DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/8

Análise de Sensibilidade do Fator de Segurança de Estabilidade Geotécnica de uma Barragem em Relação aos Parâmetros de Resistência dos Materiais

Luana Aparecida Silva
Estudante de Engenharia Civil, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, luanasil412@gmail.com

Bruno Oliveira da Silva
Professor, Engenharia Civil, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, brunosilva@cefetmg.br

Eva Priscila Cardoso
Mestranda em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, Brasil, eva.cardoso@aluno.ufop.edu.br

Marcos Tulio Fernandes
Professor, Engenharia Civil, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, marcostfer@cefetmg.br

Thiago Bomjardim Porto
Professor, Engenharia Civil, CEFET-MG, Curvelo, Brasil, Thiago.porto@cefetmg.br

RESUMO: As análises de estabilidade de estruturas geotécnicas têm como objetivo verificar a condição de segurança, por meio da avaliação das possíveis superfícies de ruptura que possam comprometer a integridade dessas estruturas. A definição dos parâmetros de resistência dos materiais exerce grande influência nos resultados, sobretudo porque, desde sua obtenção até o tratamento e interpretação dos dados, podem ser incorporadas incertezas aos valores adotados. A realização de análises de sensibilidade permite incorporar o efeito dessas incertezas na avaliação da segurança, possibilitando a quantificação de seu impacto no Fator de Segurança (FS). Nesse contexto, este artigo teve como objetivo avaliar a sensibilidade do FS frente à variação dos parâmetros de resistência da barragem de Itaúna, localizada no estado do Ceará, com base em análises de estabilidade pelo método do Equilíbrio Limite de Morgenstern-Price. Para isso, utilizou-se o coeficiente de variação (COV) na definição dos intervalos de variação do peso específico, da coesão e do ângulo de atrito, considerando diferentes cenários. Os resultados indicaram que o FS é mais sensível às incertezas associadas ao ângulo de atrito, cujo intervalo entre os valores máximo e mínimo representou aproximadamente 10% do FS médio (1,528), correspondendo a uma variação da ordem de 0,289.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Terra; Incertezas; Sensibilidade do Fator de Segurança.

ABSTRACT: Stability analyses of geotechnical structures aim to verify safety conditions by evaluating potential failure surfaces that may compromise the integrity of these structures. The definition of material strength parameters has a significant influence on the results, especially because uncertainties may be incorporated into the adopted values from the stage of data acquisition through processing and interpretation. Conducting sensitivity analyses makes it possible to account for the effect of these uncertainties in the safety assessment, enabling the quantification of their impact on the Factor of Safety (FS). In this context, this study aimed to evaluate the sensitivity of the FS to variations in the strength parameters of the Itaúna dam, located in the state of Ceará, based on stability analyses using the Morgenstern-Price Limit Equilibrium method. For this purpose, the coefficient of variation (COV) was used to define the variation ranges of unit weight, cohesion, and friction angle under different scenarios. The results indicated that the FS is more sensitive to uncertainties associated with the friction angle, whose range between maximum and minimum values represented approximately 10% of the mean FS (1.528), corresponding to a variation on the order of 0.289.

KEYWORDS: Earth dam; Uncertainties, Safety Factor Sensitivity.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Costa (2012), as barragens têm diversas finalidades, as quais podem ser divididas em dois grandes grupos: barragens de regularização e barragens de retenção. O autor enfatiza que, desde que apresentem arranjos estruturalmente estáveis, esses objetivos podem ser alcançados por meio de diferentes tipos de barragens, empregando uma ampla variedade de materiais de construção, como solos, enrocamento, asfalto, concreto, entre outros. A segurança geotécnica dessas estruturas comumente é avaliada e quantificada através do cálculo de um Fator de Segurança (FS), o qual consiste na comparação entre os esforços atuantes com a resistência típica dos materiais de construção e da fundação da estrutura (Massad, 2010). No entanto, Cho (2007) destaca que o processo de avaliação da estabilidade por meio de uma abordagem determinística para o cálculo do FS apresenta limitações. Esse autor argumenta que diversas fontes de incertezas estão envolvidas nesse processo, especialmente aquelas relacionadas à obtenção dos parâmetros de resistência dos materiais.

Diante deste cenário, uma abordagem possível para mitigar essas limitações é a realização de análises de sensibilidade, permitindo incorporar o efeito das incertezas na avaliação da segurança das estruturas geotécnicas (Siacara, Beck, Futai, 2018). Para Neto et al. (2018), a análise de sensibilidade dos parâmetros de resistência dos materiais de obras geotécnicas constitui uma ferramenta útil para auxiliar os projetistas nos estudos e projetos de estruturas geotécnicas. A análise de sensibilidade consiste em atribuir incertezas a algumas variáveis explicativas de um parâmetro-resposta e avaliar quais as magnitudes dos efeitos de tais incertezas neste parâmetro (Nearing *et al.*,1990). Tendo em vista o contexto apresentado, a presente proposta de pesquisa visa realizar uma análise de sensibilidade do Fator de Segurança em relação à variação dos parâmetros de resistência dos materiais de construção e da fundação de uma barragem localizada em Chaval, Ceará. Objetiva-se avaliar o grau de dependência ou sensibilidade do FS em relação à estabilidade geotécnica da estrutura, considerando às incertezas inerentes aos parâmetros de resistência destes materiais.

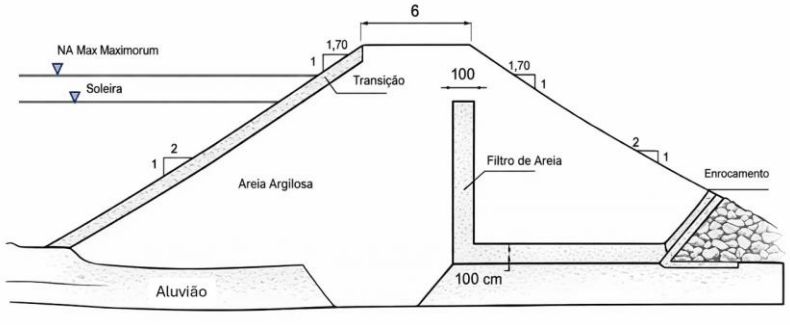
2 ESTUDO DE CASO

2.1 Barragem Itaúna

A barragem analisada será a barragem de Itaúna, que tem como finalidade barrar o rio Timonha, do sistema do rio Coreaú, localizado cidade de Chaval no estado do Ceará, o açude se destina ao abastecimento da cidade de Chaval e de Barroquinha. Os dados utilizados para a análise de estabilidade dos taludes da barragem foram fornecidos pela Secretária de Recursos Hídricos do Ceará (1998), assim todas as características pertinentes a barragem estão dispostas dos relatórios disponibilizados.

A barragem de Itaúna foi projetada com um maciço terroso homogêneo compactado e possui uma seção trapezoidal constituída de areia argilosa. Finalizada em 2001, a barragem apresenta uma altura máxima de aproximadamente 17,95 metros, um coroamento de 6 metros de largura e uma extensão de 436,00 metros. O reservatório apresenta uma capacidade de 77.500.000 m³ de água. A Figura 1 a seguir, apresenta as características geométricas da seção transversal da barragem de Itaúna, seção adotada para a análise de estabilidade.

Figura 1 - Seção transversal da barragem Itaúna



Fonte: Adaptado de SRHCE (1998).

O sistema de drenagem interna da barragem inclui um filtro vertical com um metro de espessura, composto por areia de granulometria variada. Este filtro está conectado ao enrocamento a jusante da barragem, por meio de um tapete drenante com a mesma constituição e espessura do filtro vertical. A fundação é caracterizada por uma camada de aluvião arenoso, que se estende até o quartzito, a rocha predominante na região.

3 PARÂMETROS ADOTADOS

3.1 Parâmetros hidráulicos adotados para análises de fluxo

Para a análise de percolação no maciço, realizada por meio do SEEP/W, fator intrinsecamente relacionado à estabilidade dos taludes, adotou-se a seção de maior altura da estrutura, apresentada na Figura 1. Os parâmetros de entrada, correspondentes aos coeficientes de permeabilidade dos materiais utilizados na simulação da percolação e na definição das redes de fluxo, foram fornecidos pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.

Os materiais empregados na construção da barragem foram provenientes de jazidas localizadas nas proximidades do empreendimento, aspecto que influenciou diretamente sua seleção. Para o material constituinte do maciço terroso, foram realizados ensaios de permeabilidade com carga constante, a partir dos quais se obteve o valor médio adotado neste estudo. Já para os materiais do filtro, foram executados ensaios de permeabilidade com carga variável. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetro de permeabilidade dos materiais.

Componente	Material	k(m/s)
Maciço	Areia Siltosa	$1{,}50 \times 10^{-7}$
Filtro	Areia	$2{,}40 \times 10^{-5}$
Transição	Pedregulho	$1{,}00 \times 10^{-3}$
Enrocamento	Pedregulho	$1{,}00 \times 10^{-3}$
Fundação	Aluvião	$3{,}26 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de SRHCE (1998).

3.2 Parâmetros de resistência dos materiais

Para a avaliação da estabilidade geotécnica da estrutura, serão considerados os parâmetros de resistência dos materiais conforme apresentados no Relatório de Estudos Geológicos e Geotécnicos (SRHCE, 1998). Os parâmetros mencionados são apresentados na Tabela 2, esses valores correspondem aos parâmetros de resistência dos materiais que constituem a barragem de terra de Itaúna. Ressalta-se que os dados referentes ao enrocamento e à transição foram adotados com base em referências da literatura, conforme descrito no Memorial de Cálculo do projeto.

Tabela 2-Parâmetros de resistência dos materiais da Barragem Itaúna.

Material	Peso Específico (kN/m^3)	Coesão kPa	Ângulo de Atrito
Areia Siltosa	18,20	3,82	35,90°
Areia (Filtro)	18,50	0,00	30,00°
Pedregulho (Trans.)	19,00	0,00	33,00°
Pedregulho (Enr.)	20,00	0,00	37,00°
Aluvião	18,50	0,00	33,00°

Fonte: Adaptado de SRHCE (1998).

Para a realização das análises de estabilidade dos taludes, foi adotada a análise determinística, utilizando-se o método de equilíbrio-limite de Morgenstern-Price (1965). O critério de ruptura de Mohr-

Coulomb foi considerado nesta avaliação, empregando-se como dados de entrada os parâmetros geotécnicos obtidos no Relatório de Estudos Geológicos e Geotécnicos, provenientes de ensaios de cisalhamento lento. A análise de fluxo complementa a análise de estabilidade executada no SLOPE/W, visto que o Fator de Segurança do talude de jusante é diretamente influenciado pela presença de água no maciço e pelo comportamento da linha freática em seu interior.

O Fator de Segurança, definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível e a resistência mobilizada, será calculado para as diferentes condições impostas pela variação dos parâmetros geotécnicos. Para fins de avaliação, será realizada a comparação entre os coeficientes obtidos nas distintas simulações, tomando-se como referência o Fator de Segurança mínimo estabelecido para a condição de operação do reservatório com a rede de fluxo em regime normal, conforme a ABNT NBR 13028, que estabelece valor mínimo aceitável igual a 1,50.

3.3 Análise estatística dos parâmetros

As propriedades físicas e mecânicas dos solos e das rochas são naturalmente dispersas, uma informação que deve ser considerada nas análises de estabilidade de taludes. Segundo Flores (2008), uma forma mais eficiente de expressar essa dispersão é por meio do coeficiente de variação amostral (COV), definido como a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ). Sendo uma grandeza adimensional, esse coeficiente avalia a variabilidade dos dados em relação à média global (Pereira, 2020). Essa relação é expressa na Equação 1, apresentada a seguir.

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (1)$$

Flores (2008) comenta também que, o coeficiente de variação (COV) descreve o quanto os dados estão longe da média, sendo, portanto, uma análise em função da variação espacial dos parâmetros. Ainda segundo o autor, diferentes valores de coeficiente de variação são encontrados na literatura, esses valores podem ser muito úteis para se validar um determinado parâmetro de solo. O Quadro 1 apresenta um compilado de valores do COV, segundo os parâmetros do solo e os autores responsáveis pela análise desse coeficiente. Para realizar o cálculo do desvio padrão dos parâmetros de resistência dos materiais que constituem a estrutura, como mencionado anteriormente, foi utilizado o COV médio referente ao peso específico, coesão e ângulo de atrito.

Quadro 1- Coeficientes de variação usuais por parâmetro geotécnico.

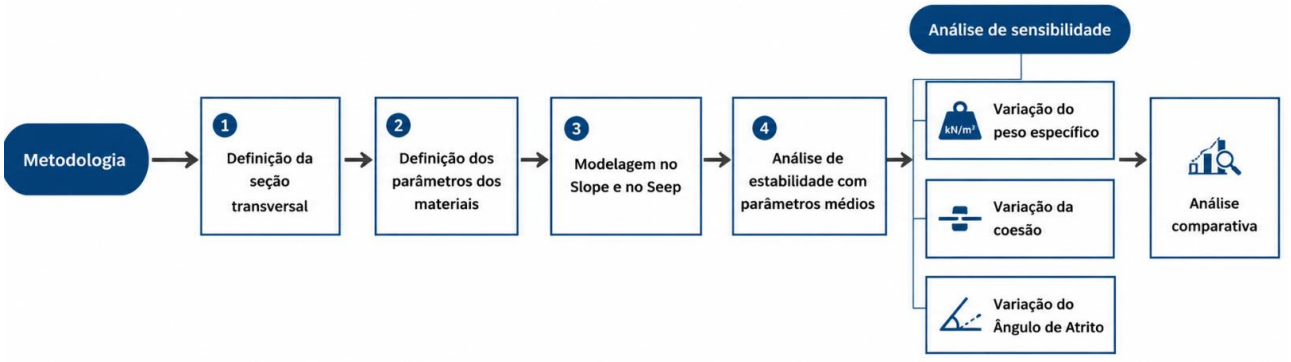
Propriedade ou Resultado de Ensaio de Campo	Coeficiente de Variação COV (%)	Origem
Peso específico (γ)	3 a 7	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Peso específico submerso (γsub)	0 a 10	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	2 a 13	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Coesão (c)	20 a 80	Sandroni e Sayão (1993)
Resistência ao cisalhamento não drenada (Su)	13 a 40	Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenada (Su/σ'v)	5 a 15	Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Índice de compressão (Cc)	10 a 37	Harr (1984), Kulhawy (1992) e Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila saturada (k)	68 a 90	Harr (1984) e Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila não saturada (k)	130 a 240	Harr (1984) e Benson et al., (1999)
Coeficiente de adensamento (Cv)	33 a 68	Duncan (2000)

Fonte: Souza, (2023).

4 METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a modelagem da seção transversal da barragem, com o objetivo de definir a geometria do objeto de estudo. Em seguida, foram determinados os parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito e peso específico) e hidráulicos (condutividade hidráulica) dos materiais constituintes da estrutura. Após a definição da seção, estabeleceram-se as condições de contorno nos SEEP/W e SLOPE/W para a realização das análises de percolação e estabilidade da seção, respectivamente, possibilitando, na etapa seguinte, a aplicação da variação dos parâmetros geotécnicos. O fluxograma apresentado na Figura 2, demonstra a metodologia adotada para no presente trabalho.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia da pesquisa.



Para a realização da análise de sensibilidade de cada parâmetro de resistência, foi inicialmente determinado o valor do Fator de Segurança (FS) considerando os parâmetros sem qualquer variação. Esse valor foi adotado como referência para a análise comparativa. Em seguida, foram definidos três cenários para avaliar a sensibilidade do FS, sendo que, em cada cenário, apenas um parâmetro sofreu variação, conforme a aplicação do desvio padrão, enquanto os demais permaneceram constantes. O Quadro 2, apresentado a seguir, demonstra a metodologia adotada para a variação dos parâmetros de resistência dos materiais. Em cada cenário, foi aplicado o desvio padrão calculado a partir do valor do coeficiente de variação médio (COV), de cada parâmetro. A adoção do COV médio teve como objetivo representar a variabilidade típica desses parâmetros de forma estatisticamente consistente, evitando que valores extremos ou específicos de determinado material influenciassem de maneira desproporcional os resultados da análise. Por meio dessa análise, foram obtidos os Fatores de Segurança correspondentes a cada variação aplicada.

Quadro 2 - Cenários de Sensibilidade dos Parâmetros.

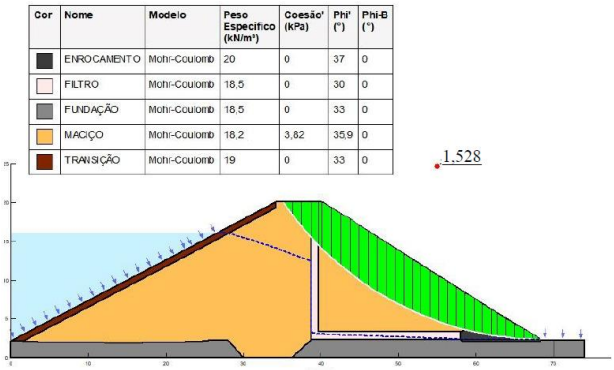
CENÁRIO I - Sensibilidade Peso Específico				
Parâmetros	Pes. Esp. (+) Desvio Padrão kN/m³	Pes. Esp.(-) Desvio Padrão kN/m³	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito(°)
CENÁRIO II - Sensibilidade Coesão				
Parâmetros	Coesão (+) Desvio Padrão (kPa)	Coesão (-) Desvio Padrão (kPa)	Peso Específico kN/m³	Ângulo de Atrito(°)
CENÁRIO III - Sensibilidade Ângulo de Atrito				
Parâmetros	Ângulo de Atrito (+) Desvio Padrão (°)	Ângulo de Atrito(-) Desvio Padrão (°)	Coesão (kPa)	Peso Específico kN/m³

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para este trabalho, foi considerada a condição de operação da barragem com rede de fluxo em regime normal, adotando-se o nível máximo do reservatório, registrado na cota 32,50 m no talude de montante. A análise de estabilidade foi realizada de forma concomitante à análise de fluxo. Para o talude de jusante, obteve-

se um Fator de Segurança (FS) igual a 1,528. De acordo com o limite mínimo estabelecido pela ABNT NBR 13028/2024, o valor encontrado é superior ao mínimo exigido, atendendo, portanto, aos critérios normativos. A Figura 3 apresenta a superfície crítica de ruptura do talude de jusante da Barragem de Itaúna, bem como o Fator de Segurança obtido na análise de estabilidade, para a qual foram adotados os valores médios dos parâmetros geotécnicos.

Figura 3 - FS talude jusante.

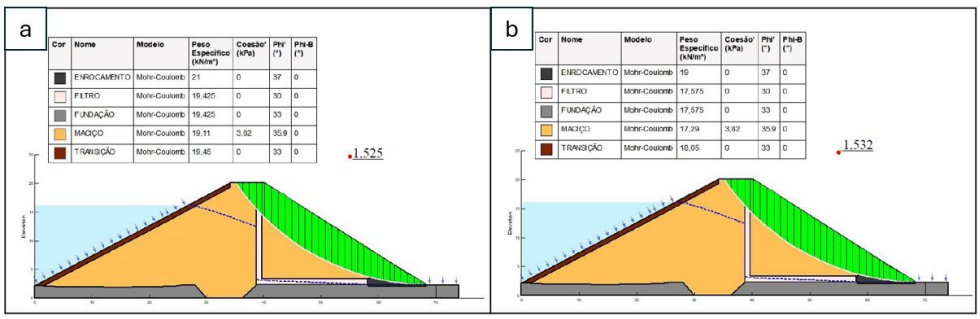


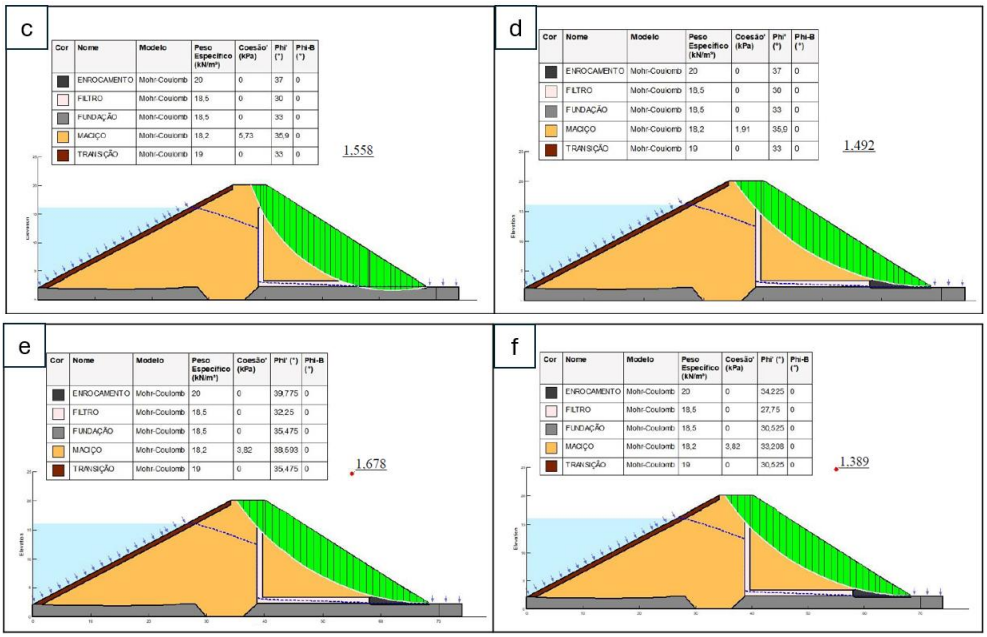
Para realizar a análise de sensibilidade do FS, frente a variação dos parâmetros de resistência dos materiais, foram estabelecidos cenários específicos para a verificação de cada parâmetro de forma isolada. A Tabela 3, apresenta o coeficiente de variação médio, de acordo com cada parâmetro, bem como os valores de desvio padrão obtidos, esses valores foram aplicados de forma que, cada parâmetro seja analisado separadamente, conforme os cenários indicados na sequência. Salienta-se que, apenas o material que constitui o maciço da barragem apresenta coesão, dessa forma, o desvio padrão referente a esse parâmetro, é aplicado apenas nesse material.

Tabela 3- Valores de desvio padrão.

Material	**Peso Específico (kN/m³)**	**Coesão kPa**	**Ângulo de Atrito**
Areia Siltosa	0,910	1,910	2,693
Areia (Filtro)	0,925	0,000	2,250
Pedregulho (Trans.)	0,950	0,000	2,475
Pedregulho (Enr.)	1,000	0,000	2,775
Aluvião	0,925	0,000	2,475

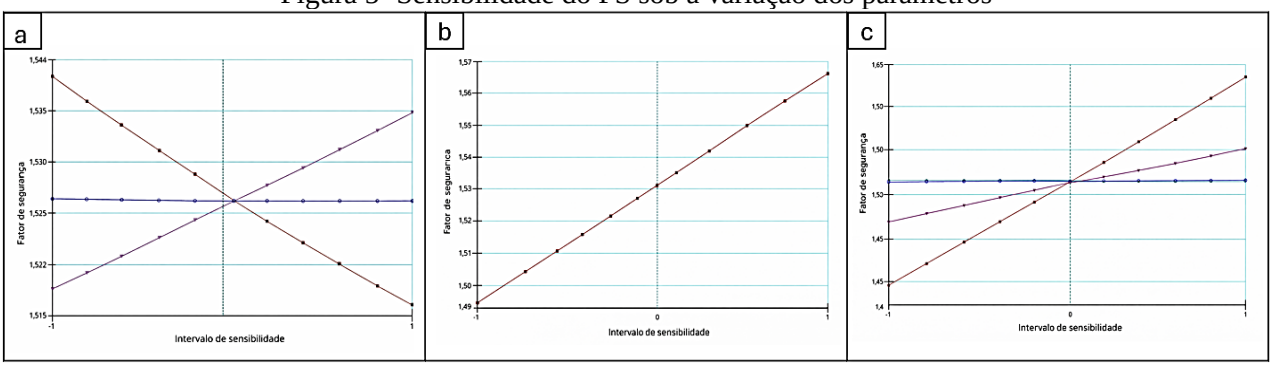
Figura 4- Análise de variação dos parametros de resistência





As Figuras 4(a) e 4(b) presentam o Cenário I, referente à variação do peso específico. A análise de sensibilidade foi limitada a ±1 desvio padrão (±1σ), calculado a partir do COV médio de cada parâmetro, por representar uma faixa estatisticamente plausível de variabilidade e permitir a comparação direta da influência individual dos parâmetros. Observa-se que o aumento do peso específico reduz o FS em 0,003, enquanto sua redução eleva o FS em 0,004, evidenciando baixa sensibilidade desse parâmetro, em concordância com Cho (2007). As Figuras 4(c) e 4(d) apresentam o Cenário II, referente à coesão. A variação de +1σ promove aumento de 0,030 no FS, enquanto -1σ reduz o fator de segurança em 0,036. O comportamento confirma a maior influência da coesão em relação ao peso específico, resultado também observado por Flores (2008), que destaca a relevância dos parâmetros resistentes na estabilidade de taludes. As Figuras 4(e) e 4(f) apresentam o Cenário III, referente ao ângulo de atrito. A aplicação de +1σ aumenta o FS em 0,150, enquanto -1σ reduz o FS em 0,139, demonstrando que este é o parâmetro de maior influência na estabilidade da barragem. Esse comportamento é consistente com os resultados de Cho (2007) e Souza (2023), que identificaram o ângulo de atrito como o parâmetro geotécnico mais sensível nas análises de estabilidade.

Figura 5- Sensibilidade do FS sob a variação dos parâmetros



A Figura 5 apresenta a influência individual de cada material considerando a variação normalizada de ±1σ. As maiores alterações no FS concentram-se no maciço e no enrocamento para o peso específico, enquanto a coesão influencia apenas o maciço, por ser o único material coesivo. Para o ângulo de atrito, todos os materiais apresentam aumento do FS com +1σ e redução com -1σ, confirmando a predominância desse parâmetro na estabilidade global e reforçando as tendências descritas por Cho (2007), Flores (2008) e Souza (2023).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a análise de sensibilidade uma Fator de Segurança (FS) da barragem de Itaúna (CE), considerando as incertezas dos parâmetros geotécnicos por meio do coeficiente de variação (COV). Os resultados mostraram que o ângulo de atrito foi o parâmetro mais influente na estabilidade, causando variação de aproximadamente 10% no FS (entre 1,389 e 1,678), Embora a coesão apresente incertezas relevantes devido ao seu intervalo de variação, foi o ângulo de atrito que exerceu maior influência nos resultados.

Conclui-se que as incertezas associadas aos parâmetros de resistência podem impactar significativamente o FS, sendo que alguns parâmetros exercem influência mais expressiva que outros. Além disso, os resultados indicam que campanhas de investigação geotécnica devem priorizar a caracterização do ângulo de atrito, uma vez que sua determinação mais precisa tende a reduzir as incertezas das análises e aumentar a confiabilidade das avaliações de estabilidade de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG) na viabilização do presente artigo. Gostaríamos de agradecer também a *Seequent* pela disponibilização do software e ao COBRAMSEG 2026 pela oportunidade da publicação do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2024) NBR 13028: *Mineração —Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos*. Rio de Janeiro.

CHO, S. E. *Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis and Management* (ICVRAM); and Fifth International Symposium on Uncertainty Modeling and Anaylsis (ISUMA), 2007.

COSTA, W. D. *Geologia de Barragens*. 1. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

FLORES, E. A. F. *Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo*. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MASSAD, F. *Obras de Terra – Curso Básico de Geotecnia*. 2. ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

NEARING, M. A.; Deer-Ascough, L.; Laflen, J.M. (1990) *Sensitivity analysis of the WEPPhillslope profile erosion model*. Transactions of theASAE, v. 33, n.3, 1990.

NETO, F. C, Fonteles, C. Q, Farias, T. R. L, Bastos, J. *Análise de sensibilidade de fatores desegurança de estabilidade externa de uma estrutura de contenção em solos reforçado do tipo terra armada*. Bahia. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2018.

PEREIRA, A. *Análise de estabilidade de taludes: superfície circular***.** YouTube, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Y93kg6oqCFs. Acesso em: 2 fev. 2026.

SIACARA, A. T; Beck, A.T; Futai, M. M. *Confiabilidade Estrutural de uma barragem de terra antiga*. Bahia. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2018.

SOUZA, L. A. E. *Avaliação geotécnica da estabilidade de uma barragem de rejeitos por métodos probabilísticos e Determinísticos*. Araxá. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – MG, 2023.

SRHCE (1998). Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará. Disponível em: http://www.ged.srh.ce.gov.br/pesquisar_por_municipio.php. Acesso em 10 de jun. de 2024.