DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/7

Análise de Sensibilidade Aplicada à Estabilidade de Barragens: Influência dos Parâmetros Geotécnicos e da Linha Freática

Renata Ferreira Lima
Especialista em Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, engenharia.renataferreira@gmail.com

Mariana Campos Castro e Silva
Mestrado em Geotecnia, Fortaleza, Brasil, marianacampos@alu.ufc.br

Talyta Tuane Lima Melo
Mestrado em Geotecnia, Recife, Brasil, talytalimamelo@gmail.com

Giuliano Bordin Trindade
Doutorando em Geotecnia, Sao Paulo, Brasil, giulianotrindade@gmail.com

Andre Vidal Portella Pessoa
Doutorando em Recursos Hidricos, Rio de Janeiro, Brasil, andre.pessoa@tpfe.com.br

RESUMO: A confiabilidade das análises de estabilidade de barragens depende da representatividade dos parâmetros geotécnicos e da correta estimativa da linha freática. Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade aplicada aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes de uma barragem, considerando faixas de variação obtidas em ensaios triaxiais de laboratório e diferentes condições de elevação do nível freático. Foram definidos cenários de estabilidade por meio de modelagens numéricas em equilíbrio limite, conforme a NBR 13028:2025, permitindo avaliar sistematicamente o impacto dessas variações no fator de segurança global. Os resultados evidenciam que alterações na coesão efetiva, no ângulo de atrito interno e na posição da linha freática influenciam significativamente a estabilidade da estrutura. As incertezas associadas aos parâmetros de resistência e às condições de saturação reforçam a necessidade de calibração criteriosa, validação experimental e atualização contínua dos dados. Além disso, o monitoramento por instrumentação geotécnica mostrou-se fundamental para validar os parâmetros adotados e ajustar as condições de contorno das simulações. Conclui-se que a aplicação de análises de sensibilidade é ferramenta essencial para aumentar a confiabilidade das avaliações de desempenho e assegurar elevados padrões de segurança em projetos e monitoramentos de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Sensibilidade, Estabilidade, Parâmetros, Fréatica, Barragens.

ABSTRACT: The reliability of dam stability analyses depends on the representativeness of geotechnical parameters and the correct estimation of the water table. This work presents a sensitivity analysis applied to the shear strength parameters of the constituent materials of a dam, considering variation ranges obtained in laboratory triaxial tests and different water table elevation conditions. Stability scenarios were defined through numerical limit equilibrium modeling, according to NBR 13028:2025, allowing for the systematic evaluation of the impact of these variations on the overall safety factor. The results show that changes in effective cohesion, internal friction angle, and the position of the water table significantly influence the stability of the structure. The uncertainties associated with the strength parameters and saturation conditions reinforce the need for careful calibration, experimental validation, and continuous data updating. Furthermore, monitoring by geotechnical instrumentation proved fundamental to validate the adopted parameters and adjust the boundary conditions of the simulations. It is concluded that the application of sensitivity analysis is an essential tool to increase the reliability of performance evaluations and ensure high safety standards in dam design and monitoring.

KEYWORDS: Sensitivity, Stability, Parameters, Phreatic, Dams.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de barragens constitui um dos aspectos fundamentais da engenharia geotécnica aplicada, especialmente no contexto de estruturas destinadas ao armazenamento de rejeitos, nas quais os níveis de risco associados a eventuais falhas demandam elevado rigor técnico nas etapas de projeto, avaliação e monitoramento. Nesse contexto, a confiabilidade das análises de estabilidade está diretamente relacionada à adequada caracterização dos materiais constituintes e à correta definição das condições hidráulicas atuantes, com destaque para a posição da linha freática (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

De acordo com a ABNT NBR 13028:2025, as análises de estabilidade devem contemplar condições representativas e cenários críticos de carregamento, incorporando explicitamente as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos e às variáveis hidráulicas (ABNT, 2025). Em consonância com essas diretrizes, o International Commission on Large Dams – ICOLD enfatiza a necessidade de avaliações baseadas na compreensão das incertezas e na adoção de abordagens fundamentadas em risco (ICOLD, 2013).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais, usualmente expressos em termos de coesão efetiva (c') e ângulo de atrito interno (φ'), são tipicamente obtidos a partir de ensaios laboratoriais, como os ensaios triaxiais. Contudo, a variabilidade natural dos materiais geotécnicos, associada às limitações inerentes aos processos de amostragem, preparação de corpos de prova e efeitos de escala, introduz incertezas relevantes que podem impactar significativamente os resultados das análises de estabilidade (LAMBE; WHITMAN, 1969; DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

Adicionalmente, a definição da superfície freática, frequentemente baseada na interpretação de dados de instrumentação e em modelagens hidrogeológicas, está sujeita a variações temporais e operacionais, influenciando diretamente as pressões neutras e, consequentemente, o fator de segurança global da estrutura (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Nesse cenário, a análise de sensibilidade configura-se como uma ferramenta essencial para avaliação da robustez dos modelos geotécnicos, permitindo quantificar a influência das variáveis de entrada sobre os resultados das análises (DUNCAN, 2000). Essa abordagem possibilita a identificação de parâmetros críticos e o suporte à tomada de decisão em condições de incerteza.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma análise de sensibilidade aplicada aos parâmetros de resistência ao cisalhamento e às condições de nível freático de uma barragem, por meio de modelagens numéricas em equilíbrio limite, conforme estabelecido pela ABNT NBR 13028:2025.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estabilidade de taludes em barragens

A estabilidade de taludes em barragens constitui um dos principais aspectos de segurança geotécnica, uma vez que falhas nesses maciços podem resultar em consequências ambientais, sociais e econômicas significativas. De acordo com Das (2007), a análise de estabilidade é avaliada a partir do fator de segurança (FS), que corresponde à relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e resistência atuante ao longo da superfície potencial de ruptura.

Quando o FS é superior à unidade, este indica condição estável, enquanto valores próximo ou inferior a 1,0 indicam condição de instabilidade ou ruptura iminente. Normas técnicas, como a ABNT NBR 13028:2025, estabelecem critérios mínimos de segurança para diferentes condições operacionais de barragens, considerando estados permanentes, transitórios e excepcionais.

Os métodos de equilíbrio limite figuram entre as abordagens mais empregadas na análise de estabilidade de taludes, baseando-se na hipótese de que o maciço se encontra em condição crítica, próxima à ruptura. Em termos práticos, consiste na avaliação do equilíbrio de uma massa de solo potencialmente instável, delimitada

por uma superfície de ruptura previamente assumida (Carvalho et al., 2015). Dentre as formulações disponíveis, destacam-se as propostas por Spencer (1967), Morgenstern-Price (1965) e Sarma (1973), amplamente reconhecidas por satisfazerem simultaneamente as equações de equilíbrio de forças e momentos. Por essa razão, são consideradas mais robustas e rigorosas quando comparadas às abordagens simplificadas.

2.2 Parâmetros de resistência

A resistência ao cisalhamento dos solos é comumente descrita pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que relaciona a tensão cisalhante resistente aos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito interno (φ), além da tensão normal efetiva atuante.

A coesão representa a parcela da resistência independente da tensão normal, sendo associada a forças de ligação entre partículas, especialmente em solos finos. Já o ângulo de atrito interno está relacionado à resistência friccional decorrente do contato entre partículas e da sua estrutura interna.

A determinação desses parâmetros é realizada por meio de ensaios laboratoriais, principalmente ensaios triaxiais (CD, CU e UU). No entanto, a variabilidade natural dos solos, aliada a incertezas de amostragem e escala, implica dispersão significativa nos resultados (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Além disso, a extrapolação de parâmetros obtidos em laboratório para condições de campo representa uma fonte adicional de incerteza, sendo recomendada a utilização de faixas de variação e não apenas valores determinísticos (DUNCAN, 2000).

2.3 Linha freática

A linha freática exerce papel fundamental na estabilidade de taludes, pois controla o regime de tensões efetivas, conforme o princípio de Terzaghi. A elevação do nível freático implica aumento das pressões neutras, reduzindo as tensões efetivas e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do solo.

As análises de estabilidade devem considerar diferentes condições hidráulicas, incluindo:

- Condições drenadas, nas quais há dissipação das pressões neutras ao longo do tempo;
- Condições não drenadas, típicas de carregamentos rápidos, onde não ocorre dissipação de poropressões;
- Cenários transientes, como rebaixamento rápido do nível d'água ou eventos de cheia.

A correta definição da posição da linha freática e da distribuição de pressões neutras é essencial para a confiabilidade das análises. Essa definição pode ser obtida por meio de modelagem numérica de fluxo, instrumentação (piezômetros) e interpretação de dados de monitoramento.

2.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste na avaliação sistemática da influência da variação de parâmetros de entrada sobre os resultados de um modelo. No contexto geotécnico, essa abordagem é amplamente utilizada para investigar o impacto das incertezas associadas aos parâmetros do solo e às condições hidráulicas nas análises de estabilidade.

Sua importância reside no fato de que modelos geotécnicos são inerentemente incertos, devido à variabilidade natural dos materiais e às limitações de investigação. Assim, a análise de sensibilidade permite:

- Identificar os parâmetros mais influentes no fator de segurança;
- Avaliar a robustez dos resultados obtidos;
- Apoiar a tomada de decisão em projetos e operações;
- Definir estratégias de investigação complementar e monitoramento.

No caso de barragens, a aplicação dessa técnica possibilita a avaliação de diferentes cenários, como variações nos parâmetros de resistência e na posição da linha freática, contribuindo para uma análise mais realista e confiável do comportamento da estrutura.

Dessa forma, a análise de sensibilidade se consolida como uma ferramenta essencial para aumentar a confiabilidade das avaliações de estabilidade, especialmente quando integrada a dados de instrumentação e monitoramento contínuo.

3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido a partir da análise de uma barragem de contenção de sedimentos (Figura 1), com altura máxima de 24,61 m (conforme lei federal 14.066 de 30 de setembro de 2020) composta por aterro compactado e fundação constituída por colúvio aluvionar, solo saprolítico, saprólito e rocha gnáissica.

Por se tratar de uma barragem hipoteticamente concebida para análise conceitual, os parâmetros geotécnicos e hidráulicos adotados (Tabela 1) foram definidos com base em referências bibliográficas e dados de materiais com características compatíveis às representadas no modelo, não sendo provenientes de investigações específicas da estrutura. A rede de fluxo foi definida a partir da estratigrafia considerada, com parâmetros de permeabilidade e anisotropia hidráulica coerentes com os materiais modelados, buscando representar o comportamento esperado para barragens similares.

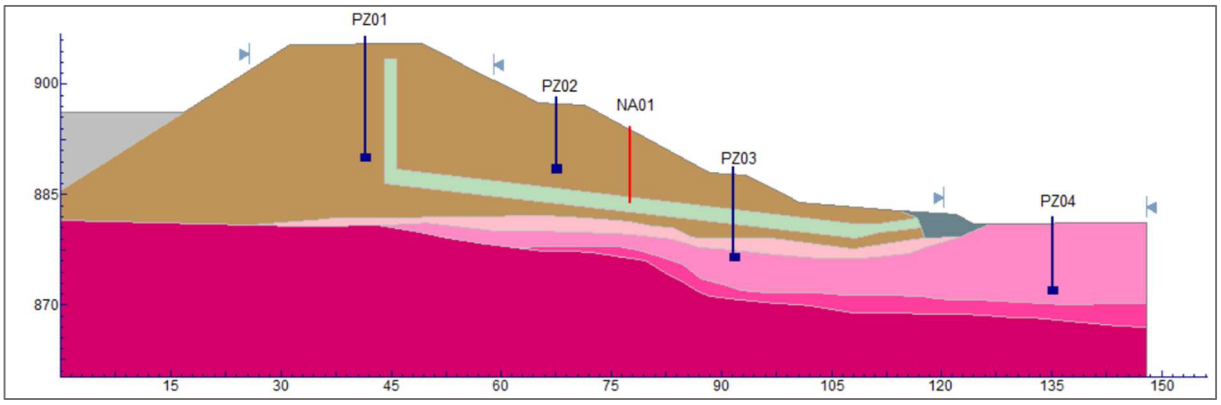


Figura 1. Seção adotada para as análises.

Tabela 1. Parâmetros de permeabilidade e resistência dos materiais.

Cor	Material	Ks (cm/s)	k_V/K_h	Peso específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
	Aterro	1×10^{-5}	0,15	19	0	28
	Enrocamento	2	1	21	0	40
	Colúvio mole aluvionar	6×10^{-5}	1	17,5	12	24
	Solo Saprolítico	6×10^{-5}	1	17,8	10	32
	Saprólito	6×10^{-5}	1	17,8	10	32
	Areia	9×10^{-3}	1	19	0	30
	Gnaisse	4×10^{-5}	1	27	60	30
	Sedimento	1×10^{-5}	1	20	-	-

Foram analisadas variações do nível do reservatório e dos parâmetros de resistência do aterro e do solo saprolítico, tendo em vista que esses materiais desempenham papel relevante no comportamento global da estrutura.

As análises de estabilidade foram realizadas para a seção central da estrutura, com auxílio do software SLIDE2 2022 (Rocscience), adotando-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Foram utilizados os métodos de equilíbrio-limite de Spencer, Morgenstern-Price e Sarma, sendo apresentados os resultados das superfícies não circulares que resultaram nos menores fatores de segurança. Além disso, a linha freática foi obtida através de calibração da rede de fluxo a partir da análise dos ensaios de permeabilidade para os materiais constituintes.

Foram avaliados os Cenários I, II e III conforme a NBR 13.028/2025. O Cenário I corresponde à condição operacional, com o nível d'água do reservatório no máximo normal (903 m), e a linha freática definida a partir de análise de percolação com base em modelo calibrado. O Cenário II mantém essa mesma condição hidráulica, adotando parâmetros de resistência não drenados juntamente com a solicitação sísmica, por meio de abordagem pseudoestática. Já o Cenário III considera apenas a condição operacional associada à análise não drenada. Ressalta-se que os parâmetros drenados adotados foram definidos a partir da interpretação de ensaios de campo e de laboratório, considerados representativos das condições geotécnicas dos materiais da estrutura.

Foi adotado um coeficiente de variação (COV) de 20% para os parâmetros geotécnicos, valor compatível com as faixas de variabilidade indicadas por Campello et al. (2019) para parâmetros de resistência ao cisalhamento. A escolha desse valor permitiu avaliar a sensibilidade dos fatores de segurança frente às incertezas associadas à caracterização geotécnica dos materiais. Aplicou-se a variação simultânea de ambos, admitindo-se uma possível margem de incerteza inerente aos valores obtidos em laboratório, sendo possível observar a resposta em cenários variados.

Também foi considerada a influência do nível freático nas análises. Para isso, foram adotados incrementos e decréscimos em relação ao valor de referência de 903 m, correspondente à cota da soleira do extravasor, de modo a representar diferentes condições de saturação da fundação. Assim, foram definidos três níveis de análise: 903 m (valor de referência), 902 m (limite inferior) e 904 m (limite superior, que representa o nível máximo *maximorum*, ou seja, nível mais elevado que um reservatório pode atingir, representando a cota máxima para a qual a estrutura foi projetada para suportar com segurança).

Com base nas definições previamente estabelecidas, foram delineadas as hipóteses de cálculo apresentadas na Tabela 1, as quais serão aplicadas aos Cenários I, II e III anteriormente definidos para cada nível freático pré-estabelecido.

Tabela 1. Hipóteses consideradas para a variação dos parâmetros de resistência (aterro e solo saprolítico) para cada NA do reservatório.

Hipótese	**Aterro**		**Solo saprolítico**	
	c' (kPa)	**Φ' (°)**	**c' (kPa)**	**Φ' (°)**
Parâmetros adotados nas análises de estabilidade atuais	5	35	9	31
A – Redução de 20% dos parâmetros de resistência	4	28	7	25
B – Aumento de 20% dos parâmetros de resistência	6	42	11	37

4 RESULTADOS

Os fatores de segurança obtidos estão apresentados nas Tabelas 2 a 4, sendo as Figuras 3 e 4 representativas das superfícies críticas de ruptura para NA 904 m no Cenário I, considerando a variação de –20% e +20% nos parâmetros do solo saprolítico.

Para os parâmetros atuais (Tabela 2), os fatores de segurança no Cenário I variam entre 1,40 e 1,44, com leve redução com o aumento do nível d'água. No Cenário II, os valores permanecem próximos ao mínimo normativo (FS= 1,10), enquanto no Cenário III situam-se entre 1,23 e 1,25, abaixo do preconizado na NBR 13.028:2025 de 1,30.

A redução de 20% nos parâmetros (Tabela 3) resulta em diminuição sistemática dos fatores de segurança, com valores mínimos próximos de 1,01 no aterro (Cenário II), indicando condição crítica. Para o solo saprolítico, os fatores de segurança permanecem mais elevados.

O aumento de 20% nos parâmetros (Tabela 4) promove elevação consistente dos fatores de segurança em todos os cenários.

As Figuras 3 e 4 evidenciam a influência dos parâmetros na geometria das superfícies de ruptura, com maior profundidade e mobilização na condição de redução da resistência e superfícies mais confinadas na condição de aumento.

Tabela 2. Fatores de Segurança globais - parâmetros adotados atualmente.

Cenário	**FS mínimo NBR 13028 (2025)**	**NA do reservatório**	**Sup. não circular**
I	1,50	902	1,44
		903	1,42
		904	1,40
II	1,10	902	1,11
		903	1,10
		904	1,10
III	1,30	902	1,25
		903	1,24
		904	1,23

Tabela 3. Fatores de Segurança globais – redução de 20%.

Cenário	**FS mínimo NBR 13028 (2025)**	**NA do reservatório**	**Variação - Aterro** **Sup. não circular**	**Variação – Solo saprolítico** **Sup. não circular**
I	1,50	902	1,41	1,42
		903	1,40	1,32
		904	1,39	1,38
II	1,10	902	1,04	1,17
		903	1,02	1,17
		904	1,01	1,16
III	1,30	902	1,17	1,36
		903	1,16	1,32
		904	1,14	1,29

Tabela 4. Fatores de Segurança globais – aumento de 20%

Cenário	FS mínimo NBR 13028 (2025)	NA do reservatório	Variação - Aterro Sup. não circular	Variação – Solo saprolítico Sup. não circular
I	1,50	902	1,69	1,61
		903	1,67	1,59
		904	1,65	1,44
II	1,10	902	1,43	1,25
		903	1,19	1,26
		904	1,18	1,25
III	1,30	902	1,52	1,44
		903	1,37	1,43
		904	1,35	1,41

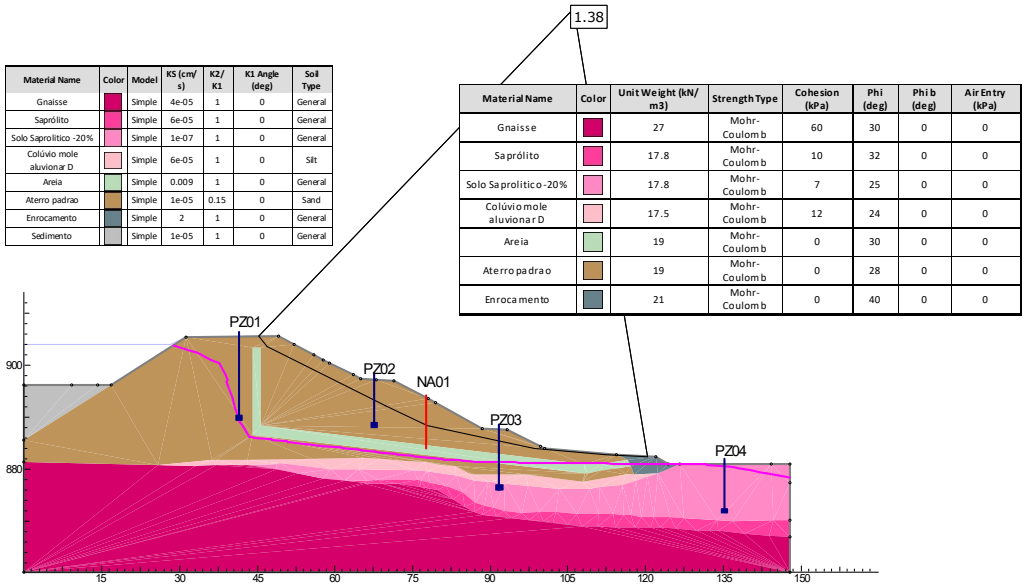


Figura 3. Análise de estabilidade – NA 904 m, Cenário I (saprolítico –20%)

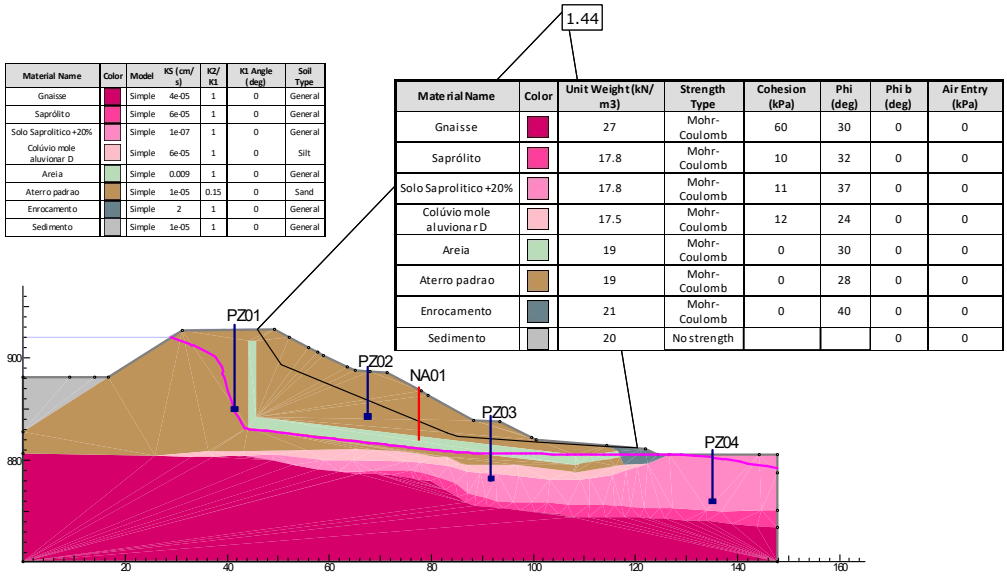


Figura 4. Análise de estabilidade – NA 904 m, Cenário I (saprolítico + 20%)

5 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a estabilidade da barragem é predominantemente influenciada pelos parâmetros de resistência ao cisalhamento, apresentando menor sensibilidade às variações do nível freático dentro da faixa analisada, conforme discutido na literatura geotécnica (DUNCAN, 2000; DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

A redução de 20% nos parâmetros de resistência resultou em diminuições consistentes dos fatores de segurança, com maior impacto observado no aterro, especialmente no Cenário II, onde os valores atingem aproximadamente FS = 1,01, caracterizando condição próxima ao limite de estabilidade. Em contrapartida, o solo saprolítico apresentou menor sensibilidade relativa, mantendo fatores de segurança superiores nas mesmas condições.O aumento de 20% nos parâmetros de resistência resultou em elevação significativa dos fatores de segurança em todos os cenários, evidenciando comportamento coerente do modelo numérico frente às variações das propriedades mecânicas dos materiais.

No que se refere às variações do nível d'água entre as cotas 902 m e 904 m, observam-se alterações pouco expressivas nos fatores de segurança, indicando que, para a geometria e condições analisadas, a influência das poropressões é secundária em relação à resistência dos materiais, conforme discutido por Fredlund e Rahardjo (1993).

De modo geral, os resultados demonstram consistência do modelo e indicam que, dentre os materiais analisados, a estabilidade global da estrutura apresentou maior sensibilidade às variações dos parâmetros de resistência do aterro em relação ao solo saprolítico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Barragens de mineração – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 2025.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Estabelece critérios para segurança de barragens de mineração. Brasília, 2022.

CAMPELLO, I. C. et al. Variabilidade de propriedades geotécnicas: revisão bibliográfica e valores típicos de coeficientes de variação. In: XXXII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 2019, Salvador. Anais […]. Salvador: CBDB, 2019.

CARVALHO, José Camapum de et al. (org.). *Solos não saturados no contexto geotécnico.* São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2015.

DAS, Braja M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DUNCAN, J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 4, p. 307–316, 2000.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. *Soil Strength and Slope Stability*. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2014.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley, 1993.

GISTM – GLOBAL INDUSTRY STANDARD ON TAILINGS MANAGEMENT. *Global Industry Standard on Tailings Management*. 2020.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Dam Safety Guidelines*. Paris, 2013.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. New York: Wiley, 1969.