XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.3/20

Maquete de Barragem: Modelo Didático do Processo de Percolação de Água em Sistema de Filtros em Barramento de Solo

Josias Eduardo Rossi Ladeira
Professor, Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, Brasil, proqual@uol.com.br

Otarcione Felipe Cesário
Gerente de Laboratório, Diefra Engenharia e Consultoria Ltda, Belo Horizonte, Brasil, otarcione.cesario@diefra.com.br

Ingrid Maria de Souza Melo
Estudante, Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, Brasil, imsmelo@sga.pucminas.br

Thalita Braga Silva
Estudante, Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, Brasil, thalitatbs@hotmail.com

Adib Antunes Chequer
Coordenador, Diefra Engenharia e Consultoria Ltda, Belo Horizonte, Brasil, adib.chequer@diefra.com.br

RESUMO: A maquete física de barragem de terra foi desenvolvida como para apresentar os elementos constituintes e o funcionamento geotécnico de um barramento em solo compactado. O modelo contempla espaldares em solo argiloso, filtros vertical e horizontal, zonas de transição no filtro horizontal, do tipo sanduíche, dreno de pé; simulando o perfil típico de barragem homogênea, ilustrando a percolação de água e sua influência na estabilidade da estrutura. O objetivo consiste em demonstrar como a água se movimenta no interior do maciço de solo e mecanismo de drenagem interna para controlar seu fluxo. Para garantir aderência ao comportamento real de uma barragem, os materiais empregados foram submetidos a ensaios de caracterização completa, além de ensaios de permeabilidade que asseguram a capacidade de drenagem aplicada a filtros em barragens de terra. Essa estrutura de maquete demonstra princípios essenciais em barragem de terra, como o controle do fluxo descendente e horizontal da água, que permite a prevenção de erosão interna por 'piping' pelo direcionamento da água a jusante da barragem, evitando elevação de superfície freática no espaldar de jusante. Desse modo, a maquete facilita a visualização de fenômenos hidráulicos e geotécnicos mediante mecanismos de controle do fluxo de água no interior da barragem, e também pode ser utilizada para aproximar a teoria da prática, apoiando a formação de estudantes de engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem, Maquete, Barragem, Percolação de Água, Filtros

ABSTRACT: A physical model of an earth dam was developed to present the constituent elements and geotechnical functioning of a dam in compacted soil. The model includes clay soil supports, vertical and horizontal filters, sandwich-type transition zones in the horizontal filter, and a toe drain; simulating the typical profile of a homogeneous dam, illustrating water percolation and its influence on the structure's stability. The main objective is to demonstrate how water moves within the soil mass and what mechanisms contribute to controlling its flow. To ensure adherence to the real behavior of a dam, the materials used were subjected to complete characterization tests, in addition to permeability tests that ensure the drainage capacity when applied to filters in earth dams. This scale model demonstrates essential principles in earth dams, such as controlling the downward and horizontal flow of water, which prevents internal erosion by piping, directing the water downstream of the dam and avoiding the elevation of the water table on the downstream slope. Thereby, the model facilitates the visualization of hydraulic and geotechnical phenomena through mechanisms for controlling water flow inside the dam, and can also be used to bridge the gap between theory and practice, supporting the training of engineering students.

KEYWORDS: Drainage, Dam, Water percolation, Filters

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são consideradas uma das estruturas mais difundidas no Brasil, em função das condições topográficas e da abundância de solos terrosos disponíveis no país (Massad, 2010). No entanto, falhas associadas à caracterização do maciço, etapa fundamental da concepção do projeto, podem levar à adoção de hipóteses incorretas sobre o comportamento do solo frente às solicitações hidrológicas e mecânicas. Entre essas, destaca-se o controle inadequado da percolação do movimento da água no interior do maciço de solo do barramento, bem como o dimensionamento incorreto de filtros no sistema de drenagem, os quais estão entre as principais causas de acidentes envolvendo esse tipo de estrutura.

Assim, é necessário que o projeto de barragem de terra seja precedido por uma caracterização geotécnica criteriosa dos materiais, composta por ensaios de granulometria, limites de Atterberg e ensaio de compactação para a identificação da umidade ótima, além de ensaios de permeabilidade que evidenciam a capacidade de drenagem de filtros em barragens de terra; de modo a fornecer parâmetros confiáveis para o dimensionamento do maciço.

No ensino de engenharia civil, especialmente na disciplina de Mecânica dos Solos, a dificuldade de entendimento dos fenômenos hidráulicos e geotécnicos em uma barragem constitui um desafio recorrente para os alunos da graduação em nível superior. A maquete física de barragem de terra surge, nesse contexto, como uma estratégia didática para aproximar a teoria à prática. A maquete apresentada neste trabalho (Figura 1), representa uma barragem genérica de terra que foi desenvolvida seguindo procedimentos técnicos alinhados às boas práticas de engenharia. Essa estrutura permite demonstrar princípios essenciais das barragens de terra, como o controle do fluxo descendente e horizontal da água, a prevenção da erosão interna por ‘piping’ e o papel dos sistemas de drenagem interna no alívio das poropressões, promovendo o direcionamento seguro da água a jusante da barragem.

O modelo também possibilita a compreensão da estabilidade dos taludes a montante e a jusante da crista do barramento, uma vez que a infiltração de água pode reduzir a resistência do solo e aumentar as tensões de poropressões, exigindo a garantia de fatores de segurança adequados em situações críticas, como o final da construção, o primeiro enchimento do reservatório, o nível máximo do reservatório e o rebaixamento rápido do nível d’água de montante (Cruz, 2004). A maquete foi concebida para demonstrar a importância da interação entre materiais de características físicas diferentes e fluxo interno de água em barragem de terra.

Neste sentido, a maquete foi construída em equipe por dois engenheiros da empresa parceira Diefra Engenharia e Consultoria Ltda, professor da disciplina de Mecância dos Solos e a participação de duas alunas do Programa de Educação Tutorial da PUC Minas. Esse modelo possibilitou a demonstração do comportamento hidráulico e geotécnico de um barramento de terra, o que facilitou transmitir conhecimentos geotécnicos com apoio do software Slide2, versão 9.041 da Rocscience.

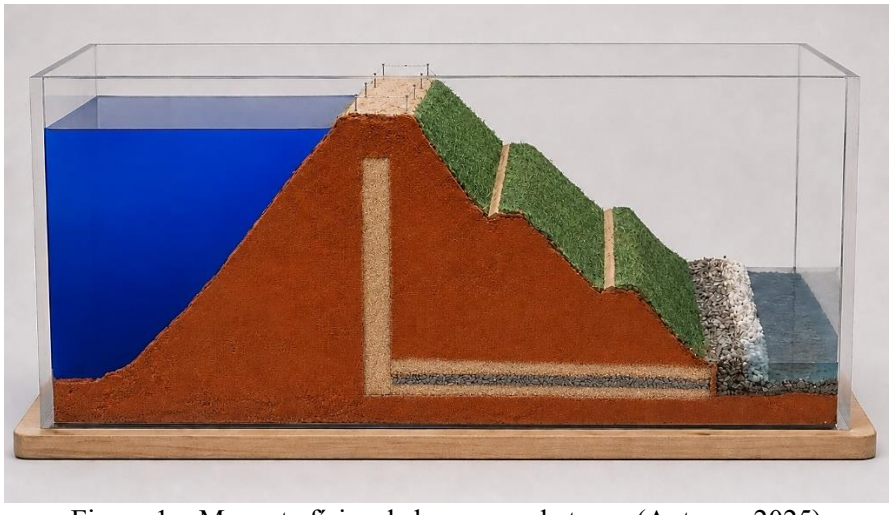


Figura 1 – Maquete física de barragem de terra. (Autores, 2025)

A busca por metodologias que superem o modelo expositivo tradicional tem levado pesquisadores a investigar ferramentas que coloquem os estudantes como protagonistas. Nesse contexto, a estratégia é utilizar a maquete como "materialização" de conceitos abstratos e a construção coletiva do conhecimento.

A possibilidade de uso da maquete como ferramenta de representação na engenharia, tem se mostrado um recurso didático poderoso em diversas áreas do conhecimento. Conforme Pitano e Roqué (2015), o uso de maquetes no ensino favorece a práxis, permitindo que o aluno visualize fenômenos que seriam de difícil compreensão em sala de aula.

A utilização da maquete, portanto, reside na sua capacidade de transformar a teoria abstrata em um objeto tangível, facilitando a apropriação do conhecimento espacial e estrutural (Simão, 2020). Saindo da área de engenharia civil e ingressando na área de ciências biológicas, Saraiva e Oliveira (2025) demonstram que a construção de modelos táteis de células atua como um substituto eficaz na ausência de microscópios.

Neste contexto, uma turma de alunos do curso de Engenharia Civil da PUC Minas, matriculados na disciplina de Mecânica dos Solos Aplicada teve a oportunidade de vivenciar uma aula sobre sistema de drenagem interna em barragem com uso da maquete em abril/2025 nas instalações do laboratório da empresa parceira: Diefra Engenharia e Consultoria Ltda, conforme mostra a Figura 2.



Figura 2 – Aula com uso de Maquete de Barragem (Autores, 2025)

2 METODOLOGIA

O protótipo da maquete (Figura 3) representa uma barragem de terra homogênea, com espaldares em solo argiloso; filtros vertical e horizontal; zonas de transição no filtro horizontal, do tipo sanduíche; dreno de pé; crista da barragem e bermas de alívio. A maquete tem as seguintes dimensões: comprimento total do maciço 1 m; altura máxima da maquete de barragem 0,33 m; largura da crista 0,07 m; inclinação do talude de montante na proporção 1V:1H (45°); inclinação do talude de jusante na proporção 1V:1H (45°).

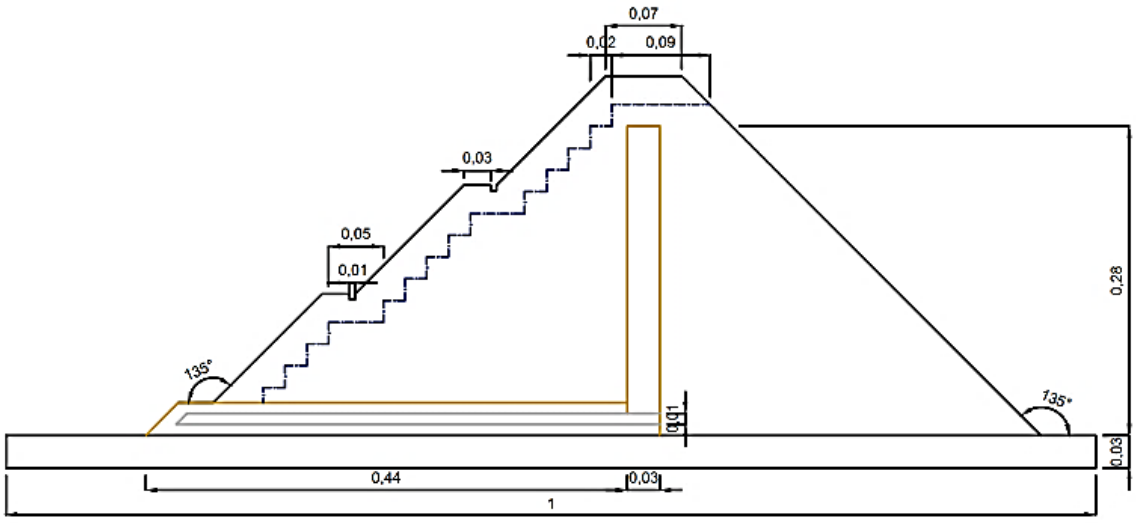


Figura 3 – Vista lateral do projeto da maquete de barragem de solo. Dimensões em metros, escala 1:1. (Autores, 2025)

A construção da maquete iniciou-se com a preparação da base da barragem em um tanque de vidro com base de chapa de aço, executada com solo argiloso disposto sobre uma placa de isopor, mantida afastada das paredes de vidro. Em seguida, procedeu-se à execução do filtro tapete, tipo sanduíche, constituído por três camadas, sendo duas camadas de areia e uma camada intermediária de pedrisco, conforme a Figura 4.



Figura 4 – Filtro Horizontal (tapete), tipo sanduiche. (Autores, 2025)

A construção do espaldar de montante foi realizada por meio da execução de camadas subsequentes de solo argiloso, com espessura aproximada de 1 cm, compactadas com o auxílio de um soquete cilíndrico. Entre as camadas de argila compactada, as superfícies entre as camandas foram previamente escarificadas como mostra na Figura 5, de modo a promover maior aderência e homogeneização entre as camadas. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de evitar a formação de caminhos preferenciais de percolação da água durante o enchimento do reservatório, contribuindo para a integridade hidráulica do maciço de solo.



Figura 5 – Escarificação do solo. (Autores, 2025)

Após finalizar a contrução do espaldar de montante, o dreno vertical de areia foi incluido para interceptar o fluxo descendente de água e direcioná-lo para o sistema de drenagem do filtro horizontal. Posteriormente, para finalizar o maciço de terra, foi feito a remoção dos excessos de solo, moldando os taludes para o formato jusante e montante, ilustrado na Figura 6. Posteriormente os taludes da maquete foram cobertos por vegetação sintética (Figura 7), para representar barragens reais onde a cobertura vegetal ajuda a evitar erosão superficial.



Figura 6 – Maquete de barragem sem acabamento. (Autores, 2025)



Figura 7 – Cobertura sintética no talude de jusante. (Autores, 2025)

Ao finalizar a construção da maquete, deu-se início ao enchimento do tanque com água (Figura 11). A partir dos parâmetros provenientes de ensaios laboratoriais, foi utilizado o software Slide2, versão 9.041 (Rocscience) para fazer a modelagem do maciço de solo produzido na maquete, com aplicação de um aumento de escala geométrica de 1:100, visando à análise de fluxo de percolação da água próximos da referida escala, devido à grandeza dos parâmetros geotécnicos identificados nos ensaios de caracterização dos materiais. As análises realizadas ao logo do Artigo, portanto, demosntram os dados obtidos pelo comportamento do maciço construído na maquete e modelado numericamente no software Slide2.

3 ANÁLISE GEOTÉCNICA DO MACIÇO DA MAQUETE

A análise de fluxo de água no interior do maciço de terra da maquete foi representada no modelo numérico, conforme descrito a sequir.

A modelagem numérica representativa da maquete utilizou o software Slide2 (Rocscience) com uma malha composta por 1.598 elementos finitos triangulares de seis nós, para melhor precisão na interpolação dos campos de deslocamento e de carga hidráulica, pois considera não apenas os vértices dos triângulos, mas também os pontos médios de cada lado dos triângulos.

Os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de caracterização do solo (Tabela 1), realizados em laboratório para a contrução da maquete, foram utilizados para a modelagem da maquete. Ressalta-se que, devido ao filtro horizontal, do tipo sanduíche, e o dreno de pé não representarem uma área significativa na maquete, seus dados foram estimados com base na respectiva classe de solo.

Tabela 1 - .Dados de entrada para a análise de fluxo de percolação

Classe de solo	Permeabilidade (cm/s)	Peso Específico dos Grãos (KN/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Umidade Ótima (%)
Argila Vemelha	$7{,}7 \cdot 10^{-7}$	17,85	44,9	24,1	27,8
Pedrisco	$1{,}78 \cdot 10^{-2}$	19,52	-	-	-
Areia Fina	$7{,}1 \cdot 10^{-3}$	19,03	-	-	-

Fonte: Ensaios realizados pela empresa Diefra Engenharia e Consultoria Ltda.

Para a fundação do maciço foi considerado solo argiloso e abaixo dele impermeável, influenciando o regime de fluxo e a dissipação de poropressões. Como cota de topo da barragem foi atribuída a cota da soleira do extravasor em 30,4 metros (escala 1:100), valor utilizado como referência para a carga hidráulica, mostrada na Figura 8.

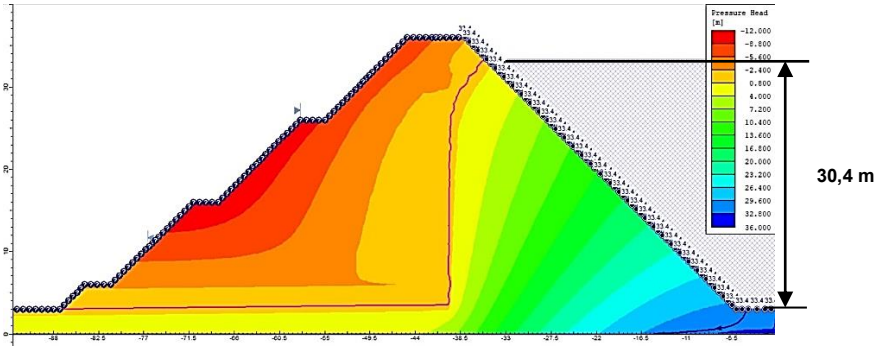


Figura 8 – Cota da carga hidráulica, escala 1:100 (30,4 m). (Autores, 2025)

Para fazer a análise do fluxo de percolação foi considerado um regime permanente, ou seja, em tempo infinito onde o sistema atinge o equilibrio hidráulico. Assim, inicialmente foram testadas 10 linhas de rede de fluxo além de anisotropia entre a permeabilidade horizontal e vertical na proporção de 0,1; indicando que a permeabilidade vertical é equivalente a um décimo da permeabilidade horizontal, mas, para fins acadêmicos e para a representação gráfica mais clara e didática, foi desconsiderada a anisotropia e houve um aumento para 13 linhas na rede de fluxo de água (Figura 9).

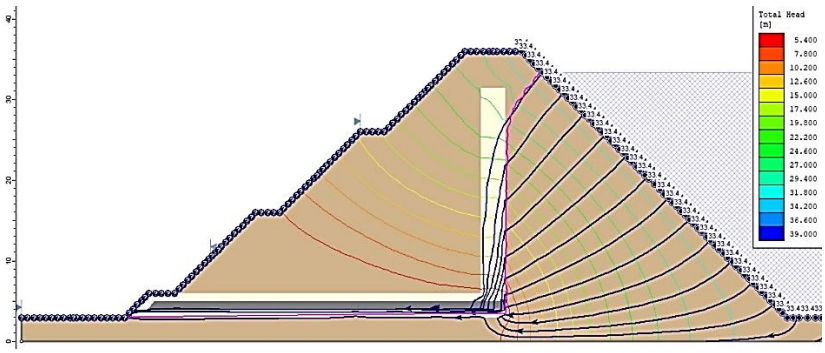


Figura 9 – Análise do fluxo de percolação com 13 linhas na rede de fluxo de água. (Autores, 2025)

A linha ‘vertical’ em cor magenta no modelo (Figura 10) indica o nível de saturação do maciço, ou seja, abaixo dessa linha o solo encontra-se totalmente saturado. A partir dessa delimitação foi possivel avaliar a extensão das zonas saturadas e sua relação com a estabilidade da barragem.

Após traçar as linhas de fluxo de percolação foi feita a análise do fluxo transiente no primeiro enchimento, para esta etapa foi utilizado a variação da cota da carga hidráulica de 30,4 m em função do tempo. O primeiro enchimento do reservatório foi modelado com duração total de 24 horas, com uma taxa de enchimento de aproximadamente 1,25 m por hora. A variação da carga hidráulica ao longo do tempo foi dividida em três etapas de 10 m cada, de modo que a cada 8 horas ocorria uma elevação de 10 m no nível do reservatório (escala 1:100).

Após estabilizar a carga hidráulica foram consideradas as seguintes etapas de análises de comportamento do maciço em relação à percolação de água, a saber: 0,3 dia; 0,6 dia; 1 dia; 2 dias, 1 ano; 2 anos; 4 anos; 8 anos; 16 anos; 32 anos, 64 anos e 100 anos, com o objetivo de observar a evolução da saturação do maciço conforme a Figura 10; a qual mostra as linhas escuras do avanço da saturação que repressentam as superfícies freáticas no maciço (espaldar de montante). Na Figura 10, obseva-se que o sistema de filtros vertical e horizontal estão funcionam adequadamente, não havendo elevação de superfície freática no espaldar de jusante da barragem. Portanto, a barragem possui apropriado controle geotécnico sem haver elevação de poropressão no maciço no espaldar de jusante.

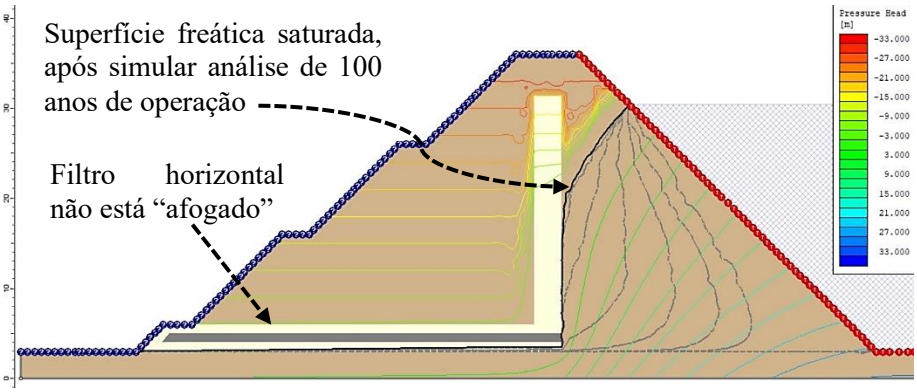


Figura 10 – Análise de saturação do maciço da barragem ao londo do tempo, até 100 anos. (Autores, 2025)

A representação da modelagem numérica com apoio do software foi também observada no modelo físico (maquete) pelo adequado funcionamento dos filtros vertical e horizontal, onde observou-se visualmente que não houve saturação do solo acima do filtro vertical (elevação de superfície freática), no espaldar de jusante da maquete da barragem de terra, conforme Figura 11.

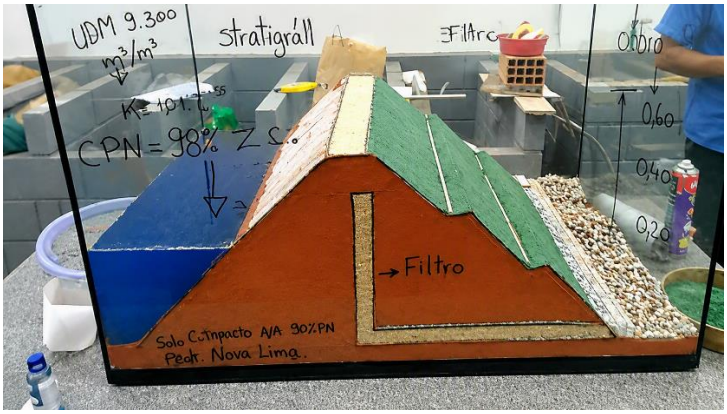


Figura 11 – Enchimento do reservatório da maquete da barragem. (Autores, 2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de facilitar a visualização do comportamento hidráulico de uma barragem de terra, no sistema de drenagem interna, foram utilizados a construção de uma maquete de barragem de terra homogênea (Figuras 1 e 3) e a análise com apoio do software Slide2, na versão 9.041 da empresa Rocscience.

A maquete e o modelo numérico evidenciaram o adequado funcionamento do sistema de filtros vertical e horizontal, uma vez que se observou que o filtro horizontal não opera em condição afogada, pois a propagação da saturação em direção à jusante é limitada. Esse comportamento contribui de forma significativa para a redução das poropressões nos taludes do maciço de jusante (espaldar de jusante). (Pinto, 2015).

A análise da carga hidráulica e fluxo de água no interior do maciço de solo por meio do software Slide2 mostra que os resultados são favoráveis, devido a baixa permeabilidade do solo argiloso ser 7 x 10^{-7} cm/s, o

que resultou em evolução lenta da saturação no maciço, sendo necessários 100 anos para que o espaldar de montante fosse saturado em sua plenitude.

Além disso, a construção da maquete com execução de camadas subsequentes de solo argiloso escarificadas entre si, com inclusão de dreno vertical e horizontal demonstrou a efetividade em evitar a formação de caminhos preferenciais de percolação da água durante o enchimento do reservatório, contribuindo para a integridade hidráulica do maciço de solo.

A partir dos resultados obtidos com a construção da maquete é possível usá-la em aula prática sobre importantes estruturas no maciço de barragem, tais como sistemas de filtros vertical e horizontal (Figura 2).

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da maquete física de uma barragem de terra, aliado à análise geotécnica por meio do software Slide2 (Rocscience), mostrou-se uma ferramenta eficaz para a compreensão dos fenômenos hidráulicos em estrutura geotécnica composta de solo argiloso. A maquete permitiu a visualização prática dos mecanismos de percolação do fluxo de água no maciço de solo, da atuação dos sistemas de drenagem interna e da formação das zonas saturadas no interior do maciço terroso, pelo funcionamento dos filtros de drenagem.

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas do maciço da maquete confirmaram a relevância de caracterização geotécnica adequada dos materiais, bem como uso de filtros de drenos internos, para o controle da percolação de água no interior da estrutura geotécnica (barragem de terra homogênea).

Além disso, a avaliação da evolução da saturação do maciço da barragem ao longo do tempo destacou a importância da análise de longo prazo para a segurança de barragens de terra, uma vez que a baixa permeabilidade dos solos argilosos pode resultar em processos lentos de dissipação de poropressões.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre modelos físicos e simulações numéricas permite a visualização do comportamento de rede de fluxo de água no interior de maciços de barragem de terra, o que proporciona a compreensão dos fatores que condicionam o desempenho e hidráulico em barragem de terra.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da empresa Diefra Engenharia e Consultoria LTDA no desenvolvimento da maquete, pelo fornecimento dos dados de ensaios necessários, a Thiago Cruz Bretas pelo apoio nas análises numéricas no software Slide2 e à PUC Minas, pela licença do software Slide2 fundamentais para este trabalho.

REFERÊNCIAS

Cruz, Paulo Teixeira da. (2004) *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Massad, Faiçal. (2010) *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos: São Paulo: Oficina de Textos.

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

Pitano, S. C.; Roqué, B. B. (2015) O uso de maquetes no processo de ensino-aprendizagem segundo licenciandos em Geografia. Revista Educação (Unisinos), v. 19, n. 2, p. 317-326

Saraiva, T. C. da S.; Oliveira, J. D. de. (2025) Utilização de maquetes na prática pedagógica para o ensino de biologia celular. Ensino Revista, v. 32, p. 1-12

Simão, T. R. S. (2020) O uso da maquete como prática pedagógica no curso de Design de Interiores.