

# Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra

Thays Car Feliciano de Oliveira

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu, Brasil,  
thayscarf@gmail.com

Bianca Gabriel dos Santos Dezen

UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, biancadezen@gmail.com

Renata Rauber Dahmer

UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, renata.dahmer@gmail.com

Isabela de Oliveira Antonio

UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, isabelaoliveira10@gmail.com

Julio César Bizarreta Ortega

UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil, julio.ortega@unila.edu.br

**RESUMO:** O estudo da percolação de água através dos solos é extremamente importante e, para tal, diversos métodos são difundidos, como o analítico, o numérico e o físico (laboratorial). Desta forma no presente trabalho propôs-se um estudo comparativo destes três métodos em barragens de terra homogêneas, a fim de analisar a concordância dos resultados para os diferentes modelos. Foram selecionados dois tipos de controle de fluxo, o de dreno tipo colchão drenante e o de dreno tipo chaminé. Os resultados mostram que as linhas de fluxo obtidas com cada um dos métodos possuem comportamento semelhante, porém quando são comparados os valores de poro-pressão medidos ao longo da barragem, observa-se discrepância entre os dados, chegando-se a um erro médio de 18,4%, entre os modelos analítico e físico. No entanto desconsiderando o método analítico, chega-se a um erro médio de 6,8% entre os métodos computacional e físico. Desta forma, sugere-se que os modelos físicos podem ser utilizados com resultados satisfatórios como ferramentas didáticas para o estudo do fluxo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens de Terra, Percolação de Água, Modelo Físico.

## 1 INTRODUÇÃO

A análise do fluxo de água em obras de terra, como barragens, escavações, estabilidade de taludes, etc. é fundamental para concepção de projetos de geotecnia e há muito é estudado (e.g. Casagrande, 1937; Lambe; Whitman, 1969; Cedergren, 1989; Harr, 1991; entre outros). Em especial para projetos de barragens de terra deve-se realizar uma análise detalhada

da percolação de água através da estrutura, pois diversos são os registros de colapso ao longo da história, causados pelo controle ineficiente do fluxo; alguns exemplos são as barragens Teton (Penman, 1987), IVEX (Evans et al., 2000) e Tawila (Zumrawi, 2013) que sofreram o fenômeno de piping. Tal fenômeno foi inicialmente abordado em detalhes por Terzaghi na década de 1920, porém devido à complexidade teórica dos problemas de fluxo,

apenas alguns anos mais tarde realizou-se progresso substancial no estudo dessa área (Casagrande, 1937), sendo que posteriormente disponibilizou-se na literatura (e.g. Casagrande, 1937; Harr, 1991; Massad, 2010) abordagem detalhada para o problema, bem como possibilidades para controle do fluxo, por meio de drenos (tipo pé, colchão drenante, cortina de estacas, chaminé, etc.).

Em geral, para os estudos de fluxo é comum utilizar-se a Lei de Darcy com uma combinação de métodos experimentais, numéricos ou analíticos. Em barragens de terra, por exemplo, o problema do fluxo pode ser considerado bidimensional e, portanto, uma possível solução é dada pela equação de Laplace (1). Tal solução pode ser revisada em Casagrande (1937) ou Massad (2010), onde são aplicadas a lei de Darcy e uma simplificação da equação de Bernoulli (2), onde “h” é a carga hidráulica total, “he” é a carga de elevação e “hp” a carga de pressão.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$h = h_e + h_p \quad (2)$$

Diversos autores (Cedergren, 1989; Harr, 1991; Massad, 2010; Houghtalen et al., 2012; Sachpazis, 2014) evidenciam a técnica das redes de fluxo como ferramenta valiosa para estudo da percolação em barragens, pois bons resultados são obtidos por meio da aplicação de regras simples e que também satisfazem a equação de Laplace. Para o caso de barragens de terra, onde as estruturas estão submetidas ao fluxo não confinado, Cedergren (1989) ressalta, no entanto, que o traçado das redes de fluxo pode tornar-se mais desafiador, pois a linha freática é desconhecida e deve ser determinada em conjunto com as linhas de fluxo.

Diante de tal fato, vários estudiosos da área passaram a desenvolver modelos analíticos, a partir da década de 1960, para o traçado das redes de fluxo e consequente estudo da percolação em barragens homogêneas. Alguns

exemplos são os modelos de Casagrande, Dupuit, Pavlovsky e Kozeny (Reyna e Reyna, 2012), sendo a proposta de Kozeny umas das soluções que mais se aproxima do problema real (Lambe; Whitman, 1969).

Também, a partir da década de 1990, com os avanços da informática, os modelos numéricos passaram a destacar-se, por sua praticidade em solucionar problemas como a equação de Laplace por meio do método de elementos finitos (Reyna e Reyna, 2012). Nesse sentido, na prática atual de engenharia são encontrados diversos softwares, sendo o SEEP/W um dos mais difundidos para modelagem do problema de fluxo em barragens. Tal programa resolve a equação em questão por meio do método de Galerkin de pesos residuais (GEOSLOPE, 2012).

Além disso, os modelos físicos, que antes foram amplamente empregados pelos pesquisadores para que estes desenvolvessem as formulações analíticas, atualmente vem ganhando espaço nas escolas de engenharia, como ferramenta didática (Marques e Unas, 2010).

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo dos três tipos de modelagem para o problema de fluxo que foram citados, o analítico, onde aplicou-se o método gráfico de Kozeny; o numérico, por meio da ferramenta computacional SEEP/W; e, o físico, construído em tanque de permeabilidade do Laboratório Didático de Engenharia da UNILA. Foram estudadas barragens com dois tipos diferentes de controle de fluxo, uma com dreno horizontal, tipo colchão (ou tapete) drenante, e outra com dreno vertical tipo chaminé.

## 2 METODOLOGIA

Inicialmente trabalhou-se na montagem dos modelos físicos reduzidos, em laboratório. Foram estudados dois tipos de sistema de drenagem interna, o de dreno horizontal (tipo colchão drenante) e outro de dreno vertical (tipo chaminé). Para tanto, utilizou-se tanque de

permeabilidade Nova Didacta®, que se trata de um canal de vidro com dimensões 2450 mm x 700 mm x 150 mm, com filtros e chapas de aço inoxidável removíveis em cada uma de suas extremidades, bem como um sistema de medições piezométricas.

Os modelos físicos reduzidos foram construídos, um por vez, dentro do tanque. Para o corpo da barragem utilizou-se areia quartzosa média lavada, sendo sua compactação realizada manualmente, devido a limitações práticas. Mesmo assim o processo foi executado cuidadosamente, em camadas de pequena espessura, visando uma permeabilidade uniforme no corpo da barragem. Em comparação com o modelo físico desenvolvido por Lambe e Whitman (1969), por exemplo, com 10 cm de espessura, o deste trabalho possuía 5 cm a mais, o que facilitou o processo de montagem e compactação.

Ressalta-se que, apesar da opção pela areia não representar a realidade de execução de barragens (geralmente construídas com a incorporação de solos coesivos, de baixa permeabilidade), o que se pretende nos modelos reduzidos é manter a similaridade cinemática entre os fluxos e a areia constituiu-se no material mais viável para esses experimentos, pois devido à sua maior permeabilidade o processo de fluxo ocorre mais rapidamente. Ou seja, uma vez estabelecidas as condições de fluxo permanente no modelo, buscou-se a comparação entre os resultados obtidos com as diferentes metodologias de estudo (modelos físico, numérico e analítico). Ademais, esse material permite a visualização das linhas de fluxo (com corantes) mais facilmente, por possuir tonalidade mais clara do que solos argilosos, por exemplo.

Para os drenos do modelo físico adotou-se pedrisco envolto em tecido de algodão, sendo este tecido empregado para evitar o carreamento de partículas da barragem para dentro dos drenos. Os modelos laboratoriais descritos podem ser observados na Figura 1.

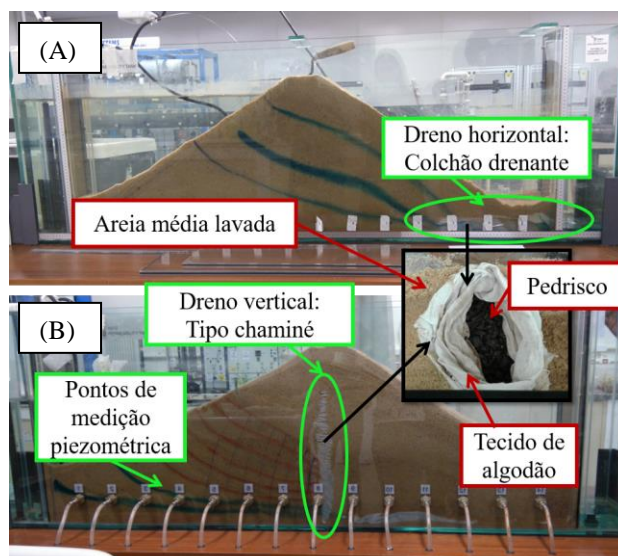


Figura 1. Modelos físicos laboratoriais da pesquisa. (A) Dreno horizontal. (B) Dreno vertical.

Para simular o fluxo utilizou-se água potável da rede pública de abastecimento da região e o ensaio transcorreu a uma temperatura de 20°C. Também se determinou a vazão do sistema, com auxílio de proveta graduada e cronômetro, e tal parâmetro foi mantido constante ao longo de todo o ensaio, caracterizando fluxo permanente.

Durante o experimento foram impostas diferentes cargas hidráulicas à montante e à jusante da barragem e, por meio de traçadores (corante contraste) e caneta para vidro para marcar a trajetória seguida pelos traçadores, observaram-se as linhas de fluxo no corpo da barragem.

O sistema de medição piezométrica do tanque de permeabilidade utilizado no modelo físico constituía-se por tubulações flexíveis instaladas ao longo do eixo montante-jusante (eixo X) da barragem, em 14 pontos igualmente espaçados. Nesse sistema as tubulações permanecem fixadas à uma placa rígida com buretas graduadas, cujo nível da base coincide com o nível da base do tanque, permitindo assim conhecer a carga hidráulica na barragem nesses diferentes pontos de medição, bem como as poro-pressões. Ressalta-se que previamente à imposição do fluxo permanente para os experimentos, fez-se a limpeza dos filtros e das tubulações, bem como extração dos vazios de ar

do sistema, para evitar erros de medição. Um esquema do sistema de medição piezométrica pode ser observado na Figura 2.



Figura 2. Esquema do sistema de medições piezométricas.

Como complemento à esta etapa do trabalho, o material utilizado (areia média) foi caracterizado quanto à massa específica (natural e seca), índice de vazios e porosidade e tais dados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Características da areia utilizada nas condições de compactação do modelo físico.

$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$\eta$ (%)
1,68	1,50	0,79	44

Após experimentos laboratoriais, procedeu-se com o desenvolvimento do modelo computacional (numérico), sendo a simulação da percolação no corpo da barragem realizada por meio do programa computacional GeoStudio 2007, extensão SEEP/W, que efetua os cálculos por meio do método de elementos finitos. Os dados de entrada no modelo computacional, de dimensões da barragem, cargas hidráulicas à montante e à jusante, vazão do sistema e características do material (i.e.,

permeabilidade) foram os mesmos do modelo físico. Para tanto, realizou-se ensaio de permeabilidade a carga constante, indicado para materiais arenosos, conforme NBR 13292 (ABNT, 1995), em amostra do material aplicado no modelo físico. Para esta etapa também foram medidos os parâmetros de densidade (natural e seca), índice de vazios e porosidade, e os resultados serão apresentados no item 3.1.

Por fim, para aplicação do método analítico-gráfico da parábola de Kozeny também foram utilizados os dados das dimensões e cargas hidráulicas (à montante e à jusante) do modelo físico, e a linha freática foi determinada de acordo com a equação (3):

$$x = x_0 - \frac{y^2}{4x_0} \quad (3)$$

Em que x e y são as coordenadas da linha freática e  $x_0$  é o ponto inicial da linha freática. No caso do dreno vertical foram utilizadas as técnicas de correção propostas por Casagrande (1937). Para o traçado manual das linhas de fluxo, seguiram-se as recomendações de Casagrande (1937), detalhadas por SAGARPA (2012).

Do modelo analítico-gráfico, também foi possível estimar a permeabilidade do material mediante a equação (4), para comparar com os resultados laboratoriais.

$$k = \frac{Q \cdot N_q}{\Delta H \cdot e \cdot N_c} \quad (4)$$

Em que “Q” corresponde à vazão que escoou pela barragem, “ $N_q$ ” o número de linhas de perdas de carga, “ $N_c$ ” o número de canais de fluxo, “ $\Delta H$ ” a diferença de cargas totais e “e” a espessura da barragem, no caso os 15 cm do modelo físico reduzido.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização da areia

Os valores de massa específica natural ( $\gamma_n$ ), seca ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $\eta$ ) associados ao ensaio laboratorial de permeabilidade da areia, bem como o coeficiente de condutividade hidráulica saturado ( $k_{sat}$ ) propriamente dito podem ser observados na Tabela 2 e estão de acordo com os valores típicos para areia.

Tabela 2. Características da areia utilizada, obtidas no ensaio de permeabilidade à carga constante.

$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	E	$\eta$ (%)	$k_{sat}$ (cm/s)
1,70	1,69	0,57	36	$2,87 \times 10^{-3}$

Tais resultados assemelham-se aos apresentados por Das (2012) para uma areia com granulação angular fofa, por exemplo, onde foram apresentados valores de “ $\gamma_d$ ” de 1,63 g/cm<sup>3</sup> e “ $e$ ” de 0,65. Ademais, valores típicos de condutividade hidráulica para a areia fina encontram-se entre  $1,0 \times 10^{-3}$  cm/s e  $1,0 \times 10^{-2}$  cm/s, segundo o mesmo autor, e os resultados enquadram-se nestes limites.

Ademais, observa-se, em comparação com os valores obtidos para o modelo físico (Tabela 1), que o índice de vazios e porosidade da amostra no ensaio de permeabilidade apresentaram valores ligeiramente menores. Isto indica uma pequena diferença nas condições de compactação entre a amostra da barragem do modelo físico e a utilizada no ensaio de permeabilidade para modelo numérico.

#### 3.2 Estudo de fluxo e poro-pressões

##### 3.2.1 Barragem homogênea com dreno tipo colchão drenante

A partir do desenvolvimento dos três tipos de modelagem indicados na metodologia, foi possível observar a concordância entre os métodos, pois os resultados corroboraram entre si, tanto para as linhas de fluxo, quanto para

valores de carga ao longo do eixo X da barragem. Na Figura 3 mostram-se as linhas de fluxo obtidas pelos três métodos, bem como as linhas equipotenciais obtidas nos modelos numérico e analítico.

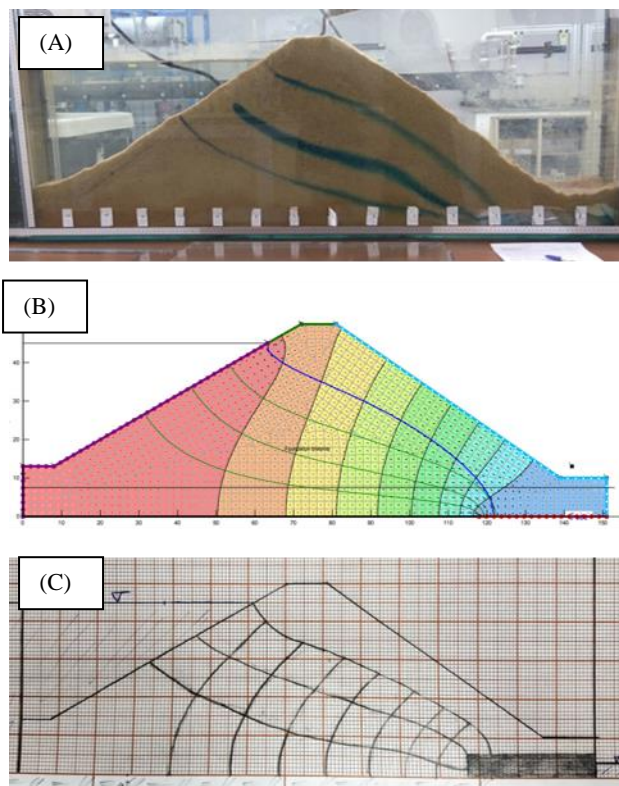


Figura 3. Linhas de fluxo da barragem com dreno horizontal obtidas para os modelos (A) físico, (B) computacional e (C) gráfico.

Em relação às linhas equipotenciais das análises numérica e analítica nota-se que no modelo numérico tais linhas ultrapassam a linha freática (L.F.), que representa a condição de pressão zero. Tal condição é assumida para todo o trecho da L.F., bem como para a zona externa a ela, nas teorias de traçado das linhas de fluxo (Lam et al., 1987). Nesse sentido, idealmente as linhas equipotenciais seriam traçadas somente até altura da L.F., no entanto o próprio programa utilizado nas análises numéricas (SEEP/W) fornece o traçado das linhas equipotenciais até o topo da seção da barragem.

Na literatura consultada (Lam et al., 1987; Papagianakis; Fredlund, 1984) estão disponíveis alguns estudos acerca do tema, em que esses autores citam que na zona externa à L.F. na

realidade ocorre pressão negativa (fluxo não saturado) e, neste caso, seria conveniente o traçado de linhas equipotenciais acima da linha freática. Contudo, o presente trabalho não entrou neste âmbito, sendo analisada apenas a similaridade cinemática do fluxo entre os três diferentes modelos.

Quanto aos valores de carga observados ao longo da barragem, obtiveram-se as poro-pressões nos três casos e os resultados comparando os três modelos estão representados na Figura 4. Destaca-se que tais valores foram obtidos de diferentes maneiras para cada modelo. No físico, foram realizadas medições com auxílio do sistema detalhado na Figura 2; no modelo computacional, o próprio software forneceu os valores e; no caso analítico, foi possível calculá-los após o traçado da linha freática e redes de fluxo.

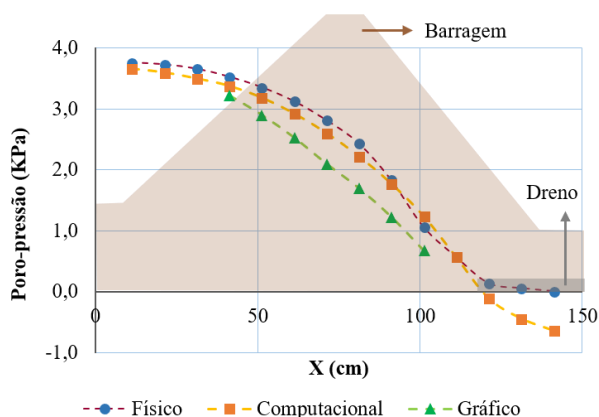


Figura 4. Gráfico das poro-pressões ao longo da barragem de dreno tipo horizontal no sentido montante-jusante (eixo X), para as três modelagens estudadas. Nota: o dreno origina-se em X=117 cm.

Observando o traçado das poro-pressões da Figura 4, é possível identificar que os três métodos resultaram em comportamento semelhante ao longo do corpo da barragem. A discrepância dos valores nos últimos pontos ocorre, pois o programa computacional considera poro-pressões negativas acima do nível freático, o que é observado a partir do dreno (X=117 cm), considerado como ponto de poro-pressão zero. No caso do modelo físico, provavelmente ocorreram fluxos preferenciais e poro-pressões negativas na região externa à

linha freática, devido ao baixo nível de compactação do material, porém dado que unicamente foram utilizados medidores de carga hidráulica positiva, não foi possível registrar tais poro-pressões negativas. E, em relação ao modelo analítico, a resolução pela parábola de Kozeny apenas estende-se ao ponto onde inicia-se o dreno (Reyna e Reyna, 2012), razão pela qual o último ponto representado no gráfico da Figura 4 ocorreu antes de X=117 cm.

Ainda, comparando-se os três modelos quanto às poro-pressões, encontrou-se um erro médio de 16,7%, um pouco elevado. No entanto, quando se consideraram apenas os modelos físico e computacional, este valor de erro médio cai para 5,0%, mesmo com a pequena diferença nas condições de compactação (diferença no índice de vazios) dos modelos, citada anteriormente em 3.1. Desta forma, os resultados indicam que a técnica dos modelos reduzidos laboratoriais forneceu melhores resultados quando comparada à técnica analítica.

Em trabalho desenvolvido por Marques e Unas (2010), obteve-se erro de apenas 1,06% entre os modelos laboratorial e computacional, para o mesmo tipo de dreno, corroborando com a observação levantada, de boa confiabilidade nos resultados obtidos laboratorialmente.

Por fim, com os dados do método analítico calculou-se a permeabilidade da areia e obteve-se valor de  $2,14 \times 10^{-3}$  cm/s, muito próximo ao de  $2,87 \times 10^{-3}$  cm/s encontrado com o ensaio normatizado de permeabilidade, apesar da diferença entre os índices de vazios citada anteriormente, para a condição do ensaio normatizado e amostra retirada do corpo da barragem do modelo físico.

Uma possível explicação para isto é que, apesar do índice de vazios ser menor no caso do ensaio normatizado, o que resultaria em menor permeabilidade quando comparada à amostra do modelo físico, pode haver variação nos coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical (Pereira; Calliari, 2005) e, no caso do ensaio normatizado, o fluxo apenas ocorre verticalmente, diferentemente do modelo físico.

### 3.2.2 Barragem homogênea com dreno tipo chaminé

Para a barragem com dreno vertical tipo chaminé observa-se na Figura 5 que houve boa concordância entre as linhas de fluxo obtidas para os modelos computacional e gráfico, no entanto para o modelo físico há uma pequena discrepância. Neste modelo identificou-se fluxo na zona vadosa (franja capilar), i.e., na região superior à linha freática (L.F.), na margem esquerda da barragem. Tal fluxo foi detectado ao inserir a agulha do traçador acima do nível freático (N.F.).

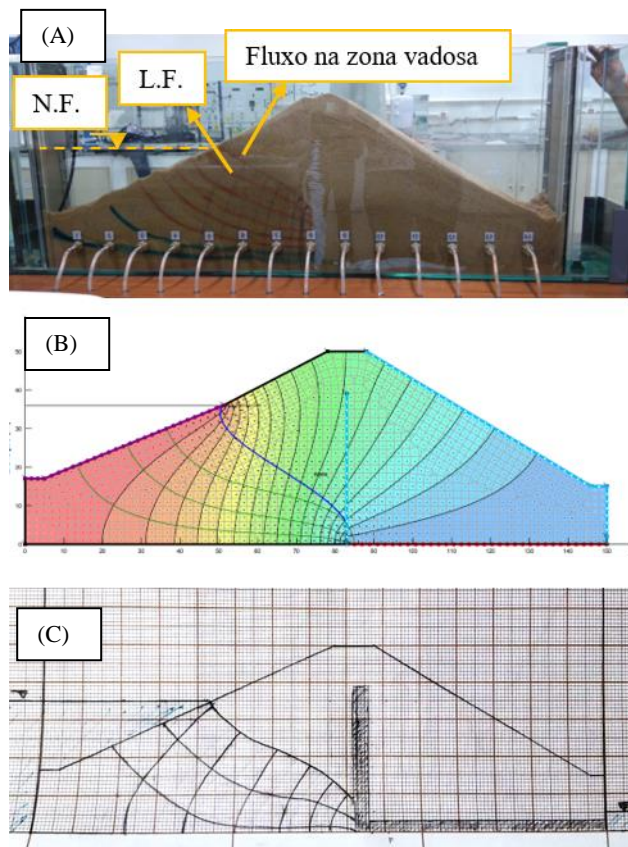


Figura 5. Linhas de fluxo obtidas para os modelos (A) físico, (B) computacional e (C) gráfico da barragem com dreno vertical.

Apesar da constatação da presença de fluxo não saturado na zona externa à L.F. no modelo físico, novamente ressalta-se que o presente trabalho não entrou neste âmbito. A mesma afirmação é válida para a presença das linhas equipotenciais acima da linha freática, fornecidas pelo software na análise numérica,

conforme já explanado anteriormente para as análises do dreno horizontal (tipo colchão drenante).

Em relação às poro-pressões, novamente estas foram comparadas para os três modelos estudados (Figura 6), onde observa-se que as curvas apresentam comportamento semelhante até ponto de instalação do dreno ( $X=82$  cm).

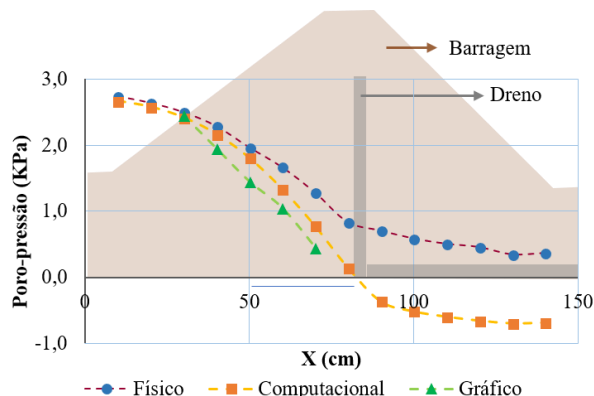


Figura 6. Gráfico das poro-pressões ao longo da barragem de dreno tipo vertical no sentido montante-jusante (eixo X), para as três modelagens estudadas. Nota: o dreno origina-se em  $X=82$  cm.

Ressaltam-se os mesmos fatores evidenciados para a barragem apresentada anteriormente. Nos pontos após o dreno, não são apresentados resultados de poro-pressão com o modelo analítico, devido às limitações do método, onde supõem-se fluxo nulo na região externa à linha freática. Além disso, os resultados diferem consideravelmente entre os modelos físico e computacional a partir do dreno ( $X>82$  cm), com a ocorrência de valores negativos no método computacional. Em comparação, no modelo físico foram registradas poro-pressões positivas nos medidores piezométricos a partir de  $X>82$  cm, acima do dreno, possivelmente devido à presença de fluxo preferencial nessa zona, devido ao baixo nível de compactação do material.

Marques e Unas (2010) também realizaram um comparativo entre a modelagem física e numérica para dreno tipo chaminé, onde constataram o mesmo fenômeno de desvio entre as soluções numérica e experimental após o dreno. Os autores também registraram a linha

freática acima da parte horizontal do dreno, no modelo físico.

Em relação ao erro entre os três métodos, obteve-se valor médio de 18,4%, porém, outra vez, desconsiderando o modelo analítico este valor decai para 6,8% (em relação aos pontos antes do dreno, i.e., antes que houvesse o desvio entre as soluções).

Assim como na barragem de colchão drenante, na de dreno tipo chaminé o coeficiente de permeabilidade calculado com os dados do método analítico resultou bem próximo do valor experimental apresentado na seção 3.1, sendo de  $1,9 \times 10^{-3}$  cm/s. Novamente é pertinente ressaltar a observação de Pereira e Calliari (2005), de que pode haver variação nos coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical, sendo esta uma possível explicação na diferença entre os valores destes coeficientes entre o ensaio normatizado e o cálculo por meio do método analítico.

Analisando-se os resultados em geral, obtidos para os dois tipos de drenos estudados, percebem-se as limitações do método analítico. Segundo Reyna e Reyna (2012) após os avanços tecnológicos que permitiram inserção da informática como ferramenta de estudos no meio acadêmico, o uso do método analítico diminuiu consideravelmente. E, em relação aos métodos físicos, Marques e Cunha (2010) complementam que são uma ferramenta extremamente importante, principalmente do ponto de vista didático, porém não permitem muita flexibilidade. Por isso é interessante associar este método ao computacional, de maneira a realizar estudo preliminar da barragem, para então modelá-la fisicamente com melhor controle experimental.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estudou-se o fluxo em barragens homogêneas de areia, com dois tipos de dreno, o horizontal (colchão drenante) e vertical (chaminé), comparando-se diferentes metodologias de modelagem do problema de

fluxo: a física, a numérica e a analítica. A partir dos resultados foi possível levantar as seguintes observações:

- Considerando o traçado das linhas de fluxo observa-se que os métodos apresentam concordância entre si no caso do dreno horizontal, sendo cumprido o objetivo de observar a similaridade cinemática do fluxo entre as diferentes modelagens. No entanto, para o caso do dreno chaminé identificou-se discrepância do método físico em relação aos outros dois métodos abordados.
- Outro resultado satisfatório para os dois casos estudados (dreno horizontal e dreno vertical) foram as curvas de poro-pressões, que apresentaram comportamento semelhante entre as três modelagens, antes do ponto do dreno. Novamente, a maior discrepância entre os resultados foi no caso da barragem com dreno chaminé, onde a curva de poro-pressões para o modelo físico indicou valores positivos na região acima do trecho horizontal do dreno, diferindo dos resultados do modelo numérico.
- Uma maneira de abordar a questão da discrepância dos resultados entre o modelo físico com os outros dois modelos, para a barragem de dreno chaminé, é que os métodos computacional e analítico empregados não foram capazes de representar adequadamente o modelo físico. Ou seja, nestes outros dois métodos não se consideram as poro-pressões positivas acima da parte horizontal do dreno, identificadas no modelo físico, pois nos modelos numérico e analítico assume-se permeabilidade do solo isotrópica e poro-pressões iguais a zero como condição de contorno do dreno, fato que não ocorre fisicamente.
  - Apesar destes aspectos, pode-se dizer que os resultados obtidos com o



trabalho foram satisfatórios e sugerem a viabilidade do uso de modelos físicos para estudo da cinemática do fluxo em barragens.

- Novamente ressalta-se que a opção pela utilização da areia, apesar de não representar a realidade de execução de barragens, constitui-se na abordagem mais viável para experimentos físicos. Isto porque a areia possui maior permeabilidade quando comparada aos solos coesivos, sendo possível sua utilização uma vez que o que se deseja é manter a similaridade cinemática entre os fluxos.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1995). *NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro.
- Casagrande, A. (1937). Seepage through dams, *Journal of the New England Water Works Association*, Vol. 51, No. 2, p. 131-172.
- Cedergren, H. R. (1989). *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, John Wiley & Sons, New York, 465 p.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 7. ed, Cengage Learning, São Paulo, 610 p.
- GEOSLOPE. (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W - An Engineering Methodology*. GEO-SLOPE International Ltd., Canada.
- Harr, M. E. (1991). *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York.
- Houghtalen, R. J.; Hwang, N. H. C.; Akan, A. S. (2012). *Engenharia Hidráulica*, 4. ed., Pearson, São Paulo.
- Evans, J. E.; Mackey, S. D.; Gottgens, J. F.; Gill, W. M. (2000). Lessons from a dam failure. *The Ohio Journal of Science*, Vol. 100, No. 5, p. 121-131.
- Lam, L.; Fredlund, D.G.; Barbour, S. L. (1987). Transient seepage model for saturated – unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. *Can. Geotech. J.*, Vol. 24, p. 565-580.
- Lambe W.; Whitman R. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Marques, J. C. Unas, M. (2010). Estudos em modelo reduzido de percolação em barragens de aterro. *5<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. FEUP. ISBN 978-989-95557-4-7.
- Massad, F. (2010). *Obras de terra: curso básico de geotecnia*, Oficina de Textos, São Paulo.
- Papagianakis, A. T.; Fredlund, D. G. (1984). A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, Vol. 21, p. 419-430.
- Penman, A. D. M. (1987). The Teton Dam Failure. *Engineering Geology*, Vol. 24, p. 257-259.
- Pereira, P. S.; Calliari, L. J. (2005). Permeabilidade das praias oceânicas do Rio Grande do Sul (RS) em relação a eventuais derrames de óleo. In: *Anais do 3º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás*.
- Reyna, E. E.; Reyna, S. M. (2012). Modelos analíticos y numéricos para la determinación de infiltración en presas de material suelto. Análisis de su uso y sensibilidad. *Mecánica Computacional*, Vol. 31, p. 279-303.
- Sachpazis, C. I. (2014). Experimental conceptualisation of the flow net system construction inside the body of homogeneous earth embankment dams. *EJGE*, Vol. 19, p. 2113-2136.
- SAGARPA. (2012). *Presas con cortina de tierra compactada*. Disponível em: <[http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/FICHA%20TECNICA\\_PRESA%20DE%20TIERRA.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/FICHA%20TECNICA_PRESA%20DE%20TIERRA.pdf)>. Acesso em: 06/05/2018.
- Zumrawi, M. M. E. (2015) Failure investigation of Tawila Dam in north Darfur Sudan. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 4, No. 5, p. 963-967.