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/COBRAMSEG2026.1/5

Análise de Confiabilidade da Estabilidade de uma Barragem Utilizando o Método de Acoplamento Direto

Robert Nagai Gonçalves da Cruz
Mestrando em Geotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, robertnagaig@gmail.com

Helena Paula Nierwinski
Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Daniel Claudino Ramos Penna
Diretor de Geotecnia, GWS Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, daniel.penna@gwsengenharia.com.br

Filipe Guarnieri Xavier
Doutorando em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, filipe.g.x@hotmail.com

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

RESUMO: A avaliação da estabilidade de barragens é um desafio na engenharia geotécnica, devido ao risco de falhas com impactos ambientais, sociais e econômicos. Tradicionalmente, a estabilidade é avaliada por fatores de segurança (FS) determinísticos obtidos por métodos de Equilíbrio Limite (LEM), que não consideram a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. A partir dessas limitações, a análise de confiabilidade probabilística emerge como uma alternativa, permitindo estimar a probabilidade de falha (P_f), o índice de confiabilidade (β) e realizar análises de sensibilidade de parâmetros críticos, fornecendo suporte robusto à tomada de decisão. Neste estudo, avaliou-se a estabilidade do maciço de uma barragem em solo compactado, considerando o cenário atual da estrutura e a implementação de uma berma de reforço em enrocamento a jusante do maciço. Foram aplicados métodos probabilísticos, incluindo métodos clássicos como o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e Simulação de Monte Carlo (MCS). Adicionalmente, foram utilizados os metamodelos de Regressão por Processo Gaussiano (GPR) e Amostragem de Subespaço Ativo (ASS). O acoplamento direto foi realizado entre o *software* Slide2 e códigos de programação em Python, onde os modelos probabilísticos foram desenvolvidos. Os resultados mostraram que, dentro do intervalo estudado, em que dois cenários de reforço foram dimensionados para atingir FS determinísticos de 1,30 e 1,50, não houve aumento significativo da confiabilidade probabilística. Para variações moderadas do FS, a confiabilidade depende mais da distribuição e variabilidade dos parâmetros geotécnicos do que do FS médio.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Confiabilidade, Estabilidade de Barragens, Análise Determinística, Métodos Probabilísticos, Slide2–Python.

ABSTRACT: The assessment of dam stability is a challenge in geotechnical engineering due to the risk of failures with environmental, social, and economic impacts. Traditionally, stability is evaluated using deterministic safety factors (FS) obtained through Limit Equilibrium Methods (LEM), which do not account for the variability of geotechnical parameters. Given these limitations, probabilistic reliability analysis emerges as an alternative, allowing the estimation of the probability of failure (P_f), the reliability index (β), and the sensitivity of critical parameters, providing robust support for decision-making. In this study, the stability of a compacted earthfill dam embankment was evaluated considering both the current structural condition and the implementation of a downstream rockfill berm reinforcement. Probabilistic methods were applied, including classical approaches such as the First-Order Reliability Method (FORM) and Monte Carlo Simulation (MCS).

Additionally, surrogate models based on Gaussian Process Regression (GPR) and Active Subspace Sampling (ASS) were employed. Direct coupling was implemented between the Slide2 software and Python programming codes, where the probabilistic models were developed. The results showed that, within the studied range, in which two reinforcement scenarios were designed to reach deterministic FS values of 1.30 and 1.50, no significant increase in probabilistic reliability was observed. For moderate variations in FS, reliability depends more on the distribution and variability of the geotechnical parameters than on the mean FS.

KEYWORDS: Reliability Analysis, Dam Stability, Deterministic Analysis, Probabilistic Methods, Slide2–Python.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade de maciços geotécnicos, especialmente barragens para reservação de água, constitui um desafio crítico na engenharia civil, dado o risco associado a falhas que podem gerar impactos ambientais, sociais e econômicos significativos (Siacara *et al.*, 2020; Siacara *et al.*, 2024). Nesse contexto, a análise de risco e confiabilidade emerge como uma ferramenta para quantificar incertezas, verificar fatores de segurança e fornecer subsídios para tomadas de decisão seguras (Beck, 2019).

Nos últimos anos, diferentes métodos probabilísticos têm sido desenvolvidos e aplicados para estudar a confiabilidade de estruturas geotécnicas, incluindo o *First Order Reliability Method* (FORM) com algoritmo iHL-RF (*Inverse Hasofer-Lind / Rackwitz-Fiessler*), *Importance Sampling* (IS), Simulação de Monte Carlo (MCS), bem como técnicas de *Gaussian Process Regression* (GPR) e *Active Subspace Sampling* (ASS) (Torrico *et al.*, 2024). Esses métodos permitem estimar a probabilidade de falha P_f considerando a variabilidade dos parâmetros do solo, a geometria do maciço e os carregamentos aplicados.

Recentemente, tem-se discutido a atualização da norma brasileira NBR 11.682 (ABNT, 2009), com propostas que devem trazer diretrizes específicas para a análise de estabilidade de taludes e encostas naturais, incluindo recomendações para avaliação probabilística e análise de confiabilidade. Esse avanço reforça a relevância de abordagens probabilísticas complementares aos métodos determinísticos tradicionais, como o método de Equilíbrio Limite (LEM), servindo como referência conceitual para estudos que buscam quantificar incertezas em maciços geotécnicos.

Neste trabalho, apresenta-se uma avaliação da estabilidade de um maciço em solo compactado de uma barragem, considerando o cenário atual e a implementação de reforço estrutural. O objetivo é demonstrar a aplicação integrada de métodos determinísticos e probabilísticos, evidenciando diferenças nos resultados e a sensibilidade dos parâmetros críticos.

2 METODOLOGIA

Para a avaliação da estabilidade do maciço da barragem foram aplicados métodos determinísticos e probabilísticos, permitindo comparar abordagens tradicionais com análises de confiabilidade. O método determinístico utilizado baseia-se no método LEM implementado no *software* Slide2, da Rocscience. Nesta abordagem, o FS é calculado considerando as propriedades médias dos materiais, a geometria do maciço e os carregamentos aplicados, sem levar em conta a variabilidade ou incertezas nos parâmetros geotécnicos.

Por outro lado, os métodos probabilísticos incorporam a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, permitindo estimar a probabilidade de falha (P_f) e o índice de confiabilidade (β). Para o presente estudo, foram aplicadas diferentes técnicas:

- *First Order Reliability Method* (FORM) com iHL-RF (*Inverse Hasofer-Lind / Rackwitz-Fiessler*): avalia o β utilizando uma aproximação linearizada da função de limite de falha no espaço normalizado das variáveis aleatórias;
- *Monte Carlo Simulation* (MCS): realiza múltiplas amostragens aleatórias dos parâmetros do modelo para estimar diretamente a P_f;
- *Importance Sampling* (IS): aprimora a eficiência do MCS concentrando as amostras nas regiões de maior contribuição para a falha;

- *Gaussian Process Regression* (GPR): técnica utilizada para criar modelos substitutos (surrogate models), reduzindo o custo computacional e permitindo estimativas rápidas do β em diferentes cenários;
- *Active Subspace Sampling* (ASS): método avançado que identifica os parâmetros mais influentes sobre a estabilidade, reduzindo a dimensão do problema e acelerando a análise probabilística.

Essa combinação de métodos determinísticos e probabilísticos permite avaliar não apenas o FS com base em valores médios de resistência dos materiais, mas também a sensibilidade do modelo quanto às incertezas, fornecendo uma visão mais completa do risco geotécnico e permitindo comparar os efeitos de possíveis intervenções de reforço no maciço da barragem.

O modelo geológico-geotécnico utilizado na análise está apresentado na Figura 1. Trata-se de um modelo representativo elaborado com base em condições reais de uma barragem em solo compactado, adaptado para fins de estudo. A geometria e a estratigrafia foram ajustadas de modo a preservar a confidencialidade da estrutura original. O maciço considerado possui altura aproximada de 22 m e taludes com inclinação média de 1,8H:1V. O maciço da barragem é constituído por aterro de solo compactado, filtro vertical em areia e dreno de pé, apoiado sobre fundação composta por colúvio, solo residual jovem, solo residual maduro e saprólito. Os parâmetros geotécnicos adotados, conforme apresentados na Tabela 1, foram obtidos a partir de resultados de ensaios laboratoriais e de campo.

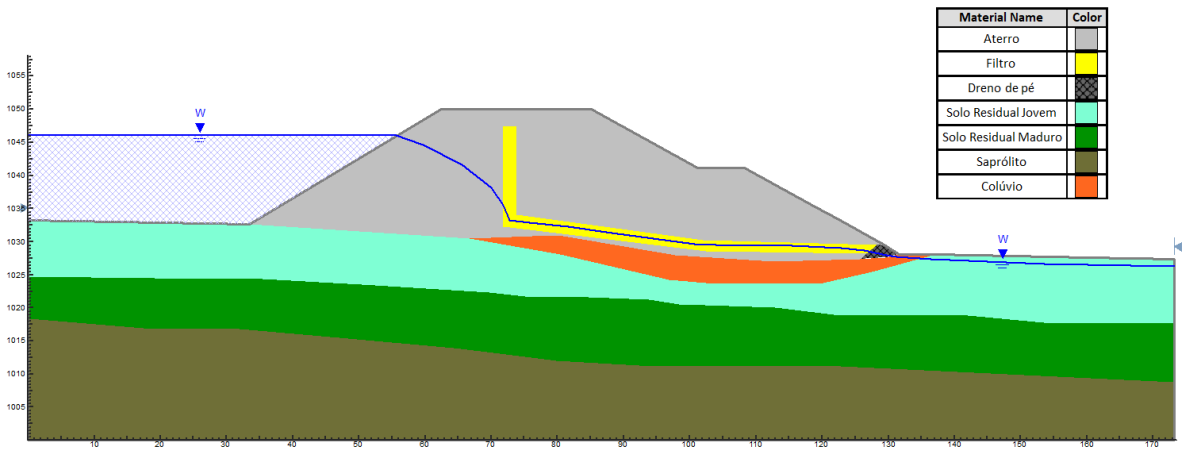


Figura 1. Modelo geológico-geotécnico.

A análise probabilística concentrou-se na variação da razão de resistência não drenada do colúvio e nos parâmetros do aterro (coesão, ângulo de atrito e peso específico), que apresentam maior influência sobre a estabilidade da estrutura avaliada pelo método de Equilíbrio Limite (LEM). Para ambos os materiais, adotou-se uma distribuição lognormal para os parâmetros probabilísticos, sem teste formal de aderência. Os valores médios e desvios padrão foram definidos a partir do coeficiente de variação (COV), considerando faixas de variabilidade reportadas na literatura geotécnica (Zevgolis *et al*., 2010). A Tabela 1 apresenta os parâmetros variáveis no modelo, juntamente com suas médias e desvios padrão.

Tabela 1. Estatística dos parâmetros variáveis do modelo para o maciço e colúvio.

Estatística	**Maciço**			**Colúvio**
	Coesão	**Ângulo de atrito**	**Peso específico**	**Razão de resistência não drenada de pico – (Su_{pico}/σ'_{v0})**
Média	5 (kPa)	30 (º)	20 (kN/m³)	0,23
COV	30 (%)	15 (%)	8 (%)	4 (%)
Desvio padrão	1,50 (kPa)	4,5 (º)	1,6 (kN/m³)	0,01

As análises foram realizadas utilizando o *software* Slide2 da Rocscience, integrado ao Python por meio de *scripts* automatizados. O procedimento consistiu em abrir o modelo original, modificar os parâmetros necessários, salvar as alterações e executar a simulação pelo aslidew.exe, o executável do Slide2. Após cada execução, o *script* lê automaticamente o *FS* calculado e salva na base de dados.

3 RESULTADOS

Dada a análise determinística para a condição não drenada, verificou-se que o *FS* da barragem é igual a 1,01, obtido pelo método de Spencer (Spencer, 1967), conforme apresentado na Figura 2. De acordo com a NBR 13.028 (2025), o *FS* mínimo exigido para esta condição é 1,30, indicando que a barragem não atende aos critérios de estabilidade para o cenário considerado.

Para atender a esse requisito, foi projetado um reforço em enrocamento a jusante do maciço, visando incrementar a estabilidade da estrutura. Foram avaliados dois cenários de reforço. No Cenário 1, o reforço foi dimensionado para atingir um *FS* determinístico mínimo de 1,30, resultando em uma área de reforço de 21 m² (Figura 3). No Cenário 2, foi considerado um caso mais conservador, com *FS* de 1,50, correspondente a uma área de reforço de 60 m² (Figura 4).

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Vertical Stress Ratio	Water Surface
Aterro		20	Mohr-Coulomb	5	30		Water Table
Filtro		19	Mohr-Coulomb	0	32		Water Table
Dreno de pé		20	Mohr-Coulomb	0	45		Water Table
Solo Residual Jovem		19	Mohr-Coulomb	0	28		Water Table
Solo Residual Maduro		19	Mohr-Coulomb	8	30		Water Table
Saprólito		20	Mohr-Coulomb	10	30		Water Table
Colúvio - Não Drenado		18	Vertical Stress Ratio			0.23	Water Table

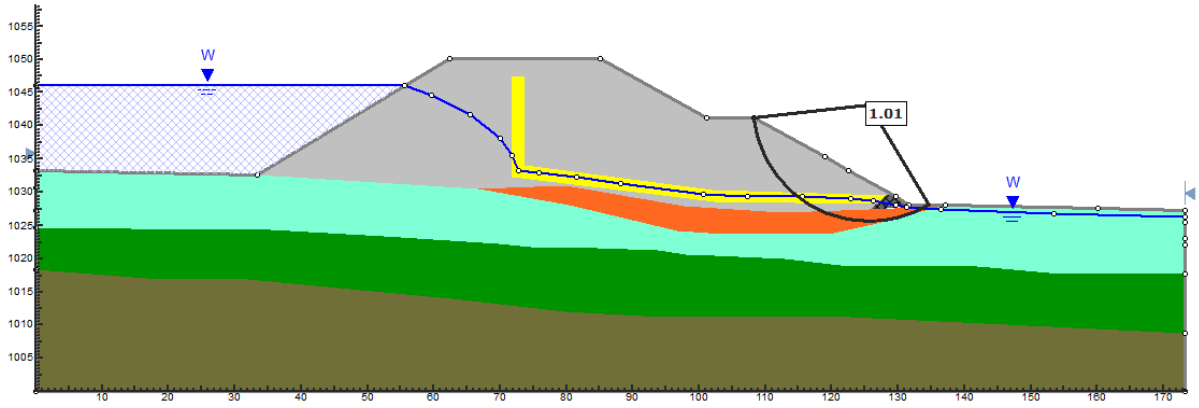


Figura 2. Cenário atual: fator de segurança determinístico pelo método de Spencer.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Vertical Stress Ratio	Water Surface
Aterro		20	Mohr-Coulomb	5	30		Water Table
Filtro		19	Mohr-Coulomb	0	32		Water Table
Dreno de pé		20	Mohr-Coulomb	0	45		Water Table
Solo Residual Jovem		19	Mohr-Coulomb	0	28		Water Table
Solo Residual Maduro		19	Mohr-Coulomb	8	30		Water Table
Saprólito		20	Mohr-Coulomb	10	30		Water Table
Colúvio - Não Drenado		18	Vertical Stress Ratio			0.23	Water Table
Reforço		20	Mohr-Coulomb	0	45		Water Table

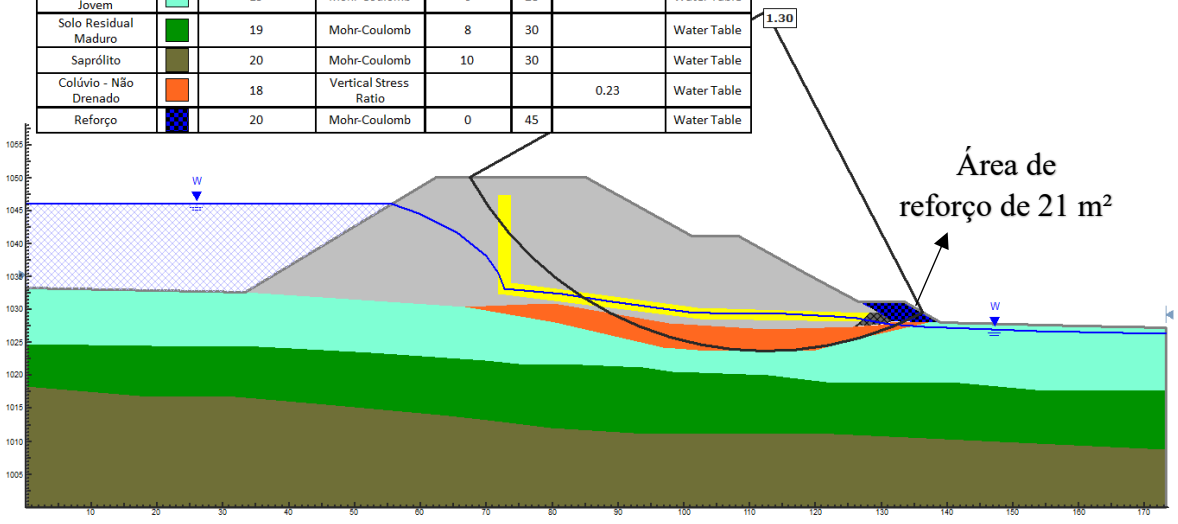


Figura 3. Cenário 1: fator de segurança determinístico igual a 1,30 pelo método de Spencer.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Vertical Stress Ratio	Water Surface
Aterro		20	Mohr-Coulomb	5	30		Water Table
Filtro		19	Mohr-Coulomb	0	32		Water Table
Dreno de pé		20	Mohr-Coulomb	0	45		Water Table
Solo Residual Jovem		19	Mohr-Coulomb	0	28		Water Table
Solo Residual Maduro		19	Mohr-Coulomb	8	30		Water Table
Saprólito		20	Mohr-Coulomb	10	30		Water Table
Colúvio - Não Drenado		18	Vertical Stress Ratio			0.23	Water Table
Reforço		20	Mohr-Coulomb	0	45		Water Table

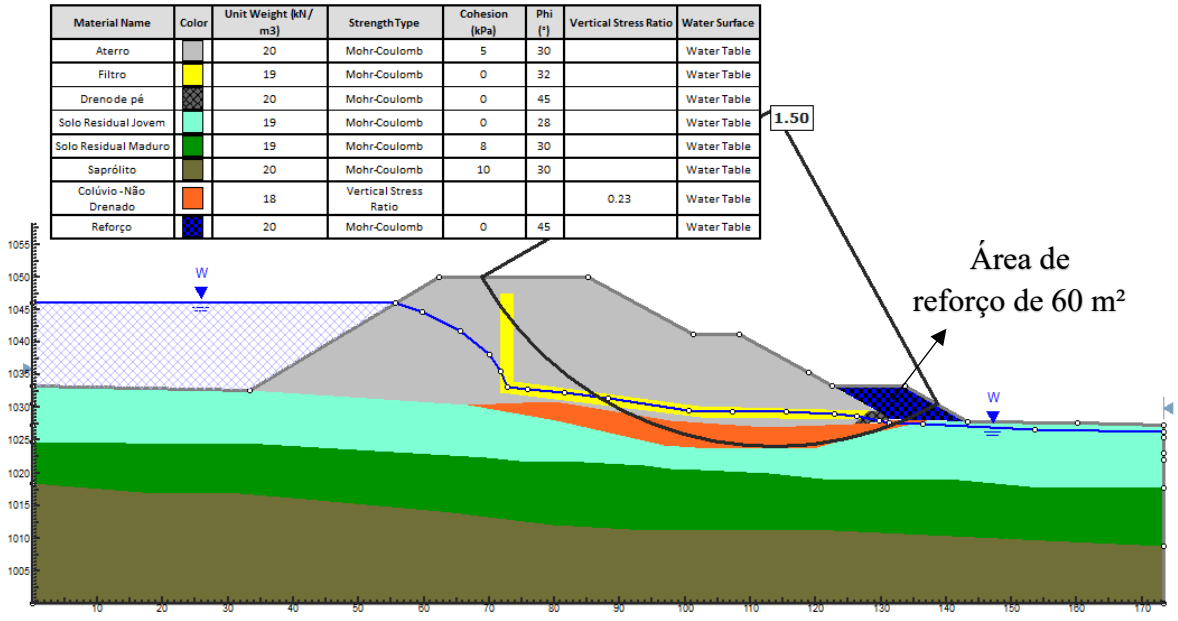


Figura 4. Cenário 2: fator de segurança determinístico igual a 1,50 pelo método de Spencer.

Para os modelos com o reforço, foram realizadas análises de confiabilidade utilizando FORM, MCS, IS, GPR e ASS, conforme os resultados apresentados na Tabela 2 (Cenário 1) e Tabela 3 (Cenário 2). A Figura 5 apresenta o histograma da Simulação de Monte Carlo e os resultados do *Active Subspace Sampling* (ASS) para o cenário 1, evidenciando a distribuição do β e da P_f. A Figura 6 ilustra a convergência do FORM e a aplicação do *Importance Sampling* (IS) em conjunto com o modelo FORM + GPR para o cenário 2, destacando como os métodos aproximados capturam a confiabilidade do maciço com eficiência computacional.

Tabela 2. Cenário 1: Resultados das análises de confiabilidade.

Método	Número de Iterações	Tempo computacional	β	Pf
MCS	5.000	9 h 50 min	2,74	0,30%(1)
ASS	4 subconjuntos com 500 simulações cada	6 h 56 min	2,95	0,16%
FORM(2)	5	7 min	2,89	0,18%
FORM + GPR + IS	50 mil amostras para IS	3 min	2,90	0,18%

Nota 1: O coeficiente de variação da estimativa de P_f para o MCS foi de 26%.
Nota 2: O erro estimado para o FORM foi de 2,70%.

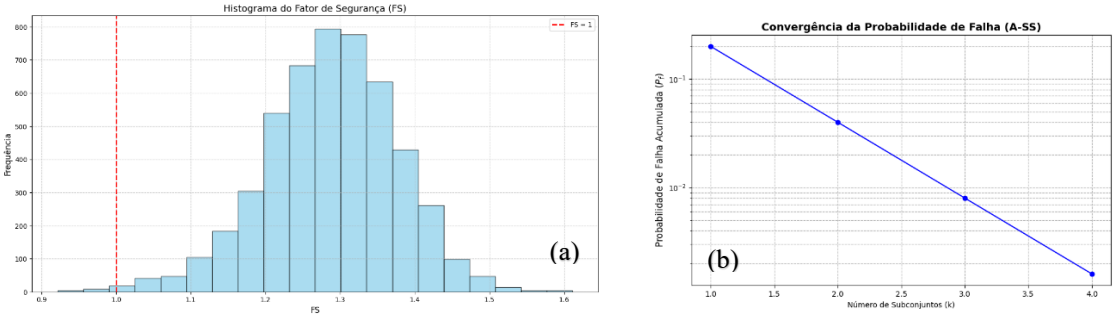


Figura 5. Cenário 1: Resultados das análises de confiabilidade: (a) MCS - β = 2,74 e P_f= 0,30%. (b) ASS - β = 2,95 e P_f= 0,16%.

Tabela 3. Cenário 2: Resultados das análises de confiabilidade.

Método	Número de Iterações	Tempo computacional	β	Pf
MCS	10.000	18 h 35 min	2,82	0,24%(1)
ASS	4 subconjuntos com 500 simulações cada	7 h	2,95	0,16%
FORM(2)	5	7 min	2,73	0,32%
FORM + GPR + IS	50 mil amostras para IS	2 min 40s	2,59	0,46%

Nota 1: O coeficiente de variação da estimativa de P_f para o MCS foi de 20%.
Nota 2: O erro estimado para o FORM foi de 1,10%.

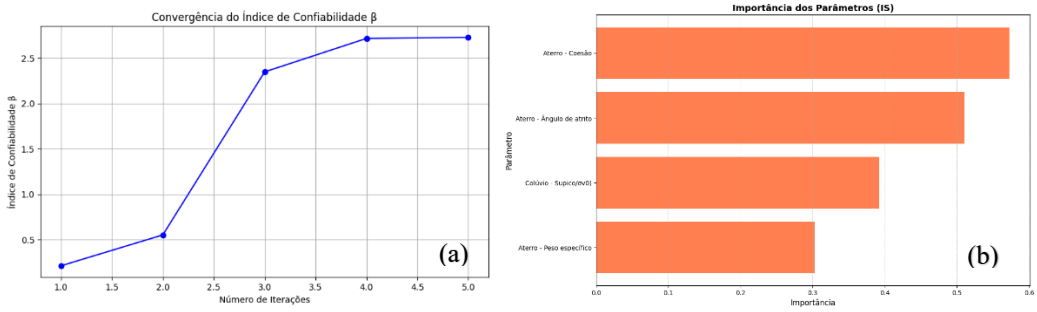


Figura 6. Cenário 2: Resultados das análises de confiabilidade: (a) FORM - β = 2,73 e P_f = 0,32%. (b) *Importance Sampling* (IS) no FORM + GPR.

4 DISCUSSÃO

Os resultados das análises probabilísticas foram avaliados considerando dois cenários de reforço, projetados para atingir *FS*s determinísticos de 1,30 e 1,50, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

4.1 Estrutura com reforço para o Cenário 1 (FS determinístico = 1,30)

A estimativa de P_f obtida pelo MCS apresentou um coeficiente de variação (COV) de cerca de 26%, resultado do baixo valor da P_f e do número limitado de 5.000 simulações. Melchers (1999) ressalta que, para probabilidades de falha na ordem de 0,1–1%, são necessários milhares de simulações para que o MCS produza estimativas estáveis. Assim, o COV obtido é compatível com o comportamento esperado para esse nível de probabilidade de falha. Apesar desse COV elevado, o valor obtido é representativo para fins comparativos e permite avaliar a consistência dos métodos aproximados, como FORM, FORM+GPR+IS e ASS.

Os valores de β e as P_f obtidos pelos métodos FORM, FORM+GPR+IS e ASS foram bastante consistentes, indicando convergência entre diferentes abordagens probabilísticas. Os valores representativos ($\beta \approx 2{,}89$–$2{,}95$ e $P_f \approx 0{,}16$–$0{,}18\%$) demonstram confiabilidade significativa da estrutura com reforço.

O método FORM+GPR+IS apresentou desempenho compatível com FORM e ASS, fornecendo β = 2,90 e P_f = 0,18%, porém com custo computacional significativamente menor (3 minutos) em comparação com MCS (9 h 50 min) e ASS (6 h 56 min). A análise de importância indicou que o ângulo de atrito do aterro foi a variável com maior relevância, contribuindo com aproximadamente 55% da variabilidade da confiabilidade.

4.2 Estrutura com reforço para o Cenário 2 (FS determinístico = 1,50)

Para o Cenário 2, a estimativa de P_f pelo MCS com 10.000 simulações apresentou COV de aproximadamente 20%. Os métodos aproximados (FORM, FORM+GPR+IS e ASS) mantiveram consistência entre si e com o MCS, fornecendo β entre 2,59 e 2,95 e P_f entre 0,16% e 0,46%. O FORM+GPR+IS apresentou β = 2,59 e $P_f = 0{,}46\%$, indicando uma leve superestimação da probabilidade de falha, possivelmente devido à variabilidade do processo de amostragem no *Importance Sampling*. A análise de sensibilidade apontou a coesão do aterro como a variável mais influente, contribuindo com aproximadamente 56% da variabilidade da confiabilidade.

Os métodos aproximados proporcionaram economia significativa de tempo computacional: FORM = 7 min e FORM + GPR + IS = 2 min 40 s, comparados a MCS (18 h 35 min) e ASS (7 h). Isso demonstra a eficiência desses métodos para análise probabilística em cenários com baixa probabilidade de falha, mantendo resultados consistentes com o MCS.

5 CONCLUSÕES

Dentro do intervalo estudado, em que o fator de segurança (FS) determinístico foi variado de 1,30 para 1,50, não se observou aumento significativo da confiabilidade probabilística. Para variações moderadas do FS determinístico, o índice de confiabilidade β se mantém praticamente constante, evidenciando que a confiabilidade depende mais da distribuição e variabilidade dos parâmetros geotécnicos do que do FS médio.

Os resultados reforçam que métodos determinísticos e probabilísticos devem ser vistos como ferramentas complementares. Enquanto o FS fornece uma referência rápida sobre a estabilidade da barragem, as análises probabilísticas permitem quantificar o risco de falha e identificar quais parâmetros influenciam mais a confiabilidade. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser diretamente utilizados em análises de risco, oferecendo base para a tomada de decisões em engenharia geotécnica e permitindo quantificar a probabilidade de ocorrência de falha da estrutura.

A Simulação de Monte Carlo (MCS) forneceu uma referência confiável para comparação com métodos aproximados, apresentando coeficientes de variação de 26% para o Cenário 1 e 20% para o Cenário 2, valores aceitáveis considerando o número de simulações adotado (5.000 e 10.000, respectivamente). Métodos

aproximados, como FORM, FORM+GPR+IS e ASS, apresentaram resultados consistentes com MCS, mas com economia expressiva de tempo computacional, destacando-se como abordagens eficientes para estudos de confiabilidade.

Ressalta-se que os coeficientes de variação obtidos no MCS (20–26%) estão associados ao número de simulações adotado e ao baixo nível de probabilidade de falha avaliado, comportamento esperado para esse tipo de problema. Ainda assim, os resultados mostraram-se adequados para fins comparativos, especialmente frente à convergência observada com os métodos aproximados, que apresentaram estimativas consistentes com custo computacional significativamente inferior.

A integração de técnicas aproximadas mostrou-se eficaz, permitindo explorar múltiplos cenários e realizar análises de sensibilidade de forma prática, mantendo consistência com métodos mais robustos. A análise de sensibilidade indicou que, dependendo do cenário, diferentes parâmetros dominam a variabilidade da confiabilidade: no Cenário 1, o ângulo de atrito do aterro contribuiu com cerca de 55%, enquanto no Cenário 2 a coesão do aterro respondeu por aproximadamente 56%.

A comparação entre cenários evidenciou que, para o Cenário 1 (FS determinístico = 1,30), a probabilidade de falha ainda se manteve relativamente elevada. O aumento do FS determinístico para o Cenário 2 (FS = 1,50) não elevou significativamente β, mas reduziu a probabilidade de falha, indicando desempenho mais consistente sob a ótica da confiabilidade e sugerindo que este cenário representa uma alternativa mais adequada para fins de projeto e tomada de decisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à GWS Engenharia pela disponibilização da licença do *software* Slide2 utilizada nas análises deste estudo. Os autores agradecem, também, o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; número do processo 2023/06123-9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *ABNT NBR 11682: Estabilidade de encostas - Procedimentos para avaliação de taludes e diretrizes de confiabilidade*. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). *ABNT NBR 13028-2:2025: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Parte 2: Requisitos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2025.

Beck, A. T. (2019). Confiabilidade e Segurança das Estruturas. Elsevier / GEN LTC.

Melchers, R. E. (1999). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

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, 106659. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106659

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. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012

Spencer, E. (1967). *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces*. Géotechnique, 17(1), 11–26. https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11

Torrico, A. T., Siacara, A., & Guo, X. (2024). *Application of FORM and Monte Carlo simulation in slope stability analysis*. Computers and Geotechnics, 170, 105–118.

Zevgolis, I. E.; Koukouzas, N. C.; Roumpos, C.; Deliveris, A. V.; Marshall, A. M. (2010). *Evaluation of geotechnical property variability: the case of spoil material from surface lignite mines*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 24, n. 2, p. 104–120.

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/6

Análise de Fluxo e Estabilidade na Fundação da Barragem Olho d'Água: Comparação entre Alternativas de Projeto

Rosiel Ferreira Leme 1
Docente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, rosiel.leme@ufc.br

Fabiola Costa de Lima 2
Doutoranda, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, fabiolac.lima@alu.ufc.br

RESUMO: Este trabalho avalia o comportamento hidráulico e a estabilidade da fundação da Barragem Olho d'Água, localizada em Várzea Alegre–CE, considerando diferentes soluções de controle de percolação adotadas na fase de projeto e durante a operação. O objetivo é comparar o desempenho hidráulico e geotécnico de duas alternativas de projeto — o projeto básico da Aguasolos e o projeto executivo da CEC Engenharia — além da intervenção corretiva executada pela COGERH. A metodologia baseou-se em modelagem numérica bidimensional de fluxo e estabilidade, utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W do software GeoStudio, com parâmetros obtidos a partir de dados de campo e laboratório. Foram analisados os padrões de fluxo, os gradientes hidráulicos de saída, os fatores de segurança contra piping e a estabilidade do talude de jusante em condição operacional. Os resultados indicaram melhor desempenho hidráulico no projeto básico, com menores gradientes e maiores fatores de segurança. O projeto executivo apresentou gradientes elevados e fator de segurança próximo ao limite mínimo recomendado, coerente com anomalias observadas em campo. A intervenção da COGERH reduziu significativamente os gradientes hidráulicos e aumentou a segurança da estrutura. Conclui-se que soluções adequadas de impermeabilização e drenagem são essenciais para a segurança de barragens sobre fundações aluvionares espessas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de terra, Fundação permeável, Percolação, Gradiente hidráulico, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT: This paper evaluates the hydraulic behavior and foundation stability of the Olho d'Água Earth Dam, located in Várzea Alegre, Ceará State, Brazil, considering different seepage control solutions adopted during the design phase and operation. The objective is to compare the hydraulic and geotechnical performance of two design alternatives—the basic design prepared by Aguasolos and the executive design developed by CEC Engenharia—as well as a corrective intervention implemented by COGERH. The methodology was based on two-dimensional numerical modeling of seepage and slope stability using the SEEP/W and SLOPE/W modules of the GeoStudio software, with geotechnical parameters obtained from field and laboratory data. Analyses included flow patterns, exit hydraulic gradients, safety factors against piping, and downstream slope stability under operating conditions. The results showed superior hydraulic performance for the basic design, with lower gradients and higher safety factors. The executive design presented higher gradients and safety factors close to the minimum recommended limit, consistent with anomalies observed in the field. The corrective intervention significantly reduced hydraulic gradients and improved structural safety. It is concluded that adequate impermeabilization and drainage systems are essential for the safety of earth dams founded on thick alluvial deposits.

KEYWORDS: Earth dam, Permeable foundation, Seepage, Hydraulic gradient, Slope stability.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de terra são amplamente utilizadas no armazenamento e na regularização de recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas. Apesar de sua ampla aplicação, a literatura técnica indica que problemas associados à percolação e à erosão interna continuam figurando entre os principais mecanismos de falha dessas estruturas, estando frequentemente relacionados a deficiências de concepção, execução ou alterações inadequadas de projeto. Organismos internacionais de referência destacam que o controle da percolação deve