

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/67

Fluxo em Modelo Reduzido de Barragem de Terra: um Comparativo Entre Solução por MEF e Experimental

Laiânderson da Silva Leal

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, laiandersoneng@gmail.com

Carina Silvani

Professora na Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Pedro Raimundo Santana Junior

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, engpejota@gmail.com

Alisson do Nascimento Lima

Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, alissonnascimentolim@gmail.com

RESUMO: Barragens têm sido um importante recurso para o desenvolvimento da humanidade desde o início da civilização. A segurança dessas estruturas deve ser avaliada continuamente para garantir sua estabilidade. Deste modo, um dos principais fenômenos deflagradores de rupturas em barragens é a percolação excessiva de água, que podem afetar a estabilidade da estrutura, causando erosão na base, danificando a camada protetora, levando a perda significativa de água e eventualmente seu colapso. Nesta perspectiva, o presente estudo teve como objetivo analisar e comparar por meio de modelos reduzidos e modelos numéricos, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), a percolação de água no maciço de uma barragem de terra, observando o comportamento das linhas de fluxo e quantificação de vazão. Assim, adotou-se uma abordagem que avaliou modelos reduzidos com e sem elementos de drenagem interna, em escala reduzida, e posteriormente os mesmos foram modelados numericamente no SEEP/W. Os resultados avaliaram a quantificação das vazões percoladas e variação da linha freática. Assim observou-se que as posições das linhas freáticas nos diferentes modelos apresentaram coincidência, já as vazões percoladas se mostraram distintas. Por fim, observou-se que modelos reduzidos contribuem significativamente para compreensão do fluxo em barragens de terra, e que os filtros desempenham um papel importante no controle da linha freática.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de terra, Percolação da água, Modelo reduzido, Análise de fluxo.

ABSTRACT: Dams have been an important resource for the development of humanity since the beginning of civilization. The safety of these structures must continually be assessed to ensure their stability. Therefore, one of the main phenomena that triggers dam failures is excessive water percolation, which can affect the stability of the structure, causing erosion at the base, damaging the protective layer, leading to significant loss of water and eventually its collapse. From this perspective, the present study aimed to analyze and compare, through reduced models and numerical models, using the Finite Element Method (FEM), the percolation of water in the mass of an earthen dam, observing the behavior of the flow lines and flow quantification. Thus, an approach was adopted that evaluated reduced models with and without internal drainage elements, on a reduced scale, and later they were modeled numerically in SEEP/W. The results evaluated the quantification of percolated flows and variation in the water table. Thus, it was observed that the positions of the phreatic lines in the different models showed considerable coincidence, while the percolated flows were different. Finally, it was observed that reduced models contribute significantly to understanding the flow in earthen dams, and that filters play an important role in controlling the water table.

KEYWORDS: Earth dam; Water percolation; Reduced model; Flow analysis.

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas bem conhecidas pela humanidade desde sua antiguidade têm como objetivo interceptar o curso d'água a fim de reter uma determinada quantidade de água, de modo a se obter uma vazão de regularização ao longo da sazonalidade das precipitações. O uso desse recurso hídrico pode atender diversas finalidades, tais como o abastecimento de água, irrigação, transporte, lazer entre outras aplicações (Quintas, 2002). Logo, dada tal importância, as análises a respeito de segurança das barragens devem ser continuamente estudadas e avaliadas, pois mesmo sendo estruturas com comportamento bastante estudado, estas ainda apresentam rupturas, gerando consideráveis danos socioeconômicos, e perdas de vidas humanas (Huang *et al.*, 2017).

Apresentar condições adequadas de funcionalidade (represamento), mas também de segurança deve ser mandatório em projeto de barragens. No que se refere às barragens de terra, a sua estabilidade é afetada por diferentes fatores dos quais o mais importante é a percolação de água pelo corpo da barragem (Amnyattala; Rezaie, 2018). Em consonância a isso, a água que percola pode danificar a camada protetora dos taludes, tornando-a mais suscetível a futuros danos. Em certos casos a percolação também pode levar a uma perda significativa de água, afetando a eficiência da barragem como um recurso hídrico.

Segundo Eduardo e Nogueira (2019), o fluxo de água pode influenciar todo o comportamento geotécnico do solo, tais como cisalhamento, permeabilidade, expansividade, e tensões efetivas. Um grande número de rupturas de barragens de terra ocorre devido à falta de controle de fluxo. A água se infiltra pelo maciço da barragem, promovendo o arraste ou carregamento das partículas, o que acaba por gerar erosão na base e/ou no corpo da barragem levando a falhas muitas vezes catastróficas. Deste modo, análises de percolação são fundamentais para que se torne possível observar a distribuição das poropressões, linha piezométrica e o cálculo das vazões em diferentes trechos da barragem, auxiliando assim na análise de estabilidade, dimensionamento de sistemas de drenagem e de tapetes impermeabilizantes (Massad, 2010; Sandroni; Guidicini, 2022).

Dessa forma, baseando-se no avanço tecnológico das últimas décadas, métodos computacionais para suporte na análise e estudo de fluxo em barragens se tornaram mais presentes, como os Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é um método numérico que divide o material, no caso a barragem, em pequenos elementos, ou seja, elementos finitos, que são usados para representar a barragem em termos matemáticos. Baseando nisso, a percolação da água é modelada por meio da resolução de equações diferenciais de fluxo com base nas propriedades físicas do solo, incluindo permeabilidade e densidade, como também nas condições de contorno, que descrevem as condições ao longo da superfície da barragem (Abokwiek *et al.*, 2022; Haghdoost *et al.*, 2023) Atualmente, muitas das análises de fluxo são feitas por esse método, assim, o antigo traçado manual, hodiernamente, é feito somente em ambientes acadêmicos ou mesmo para realizar estimativas. Para que os métodos numéricos sejam eficazes, segundo Freitas; Silva e Menezes (2016), é necessária uma boa escolha da malha de transição, sendo a validação deste método efetuada através da análise de itens, tais como, qualidade da malha de transição, da solução numérica e do processo de convergência.

Aliado a isso, modelos reduzidos são também utilizados como para análise do comportamento final da barragem em diferentes situações, como por exemplo a tem-se aquele utilizado para simular a Usina de Belo Monte, localizada no Rio Xingu, Pará (Muller *et al.*, 2017). Sendo assim, um dos usos é visualizar a percolação da água na barragem, permitindo simulações e análises técnicas, além de ser instrumento didático relevante para a temática. Além disso, os modelos reduzidos permitem a análise de diferentes cenários e condições, incluindo mudanças na quantidade e pressão da água, variações na permeabilidade do solo, efeitos de drenagem etc. (Massad, 2010).

Nesta perspectiva, a presente pesquisa teve como objetivo analisar, por meio de alguns modelos reduzidos, a percolação de água no maciço de uma barragem de terra, observando o comportamento das linhas de fluxo e seu comportamento com relação a modelagem numérica, por meio do método dos elementos finitos, do modelo reduzido.

2 METODOLOGIA

A metodologia concentrou-se em duas etapas: uma experimental e outra numérica. Na primeira etapa se deteve a construção da estrutura suporte ao modelo reduzido, caracterização dos materiais, a

concepção e construção dos modelos reduzidos de barragem, e por fim a mensuração o acompanhamento qualitativo (linhas de fluxo) e quantitativo (vazões). Na segunda etapa os mesmos modelos concebidos experimentalmente, foram simulados por método numéricos para posterior comparação com os parâmetros obtidos experimentalmente.

2.1 Construção do Recipiente Impermeabilizado

Para realizar os experimentos, foi construído um recipiente de madeira impermeabilizado, com saídas de água nas laterais controladas por registros e um vidro transparente para observação do fluxo pelo modelo reduzido de barragem. O projeto, com dimensões em centímetros, está apresentado na Figura 1.

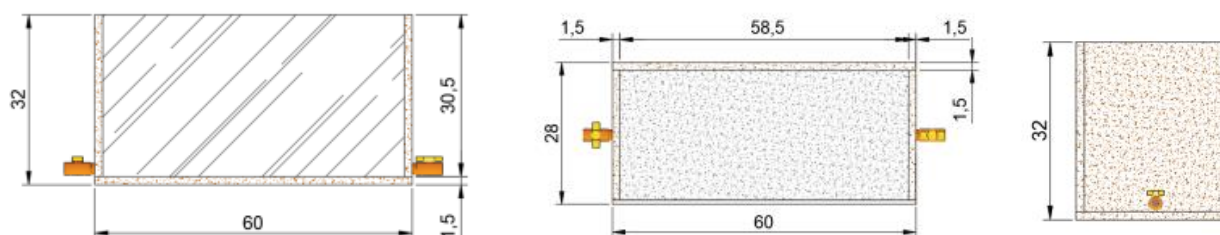


Figura 1. Projeto do recipiente para o modelo reduzido de barragem de terra, vista frontal, superior e lateral, respectivamente

2.2 Propriedades dos Materiais do Corpo da Barragem e do Filtro

Para a execução dos experimentos em modelo reduzido foram utilizados dois tipos distintos de materiais. Para o corpo da barragem, optou-se por empregar uma areia, enquanto para a camada de filtro foi utilizado pedrisco. O uso da areia, apesar de conhecido não ser indicado para a construção de barragens, se deu devido buscar uma maior velocidade no fluxo e na obtenção dos resultados pensando na praticidade do experimento.

A areia utilizada possui granulometria passante na peneira de abertura 1,180mm e retida na peneira de abertura de 0,075mm. Já para o material do filtro, o material nomeado como pedrisco possui granulometria passante na peneira de abertura 2,800mm e retido na ABNT#1,180mm. A granulometria desses materiais foi obtida conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).

O coeficiente de permeabilidade (k) para areia e o pedrisco foi determinado de forma empírica partindo da fórmula proposta por Hazen (1911), conforme Equação 1, e exposto por Livia *et al.*, (2018), que relaciona o diâmetro do material com sua condutibilidade hidráulica, isto é, aplicado em areias saturadas. Para fins de comparação, foi também utilizado o modelo de Alyamani e Şen (1993) (Equação 2).

$$k = CH \times (D_{10})^2 \quad (1)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

CH = coeficiente (habitualmente, emprega-se 100);

D_{10} = diâmetro efetivo do solo (cm).

$$k = 1,505 \cdot (I_o + 0,025 \cdot (D_{50} - D_{10}))^2 \quad (2)$$

Em que:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

I_o = interseção (em milímetros) criada ao conectar D_{50} e D_{10} e projetá-la no eixo do diâmetro das partículas;

D_{10} = diâmetro efetivo do solo (cm).

D_{50} = diâmetro efetivo do solo (cm).

Assim, partindo da metodologia descrita, foi obtido o coeficiente de permeabilidade para ambos, para utilizá-los posteriormente na simulação do software.

2.3 Montagem dos Modelos Reduzidos e análise de fluxo de forma experimental

Com o propósito de verificar distintos modelos de barragens de terra, foram escolhidos quatro tipos para análise. Abrangendo desde a barragem de terra homogênea sem filtro (Figura 2a) até as variantes que incorporam diferentes tipos de filtros, incluindo a barragem com filtro de pé (Figura 2b), com filtro horizontal (Figura 2c) e, por fim, com filtro vertical (Figura 2d).

Para análise da rede de fluxo, a Figura 2 ilustra o projeto em cada caso, bem como o nível que água atingiu em regime permanente. Por fim, realizou-se a gravação do fluxo de água e registro fotográfico da rede de fluxo para posterior comparação com a rede de fluxo obtida por elementos finitos.

Para medir a vazão de percolação em cada modelo reduzido de barragem, foi aplicado um fluxo constante de água. Em seguida, utilizou-se uma proveta para registrar a vazão em um intervalo de tempo específico. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada barragem.

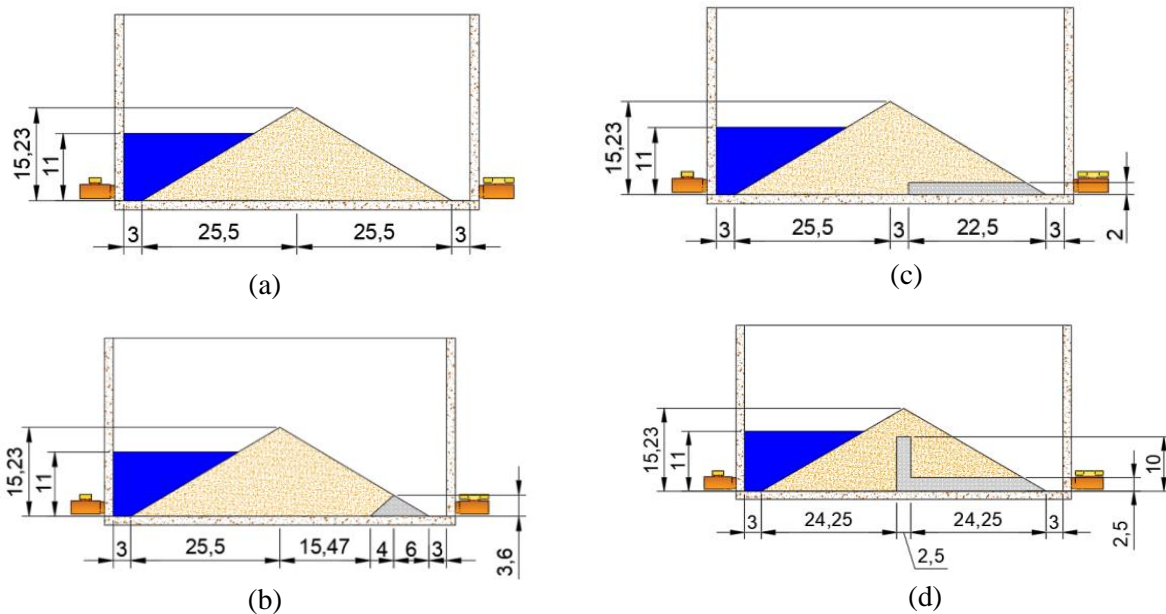


Figura 2. Barragem homogênea (a), com filtro de pé (b), com filtro horizontal (c) e barragem com filtro vertical (d). Escala: cm.

Por fim, com auxílio do software SEEP/W (Versão estudante), extensão do Geostudio, as seções transversais das barragens foram desenhadas e foi definida a grade de elementos finitos, conforme exemplificado na Figura 3, e posteriormente executada a solução numérica no software. Assim, foram obtidas todas as linhas de fluxo para cada modelo reduzido, representado o exemplo da Figura 3 pela linha tracejada em azul, e obtida a vazão calculada na extremidade jusante do modelo. E por fim, comparou-se as linhas de fluxo obtidas experimentalmente com as obtidas pelo método dos elementos finitos.

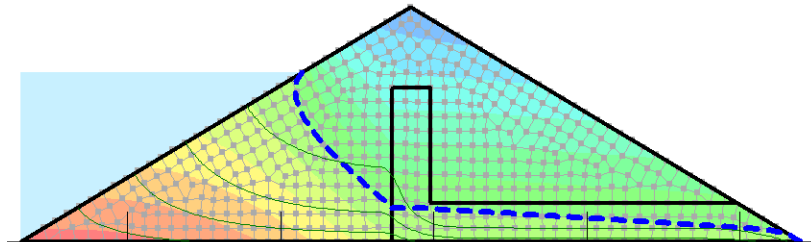


Figura 3. Exemplo de malha de elementos finitos utilizada.

3 RESULTADOS

Os resultados e discussões são apresentados tanto para os modelos experimentais em escala reduzida quanto para as simulações numéricas. Foram desenvolvidas discussões com base nos resultados a respeito,

principalmente, do uso dos diferentes tipos de filtros em barragens de terra e como eles podem afetar o fluxo e a estabilidade. Não obstante, também foram comparadas a estimativa de parâmetros de permeabilidade utilizados nas simulações numéricas, e conseqüentemente na obtenção da vazão, com a vazão observada experimentalmente.

3.1 Propriedade Dos Materiais

Para obter o coeficiente de permeabilidade da areia, foram aplicados dois métodos distintos: o primeiro método foi baseado na abordagem de Hazen (1911), e o segundo na metodologia proposta por Alyamani e Şen (1993). Partindo disso, os resultados dos coeficientes de permeabilidade obtidos em cada método, bem como outros dados importantes nos experimentos, foram elencados na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros obtidos.

Materiais	D10 (cm)	D50 (cm)	Io (cm)	k (Hazen) cm/s	k (Alyamani e Şen) cm/s
Areia	0,015	0,03	0,13	0,0225	0,0256
Pedrisco	0,127	0,185	1,12	1,6129	1,893

3.2 Análise de Fluxo nos Modelos Reduzidos

Como o fluxo teórico obtido a partir dos coeficientes de permeabilidade foram bastante similares, por se tratar de equações empíricas e que se baseiam em índices granulométricos. Deste modo, utilizou-se para as análises os traçados obtidos pelos parâmetros de Hazen (1911), ou seja, $k = 0,0225\text{cm/s}$ e $k = 1,6129\text{cm/s}$, para areia e pedrisco, respectivamente. Sendo assim, mediante a Figura 4 e 5 pode-se ilustrar os resultados obtidos para análise experimental e teórica no SEEP/W (Versão Estudante) da linha freática.

A Figura 4a e b apresenta linha freática percolada através do corpo da barragem homogênea. Foi possível observar o fluxo emergindo no talude de jusante, tanto na simulação numérica quanto no modelo experimental. Assim, ocasionando uma tendência para o carreamento das partículas de solo pela água, evidenciado na Figura 4a, e posteriormente ocasionando a ruptura por erosão do maciço do modelo experimental, Figura 4c.

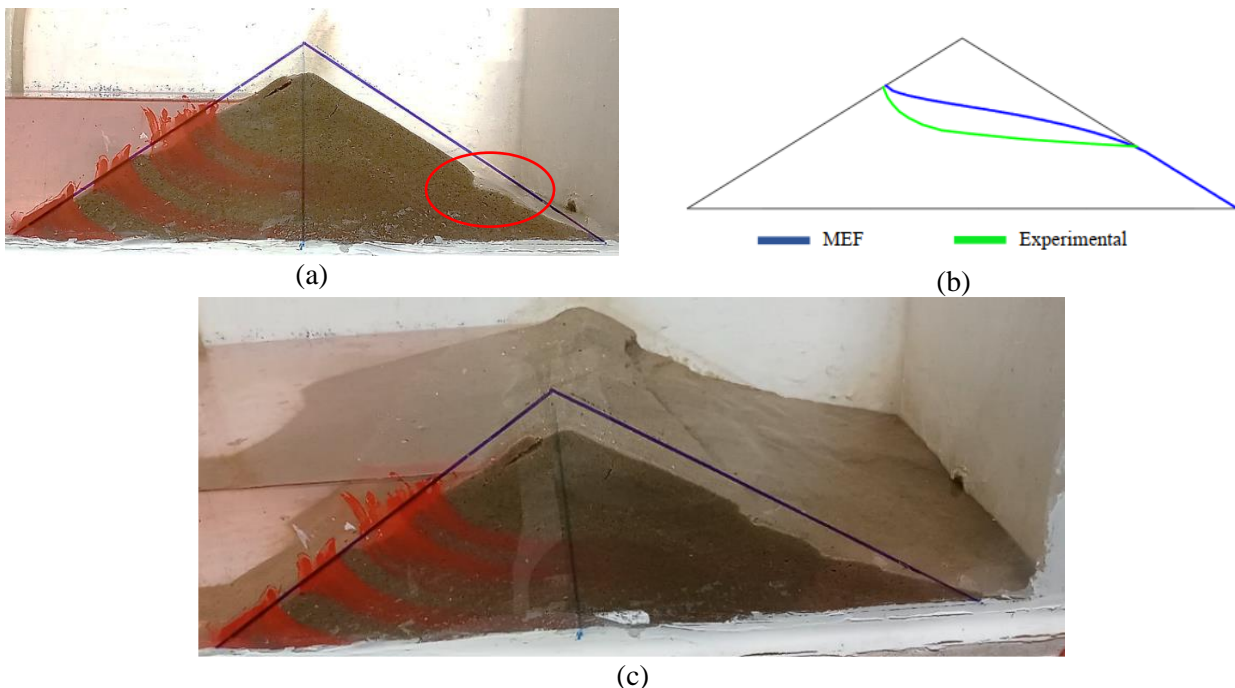


Figura 4. Modelo experimental de barragem homogênea (a), comparativo das linhas piezométricas (b) e ruptura por erosão hidráulica (c),

A Figura 5 trata do uso de diferentes tipos de filtro na avaliação do comportamento da linha freática no modelo experimental, e a comparação com o resultado numérico. Na Figura 5a nota-se que a linha freática se direciona no sentido do filtro de pé, permitindo o fluxo de água, o que pode reduzir potencial erosão do corpo do talude. A barragem com filtro horizontal, Figura 5c, mostra a eficácia deste no direcionamento do fluxo de água no interior do maciço. Semelhante resultado é observado na Figura 5e é possível se identificar a menor altura de linha freática, no caso do filtro vertical.

As Figuras 5b, 5d e 5f, mostram que os resultados do modelo experimental se assemelham bastante com o modelo numérico, assim como pôde ser observado no caso da barragem homogênea. No que se refere à altura da linha freática a que apresentou uma menor altura ao longo da seção transversal do modelo foi a referente Figura 5f que possui o filtro vertical. O que era esperado de acordo com Massad (2010), Sandroni e Guidicini. (2022) é esta situação que tem a melhor condição de reduzir a saturação do maciço a jusante, e conseqüentemente apresentar uma maior estabilidade, como foi possível observar tanto no modelo experimental, Figura 5e, como na simulação numérica 5f.

Partindo dos dados da simulação no SEEP/w (versão estudante) e os dados obtidos experimentalmente com os modelos reduzidos, foi possível identificar que os modelos podem ser utilizados para uma visualização simplificada do fluxo através do corpo de barragens de terra além possibilitar as condições de funcionamento dos diferentes tipos de filtro. Além de que indicar que o uso dos filtros foi essencial para que se mantivesse a estabilidade do modelo experimental, e conseqüente de obras reais.

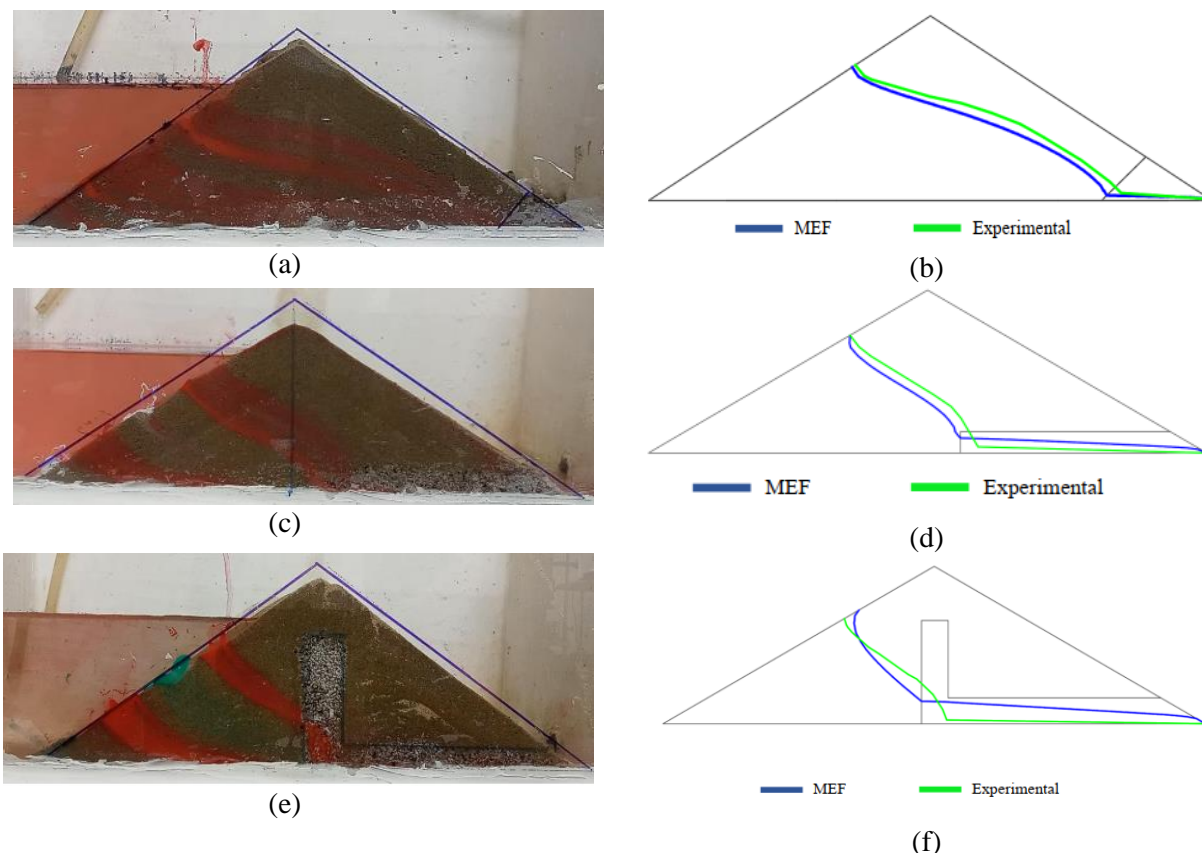


Figura 5. Modelo experimental de barragem com filtro de pé (a) filtro horizontal (b) e barragem com filtro vertical (c), e comparativo das linhas piezométricas (b, d e f), respectivamente.

3.3 Análise das Vazões

Os dados de vazão experimental, assim como as simulações no SEEP-W para cada caso, foram dispostos na Figura 6.

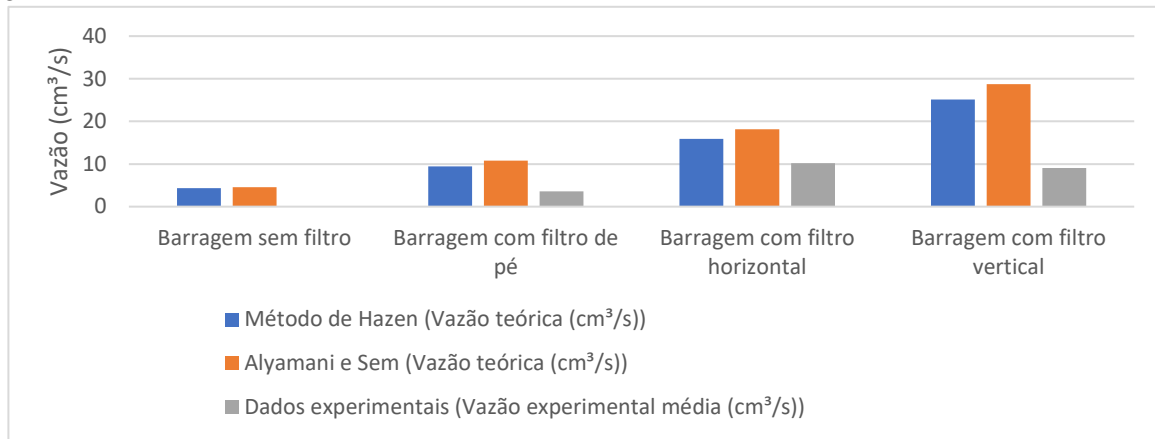


Figura 6. Análise comparativa das vazões.

De acordo com os resultados dispostos na Figura 7, pode-se observar uma diferença considerável entre os dados de vazão experimental média e teórica. A impossibilidade de mensuração na barragem sem filtro devido ao rompimento breve impossibilitou o comparativo na mesma. Sendo assim, essa análise revela uma baixa precisão nos dados de vazão quando comparados teoricamente e experimentalmente. Isso pode estar relacionado a imprecisão na estimativa dos coeficientes de permeabilidade, que foram baseados em equação empíricas.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões apresentadas, pode-se destacar algumas conclusões no que se refere as simulações no modelo reduzido de barragens de terra em comparação com a modelagem em elementos finitos (MEF):

- A análise de fluxo com o software utilizando o MEF em comparação com os modelos reduzidos, mostra uma consistência nos dados, já que a linha freática na simulação se mostrou semelhante a formada experimentalmente.
- Os diferentes tipos de filtros demonstraram a capacidade de controlar a linha freática e melhorar a estabilidade da barragem, com destaque para o filtro vertical na prevenção da saturação da barragem. Sendo assim, a importância do uso de filtros em barragens de terra ficou evidente em cada análise
- Análise das vazões revelou incertezas significativas, indicando a necessidade de conduzir estudos adicionais, como a determinação do coeficiente por meio de ensaios de permeabilidade. Além disso, a implementação de medidas para reduzir os erros na análise experimental o que pode contribuir para a minimização das discrepâncias observadas entre os métodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abokwiek, R., Al Sharabati, M., Hawileh, R. et al. (2022). A Finite Element Model for the Analysis of Seepage Flow of Water Under Concrete Dams. *Geotech Geol Eng* . v. 40 , p. 2823–2841 .
- Alyamani, M. S. e Şen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water*, Vol. 31, No. 4, p. 551-555.
- Amnyattalab, J., Rezaie, H. (2018). Study of the effect of seepage through the body of earth dam on its stability by predicting the affecting hydraulic factors using models of Brooks–Corey and van Genuchten (Case study of Nazluchay and Shahrchay earth dams). *Int. J. Environ. Sci. Technol.* v. 15, p.2625–2636 .

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 17054:2022. *Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Eduardo, G. P. e Nogueira, L. F. C. (2019). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. Oficina de Textos.
- Freitas, C. M. D.; Silva, M. A. D.; Menezes, F. C. (2016). “O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres”. *Cienc. Cult.* v. 68, n. 3, p. 25-30.
- Haghdoust, M., Lakzian, E., Norouzi, R. et al. (2023). Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of internal cutoff walls on seepage and hydraulic gradients in homogeneous earth dams. *Model. Earth Syst. Environ.* v. 9, p. 3851–3864 .
- Hazen, A. (1911). Discussion of 'Dams on sand foundations' by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, v. 73, p. 199-203.
- Huang, D., Yu, Z., Li, Y. et al. (2017). Calculation method and application of loss of life caused by dam break in China. *Nat Hazards.* v. 85, p. 39–57 .
- Marques, J. C. Unas, M. (2010). Estudos em Modelo Reduzido de Percolação em Barragens de Aterro [Small Scale Studies of Seepage in Earth Dams]. FEUP: *Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*.
- Massad, F. (2010). *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. São Paulo: Oficina de Textos
- Muller, I. I. et al. (2017). Calibração do leito do modelo físico reduzido do Rio Xingu para o estudo da Usina Hidrelétrica de Belo Monte. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* [s.l: s.n.]. Florianópolis.
- Sandroni, S. S., Guidicini, G. *Barragens de terra e enrocamento*. [s.l.] Oficina de Textos, 2022.
- Quintas, F. E. G. (2022). *Planejamento da Construção de Barragens de Terra*. Dissertação - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [S.l.].