

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



Análise da Estabilidade de Taludes de uma Barragem Localizada no Açude Açú-RN

Joás Tomaz de Aquino

Mestrando em Engenharia Civil, UFPE, Recife-PE, Brasil, joas.tomaz@ufpe.br

Inaldo José Minervino da Silva

Doutor em Engenharia Civil e Docente, Instituto Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, inaldo.jose@recife.ifpe.edu.br

Marcos George Magalhães Moreno

Doutor em Engenharia Civil e Analista, Departamento Nacional de Obras Contra Secas (DNOCS), Recife-PE, Brasil, marcosgeorge06@gmail.com

Iálysson da Silva Medeiros

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, Caruaru-PE, Brasil, ialysson.medeiros@ufpe.br

Martha Maria Bezerra Santos

Mestranda em Engenharia Civil, UFPE, Recife-PE, Brasil, martha.bezerra@ufpe.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi analisar a estabilidade dos taludes a montante e jusante da barragem de terra Armando Ribeiro Gonçalves pertencente a um reservatório localizado no Açude Açú – Rio Grande do Norte. Além do mais, buscou-se incorporar na análise a variabilidade presente nas propriedades do solo, para a situação mais crítica através de uma análise probabilística experimental por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC). A barragem de terra a ser analisada está localizada no rio Piranhas, cidade de Açú, RN, de seção transversal da estaca E53+0,00. Buscando alcançar esse objetivo, a barragem foi modelada no *software* GeoSlope® e feita a análise da percolação no regime normal de operação com a ferramenta SEEP/W 2018.R2. Foram construídos três cenários: final de construção, nível normal de operação e esvaziamento rápido. Além do mais, foi feita uma análise probabilística de ruptura considerando a variação dos parâmetros do solo em 10%, 20% e 30%. A partir das análises desenvolvidas, a barragem em estudo mostrou-se estável e os métodos utilizados forneceram fatores de segurança homogêneos. De forma complementar, a análise probabilística mostrou que a probabilidade de ruptura é baixa, havendo poucas chances de ocorrerem desastres.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Estabilidade, Fator de Segurança, Percolação.

ABSTRACT: The objective of this work was to analyze the stability of the slopes upstream and downstream of the Armando Ribeiro Gonçalves earth dam belonging to a reservoir located in the Açú Dam – Rio Grande do Norte. Furthermore, we sought to incorporate in the analysis the variability present in soil properties, for the most critical situation through an experimental probabilistic analysis using Monte Carlo Simulation (SMC). The earth dam to be analyzed is located on the Piranhas river, city of Açú, RN, with a cross section of the E53+0.00 pile. Seeking to achieve this objective, the dam was modeled in the GeoSlope® software and the percolation analysis was carried out in the normal operating regime with the SEEP/W 2018.R2 tool. Three scenarios were built: end of construction, normal operating level and rapid emptying. Furthermore, a probabilistic failure analysis was carried out considering the variation of soil parameters by 10%, 20% and 30%. Based on the developed analyses, the dam under study proved to be stable and the methods used provided homogeneous safety factors. Complementarily, the probabilistic analysis showed that the probability of rupture is low, with little chance of disasters occurring.

KEYWORDS: Dam, Stability, Safety Factor, Percolation.

1 Introdução

Uma barragem pode ser definida como uma estrutura implantada em um curso d'água, permanente ou temporário, para fins de contenção ou acumulação de água (ANA, 2019), com essa estrutura podendo ser composta de diversos materiais, como concreto e terra, por exemplo. Elas foram desenvolvidas há muitos anos, na maioria das vezes, para subsidiar às atividades relacionadas à agricultura e pecuária, mas, atualmente, elas podem ser utilizadas para diversos fins, como: abastecimento humano, irrigação, controle de enchentes, produção de energia, contenção de rejeitos de mineração, entre outras.

Diante dos acidentes envolvendo barragens, como àqueles que ocorreram nas cidades de Brumadinho (2019) e Mariana (2015), ambos em Minas Gerais, a segurança dessas estruturas ganhou ainda mais notoriedade em todo Brasil, decorrente dos grandes impactos sociais e econômicos gerados como consequência de seu rompimento. Paralelamente a esses desastres de alto impacto, segundo a ANA (2019), de 2011 a 2018 aconteceram, em média, 4 (quatro) acidentes por ano e 7 (sete) incidentes (ocorrências que não são controladas e podem gerar um acidente) por ano, com grande concentração de ocorrências em 2016 e 2017, com 17 e 10 incidentes, respectivamente.

Ainda, segundo o Relatório de Segurança de Barragens da ANA (2019), em meio a essas ocorrências de desastres já ocorridas, uma situação preocupante é que das 17.604 barragens cadastradas pelos órgãos fiscalizadores em 2018, 10.218 barragens, 58%, não possuíam algum ato de autorização (outorga, concessão ou licença), não estando regularizadas. Além do mais, apenas 4.830 barragens apresentavam pelo menos uma característica estabelecida pela Lei Federal nº 12.334/2010 que as submetem à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a qual regulamenta planos de segurança para essas estruturas. O maior número de barragens com empreendedor desconhecido encontra-se nos estados da Paraíba (210 barragens, ou 42% do total) e do Rio Grande do Norte (152 casos, ou 30% do total). Esses dados revelam que, por falta de fiscalização técnica, essas barragens poderão ter perda de sua integridade estrutural e operacional, inviabilizando o cumprimento de sua finalidade, e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (ANA, 2019).

Uma das formas de analisar a segurança de uma barragem é por meio da verificação da estabilidade de seus taludes. Os métodos clássicos de análise de estabilidade de taludes se baseiam na teoria do equilíbrio limite, sendo expresso em termos de um fator de segurança (FS), que leva em consideração o balanço entre as forças resistentes e atuantes ao longo de uma linha de ruptura pré-determinada (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). A partir da determinação desse fator, intervenções podem ser realizadas para que o talude seja estável e não venha causar desastres sociais, econômicos e ambientais.

Os métodos de equilíbrio limite, utilizados para a análise de estabilidade de taludes, se baseiam na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo, tomada como corpo rígido, na iminência de entrar em processo de escorregamento. Esses métodos são amplamente utilizados, devido à facilidade de aplicação e a experiência acumulada ao longo dos anos.

Os procedimentos de análise de estabilidade de taludes se caracterizam pela definição de um fator de segurança, obtido pela relação entre a resistência ao cisalhamento do solo (s) e a tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada (τ) ao longo da superfície de ruptura.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade dos taludes da barragem de terra Armando Ribeiro Gonçalves pertencente a um reservatório localizado no Açude Açú-RN em três condições críticas: após a construção, operação e rebaixamento rápido. Além do mais, buscando incorporar na análise a variabilidade presente nas propriedades do solo, para a situação mais crítica, foi realizada uma análise probabilística experimental por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC).

2 Metodologia

2.1 Localização da barragem analisada

A barragem de terra engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves está localizada no rio Piranhas, conforme apresentado na Figura 1, também denominado Açú, a 6 km a montante da cidade de Açú, no estado do Rio Grande do Norte (DNOCS, 1990). Ela tem como função o abastecimento de água para o Projeto de Irrigação do Baixo Açú, possuindo a capacidade de armazenamento de 2,4 milhões de m³ d'água e uma bacia hidráulica com área de 195 km².



A barragem de terra é formada por um complexo granítico migmatítico com pontos localizados bastante alterados, apresentando-se estruturalmente pouco a medianamente fraturado, com fraturas normalmente seladas ou preenchidas por materiais quartzo-feldspatos. Ainda, as ombreiras são encobertas por um solo residual pouco espesso, envolvendo afloramentos de rochas graníticas (DNOCS, 1990).

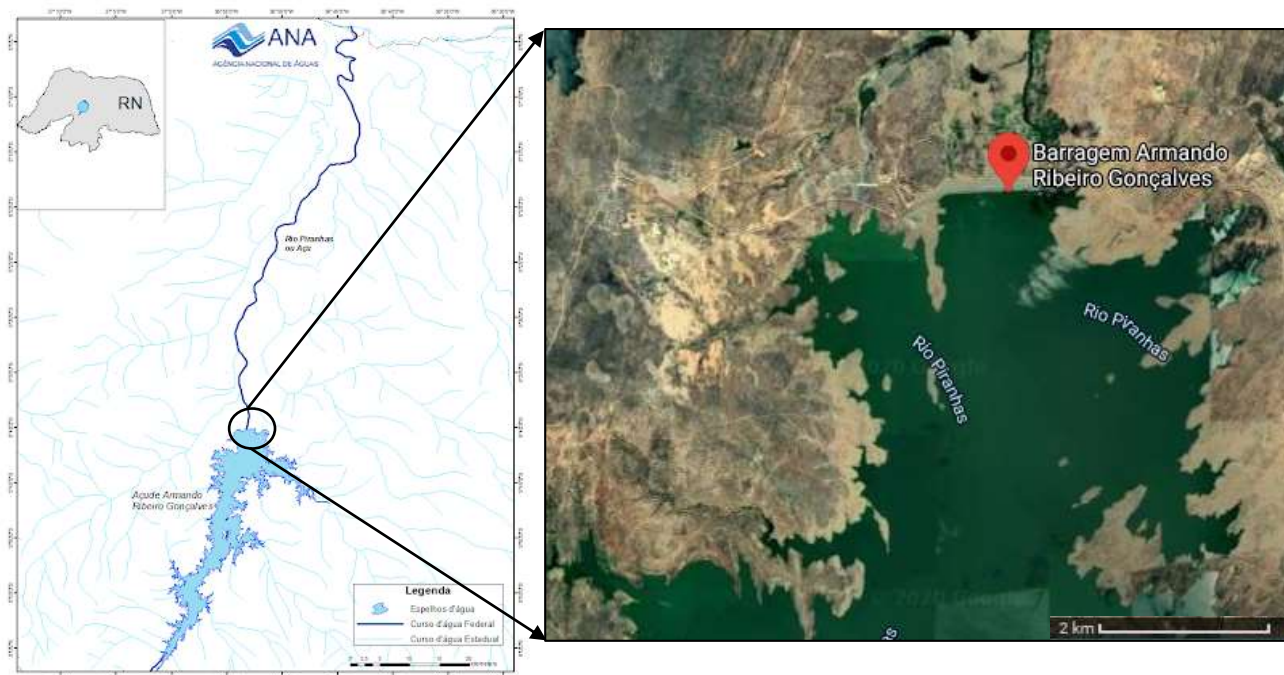


Figura 1. Localização da barragem. Fonte: Adaptado da ANA (2019).

2.2 Seção transversal da barragem e parâmetros dos materiais

A seção transversal analisada da barragem está localizada na estaca E 53+0,00 (Figura 2) e foi constituída por seis tipos de solos diferentes. O maciço da barragem é composto de pedregulho com areia de granulação variada, argiloso e o septo impermeabilizante composto de uma argila silto-arenosa. Os filtros e o enrocamento são formados por material arenoso e o solo de fundação também é composto de material arenoso e permeável.

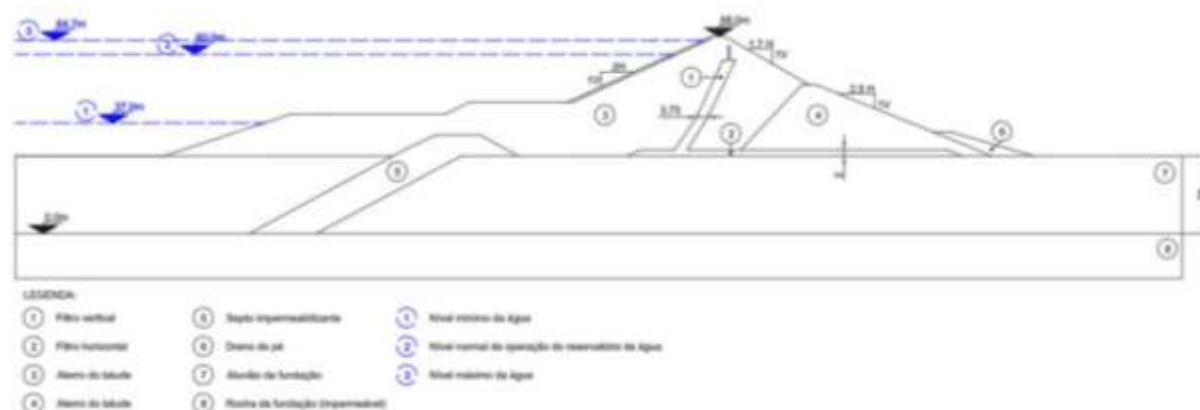


Figura 2. Seção transversal principal da barragem engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves. Fonte: Adaptado de Moreno (2011).

Na Tabela 1 estão descritos os parâmetros do solo utilizados na análise de percolação e da estabilidade da barragem, os mesmos foram provenientes de revisão de literatura e de ensaios de cisalhamento direto realizado pela empresa Tecnosolo, conforme Souza (2017) e Moreno (2011).

Tabela 1. Parâmetros do solo utilizados na análise de percolação e na estabilidade dos taludes.

Materiais	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	k _h /k _v
Septo impermeabilizante (IIA)	20	50	18°	9,26 x 10 ⁻¹⁰	0,1
Taludes a montante e a jusante da barragem (IB)	20	20	27°	1,00 x 10 ⁻⁹	0,1
Solo remanescente do talude a jusante (IB)	20	20	27°	1,00 x 10 ⁻⁹	0,1
Areia (drenos e filtros)	19	0	40°	5,00 x 10 ⁻⁴	0,4
Aluvião de fundação	19	0	30°	1,00 x 10 ⁻³	0,1
Enrocamento	21	0	40°	5,00 x 10 ⁻³	1,0

Fonte: Souza (2017) e Moreno (2011).

2.3 Modelagem numérica

Inicialmente foi realizada a modelagem da análise de percolação no regime normal de operação por meio da ferramenta SEEP/W 2018.R2 do GeoSlope®, que faz uso da modelagem por elementos finitos para resolver problemas de fluxo bidimensionais em meios saturados e não saturados. Assim, foi considerado o regime de fluxo estacionário e a malha utilizada foi constituída por 15.421 elementos quadriláteros e triangulares, com dimensões de 1 (um) metro e 15.751 nós. Para os elementos argilosos foi considerada uma saturação de 39,3%, enquanto para os materiais de caráter arenoso uma saturação de 29,3% para estimação da função do teor de umidade volumétrica, conforme Souza (2017).

Com base nos coeficientes de permeabilidade da Tabela 1 e da função de Fredlund & Xing, a função de condutividade hidráulica foi estimada no próprio SEEP/W®. Para a análise de fluxo no rebaixamento rápido da barragem, foi considerada uma análise transiente para um tempo total de 3 dias para o rebaixamento do nível d'água da cota de operação normal (55 m) até a cota mínima de operação (33 m), sendo utilizado na análise de estabilidade apenas os resultados do final desse período. Após a modelagem da percolação, a linha piezométrica foi obtida e análise de estabilidade foi realizada.

A análise de estabilidade, propriamente dita, considerou que: (i) o solo se comporta como material rígido-plástico, ou seja, rompe bruscamente sem se deformar, sendo regido pelo critério de Mohr-Coulomb; (ii) as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando o processo passa a ser dinâmico; (iii) o coeficiente de segurança é constante ao longo da superfície de ruptura, o que só se verifica em solos de comportamento dúctil.

Foram utilizados os métodos de Bishop, Morgenstern-Price e Spencer para verificar a estabilidade dos taludes a montante e jusante da barragem principal em três condições: final da construção do reservatório, reservatório cheio e esvaziamento rápido. Para a realização da análise de estabilidade foi utilizada a ferramenta SLOPE/W 2018.R2 do GeoSlope®.

Para a situação mais crítica apresentada na análise de estabilidade de talude, isto é, no caso do menor fator de segurança, foi calculada a probabilidade de ruptura e o coeficiente de confiabilidade por meio da Simulação de Monte Carlo, com 20.000 iterações. Para isso, experimentalmente, três cenários foram utilizados com variações de 10%, 20% e 30% dos parâmetros do solo (peso específico, coesão e ângulo de atrito) com esses apresentando uma distribuição lognormal, buscando representar possíveis variações que poderiam ter ocorrido na execução do maciço (no caso da existência de um controle de qualidade não muito rigoroso dos materiais utilizados *in loco*). Além do mais, objetivou-se, a partir desta consideração, acentuar a situação mais crítica observada na estabilidade do talude, a fim de complementar a análise determinística realizada, e verificar, dentro de uma distribuição de probabilidade, o comportamento médio e a dispersão do fator de segurança nessa situação.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise de Percolação

Por meio da análise de percolação foi obtida a linha piezométrica a ser utilizada na análise de estabilidade dos taludes a montante e a jusante (Figura 3). Além disso, foi identificado que o septo impermeabilizante presente na barragem cumpre a sua função por haver uma perda de carga de cerca de 30 metros d'água.

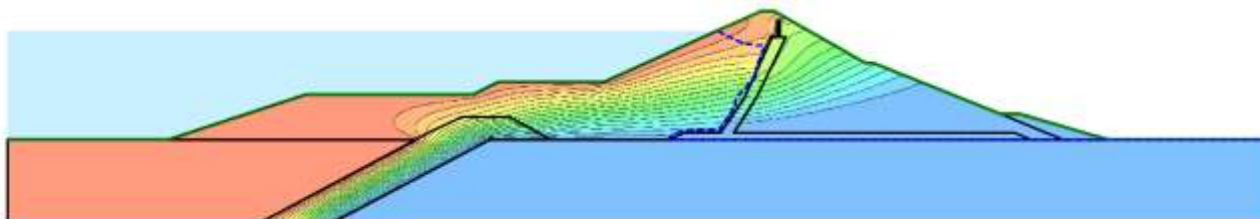


Figura 3. Linha piezométrica e distribuição das cargas totais obtidas por meio da análise de percolação.

Fonte: Autores (2021).

Como a barragem está sobre um solo de alta permeabilidade, o maior fluxo de água ocorreu no aluvião da fundação, com um fluxo ascendente no pé do talude a jusante. Nesse ponto foi verificado que o gradiente hidráulico ficou próximo de zero (entre 5×10^{-6} e 2×10^{-5}) o que possivelmente contribui para a segurança aos processos de *pipping* e liquefação, conforme argumenta Souza (2017).

3.2 Análise de estabilidade

Pela análise realizada foi identificado que nas três situações a barragem apresenta-se estável (Tabela 2), segundo os limites estabelecidos pela U.S. CORPS OF ENGINEERS (2003). A variação dos fatores de segurança entre os três métodos analisados foi baixa, com o coeficiente de variação menor do que 0,24%, dando indícios de que os resultados são consistentes e convergentes. A montante, com o enchimento da barragem, houve aumento do FS decorrente das forças de percolação atuarem na sua estabilização. Para a etapa final de rebaixamento rápido houve redução do FS tendo em vista a redução do efeito estabilizador que a água transmite, com forças que se opõem ao deslizamento deixando de existir, e pela dissipação das poropressões intersticiais dentro do maciço.

Tabela 2. Resultados da análise de estabilidade realizada.

Estágio da barragem	Fatores de segurança mínimos (FS _{min})						Valores admissíveis
	Bishop		Morgenstern-Price		Spencer		
	M	J	M	J	M	J	
Final da construção	1,805	1,685	1,802	1,678	1,802	1,678	≥ 1,30
Nível normal de operação	2,568	1,685	2,564	1,678	2,565	1,678	≥ 1,50
Esvaziamento rápido	1,776	1,687	1,774	1,683	1,775	1,682	≥ 1,10

Legenda: M: montante e J: jusante.

Fonte: Autores (2021).

Foi identificado que as poropressões resultantes da percolação da água no maciço não afetaram a estabilidade do talude a jusante, conforme também identificado por Souza (2017), tendo em vista que os seus valores apresentaram uma baixa variação, isto é, um coeficiente de variação médio de 0,126%. Como apresentado pela Tabela 2, o menor FS foi obtido para o regime normal de operação do talude a jusante, para essa situação e utilizando o método de Morgenstern-Price (Figura 4). Assim, três cenários experimentais foram construídos para uma análise probabilística desta situação, os resultados estão na Tabela 3.

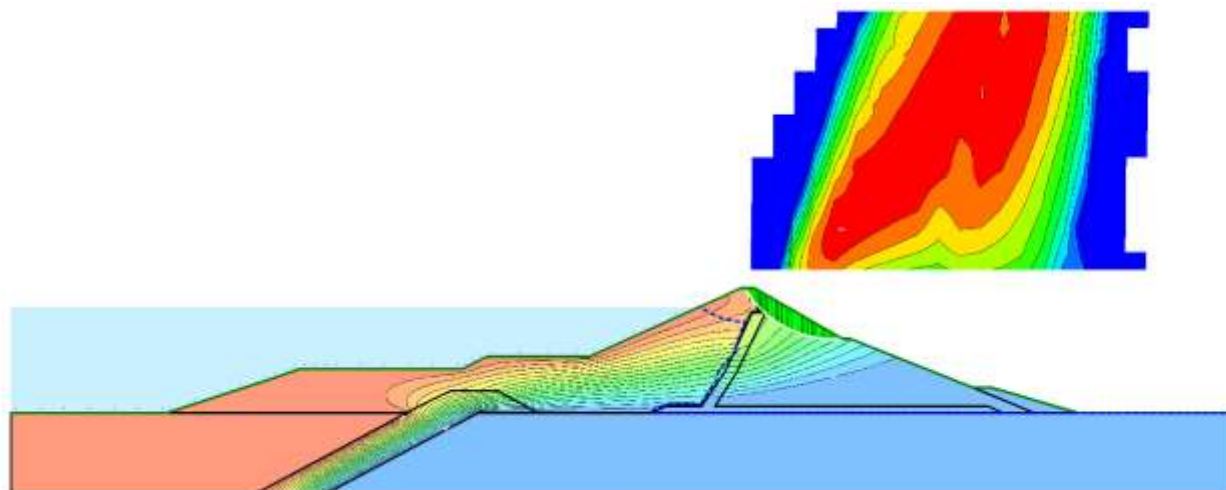


Figura 4. Superfície de ruptura do talude a jusante pelo método de Morgenstern-Price.
 Fonte: Autores (2021).

Tabela 3. Resultados da análise de estabilidade probabilística considerando três cenários experimentais.

Parâmetros	Cenários		
	1	2	3
	Δ 10%	Δ 20%	Δ 30%
E [FS]	1,693	1,720	1,761
σ [FS]	0,1237	0,2584	0,411
Coefficiente de variação	7,30%	15,02%	23,34%
Probabilidade de ruptura [FS < 1]	0,000%	0,000%	0,425%
β [FS < 1]	7,184	3,552	2,343

Legenda: FS: fator de segurança; E [FS]: valor esperado do fator de segurança; σ [FS]: desvio padrão do fator de segurança; β : índice de confiabilidade para um fator de segurança menor do que 1 (caso de não estabilidade).

Fonte: Autores (2021).

Por meio dos resultados obtidos pela análise probabilística, o talude possui uma probabilidade de ruptura próxima de zero, com aumento de chances de ocorrerem desastres a partir de uma maior variação das propriedades dos materiais. Como consequência, os índices de confiabilidade são considerados com um desempenho: alto (cenário 1), acima da média (cenário 2) e pobre (cenário 3), segundo a U.S. CORPS OF ENGINEERS (2003).

4 Considerações finais

A partir das análises desenvolvidas, e sabendo que o presente trabalho tem como objetivo a avaliação da estabilidade dos taludes da barragem de terra Armando Ribeiro Gonçalves por meio de metodologias determinísticas e probabilísticas, com base nos resultados apresentados, estes revelam que a barragem em estudo mostrou-se estável e os métodos utilizados forneceram fatores de segurança homogêneos, no qual não vai representar riscos a população das proximidades. De forma complementar, a análise probabilística mostrou que a probabilidade de ruptura é baixa, havendo poucas chances de ocorrerem desastres.

Ademais, relacionando e comparando os métodos determinísticos e probabilísticos, conclui-se que, há um ganho significativo de informações fundamentadas nos resultados, pois, o método determinístico fornece um FS que representa um valor exato e pontual, enquanto o método probabilístico é uma função de distribuição de probabilidade, no qual fornece parâmetros de avaliação da qualidade e exatidão do resultado.

Para estudos futuros, pode ser correlacionada a probabilidade de ruptura da barragem com a estimação de custos causados pelo seu rompimento, formando um mapa de risco. Além disso, sugere-se que sejam realizados análises em três dimensões (3D), assemelhando-se mais às condições reais do campo, levando em

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



consideração a variação de piezometria, cargas externas e vibrações, pois, ao serem incluídos, irão gerar menores índices de confiabilidade, e consequentemente, maiores probabilidades de ruína.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ambos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) campus Caruaru e Recife.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2019) *Relatório de segurança de barragens* – 2018. Brasília: ANA.
- Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS. (1990) *Açude Açú Barragem Engº. Armando Ribeiro Gonçalves*, Disponível em: <https://www.dnocs.gov.br/barragens/acu/acu.htm>. Acesso em: 10 jul. 2020.
- Guidicini, G.; Nieble, C.M. (1993) *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Edgard Blücher LTDA: São Paulo.
- Moreno, M. G. M. (2011) *Modelagem numérica com acoplamento hidro-mecânico da reconstrução, enchimento e comportamento da Barragem de Açú/RN após o acidente no final de construção*. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Souza, A. N. (2017) *Análise do comportamento da Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açú/RN – durante a sua construção, primeiro enchimento e operação do reservatório*. 323f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- U.S Army Corps Of Engineer. (2003) *Engineering and design Slope Stability*. Publication. U.S. Government Printing. Washington, DC.