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/COBRAMSEG2026.3/22

MODELOS REDUZIDOS DE BARRAGENS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE HIDRÁULICA E GEOTECNIA

Bruno Rogério da Hora Lôbo
Docente, Universidade Federal doTocantins, Palmas, bruno.lobo@uft.edu.br

Vanderley Pereira dos Santos Júnior
Estudante, Universidade Federal do Tocantins,Palmas, vanderley.junior@uft.edu.br

João Vitor Rocha Dias
Estudante, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, dias.joao@uft.edu.br

Iugui Fernandes Braga Veloso
Estudante, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, iugui.braga@mail.uft.edu.br

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo a fabricação e utilização de modelos reduzidos de barragens, visando enriquecer o ensino na disciplina de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Tocantins (UFT) por meio de uma ferramenta prática, visual e tecnicamente fundamentada. Para a construção dos modelos, utilizaram-se aquários de vidro com espessura de 5 mm e dimensões de 400 × 700 × 300 mm, devidamente adaptados para permitir a drenagem controlada. Os compartimentos internos foram preenchidos com materiais selecionados (areia, brita, pedrisco e bentonita) para representar o enrocamento, os sistemas de drenagem, o núcleo e demais elementos constitutivos de uma barragem. A dinâmica da água no interior do modelo foi evidenciada por meio de corante à base de permanganato de potássio, possibilitando a visualização das linhas de fluxo e dos padrões de circulação interna. Através dessas simulações, observaram-se fenômenos fundamentais como a formação da rede de fluxo, processos de percolação, comportamento em zonas saturadas e não saturadas e o desenvolvimento do gradiente hidráulico. O experimento também permitiu demonstrar conceitos como o princípio das tensões efetivas, a poropressão no talude de jusante e os efeitos decorrentes de obstruções nos sistemas de drenagem. Em síntese, os modelos reduzidos desempenharam papel essencial ao transformar conceitos teóricos em fenômenos observáveis, contribuindo significativamente para a formação técnica dos estudantes e para o fortalecimento das práticas de ensino em engenharia de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Reduzidos, Barragens de Terra, Ensino de Geotecnia, Rede de Fluxo.

ABSTRACT: The objective of this study was the manufacture and use of scale dam models to enrich the teaching of the Hydraulic Structures course at the Federal University of Tocantins (UFT) through a practical, visual, and technically grounded tool. The models were constructed using 5 mm thick glass tanks with dimensions of 400 × 700 × 300 mm, appropriately adapted to allow controlled drainage. The internal compartments were filled with selected materials (sand, gravel, crushed stone, and bentonite) to represent the rockfill, drainage systems, core, and other constitutive elements of a dam. The water dynamics within the scale model were evidenced using a potassium permanganate dye, enabling the visualization of flow lines and internal circulation patterns. Through these simulations, it was possible to observe fundamental phenomena such as flow net formation, seepage processes, behavior in saturated and unsaturated zones, and the development of the hydraulic gradient. The experiment also allowed for the demonstration of concepts such as the principle of effective stresses, pore-pressure analysis at the downstream slope, and the effects resulting from the malfunction of drainage systems. In summary, the scale models played an essential role in transforming theoretical concepts into observable phenomena, significantly contributing to the technical training of students and strengthening teaching practices in dam engineering.

KEYWORDS: Scale Models, Earth Dams, Geotechnical Engineering Education, Flow Net.

1 INTRODUÇÃO

A engenharia de barragens é uma área intrinsecamente interdisciplinar, exigindo o domínio conjunto de conceitos de hidráulica, geotecnia e geologia. Como destaca Gaioto (1982), o projeto de uma barragem não pode ser visto de forma isolada, sendo o resultado da integração de diversas especialidades para garantir a segurança da estrutura. Nesse cenário, o ensino de graduação enfrenta o desafio de transpor a barreira teórica para a compreensão prática de fenômenos como a percolação.

O estudo do regime de percolação em meios porosos constitui um dos pilares da engenharia geotécnica e de barragens. No entanto, a compreensão dos fenômenos de fluxo bidimensional e a visualização das redes de fluxo, regidas pela equação de Laplace, muitas vezes apresentam-se de forma abstrata no ambiente de sala de aula. Segundo Pinto (2006), a determinação da linha freática e a distribuição das pressões neutras (u) são fundamentais para o cálculo das tensões efetivas e, consequentemente, para a verificação da estabilidade de taludes.

A complexidade teórica no ensino de barragens reside, primordialmente, na dificuldade de visualização de fenômenos que ocorrem no interior do maciço, como a formação da linha freática e o desenvolvimento das redes de fluxo. Frequentemente, o aluno encara tais conceitos de forma puramente matemática ou por meio de softwares de modelagem, o que pode gerar uma 'lacuna cognitiva' entre as equações de Laplace e a realidade física do campo. O uso de modelos reduzidos atua como o elo de conexão nesse processo, transformando variáveis abstratas em fenômenos observáveis em tempo real. Ao visualizar a progressão do corante através dos diferentes materiais (núcleo impermeável vs. zonas de drenagem), o discente deixa de apenas aceitar a teoria para compreendê-la visualizando o fenômeno. Essa transição do abstrato para o concreto facilita a retenção do conhecimento, permitindo que o aluno antecipe comportamentos críticos, como o surgimento de zonas de saturação e o potencial de piping, consolidando uma intuição prática essencial para a segurança e o projeto de obras hidráulicas.

O curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins (UFT), por meio da disciplina de Obras Hidráulicas, buscou integrar a prática laboratorial ao ensino teórico através da construção de modelos físicos. O presente trabalho detalha a fabricação e a utilização de um aparato experimental de baixo custo, composto por um aquário adaptado e materiais zonados, visando demonstrar a dinâmica da água no interior de uma barragem. A simulação permitiu analisar não apenas a formação da rede de fluxo, mas também o efeito de sistemas de drenagem e as consequências de seu mau funcionamento, fortalecendo a formação técnica e a percepção crítica dos discentes sobre a segurança de barragens.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A solução de problemas de percolação em meios porosos é fundamentalmente regida pela Equação de Laplace, que descreve o fluxo permanente bidimensional em meios isotrópicos e homogêneos. Matematicamente, a solução dessa equação diferencial resulta em um par de funções ortogonais que formam a Rede de Fluxo: as linhas de fluxo, que representam a trajetória real das partículas de água através dos vazios do solo, e as linhas equipotenciais, que conectam pontos de mesma carga hidráulica.

O traçado dessas redes, tradicionalmente realizado pelo método gráfico de Casagrande, permite a determinação de parâmetros críticos para a segurança de barragens, como a vazão de percolação, as pressões neutras e os gradientes hidráulicos de saída. A correta interpretação dessas linhas é o que permite ao engenheiro prever a posição da linha freática e dimensionar dispositivos de drenagem capazes de interceptar o fluxo antes que este emerja no talude de jusante. Sem o controle adequado por meio desses dispositivos, a ascensão da linha freática e o aumento das poropressões reduzem a tensão efetiva do solo, podendo levar à instabilidade por escorregamento ou ao fenômeno de erosão interna (*piping*).

2.1 Fluxo em meios porosos e redes de fluxo

A compreensão do fluxo de água através de meios porosos é fundamentada na solução da equação de Laplace. Segundo Craig (2004), a rede de fluxo obtida a partir dessa equação fornece uma interpretação visual

indispensável para o cálculo de vazões e pressões neutras. Segundo Pinto (2006), a solução gráfica desta equação resulta na rede de fluxo, composta por linhas de fluxo e linhas equipotenciais que se interceptam ortogonalmente. A correta determinação da superfície freática é o primeiro passo para a análise de pressões neutras e da vazão de percolação (q).

O princípio das tensões efetivas, proposto por Terzaghi, estabelece que a resistência ao cisalhamento do solo depende da tensão transmitida pelos contatos entre os grãos. Como apontado por Das e Sobhan (2019), o aumento da poropressão (u) decorrente do fluxo de água reduz a tensão efetiva, o que pode comprometer a estabilidade do talude de jusante ou causar o fenômeno de liquefação por gradiente hidráulico de saída elevado.

3 METODOLOGIA

A fase experimental consistiu na montagem de um modelo físico em escala reduzida, buscando simular as condições de percolação e estabilidade de uma barragem zonada. O ensaio foi conduzido em um reservatório de vidro com espessura de 5 mm e dimensões externas de 400 × 700 × 300 mm, equipado com sistema de drenagem no talude de jusante. Cabe ressaltar que os modelos confeccionados tiveram caráter estritamente didático e demonstrativo. Portanto, não houve o objetivo de reproduzir as escalas de uma barragem real, tampouco a proporcionalidade dos materiais constituintes. A prioridade do experimento foi a observação qualitativa dos fenômenos de percolação e a visualização física das linhas de fluxo, facilitando a compreensão teórica dos alunos sobre o comportamento hidráulico em maciços terrosos.

A dinâmica da água e a formação da rede de fluxo foram evidenciadas mediante a introdução pontual de permanganato de potássio. O corante foi aplicado em pontos estratégicos do reservatório de montante, durante o processo de compactação, a cada 1,5 cm de altura, desde a base até o topo.

3.1 Materiais utilizados

A seleção dos materiais visou representar, qualitativamente, os diferentes coeficientes de permeabilidade (k) encontrados em estruturas reais, no entanto é importante destacar que os experimentos possuem caráter estritamente didático, não visando a reprodução rigorosa de escalas ou materiais de uma barragem real. No entanto, os modelos permitiram observar fenômenos críticos discutidos por Ortigão (2007), como a formação da linha freática e a eficiência dos sistemas de drenagem, que são vitais para evitar a instabilidade por percolação descontrolada.
Os materiais utilizados, bem como, as funções que cada um exerceu nas simulações são apresentados abaixo:

- **Corpo da barragem (Areia)**: Utilizou-se areia de granulometria média para compor o corpo do maciço. A escolha deveu-se à sua permeabilidade intermediária, permitindo que as linhas de fluxo (marcadas pelo permanganato de potássio) se desenvolvessem com rapidez suficiente para serem visualizadas e medidas dentro do tempo de uma aula prática;
- **Proteção do talude de montante (Brita e Pedrisco)**: Estes materiais foram aplicados na face do talude de montante, simulando um enrocamento de proteção (*rip-rap*). Sua função didática foi demonstrar a proteção contra a erosão causada pela oscilação do nível do reservatório e pela ação de batimento de ondas (simulada mecanicamente);
- **Sistemas de drenagem (Brita e Pedrisco)**: Foram configurados drenos verticais (chaminé), tapetes drenantes horizontais e drenos de pé. A alta porosidade destes materiais permitiu observar a "quebra" imediata do potencial hidráulico ao atingirem o sistema de drenagem;
- **Impermeabilização da interface e do núcleo(Bentonita)**: Devido à rugosidade nula do vidro, utilizou-se uma pasta de bentonita para selar o fundo do reservatório. Essa medida evitou o fluxo preferencial pelo contato solo-vidro, forçando a água a percorrer o corpo da barragem. A bentonita também foi utilizada como material do núcleo, simulando assim o barramento dos modelos reduzidos que simulavam barragens de enrocamento/areia com núcleo impermeável

A Figura 1 apresenta os materiais utilizados durante a confecção dos modelos reduzidos das barragens.



Figura 1. Materiais utilizados na montagem do modelo reduzido: (a) Areia média para o corpo do maciço; (b) Pedrisco para a composição do dreno horizontal de jusante já lançado em cima da base de bentonita.

3.1 Tipos de barragens simuladas

A definição das tipologias construídas pelos estudantes baseou-se nas configurações clássicas de zoneamento de maciços. Segundo Assis et al. (2003), a inclusão de elementos como núcleos de baixa permeabilidade e sistemas de drenagem interna (drenos de pé e horizontais) é a estratégia fundamental para o controle da linha freática e a mitigação de pressões neutras excessivas. Assim, os modelos reduzidos buscaram replicar essas soluções para observar, em escala didática, a eficácia de cada dispositivo no controle do fluxo.

A metodologia utilizada em sala de aula consistiu na confecção, pelos estudantes, de quatro tipologias distintas de modelos reduzidos, visando comparar a eficiência dos sistemas de drenagem e vedação. Foram montados modelos simulando: (a) barragem com núcleo argiloso, (b) barragem com sistema combinado de dreno de pé e dreno horizontal, (c) barragem apenas com dreno horizontal e (d) barragem apenas com dreno de pé. A base de todos os modelos foi selada com uma camada de bentonita hidratada e compactada, garantindo a estanqueidade da fundação e direcionando o fluxo exclusivamente pelo corpo do maciço. A Figura 2 apresenta alguns dos modelos confeccionados.

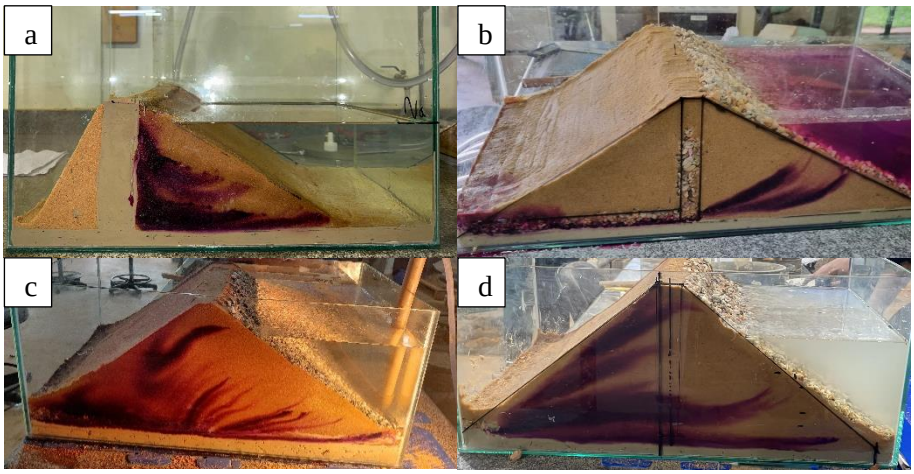


Figura 2. Diferentes tipos de barragens simuladas: (a) Núcleo argiloso; (b) Dreno horizontal e vertical; (c)Dreno horizontal; (d) Dreno de pé.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A prática laboratorial proporcionou uma visualização direta dos conceitos teóricos de redes de fluxo. Através da aplicação do permanganato de potássio, os estudantes puderam observar a formação das linhas de

fluxo em tempo real. A trajetória do corante evidenciou como o fluxo busca o caminho de menor resistência, desenhando as curvas que, na teoria, são representadas ortogonalmente às linhas equipotenciais.

Durante a confecção dos modelos, o processo de tentativa e erro foi um componente pedagógico central. Em diversos grupos, ocorreram falhas na execução dos canais de drenagem ou a obstrução inadvertida dos drenos de jusante com material fino. Esse erro de execução permitiu visualizar cenários críticos em barragens reais: o acúmulo de poropressão no corpo da estrutura e o mal funcionamento/dimensionamento dos materiais que compõem os drenos. A Figura 3 apresenta esses equívocos que contribuiram com o enriquecimento da discussão em laboratório.



Figura 3. Dificuldades durante a simulação: (a) Intupimento do dreno que gerou ascensão da água na face de jusante; (b) Mal dimensionamento do dreno vertical que conduziu a linha freática ao talude de jusante.

Dessa maneira ficou evidenciado que, com o dreno obstruído, a linha freática não era rebaixada como previsto. O resultado foi a ascensão da água misturada com corante na face do talude de jusante, demonstrando claramente aos alunos o risco de saturação da face de jusante e a consequente redução da tensão efetiva do solo, o que poderia levar a um escorregamento ou ao início de um processo de erosão interna (*piping*).

4 CONCLUSÃO

O uso de modelos reduzidos demonstrou ser uma estratégia didática superior à abordagem puramente analítica ou computacional para o ensino de hidráulica e geotecnia. A prática permitiu que os discentes transitassem das equações de Laplace para a observação física dos fenômenos de percolação. A visualização das linhas de fluxo e a discussão sobre o posicionamento das equipotenciais consolidaram o entendimento sobre a distribuição de potenciais hidráulicos no maciço. Mais do que observar sucessos, a vivência dos erros construtivos, como a obstrução de drenos e o subsequente surgimento de poropressões indesejadas na face de jusante, conferiu aos alunos uma percepção crítica sobre a importância do rigor técnico na execução de sistemas de drenagem. Em suma, o modelo reduzido funcionou como um simulador de campo, onde a física do solo se manifestou visualmente, preparando melhor os futuros engenheiros para a interpretação de fenômenos de percolação e segurança de barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, A. P.; Hernandez, H. M.; Colmanetti, J. P. *Apostila de Barragens*. Brasília: Universidade de Brasília (UnB), Publicação G.AP-AA006/02, 2003.

CRAIG, R. F. Craig's Soil Mechanics. 7. ed. London: Spon Press, 2004.

Das, B. M. & Sobhan, K. (2019). Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução da 8. ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning.

Gaioto, N. *Barragens de Terra e Enrocamento*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), 1982.

ORTIGÃO, J. A. R. Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

Pinto, C. S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos.