DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/42

ESTUDO COMPARATIVO DE UMA BARRAGEM DE TERRA EM MODELO REDUZIDO E RESULTADOS OBTIDOS POR SOFTWARE

Jenniffer Ribeiro Braga
Graduanda Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, jennifferribeiro@unifei.edu.br

Laura de Souza Barbosa
Graduanda Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, d2020025092@unifei.edu.br

Adinele Gomes Guimarães
Professora Titular, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, adinele@unifei.edu.br

RESUMO: Atualmente, no Brasil, há uma grande quantidade de barragens cadastradas e por esse motivo é imprescindível o estudo para aprimoramento da segurança destas, de forma a se tornar possível a previsão e prevenção de desastres. Mais especificamente é necessário conhecer o comportamento da estrutura. Para isso, tem-se os modelos reduzidos e os modelos numéricos. Esse trabalho tem por objetivo geral a comparação ent re os resultados obtidos pelo método experimental, utilizando o modelo reduzido de uma barragem de terra, e a análise da mesma barragem feita por meio de software. Para ambas as análises, foram realizadas simulações a fim de documentar o comportamento da barragem e dessa maneira definir pontos sensíveis. Essa comparação é realizada de acordo com as análises presentes em software (Estabilidade de taludes, Fluxo de água e Tensão Deformação). A comparação foi possível e eficaz pela padronização dos processos e realização de ensaios para conhecer os parâmetros dos solos. Conclui-se que os métodos de análise são eficazes para conhecer o comportamento de barragens e os resultados e comportamentos obtidos tiveram similaridade.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica de barragens, Percolação em barragens de terra, Análise Tensão-Deformação em barragens.

ABSTRACT: Currently, in Brazil, there is a large number of registered dams, and for this reason it is essential to conduct studies aimed at improving their safety in order to enable the prediction and prevention of disasters. More specifically, it is necessary to understand the structural behavior of these systems. To this end, reduced-scale physical models and numerical models are used. The main objective of this study is to compare the results obtained through the experimental method, using a reduced-scale model of an earth dam, with the analysis of the same dam performed using software. For both approaches, simulations were carried out to document the dam's behavior and thus identify critical points. This comparison was conducted based on analyses performed in the software (slope stability, water flow, and stress–strain). The comparison proved to be feasible and effective due to the standardization of procedures and the execution of tests to determine soil parameters. It is concluded that both analysis methods are effective in understanding dam behavior, and the results and performance obtained showed strong similarity.

KEYWORDS: Numerical simulation of dams, Seepage in earth dams, Stress–strain analysis in dams.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que passou por uma evolução relativamente lenta no que se diz respeito à legislação relacionada ao tema de segurança de barragens. Entretanto, após a ocorrência de acidentes envolvendo essas estruturas, o Congresso aprovou a Lei nº12.334 em 2010, a qual estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PSNB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Atualmente, de acordo com informações do dia 12 de Junho de 2024 do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, existem 26.609 barragens cadastradas no país. Por isso, é imprescindível que se continue aprimorando a segurança de barragens, para que seja possível prever, e

sobretudo evitar, desastres como os citados anteriormente. Mais especificamente, é necessário conhecer o comportamento da estrutura.

Em relação a isso, um dos métodos utilizados é o modelo reduzido, o qual auxilia no estudo de escoamentos em estruturas hidráulicas e na previsão do comportamento delas, já consagrado por muitas obras (Kanashiro et al 2013). Outra alternativa é o emprego de softwares que utilizam modelos numéricos para estudar o comportamento das estruturas, como por exemplo o GeoStudio. No programa é possível realizar análises de estabilidade de taludes e da deformação do solo, com a inserção de parâmetros do solo a ser aplicado.

Neste contexto, o presente trabalho propõe a comparação da análise numérica obtida do programa GeoStudio Student Edition e dos resultados do modelo reduzido de uma barragem de terra, para verificar quais medidas podem ser adotadas de forma a garantir a segurança da barragem de terra.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo do comportamento de barragens pode ser realizado por métodos analíticos, experimentais e numéricos (Reyna e Reyna, 2012). Entre essas abordagens, os modelos reduzidos e a modelagem numérica destacam-se por permitirem a avaliação de fenômenos relacionados à estabilidade, percolação e deformação dos maciços de terra.

Os modelos reduzidos consistem na construção de protótipos em escala capazes de reproduzir o comportamento hidráulico e geotécnico de estruturas reais. Essa técnica possibilita a visualização do fluxo em meios porosos, a observação de fenômenos de percolação e a identificação de regiões suscetíveis a deformações e instabilidades, constituindo importante ferramenta de apoio à análise e ao monitoramento de barragens (Kanashiro et al., 2013; Trautwein, Guimarães e Tiago Filho, 2022).

Paralelamente, os métodos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) vêm sendo amplamente empregados em estudos geotécnicos devido à sua capacidade de representar condições complexas de carregamento, fluxo e deformação. Entre os softwares utilizados para essa finalidade destaca-se o GeoStudio, que permite realizar análises de estabilidade de taludes, percolação e tensão-deformação por meio da definição das propriedades dos materiais e das condições de contorno da estrutura.

Estudos anteriores demonstram que os modelos físico e numérico podem apresentar resultados compatíveis quando adequadamente calibrados. Oliveira et al. (2018), ao analisarem a percolação em barragens homogêneas de terra, verificaram comportamento semelhante das linhas de fluxo obtidas por métodos analíticos, experimentais e numéricos. Nesse contexto, a comparação entre modelos reduzidos e simulações computacionais contribui para a compreensão dos mecanismos que governam o comportamento de barragens e para o aprimoramento das análises de segurança dessas estruturas.

3 METODOLOGIA

O estudo realizado neste trabalho relaciona duas etapas, os modelos reduzidos e as simulações em software. Para ambas as etapas, foram realizados levantamento de dados a fim de documentar o comportamento das barragens e dessa forma estabelecer os pontos passíveis de comparação.

3.1 Modelos reduzidos

Foram construídos dois modelos físicos de barragem de terra em escala 1:100, com altura de 20 cm e taludes de montante e jusante inclinados em 1:2,5. O primeiro modelo foi executado de forma homogênea, utilizando argila, enquanto o segundo recebeu um filtro horizontal de areia na região de jusante. Os modelos foram construídos em reservatório de vidro localizado no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Itajubá.

Para a caracterização dos materiais empregados, foram realizados ensaios de teor de umidade, massa específica dos grãos, análise granulométrica, limites de consistência e compactação, conforme normas da ABNT. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 1.

As barragens foram executadas em quatro camadas sucessivas de solo compactado. No modelo com filtro, a argila foi previamente homogeneizada na umidade ótima determinada em laboratório. Durante os

ensaios, o nível d'água a montante foi mantido constante em aproximadamente 15 cm, permitindo a avaliação do processo de percolação, dos deslocamentos e das deformações observadas nos modelos físicos.

Tabela 1. Resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados.

Ensaio	**Propriedade**	**Argila**	**Areia**
Granulometria Conjunta	Pedregulho (%)	0	3
	Areia Grossa (%)	5	6
	Areia Média (%)	15	63
	Areia Fina	18	28
	Silte (%)	17	0
	Argila (%)	45	0
Picnômetro	Densidade dos grãos (g/cm^3)	2,68	2,55
Compactação	Massa específica seca máxima (g/cm³)	1,48	1,56
	Teor de umidade ótimo (%)	26	18
Limites de consistência	Limite de Plasticidade (%)	2,4	NP
	Limite de Liquidez (%)	13,8	NP
	Índice de Plasticidade (%)	11,4	NP
	Índice de Consistência	1,1	NP
	Grau de contração (%)	20,6	-
Classificação Unificada		CL - argila pouco plástica com areia	SP - areia mal graduada

3.2 Modelos numéricos

As análises numéricas foram realizadas no software GeoStudio Student Edition, utilizando os módulos SLOPE, SEEP e SIGMA. As geometrias adotadas reproduziram as condições dos modelos físicos, permitindo a comparação direta entre os resultados. A estabilidade dos taludes foi avaliada pelo método de Bishop, utilizando as linhas piezométricas obtidas nas análises de percolação. As simulações de fluxo foram conduzidas em regime permanente, considerando nível d'água a montante e condição drenante a jusante. Para as análises tensão-deformação, foram utilizadas as poropressões calculadas pelo módulo SEEP e restrições de deslocamento na base da barragem.

Os parâmetros geotécnicos empregados nas simulações foram obtidos a partir dos ensaios laboratoriais e complementados com valores da literatura técnica especializada, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises numéricas.

Parâmetros	Argila	Areia	Fonte
Peso específico (kN/m^3)	14,8	15,6	Pinto (2006)
Coesão (kPa)	20	0	Pinto (2006)
Ângulo de atrito (º)	20	35	Pinto (2006)
Condutividade saturada (m/seg)	1,0x10^{-8}	1,0x10^{-4}	Das e Sobhan (2019)
Teor de umidade (%)	26	5,2	Ensaio compactação
Compressibilidade (/kPa)	0,085	0,043	Monkul e Ozden (2007) e Prakasha e Chandrasekaran (2005)
Índice de vazios inicial	0,81	0,63	Correlação com outros índices físicos
Peso específico (kN/m^3)	14,8	15,6	Ensaio de compactação
Módulo-E Efetivo (kPa)	6000	35000	Teixeira e Godoy (1996)
Coeficiente de Poisson	0,2	0,3	Teixeira e Godoy (1996)

4 RESULTADOS

4.1 Comportamento dos modelos reduzidos

4.1.1 Modelo sem filtro

A barragem de terra homogênea logo após a montagem está representada na Figura 1. No momento de realização do experimento, notou-se algumas trincas no talude de jusante da barragem, ilustradas pela Figura 2. Ressalta-se que grau de contração determinado para a argila usada foi superior a 20%, o que indica que existe a possibilidade de maior incidência de fissuras durante o processo de secagem do solo (Carvalho, 2005). O enchimento deste modelo se deu até o nível de 17cm de água a montante, pois a boia adaptada não cumpriu seu objetivo. Por isso, o enchimento do reservatório foi interrompido. Após uma hora, a saída de água se deu pela trinca, aproximadamente no centro do talude de jusante, como pode ser observado na Figura 3.



Figura 1. Modelo reduzido após montagem – modelo sem filtro.



Figura 2. Trincas observadas no modelo.



Figura 3. Saída de água a jusante no modelo.

Foram analisados sete pontos ao longo da barragem (pé a jusante, meio do talude de jusante, 15cm a jusante, crista do talude a jusante, crista do talude a montante, 15cm a montante e pé a montante) com medições das coordenadas horizontais (X) e verticais (Y) antes e após o enchimento do reservatório, adotando-se como origem do eixo X o centro do modelo. Os deslocamentos no modelo físico, obtidos com trena e régua, indicaram estabilidade global da estrutura sem filtro, não sendo observadas variações nas coordenadas na maioria dos pontos. Verificou-se apenas pequeno deslocamento vertical na altura de 15 cm no talude de montante, com redução para 14,7 cm, enquanto os demais pontos mantiveram suas posições iniciais.

4.1.2 Modelo com filtro

Após a montagem, o modelo físico com filtro apresentou-se conforme ilustrado na Figura 4. O enchimento foi realizado com vazão constante de 0,086 L/s até atingir a altura de 15 cm, mantida estável com o auxílio da boia instalada no reservatório. Ao longo do tempo, foram monitoradas a percolação pelo maciço, por meio da elevação do nível d'água a jusante, bem como os deslocamentos nos pontos previamente definidos e eventuais deformações na estrutura da barragem.



Figura 4. Modelo reduzido com filtro após montagem.

Na Tabela 3 consta o acompanhamento dos níveis de água a jusante ao passar do tempo e, consequentemente, a vazão de percolação de água pela barragem. Convém destacar que, como mostra a Figura 5, o filtro horizontal de areia funcionou de acordo com esperado, já que a água fluiu primeiramente por ele.

Tabela 3. Vazão de percolação de água pelo maciço.

NA (jusante)	Tempo (s)	Volume (cm^3)	Vazão (cm^3/s)
1 cm	20852	1812	0,09
2 cm	27960	3750	0,13
6 cm	111600	12750	0,11
7,1 cm	198000	15576	0,08

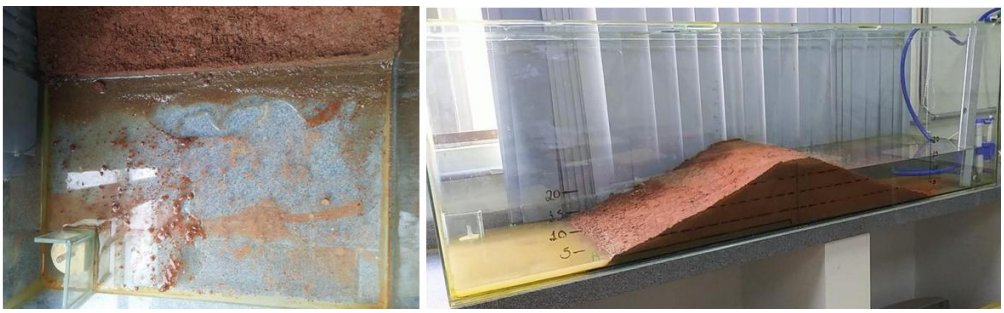


Figura 5. Funcionamento do filtro horizontal.

Nos cinco dias em que se seguiu o experimento, o nível de água a montante permaneceu constante. Ao fim do quinto dia, foi realizado o desligamento da torneira que preenchia o reservatório. No sétimo dia, o nível de água a jusante e a montante se igualaram, atingindo 13 cm.

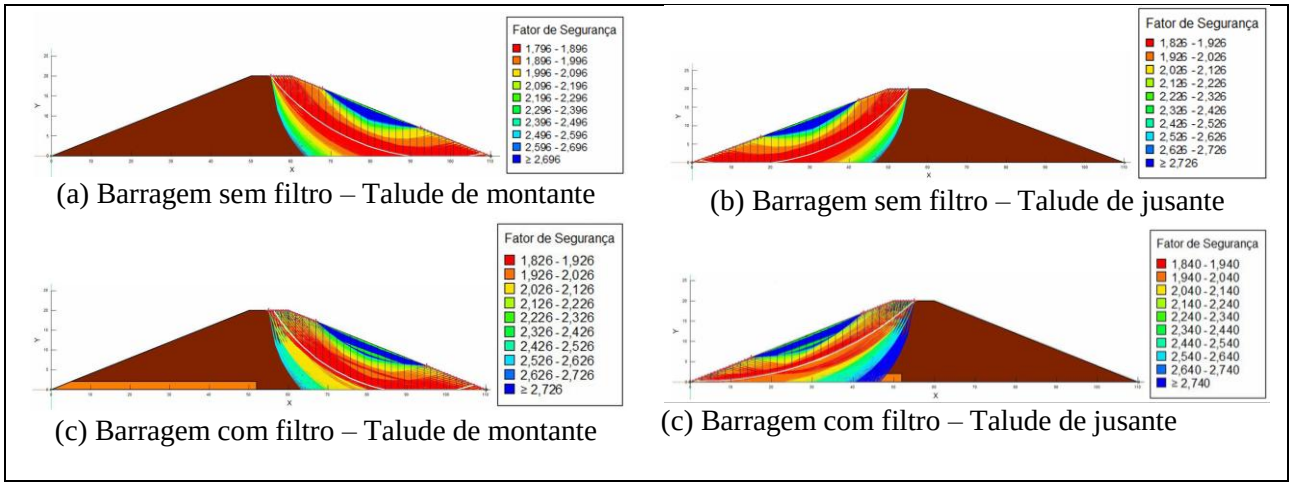
Foram analisados cinco pontos ao longo da barragem (pé a jusante, meio do talude de jusante, crista do talude a jusante, crista do talude a montante e topo do nível de água a montante), comparando-se as coordenadas antes e após o enchimento, com origem no centro do modelo. Os resultados indicaram ausência de deslocamentos significativos, observando-se apenas pequenas variações horizontais nos pontos no pé a jusante e na crista do talude de montante. Quanto às deformações, registrou-se leve carregamento no pé de jusante, sem alterações relevantes na estabilidade global da estrutura.

4.2 Respostas das Análises Numéricas

4.2.1 Análise de Estabilidade

Após a inserção das geometrias, materiais e parâmetros no módulo SLOPE, foram realizadas análises de estabilidade para os taludes de montante e jusante das barragens com e sem filtro. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.

As análises geraram as superfícies potenciais de ruptura e os respectivos fatores de segurança (FS), que variaram aproximadamente entre 1,80 e 2,74. Em todas as condições analisadas, os valores superaram o mínimo usualmente recomendado de 1,5, indicando estabilidade global dos modelos. Observa-se ainda que a inclusão do filtro não produziu alterações significativas nos fatores de segurança, embora tenha influenciado o comportamento hidráulico da barragem, conforme discutido na análise de percolação.



(a) Barragem sem filtro – Talude de montante

(b) Barragem sem filtro – Talude de jusante

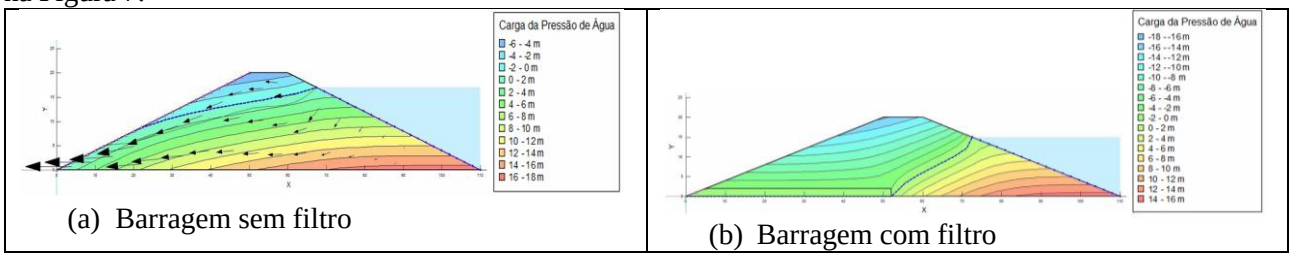
(c) Barragem com filtro – Talude de montante

(c) Barragem com filtro – Talude de jusante

Figura 6. Análises de estabilidade obtidas no módulo SLOPE: (a) barragem sem filtro – talude de montante; (b) barragem sem filtro – talude de jusante; (c) barragem com filtro – talude de montante; (d) barragem com filtro – talude de jusante.

4.2.2 Análise de Percolação

As análises de percolação foram realizadas no módulo SEEP para as barragens com e sem filtro, considerando os mesmos níveis d'água adotados nos modelos físicos. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.



(a) Barragem sem filtro

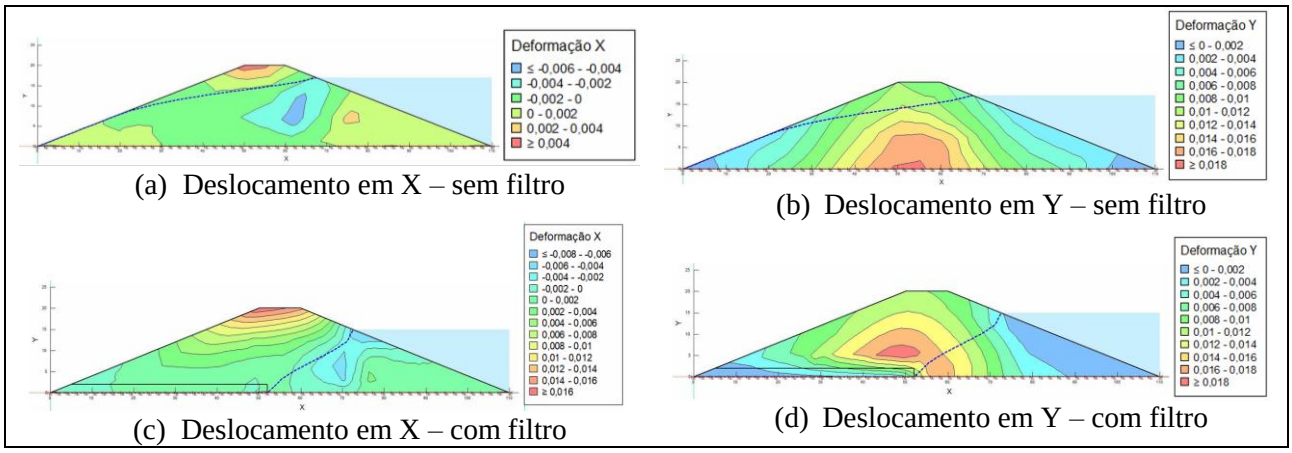
(b) Barragem com filtro

Figura 7. Distribuição da carga de pressão d'água e linhas de fluxo obtidas na análise de percolação (SEEP): (a) barragem sem filtro; (b) barragem com filtro.

Observa-se na Figura 7(a) que, na barragem sem filtro, o fluxo percola através de todo o maciço, concentrando-se na região central do talude de jusante. Esse comportamento é compatível com o observado no modelo físico, no qual ocorreu surgimento de água próximo à região fissurada. Na Figura 7(b), referente à barragem com filtro, verifica-se o direcionamento preferencial do fluxo para o filtro horizontal, reduzindo a percolação pelo maciço e reproduzindo o comportamento observado experimentalmente.

4.2.3 Análise Tensão-Deformação

A análise tensão–deformação foi realizada por meio do módulo SIGMA, considerando as condições hidráulicas obtidas na análise de percolação. Os resultados dos deslocamentos nos eixos X e Y para as barragens com e sem filtro são apresentados na Figura 8.



(a) Deslocamento em X – sem filtro

(b) Deslocamento em Y – sem filtro

(c) Deslocamento em X – com filtro

(d) Deslocamento em Y – com filtro

Figura 8. Resultados da análise tensão-deformação obtidos no módulo SIGMA: (a) deslocamentos no eixo X da barragem sem filtro; (b) deslocamentos no eixo Y da barragem sem filtro; (c) deslocamentos no eixo X da barragem com filtro; (d) deslocamentos no eixo Y da barragem com filtro.

Em ambos os modelos, as maiores deformações no eixo X concentram-se na região da crista, enquanto as maiores deformações no eixo Y ocorrem na porção central do maciço. Para o eixo X, os deslocamentos variam entre -0,8 cm e 1,6 cm nas duas barragens analisadas. Já no eixo Y, o valor máximo de deformação observado foi de 1,8 cm.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os principais resultados obtidos nos modelos físico e numérico. A análise permite verificar a compatibilidade dos métodos quanto à estabilidade da estrutura, ao comportamento da percolação e às deformações observadas.

Tabela 4. Comparação dos principais resultados obtidos nos modelos físico e numérico.

Parâmetro	Modelo Físico	Modelo numérico
Estabilidade global	Sem ocorrência de ruptura	FS entre 1,8 e 2,74
Fissuras	Obserrvado no modelo sem filto	Não observadas
Vazão percolada	0,08 a 0,13 cm^3/s	
Deslocamento horizontal máximo	Pequenas variações (< 0,3 cm)	Até 1,6 cm
Deslocamento horizontal máximo	Aproximadamente 0,3 cm	Até 1,8 cm
Comportamento do filtro	Funcionamento adequado	Fluxo preferencial pelo filtro
Local de saída da água (sem filtro)	Região central do talude de jusante	Região central do talude de jusante

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do modelo reduzido e das análises numéricas exigiu a realização de ensaios de caracterização dos solos e padronização da geometria. Entretanto, alguns parâmetros fundamentais, como coesão, ângulo de atrito, condutividade hidráulica, compressibilidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, foram adotados com base na literatura, o que limita a precisão da comparação entre os modelos físico e computacional. Assim, recomenda-se, para estudos futuros, a execução de ensaios específicos de cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados.

No modelo físico, a barragem sem filtro apresentou trincas em razão da variação de umidade entre as camadas e do elevado grau de contração da argila, enquanto a barragem com filtro demonstrou comportamento satisfatório, sem fissuras e com funcionamento adequado do sistema drenante. Embora as análises de estabilidade tenham indicado fatores de segurança entre 1,80 e 2,74, as fissuras observadas não foram associadas a uma ruptura global da estrutura, mas sim a fenômenos locais de retração do material durante o processo de secagem. Essa interpretação é reforçada pelo fato de não terem sido observados deslocamentos significativos ou superfícies de ruptura nos modelos físicos. A análise de percolação (SEEP) indicou que, na barragem com filtro, o fluxo foi direcionado ao pé de jusante, em concordância com o comportamento experimental. Já na barragem sem filtro, o fluxo concentrou-se na região central do talude de jusante,

coincidindo com a área onde se formou a trinca. A análise tensão–deformação (SIGMA) apontou deslocamentos de pequena magnitude e, em geral, coerentes com os resultados experimentais, ainda que com diferenças pontuais quanto à localização das maiores deformações.

Conclui-se que a integração entre modelo físico e modelagem numérica constitui ferramenta eficaz para a avaliação do comportamento de barragens, permitindo compreender os mecanismos de estabilidade, percolação e deformação. De modo geral, observou-se concordância qualitativa entre os resultados experimentais e numéricos, especialmente quanto às condições de estabilidade global, ao comportamento do fluxo e às regiões de maior deformação. As principais diferenças foram observadas na magnitude dos deslocamentos e na ocorrência de fissuras no modelo sem filtro, fenômeno não reproduzido pelas análises numéricas. O primeiro modelo serviu como base para ajustes construtivos aplicados no segundo, que apresentou maior compatibilidade entre os resultados experimental e numérico. Para aprimorar futuras investigações, recomenda-se a determinação experimental de todos os parâmetros de entrada do software, bem como a análise detalhada das linhas de fluxo e a avaliação de dispositivos adicionais, como filtros verticais e drenos de pé, ampliando a confiabilidade e a aplicabilidade dos estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-graduação Profissional em Engenharia Hídrica (PPGPEH), o Instituto de Recursos Naturais (IRN) e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carvalho, Gil P.A. (2005) Caracterização física e química dos solos. 2005. Universidade Federal de Juiz de Fora. Faculdade de Engenharia- Departamento de transportes. Acesso em: Outubro de 2024.

Das, Braja M.; Sobhan, Khaled. (2019) Fundamentos de engenharia geotécnica. 4th ed. Porto Alegre: Cengage Learning Brasil.

Kanashiro, W.K; Bernardino, J.C.M; Fudimori, M.H; Pecini, B. (2013). Técnicas de laboratório para estudos em modelo reduzido. In: XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens Porto de Galinhas.

Monkul,M.M; Ozden,G (2007). Compressional Behavior of Clayey Sand-Bantonite mixtures. Engineering geology. Publication No. 89. p. 195-205.

Oliveira, T. C. F. E; Dezen, B. G. S.; Dahmer R. R.; Antonio, I. O.; Bizarreta-Ortega J. C. (2018) Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra. In: Anais do XX COBRAMSEG, 2018, Vol. III, GJ35771. Salvador.

Prakasha, K.S; Chandrasekaran, V.S (2005). Behavior of Marine Sand-Clay Mixtures under Static and Cyclic Triaxial Shear. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. p.213-222.

Pinto, Carlos de Sousa. (2024) Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Reyna, Estela E.; Reyna, Santiago M. (2012) Modelos analíticos y numéricos para ladeterminación de infiltración en presas de material suelto. Análisis de su uso y sensibilidad. Mecánica Computacional, v. 31, n. 2, p. 279-303.

Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB (2024). Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 12 jul. 2024.

Trautwein, D. C. R.; Guimarães, A S.; Tiago Filho, G. L. (2022) Simulação e estudo das Deformações que Precedem o Rompimento de Barragens através de Modelo Reduzido. Engenharia, Gestão e Inovação. 1ed. Belo Horizonte: Poisson, 2022, v. 4, p. 21-31.

Teixeira, A.H.; Godoy, N.S. (1996). Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundações: teoria e prática, Hachich et al. (editores). São paulo: Pini.

Unas, Mário S. P. (2010) Estudo Experimental e Numérico de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido. 2010. Dissertação (Mestrado)– Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, FEUP. Disponível em: http://docplayer.com.br/69218927-Estudo-experimental-e-numerico.html. Acesso em jul. de 2024.