

MODELO DIDÁTICO DE PERCOLAÇÃO EM UMA BARRAGEM DE TERRA

Amanda de Oliveira Murakami Fernandes – amurak12@gmail.com

Universidade Positivo

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300

81280-330 – Curitiba - Paraná

Mayco Merkle Doff Sotta – mayco_sotta@hotmail.com

Universidade Positivo

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300

81280-330 – Curitiba - Paraná

Pablo Fernando Sanchez – pablosanchez@up.edu.br

Universidade Positivo

R. Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5300

81280-330 – Curitiba - Paraná

Resumo: *Em barragens de terra apoiadas em maciços de rocha, a percolação da água ocorre principalmente por meio do corpo da barragem. Para que se tenha um controle sobre a água que percola pela estrutura, utiliza-se de uma drenagem interna por meio de filtros, para que se evitem problemas internos devidos às forças de percolação da água. Uma das formas de avaliar este processo é uso das “Redes de Fluxo”, que representam graficamente o fenômeno da percolação nos meios porosos, sendo possível determinar as vazões e pressões em uma barragem, como também verificar as possíveis ocorrências de erosões internas. Por se tratar de um método gráfico, composto por linhas de fluxo e linhas equipotenciais, que representam os caminhos de percolação da água, e que são traçadas manualmente seguindo o provável caminho que a água irá percorrer, verifica-se certa dificuldade de visualização e interpretação por parte dos alunos no entendimento desse estudo em disciplinas relacionadas no curso de Engenharia Civil. Neste contexto, este trabalho propôs a elaboração de um modelo didático em escala reduzida de uma barragem de terra, com a finalidade de representar visualmente o fenômeno da percolação pelo corpo da barragem, facilitando o entendimento e aprendizado do fenômeno. A validação do modelo se deu com a comparação dos dados observados no modelo didático e em um modelo de representação com as Redes de Fluxo. Verificou-se coerência dos resultados em ambos os modelos, sendo o modelo didático considerado uma ferramenta útil de aprendizado deste fenômeno relacionado com áreas da Engenharia Civil.*

Palavras-chave: *Modelo didático. Fluxos em solos. Barragem de terra. Redes de fluxo.*

1 INTRODUÇÃO

Barragens podem ser definidas como elementos estruturais, que possuem como principal função a criação de um reservatório artificial de água para diferentes usos posteriores. Dentre os principais materiais que podem compor uma barragem estão o concreto, terra e enrocamento, eventualmente havendo a combinação desses materiais (MARAGON, 2004).

Em se tratando de barragens de terra, devido à sua composição, a água percola pela estrutura e pela fundação. Essas barragens, então, possuem drenagem interna composta por

filtros que, além de drenarem o maciço, ainda permitem o controle da água que percola pela estrutura. Esses filtros são dimensionados com base em análises dos fluxos apresentados pela barragem, sendo a rede de fluxo uma forma de estudo desses fluxos (CAPUTO, 1987).

A rede fluxo trata-se de um procedimento gráfico que consiste no traçado de linhas de fluxo que presumem o caminho a ser percorrido pela água e posterior traçado de linhas ortogonais às linhas de fluxo (PINTO, 2006).

Como há a dificuldade do aluno em visualizar e interpretar algumas situações e fenômenos, isso acaba impedindo o aluno de encontrar soluções e condições de contorno corretas para determinados problemas (RUVÉR *et al.*, 2012). No caso de barragens de terra, por se tratar de áreas não confinadas, o caminho de percolação não é presumível por não se conhecer o limite superior do traçado, acarretando a dificuldade de se visualizar como se dá a percolação pelo corpo da estrutura (PINTO, 2006).

Um dos métodos que mais se destaca para que os estudantes entendam melhor o comportamento das linhas de fluxo no corpo de uma barragem de terra, é a utilização de modelos didáticos (MARQUES E UNAS, 2010). Segundo Cavalcante e Silva (2008), o uso de modelos didáticos tem função pedagógica, favorecendo o aprendizado do aluno e proporcionando melhores interpretação e compreensão de situações e problemas.

Com o objetivo de se ampliar a visão do aluno a respeito do comportamento da água no interior do solo de uma barragem de terra e considerando as dificuldades encontradas no traçado de uma rede de fluxo, observa-se a necessidade de alternativas para facilitar o entendimento a respeito do fenômeno considerado.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é construir um modelo didático de uma barragem de terra em escala reduzida, onde seja possível a visualização e análise dos fenômenos relacionados ao fluxo em meios porosos.

2 REDES DE FLUXO

As redes de fluxo são de extrema importância na engenharia, pois auxiliam nas determinações de parâmetros necessários para análises de projetos em barragens, como a vazões, perdas de cargas hidráulicas e gradientes hidráulicos. Um modo de estudar as linhas de fluxo de forma mais clara é a representação gráfica, que é feita por tentativas e erros, a partir das linhas limites de fluxo e carga. Esse método requer conhecimento prévio do possível comportamento ao atravessar os meios porosos para realização do traçado da rede de fluxo (PINTO, 2006).

Essa representação gráfica, denominada de rede de fluxo, é o desenho das linhas de escoamento ou de fluxo, que mostram o caminho que as partículas do líquido percorrem e as linhas equipotenciais, que representam faixas de mesma carga hidráulica (MARANGON, 2013). Um exemplo de uma rede fluxo para uma barragem de terra é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Rede de fluxo de uma barragem de terra.



Fonte: Marangon (2013)

Um trecho no meio de duas linhas de fluxo consecutivas, é denominado canal de fluxo. Este canal contém uma parte da vazão da água que se infiltra, desta maneira a vazão é constante em cada canal de fluxo e igual para os demais canais. Ocorre também perda de carga Δh entre as linhas de mesmo potencial, que se denomina de queda de potencial. A perda de carga entre linhas equipotenciais consecutivas é igual (MARANGON, 2013).

2.1 Perda de carga e gradiente hidráulico da rede de fluxo

O traçado das linhas equipotenciais com o mesmo espaçamento tem como objetivo encontrar a mesma perda de carga em cada faixa de perda de potencial. Para a realização do cálculo de perda de potencial serão necessárias as alturas de coluna d'água de montante e jusante, a diferença entre essas alturas, dividida pelo número de faixas de perda de potencial resulta na perda de carga por faixa de equipotencial. A equação de perda de carga entre equipotenciais está representada pela “Equação (1)” (PINTO, 2006).

$$\Delta h = \frac{H_m - H_j}{Nq} \quad (1)$$

Onde:

Δh – perda de carga por faixa equipotencial (m);

H_m – altura da coluna d'água à montante (m);

H_j – altura da coluna d'água à jusante (m);

Nq – número total de quedas de potencial (adimensional).

O gradiente hidráulico, utilizado na verificação de possíveis ocorrências de erosões internas, varia de ponto para ponto, dependendo da distância das linhas de equipotenciais, que variam ao longo da linha de fluxo. Se a perda de carga calculada anteriormente for dividida pela distância das linhas de equipotenciais, resultará no gradiente hidráulico, representado pela “Equação (2)” (PINTO, 2006).

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (2)$$

Onde:

i – gradiente hidráulico (adimensional);

Δh - perda de carga por faixa equipotencial (m);

l – distância entre linhas equipotenciais (m).

2.2 Pressões calculadas pela rede de fluxo

Para que se determine a carga total em uma rede de fluxo, considera-se o número de quedas de potencial para o ponto em estudo. Calcula-se a carga total a partir da “Equação (3)” abaixo.

$$h = (H_m + H_{solo}) - N_{Nq} \times \Delta h \quad (3)$$

Onde:

h – carga total (m);

H_m – altura da coluna d'água à montante (m);

H_{solo} – altura de solo (m);

N_{Nq} – Número de quedas de potencial até o ponto estudado (adimensional);

Δh – perda de carga por faixa equipotencial (m).

2.3 Vazão de percolação na rede de fluxo

A vazão de percolação do canal de fluxo é determinado pelo fator de permeabilidade do solo multiplicado pela perda de carga total, dividido pelo número total de quedas de potencial, que pode ser representado pela “Equação (4)” (MARANGON, 2013).

$$Q = k \times \frac{\Delta h}{Nq} \quad (4)$$

Onde:

Q - vazão de percolação do canal de fluxo (m³/s);

k - coeficiente de permeabilidade do solo (m/s);

Δh - perda de carga total (m);

Nq - número total de quedas de potencial (adimensional).

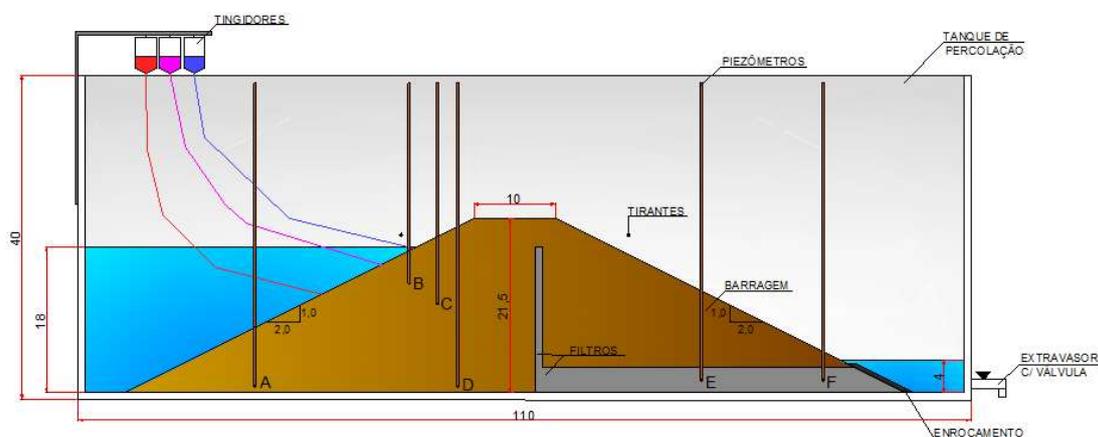
3 MODELO DIDÁTICO DA BARRAGEM

Para a execução do modelo didático foi realizado um projeto de uma barragem de terra. O projeto consistiu na definição do tamanho de uma caixa de acrílico que serviu como tanque de percolação, nas dimensões da barragem para que se adequasse ao tamanho da caixa, na alocação dos pontos de instalação de piezômetros e de um extravasor, na escolha do tipo de filtro e na posterior definição dos materiais que comporiam a barragem com o sistema de drenagem interno.

As dimensões da caixa de acrílico (110cm x 40cm x 25cm) foram definidas para que a visualização das linhas de fluxo não fosse prejudicada. Com a espessura do acrílico de 8mm, o objetivo era que não houvesse abaulamento lateral da caixa.

A barragem foi projetada com base em parâmetros de inclinações de taludes de barragens reais e admitiu-se uma escala de 1:100. No projeto da barragem ainda previu-se pontos de piezômetros e um ponto de extravasor, além de um suporte para pequenos reservatórios de corantes, que teriam a função de marcar o caminho percorrido pela água. A escolha do tipo de filtro foi a combinação do filtro vertical e horizontal. Os projetos da barragem e de seus componentes estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Projeto do modelo didático



Fonte: Os Autores (2018)

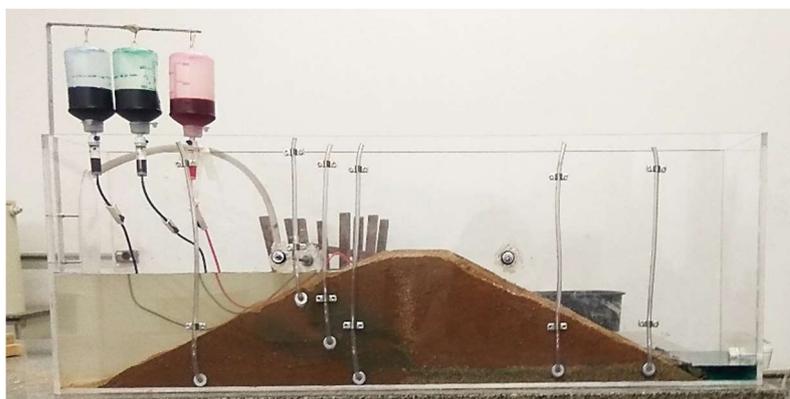
O material da composição da barragem foi determinado de modo que possuísse cor clara e com base em ensaios de coeficiente de permeabilidade, resultando na composição de solo arenoso e solo argiloso. O método de determinação do coeficiente de permeabilidade foi ensaio disposto pela ABNT NBR 14545 (2000) – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. O solo resultou em um coeficiente de permeabilidade de $3,75E-05$ m/s.

O material da composição dos filtros foi igualmente determinado em função do coeficiente de permeabilidade, devendo possuir um valor maior do que o material da barragem. O material definido para os filtros foi a areia. O método de determinação do coeficiente de permeabilidade foi o ensaio disposto pela ABNT NBR 13292 (1995) – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. O solo resultou em um coeficiente de permeabilidade de $3,45E-04$ m/s.

Os dois materiais foram submetidos à análise de critério de filtro para a certificação da não ocorrência de erosão interna (*piping*). Para isso foram realizados ensaios de granulometria em ambos os materiais, segundo dispõe a ABNT NBR 7181 (1984) – Análise Granulométrica.

Após a definição de todos os elementos o modelo didático foi construído de modo a se respeitar fielmente o projeto. Após construído, realizou-se a saturação da barragem e o modelo ficou como apresentado na “Figura 3”.

Figura 3 – Modelo didático concluído



Fonte: Os Autores (2018)

Com o modelo didático concluído, iniciaram-se os procedimentos para a determinação dos dados referentes às interpretações dos fenômenos de percolação.

Com a barragem em estado de saturação, abriu-se o extravasor, liberando água em um recipiente de volume conhecido, cronometrando-se o tempo para preencher o volume. Com os dados de volume e tempo, foi possível calcular a vazão unitária (por unidade de comprimento). Multiplicando-se essa vazão unitária pela largura do tanque de percolação, obteve-se a vazão total.

Ainda foram coletados os valores de cargas piezométricas, dados pelo nível de água atingido nos piezômetros. Multiplicando-se os valores das cargas pelo peso específico da água, foram obtidos os valores das poropressões em cada ponto.

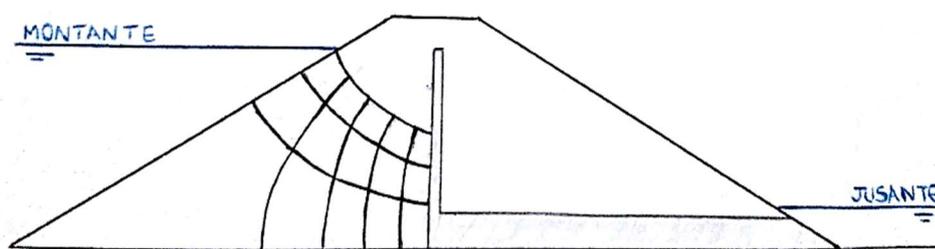
As linhas de fluxo foram demarcadas por corantes. Os corantes nos reservatórios foram ligados à montante da barragem por tubos finos de plástico em três pontos, com cores distintas para facilitar a visualização. Conforme a água ia de montante à jusante, os corantes iam marcando o caminho em direção aos filtros, representando os caminhos de percolação da água.

4 MODELO GRÁFICO COM AS REDES DE FLUXO

Paralelamente à realização do modelo didático, realizou-se um traçado manual da rede de fluxo. O traçado foi executado a partir do desenho da barragem em escala, como no projeto, e tendo referência redes de fluxo de casos semelhantes de barragens de terra.

Devido ao tamanho da barragem, optou-se pelo traçado de apenas três linhas de fluxo. Imaginando-se o caminho provável da água em direção aos filtros da barragem, traçaram-se as linhas de fluxo, sabendo que a água tende a percorrer o caminho mais curto em direção à jusante. Perpendicularmente às linhas de fluxo, foram traçadas as linhas equipotenciais, resultando na rede de fluxo, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Traçado da rede de fluxo da barragem de terra



Fonte: Os Autores (2018)

Os espaçamentos entre as linhas de fluxo são chamados de canais de fluxo e devem possuir a mesma vazão. Fica claro no traçado que uma das geometrias não se aproxima de uma forma quadrada, isso se deve ao formato da barragem. Assim, essa geometria foi admitida como quadrada.

É importante salientar que a rede de fluxo traçada nessa barragem não é a única forma possível de se realizar o traçado e alguns ajustes, como o acréscimo de linhas de fluxo e de linhas equipotenciais, podem aumentar a precisão dos resultados.

Depois que o traçado manual foi finalizado, iniciou-se os procedimentos para a determinação dos resultados da análise da rede de fluxo.

Calculou-se então a vazão apresentada pela rede de fluxo, as cargas piezométricas e as poropressões. Os mesmos parâmetros foram calculados tanto para o modelo quanto para a rede de fluxo para que, posteriormente, fossem comparados e analisados.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para que se desse a comparação dos resultados, os parâmetros de vazão, cargas piezométricas e poropressões foram obtidos e calculados tanto para a análise por meio da rede de fluxo quanto para o modelo didático.

Depois que todos os parâmetros que cabem à análise da rede de fluxo foram coletados e calculados no modelo didático, foram obtidos os seguintes valores de vazão por unidade de comprimento (q) e vazão total (Q), dispostos no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Valores de vazão do modelo didático.

q (m ³ /s/m)	3,33E-06
Q (m ³ /s)	8,33E-07

Fonte: Os Autores (2018)

Também foram coletados e calculados os valores de carga piezométrica (Hp) e de poropressões (u) no modelo, onde os pontos A, B, C, D, E e F são os mesmo previstos em projeto, dispostos no Quadro 2 a seguir.

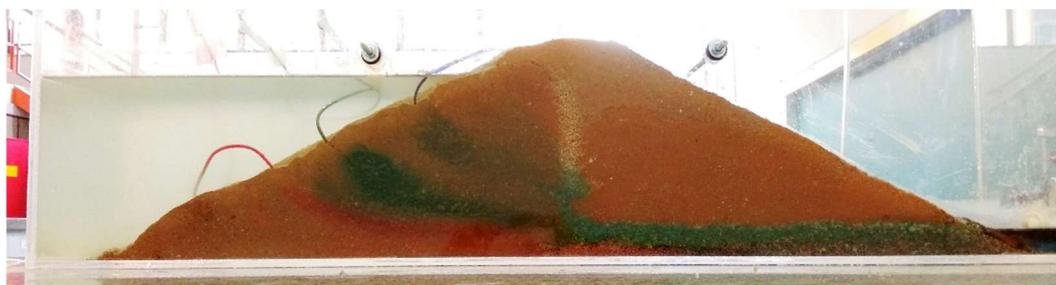
Quadro 2 – Poropressões obtidas no modelo didático

PONTO	MODELO DIDÁTICO	
	Hp (m)	u (kPa)
A	0,167	1,67
B	0,050	0,50
C	0,045	0,45
D	0,115	1,15
E	0,027	0,27
F	0,025	0,25

Fonte: Os Autores (2018)

Com a barragem saturada, foram colocados os corantes nos reservatórios a fim de que marcassem o caminho percorrido pela água, como ilustrado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – Representação das linhas de fluxo



Fonte: Os Autores (2017)

Como esperado, a água tende a ir em direção ao filtro, que é onde encontra menor resistência de percolação.

Após o traçado manual da rede de fluxo, também foi realizado o cálculo da vazão total (Q) e da vazão por unidade de comprimento (q) para o traçado realizado, dispostos no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Valores de vazão da rede de fluxo

q (m ³ /s/m)	3,15E-06
Q (m ³ /s)	7,88E-07

Fonte: Os Autores (2017)

Foram calculados, também, as cargas piezométricas (Hp) e poropressões (u) para o traçado realizado, e os resultados estão dispostos no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Valores de vazão da rede de fluxo

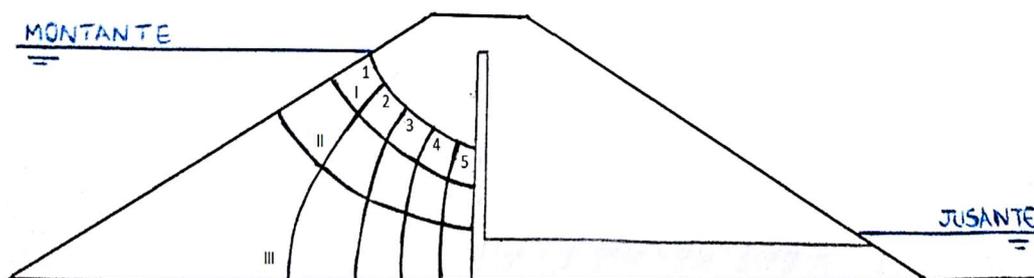
PONTO	REDE DE FLUXO	
	Hp (m)	u (kPa)
A	0,166	1,66
B	0,045	0,45
C	0,042	0,42
D	0,117	1,17

Fonte: Os Autores (2018)

Como os pontos E e F encontram-se nos filtros, ou seja, fora da rede de fluxo, os valores de cargas e de poropressões não foram calculados para esses pontos. O motivo da existência desses pontos é para a verificação da carga atuante no filtro, sendo que essa não deve ser superior à carga considerada em projeto.

O traçado da rede de fluxo foi composto por três canais de fluxo (I a III) e por cinco quedas de potencial (1 a 5), conforme exposto na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Rede de fluxo finalizada



Fonte: Os Autores (2018)

Estabelecendo-se um comparativo entre as duas formas de análise de rede de fluxo, é possível observar que as vazões apresentadas por ambos os métodos têm valores aproximados. Pode-se dizer que a pequena diferença encontrada se deve ao modo de execução da barragem na compactação do solo ou pela heterogeneidade do mesmo.

Em relação aos valores de cargas piezométricas e de poropressões obtidas nos dois casos, vê-se que são próximos para cada ponto calculado, sendo considerados satisfatórios para a mútua validação de ambos os métodos de análise de rede de fluxo.

Avaliando-se ainda as linhas de fluxo apresentadas pelo modelo, ficou claro o caminho preferencial da água em direção aos filtros, e comparando-se essas linhas com o traçado, percebe-se que há compatibilidade, visto que o caminho descrito pela água no modelo é similar às linhas de fluxo do traçado manual.

Acredita-se que o modelo representou de maneira satisfatória as linhas de fluxo descritas pela água e demais parâmetros avaliados, já que os resultados encontrados nos dois métodos foram próximos.

Pode-se afirmar, então, que o modelo poderá ser utilizado como meio de apoio para o aprendizado dos fenômenos relacionados à fluxos em barragens, pois o caminho percorrido pela água (linhas de fluxo), que nas análises convencionais de rede de fluxo deve ser arbitrado segundo uma tendência de comportamento, pode ser corretamente observado no modelo

didático. Além disso, todas as demais propriedades de engenharia envolvidas no processo, como vazões e poro-pressões, podem ser obtidas manualmente, segundo os métodos convencionais de análises, e confirmadas e observadas no modelo didático.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se neste item algumas considerações adicionais de relativa importância quanto às etapas do presente trabalho.

Em relação aos materiais utilizados, a justificativa da coloração clara do solo do corpo da barragem é que essa característica permite uma melhor visualização do fenômeno das linhas de fluxo. Ainda, a caixa de acrílico utilizada como tanque de percolação apresentou um abaulamento lateral significativo, permitindo que a água tivesse um caminho preferencial pela lateral da caixa, então foi necessária a instalação de tirantes para conter tal deformação.

No que se refere aos resultados obtidos, após a comparação dos resultados dos parâmetros de vazão, poropressões e a representação das linhas de fluxo de ambos os métodos de análise, pode-se afirmar que os mesmos foram considerados satisfatórios, apresentando somente pequenas variações.

Isto posto, considera-se que há coerência nos dois métodos estudados e que o modelo representa as condições reais de uma barragem. Além disso, é possível visualizar no modelo as linhas de fluxo bem marcadas devido à percolação por meio da barragem de terra, trazendo aos interessados, sobretudo aos estudantes, uma forma de entendimento mais palpável, ampliando o aprendizado do fluxo da água nos solos.

Considera-se válido o trabalho como apoio ao ensino de engenharia por possibilitar ao aluno a visualização de um fenômeno que, se analisado da forma convencional, depende da presunção do comportamento da água no processo, que só é possível para engenheiros experientes na área de estudo. Além disso, possibilita ao estudante a observação direta de uma obra de engenharia, mesmo que em escala reduzida.

Este trabalho foi elaborado por alunos do curso de engenharia civil da Universidade Positivo e fez parte de um Trabalho de Conclusão de Curso.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas – fundações – obras de terra volume 2**. 6ª edição, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.

CAVALCANTE, Danusa D.; SILVA, Aparecida F. A. **Modelos didáticos de professores: Concepções de ensino – aprendizagem e experimentação**. Universidade Estadual de Santa Cruz, 14ª Encontro Nacional de Ensino de Química – Curitiba, 2008.

MARANGON, Marcio. **Tópicos em geotecnia e obras de terra**. Minas Gerais: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.

MARQUES, J.C.; UNAS, M. **Estudos em modelo reduzido de percolação em barragens de aterro**. 5ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente: Porto: FEUP, 2010.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RUVER, Cesar Alberto *et al.* **Construção de um modelo físico de baixo custo e aplicação de modelo numérico para solução de problemas de percolação e fluxo de água em solos**. XL Congresso Brasileira de Educação em Engenharia. Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Rio Grande, 2012.

DIDACTIC MODEL OF PERCOLATION IN A SOIL DAM

Abstract: *In soil dams supported on rocky massif, the percolation occurs mainly through the shape of the dam. In order to control the water flowing through the structure used an internal drainage by means of filters, so as to avoid internal problems because of water percolation forces. One of the ways to evaluate this process is the use of the "Groundwater Flow", which graphically represent the phenomenon of percolation in porous means, being possible to determine the flow and the pressures in a soil dam, as too to check the possible occurrences of internal erosion. Because it is a graphic method, composed of flow lines and equipotential lines, which represent the path of water percolation, and which are drawn manually following the path that the water will course, there is a certain difficulty of visualization and interpretation by the students in the understanding of this study in related disciplines in the Civil Engineering course. In this context, this work proposed the elaboration of a didactic model of a soil dam in a reduced scale, with the purpose to represent visually the phenomenon of the percolation through the shape of the soil dam, facilitating the understanding and learning of the phenomenon. The validation was give with the comparison of observed data in didactic model and in a representation model with the Groundwater Flow. Results were consistent in both models, and the didactic model was consider a useful tool for learning this phenomenon associated to Civil Engineering.*

Key-words: *Didactic model. Flowing in soils. Soil dam. Groundwater flow.*