



CONSTRUÇÃO DE MODELO FÍSICO DE BAIXO CUSTO E APLICAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE PERCOLAÇÃO E FLUXO DE ÁGUA EM SOLOS

Cesar Alberto Ruver – cesar.ruver@furg.br
Lauro Roberto Witt da Silva – mirmannn@yahoo.com.br
Felipe Vilela Levien – felipelevien@hotmail.com
Kelter Fernando Sloczinski – kelter_s@hotmail.com
Sarah Marques Tardivelli – sarah.tardivelli@gmail.com
Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Engenharia
Avenida Itália, km-08, Pavilhão K, Caixa Postal 474
CEP: 96.201-900 – Rio Grande - RS

Resumo: A resolução para problemas de percolação e fluxo de água em solos passa pela equação diferencial de fluxo, cuja solução analítica pode ser extremamente complexa e penosa. Em certos problemas, podem ser adotadas soluções analíticas simplificadas, bem como podem ser adotados modelos numéricos, modelos físicos, métodos gráficos ou modelos de analogia com circuitos elétricos. Tradicionalmente, nas disciplinas de mecânica dos solos, são vistas somente, as soluções analíticas simplificadas e método gráfico, cujas formas de abordar os problemas são extremamente teóricas. Neste sentido, construiu-se na Universidade um tanque de percolação - a partir de materiais reciclados, em modelo reduzido, cujo objetivo é incorporar mais uma ferramenta na solução dos problemas propostos, além de permitir a visualização dos fenômenos de percolação e fluxo de água. Paralelamente a isso, está se estimulando os alunos a solucionar os problemas simulados em laboratório via modelagem numérica pelo método de elementos finitos.

Palavras-chave: Problemas de Percolação, Fluxo de Água em Solos, Tanque de Percolação, Modelagem Numérica, Baixo Custo

1. INTRODUÇÃO

Um tema de extrema importância abordados nas disciplinas de mecânica dos solos, dos cursos de graduação de engenharia civil, é a percolação e fluxo de água em solos. Sabe-se que a presença de água no solo provoca a redução da resistência ao cisalhamento efetiva. Esta redução pode ser ainda mais drástica, se houver fluxo da água no interior do solo. Inclusive a resistência ao cisalhamento pode chegar a ser nula, gerando o efeito de liquefação (também conhecida como areia movediça), em condição de fluxo ascendente em solos arenosos. Ainda podem ocorrer efeitos da erosão em solos pouco ou não coesivos, a dissolução de material rochoso de origem calcária e fenômenos como levantamento de fundo em barragens.

Resolver problemas de percolação e fluxo de água em solos requer solucionar a equação

Realização:



Organização:





diferencial de fluxo (equação 1), a qual é apresentada em diversos livros de mecânica dos solos (ex.: LAMBE e WHITMAN, 1969; ORTIGÃO, 2007). A equação 1 expressa o fluxo de água em um ponto infinitesimal, localizada no espaço cartesiano (x , y e z), sendo admitido um solo homogêneo, água incompressível e a Lei de Darcy como sendo válida.

$$k_x = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left[S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (1)$$

Onde: k_i = permeabilidade na direção j ; h = carga hidráulica total; S = saturação; e = índice de vazios; t = tempo

A solução da equação 1 não é trivial. Em certos casos [problemas bidimensionais (x e y), solo saturado ($S = 100\%$), fluxo estacionário ($t = 0$) e em solo isotrópico ($k_x = k_y$)], pode-se obter uma equação diferencial mais simplificada (equação 2). Assim, uma vez conhecidas as condições de contorno, a equação 2 pode ser solucionada por integração.

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

Além da solução analítica, segundo Ortigão (2007), os problemas de percolação e fluxo de água em solos podem ser solucionados por modelos numéricos, modelos físicos, métodos gráficos ou modelos de analogia com circuitos elétricos. Dentre todas as formas de solução apontadas, tradicionalmente, os cursos de engenharia civil e as bibliografias apresentam algumas soluções analíticas simplificadas (ex.: LAMBE e WHITMAN, 1969; DAS, 2007) e os métodos gráficos (ex.: ORTIGÃO, 2007; PINTO, 2007; DAS, 2007). As experiências em sala de aula com as duas abordagens citadas, tem sido muitas vezes frustrante. Apesar dos alunos de graduação estarem habituados com as soluções de equações diferenciais, devido a uma boa base matemática adquirida ao longo de dois ou três anos de disciplinas de cálculo, os mesmos não conseguem visualizar a ocorrência dos fenômenos, e muitas vezes, pecam ou não conseguem encontrar as condições de contorno, obtendo a solução incorreta para os problemas. Quanto aos métodos gráficos, novamente, pelo fato dos alunos não conseguirem visualizar os fenômenos de percolação e fluxo de água, acabam traçando/desenhando as redes de fluxo de forma incorreta. Dentre os problemas mais comuns, pode-se destacar (a) a não ortogonalidade entre as linhas de fluxo e linhas equipotenciais e (b) linhas de fluxo encostando ou tocando paredes ou camadas de solos impermeáveis. Problemas deste tipo inclusive foram encontrados em inúmeras bibliografias, conforme reportado por Bromhead (2006), que ilustra inúmeros erros em figuras apresentadas nos livros de mecânica dos solos.

Neste sentido seria de grande valia mostrar aos alunos como se processam estes fenômenos por experimentos de laboratório e aulas práticas através do uso, por exemplo, de um tanque de percolação ou modelagem numérica. No mercado já existem diversos modelos de tanques de percolação, inclusive alguns modelos automáticos que fazem a aquisição das leituras dos piezômetros e das vazões via computador. Os equipamentos comercializados são constituídos por tanques que podem chegar a vários metros de comprimento (até 5 m), o que do ponto de vista técnico é recomendado para diminuir a influência das condições de contorno (paredes) nos resultados finais. Porém, quanto maior o equipamento e mais moderno, maior será seu custo de aquisição. Por exemplo, no final do ano de 2011 realizou-se uma cotação,



onde um equipamento composto por um tanque com dimensões aproximadas de 250 cm x 70 cm x 150 cm, de leitura manual de vazão e piezometria, era comercializado por cerca de oitenta e cinco mil reais. Com isso, verifica-se a quase total inexistência deste tipo de equipamento para a finalidade puramente didática nas universidades brasileiras, frente ao seu alto valor de aquisição e, também, problemas com espaço físico. Como solução, pode-se projetar e confeccionar equipamentos com dimensões reduzidas com a finalidade didática, dentro das universidades, a exemplo de Pacheco *et al.* (2003). Os autores apresentam um tanque de percolação com dimensões reduzidas (85 cm x 50 cm x 20 cm), constituído por placas de madeira e acrílico, cujo equipamento foi desenvolvido e montado na COPPE/UFRJ. Quanto se trata de modelagem numérica, apesar do avanço tecnológico, a utilização desta ferramenta ainda não é prática comum nas universidades brasileiras. Seu uso pouco frequente, não necessariamente, passa pelos custos das licenças dos *softwares* – pois muitas empresas disponibilizam versões estudantis a menores custos ou até licenças gratuitas - mas sim pela falta de computadores (laboratórios de informática) e qualificação dos professores.

Desta forma, neste trabalho será apresentado o projeto e a construção de tanque de percolação, em modelo reduzido, para uso didático. O projeto foi concebido a partir da utilização de materiais reciclados e equipamentos descartados ou sem uso, mostrando ser possível a construção de equipamentos de baixo custo para uso didático dentro da própria Universidade. Por fim, para testar o equipamento e validar os resultados, foi feita a modelagem numérica pelo método de elementos finitos a partir de um *software*, cuja licença estudantil é disponibilizada gratuitamente no *web site* da empresa.

2. ELABORAÇÃO DO PROJETO

A concepção do projeto do modelo reduzido para ensaios de percolação surgiu da integração do Laboratório de Geotecnia e Construção e do Laboratório de Criatividade, ambos da Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande – FURG. O Laboratório de Geotecnia e Construção atua com ensaios geotécnicos em gerais (caracterização; compactação, Índice de Suporte Califórnia; classificação HRB, ASHTO e MCT; resistência ao cisalhamento de solos em geral através de cisalhamento direto, triaxiais e mini-palheta; ensaios de campo; modelos reduzidos de fundações em placas e estacas à compressão e tração; entre outros ensaios) e ensaios de materiais de construção, especialmente concreto. O Laboratório de Criatividade atua principalmente no desenvolvimento de equipamentos e novas tecnologias com o uso de materiais alternativos com enfoque na reciclagem de materiais e reaproveitamento de equipamentos inservíveis e descartados pela própria Universidade ou provenientes de outras fontes.

A figura 1 apresenta um croqui ilustrando os principais componentes do projeto. O equipamento é constituído das seguintes partes: (a) tanque de percolação – totalmente transparente, que permite a visualização da percolação e do fluxo de água, nele podem ser simulados diferentes tipos de obras (ex.: barragens, cortinas, etc.); (b) bancada móvel – para apoio do tanque de percolação e fixação dos reservatórios, da bomba, dos sistemas hidráulicos e do circuito elétrico; (c) sistema de tingidores – para traçado de três linhas de fluxo; (d) piezômetros – composto por conexões em latão e mangueiras de *nylon*, para medição das cargas hidráulicas; (e) sistema hidráulico de adução de água – dotado de bomba elétrica, registro para controle da vazão e válvula de retenção, para impedir o retorno da água bombeada; (f) sistema de educação – composto por extravasadores, que permitem o controle dos níveis de água a jusante e a montante, e registros a jusante que permite o desvio da água (quando muito tingida), para não tingir a água utilizada na recirculação; (g) circuito elétrico –



alimentação monofásica de 127 volts dotado de aterramento, interruptor e chave boia, que desliga a bomba automaticamente em caso de falta de água no reservatório de bombeamento; e (h) dispositivo de simulação – inicialmente preparado (ver figura 1) para simular a percolação de água abaixo de uma cortina, sendo utilizado areia para simular o terreno e uma placa de acrílico colada nas paredes do fundo e frontal para simular a cortina.

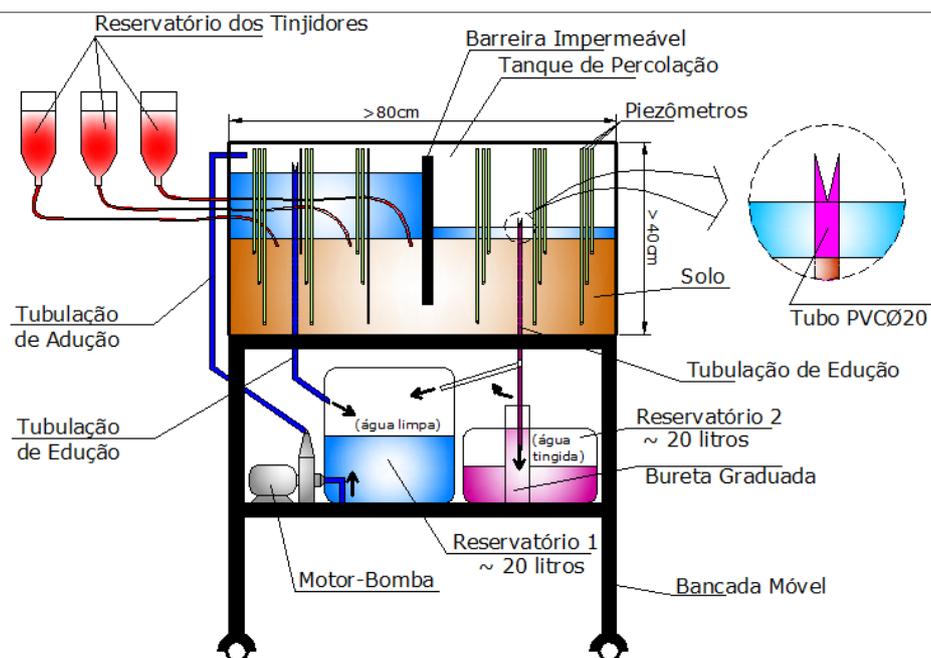


Figura 1- Projeto do modelo reduzido para ensaios de percolação

3. MATERIAIS EMPREGADOS E CUSTOS

O projeto foi concebido de forma mais sustentável possível, para tanto, diferentemente de outros equipamentos, foi prevista a recirculação da água. Também, com o objetivo de comprar o mínimo possível de materiais e peças, inicialmente foi realizado um levantamento, junto ao Laboratório de Criatividade, para verificar quais os materiais e peças que poderiam ser aproveitados, tendo como base um projeto conceitual previamente definido (Figura 1). Basicamente, foram encontrados e utilizados os seguintes materiais (ver figura 2): (a) tampa de acrílico transparente de estufa neonatal (84 cm x 34 cm x 34 cm); (b) bomba elétrica de máquina de lavar roupas; (c) estrutura metálica de suporte de equipamentos médicos; (d) bombonas plásticas de produtos de limpeza; (e) Perfis estruturais em alumínio para divisórias; (f) fonte de computador. O restante dos materiais, basicamente, peças do sistema hidráulico (mangueiras, tubos de PVC e conexões em geral), colas (PVC, epóxi, silicone, etc.) e algumas ferramentas manuais tiveram que ser adquiridos no comércio local. Para a compra destes materiais, foi gasto um total de R\$ 613,27.

4. CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO

Tendo como base o projeto, apresentado no item 2, separadas todas as peças e materiais a serem reaproveitadas e comprados todos os materiais novos, apresentados no item 3, foi feita a construção do equipamento. Inicialmente houve a necessidade de desmontagem da estufa



neonatal (figura 2a), vedação dos furos com cola epóxi e reforço das laterais (devido a pressão da areia e da água) com perfis em alumínio.



(a)



(b)



(c)

Figura 2 - Alguns materiais reaproveitados para a construção do equipamento - (a) Estufa neonatal, cuja tampa foi utilizada como tanque percolador, (b) Bomba elétrica de máquina de lavar, (c) Bombonas para armazenamento de produtos de limpeza

Após foi preparada a bancada, com a fixação e furação das duas bases de apoio (superior para o tanque e inferior para os reservatórios e bomba). A seguir, foi feita a furação do tanque percolador e o preparo (corte e furação) das bombonas (reservatórios) para as instalações hidráulicas de adução e educação (figura 2c). Concluídas as instalações hidráulicas, foi montado o circuito elétrico (condutores, interruptor, aterramento e chave boia). Depois, foram instalados treze piezômetros (figura 3a). Por fim, foram instalados os três tingidores, cujos reservatórios são garrafas de água mineral de PET de 500 ml, nas quais foram instalados equipos de soro hospitalar, com válvulas para regular a vazão ou injeção do líquido tingidor (figura 3b). Na figura 4 é apresentado o equipamento após a sua construção.



(a)



(b)

Figura 3 - Vista dos (a) dos 13 piezômetros instalados e (b) dos 3 tingidores

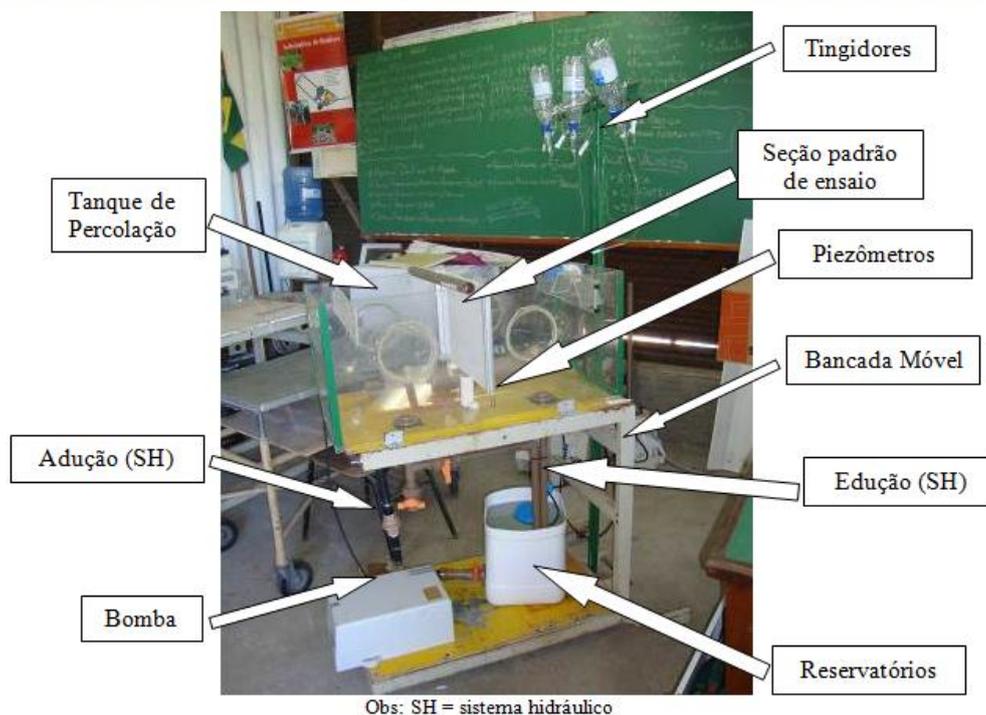


Figura 4: Vista geral do equipamento (modelo reduzido para ensaios de percolação) após a sua construção

Ao longo da montagem e construção do equipamento, foram realizados diversos testes de estanqueidade para verificar qualquer tipo de vazamento, que eram sanados a medida que foram identificados. Uma vez concluída a sua construção, foi feito um teste final somente com a percolação de água sem a utilização de solo.

5. TESTE DO EQUIPAMENTO

Concluído o último teste de estanqueidade (recirculação de água pelo equipamento sem solo), o equipamento foi efetivamente testado com a simulação de um caso de obra. O ensaio consistiu em simular o fluxo de água abaixo de uma cortina impermeável. Inicialmente foi cortada uma placa em acrílico a qual foi colada com cola de silicone junto às paredes frontal e de fundos do tanque. A seguir, foram colocados os extravasadores junto as duas saídas de água dispostas no fundo do tanque (figura 5). Importante destacar que os níveis de água em cada um dos lados do tanque são controlados pelas alturas dos extravasadores (tubos de PVC), sendo que para ocorrer fluxo de água no interior da areia, a altura do extravasador da jusante deve ser menor que o extravasador à montante. Utilizou areia comercializada como regular média, comumente utilizada nas construções da cidade de Rio Grande. A areia primeiramente foi lavada para a retirada de eventuais finos e matéria orgânica, para evitar a turbidez da água, em seguida foi seca ao ar livre. Na análise granulométrica conforme NBR 7181 (ABNT, 1984), obteve-se um percentual de 8,8% de pedregulho fino, 30,5% de areia grossa, 46% de areia média e 14,7% de areia fina, definido conforme a NBR 6502 (ABNT, 2005).

A areia, após seca, foi despejada lentamente no interior do tanque. Para a colocação da areia foi utilizado um funil, sendo a areia despejada em movimentos contínuos e de forma espiralada do centro para a borda. Este procedimento foi adotado para permitir a



homogeneização da areia, evitando a disposição em camadas, de modo a evitar uma eventual anisotropia ou caminhos preferenciais de fluxo de água. Após a colocação da areia colocou-se água dentro do tanque até os níveis dos extravasadores à direita e esquerda do tanque. Aguardou-se cerca de uma hora para garantir a total imersão (saturação) da areia e expulsão das bolhas de ar eventualmente formadas. Por fim ligou-se a bomba para a recirculação da água. A vazão da bomba foi regulada através do registro instalado a montante da bomba (saída do reservatório) até o equilíbrio do sistema. O equilíbrio do sistema é atingido quando os níveis de água a jusante e a montante ficarem constantes (limitados às alturas dos extravasadores), ou seja, a vazão que é bombeada (água que entra pela adução) deve ser igual à água que sai pelos extravasadores da jusante e montante. Uma vez atingido o equilíbrio, pode-se medir a vazão de água que percola pelo solo abaixo da cortina e as cargas hidráulicas nos piezômetros.

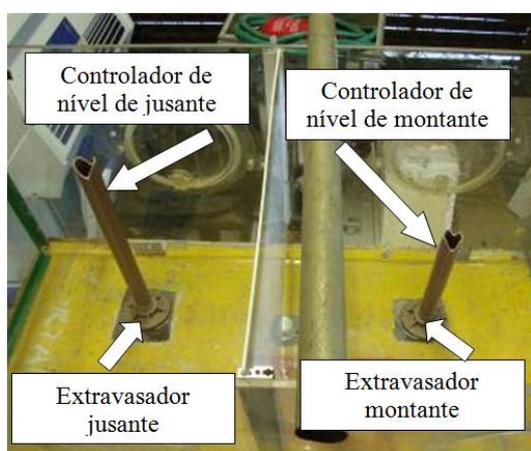


Figura 5 - Traçado das linhas de fluxo

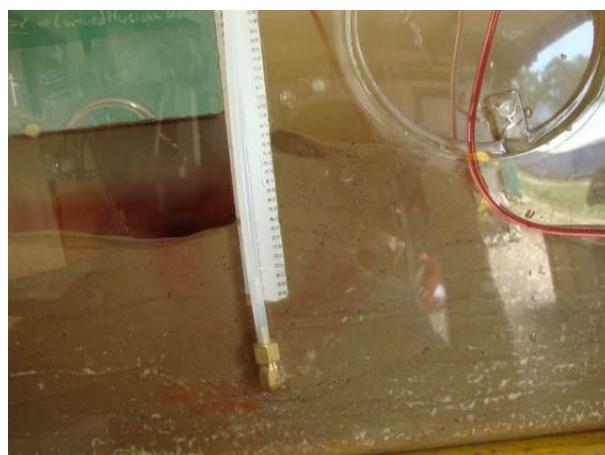


Figura 6 - Traçado das linhas de fluxo

Para a medição da vazão de percolação, efetua-se o desvio da água do extravasador de jusante (fechando um registro e abrindo outro). A vazão pode ser medida coletando-se determinado volume de água (com um bêquer ou proveta graduada) em um determinado tempo (registrado com um cronômetro). Para o ensaio em questão efetuou-se cinco coletas com volume iguais a 500 ml, sendo medidos dois tempos de 17 s e três com tempos de 16 s, cuja média corresponde à 16,4 s. A vazão é então obtida dividindo-se o volume coletado pelo tempo médio, que resultou em 0,03 l/s ou $3,05 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$. Depois das coletas, o extravasador de jusante foi novamente desviado para o reservatório de bombeamento.

Em seguida, foram lidos (medidos) os níveis de água dos piezômetros com auxílio de uma régua. Os resultados podem ser vistos na Tabela 1. Na primeira coluna é apresentada a identificação dos piezômetros (de 1 a 13), já as duas últimas colunas apresentam a posição dos piezômetros (foi considerado a origem do eixo ordenado como sendo o canto superior esquerdo do tanque). Na segunda coluna são apresentados os níveis dos piezômetros (medidos em relação ao fundo do tanque), que correspondem a carga total (H_T) no ponto de instalação do piezômetro. A terceira coluna traz a carga altimétrica (H_A), também no ponto de instalação em relação ao fundo do tanque. E por fim, a quarta coluna traz o cálculo das cargas piezométricas (H_P) (ou a pressão exercida pela água) na saída (no ponto de instalação de cada um dos piezômetros). A carga piezométrica corresponde a carga total subtraindo a carga altimétrica (ver equação 3).



Tabela 1 - Leituras dos piezômetros e carga hidráulicas

Identificação dos Piezômetros	Carga Hidráulica (cm)			Posição dos piezômetros	
	H_T (total)	H_A (altimétrica)	H_P (piezométrica)	X	Y
1	21,5	14,0	7,50	6,5	14,0
2	21,8	3,0	18,80	7,5	3,0
3	21,3	14,5	6,80	22,0	14,5
4	22,0	2,5	19,50	19,7	2,5
5	21,8	14,0	7,80	36,3	14,0
6	23,4	3,5	19,90	34,0	3,5
7	26,5	6,0	20,50	41,5	6,0
8	30,4	12,5	17,90	46,5	12,5
9	28,8	3,5	25,30	48,5	3,5
10	31,5	13,0	18,50	60,0	13,0
11	30,4	3,3	27,10	59,0	3,3
12	31,3	12,5	18,80	74,8	12,5
13	31,1	2,7	28,40	76,0	2,7

$$H_T = H_A + H_P \quad (3)$$

Por fim, testou-se os tingidores para o traçado das linhas de fluxo. Foram utilizados sucros artificiais de cores fortes (sabor uva, morango, etc.) dietéticos (sem açúcar granular para facilitar a dissolução e evitar o entupimento dos *equipos* de soros) e anil para tingimento de roupa. O traçado de uma das linhas de fluxo pode ser visualizado pela Figura 6. Como pode ser visto, o traçado das linhas de fluxo não foi muito eficiente e mostrou-se muito disperso. Para os próximos ensaios, a exemplo de Pacheco *et al* (2003), será utilizado corante de bolo ou corante de laboratório, por exemplo, azul de metileno.

6. MODELO FÍSICO X MODELO NUMÉRICO

No item 5 são mostrados os resultados obtidos pelo ensaio realizado no equipamento construído (modelo físico), sendo medida a vazão de percolação, bem como as carga hidráulicas (total, altimétrica e piezométrica) em treze pontos distintos. Para aprovar o equipamento (para ser usado efetivamente em aulas práticas de laboratório) e validar os resultados, o mesmo ensaio foi modelado pelo método de elementos finitos. Para a modelagem numérica utilizou-se a versão estudantil do *software SEEP/W*, versão 5.20, produzido pela *GEO-SLOPE Internacional Ltd.*

Antes de discutir os resultados, vale observar que o *software SEEP/W* realiza análises simplificadas em duas dimensões (plano: x e y), ou seja, quando uma das dimensões (em geral a profundidade, eixo z) é muito maior do que as outras duas dimensões – largura e altura. Neste caso, o resultado de vazão fornecido é expresso por metro linear ($m^3/s/m$) Embora os ensaios realizados em tanques de percolação sejam tridimensionais (pois as profundidades não são suficientemente grandes em relação à altura e à largura), ou seja, vazão medida é efetivamente a total (m^3/s), na modelagem numérica considera-se o plano como sendo a face frontal do tanque, e profundidade como sendo infinita (mesmo não sendo). Neste caso, basta



multiplicar a vazão por metro linear obtida na modelagem numérica pela profundidade do tanque para obter a vazão total de percolação, ou vice-versa. Já nas cargas hidráulicas não há alteração entre as análises em duas ou três dimensões, sendo que os valores obtidos no modelo físico, devem ser iguais às obtidas nas análises numéricas.

O exposto anteriormente somente é válido quando se tem uma face de percolação retangular (y, z). Porém a face de percolação do modelo construído é na verdade trapezoidal (ver figura 2a). Neste caso, pode-se utilizar o artifício de dividir a vazão por metro linear, obtida da modelagem, pela área do trapézio do tanque ($0,27 \text{ m}^2$) e multiplicando-a pela altura de escoamento ($0,09 \text{ m}$) do tanque (ver equação 4), para obter a vazão total no tanque.

$$\left(Q_{\text{tanque}} = \frac{Q_{\text{linear}} \cdot h}{A_{\text{trapézio}}} = \frac{Q_{\text{linear}} \cdot 0,09}{0,27} = 0,333 \cdot Q_{\text{linear}} \right) \quad (4)$$

Onde: Q_{tanque} = vazão total calculada pela modelagem numérica (m^3/s); Q_{linear} = vazão por metro linear obtida pela modelagem numérica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$); $A_{\text{trapézio}}$ = área da seção do trapézio (m^2); h = altura da seção de percolação do tanque (m)

Para a modelagem numérica, primeiramente, desenhou-se a geometria da face frontal do tanque, bem como os níveis de areia (NT) e de água (NA) à jusante e à montante. Em seguida, definiu-se as condições de contorno, considerando o fundo, as laterais e a placa de acrílico (cortina) como sendo impermeáveis ($Q = 0$) e as cargas hidráulicas totais junto as superfícies da areia ($H_T = 32 \text{ cm}$ à montante e $H_T = 21 \text{ cm}$ à jusante). Mas, faltava o último parâmetro a ser informado, que é o coeficiente de permeabilidade da areia (k). Como não se possuía esta informação, obteve-se o mesmo por retroanálise. Assim, considerando-se uma condição isotrópica ($k_x = k_y$) obteve-se um valor de $k = 1,7438 \times 10^{-1} \text{ m/s}$, cujo valor é compatível para areia, conforme a bibliografia (ex.: Das, 2007; Ortigão, 2007). Além disso, aplicando-se o método gráfico, por meio das linhas de fluxo e equipotenciais obtidas na modelagem numérica (figura 7) e a equação para cálculo da vazão por metro linear (equação 5), obteve-se uma vazão teórica que corresponde a 98,7% da vazão obtida no ensaio realizado no tanque.

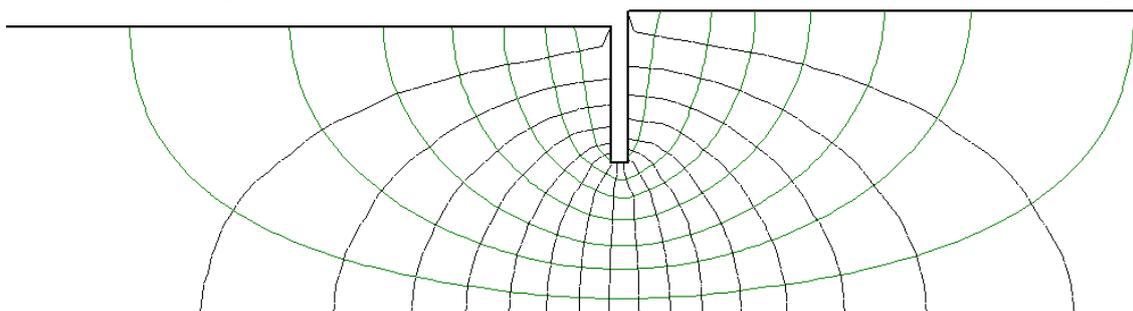


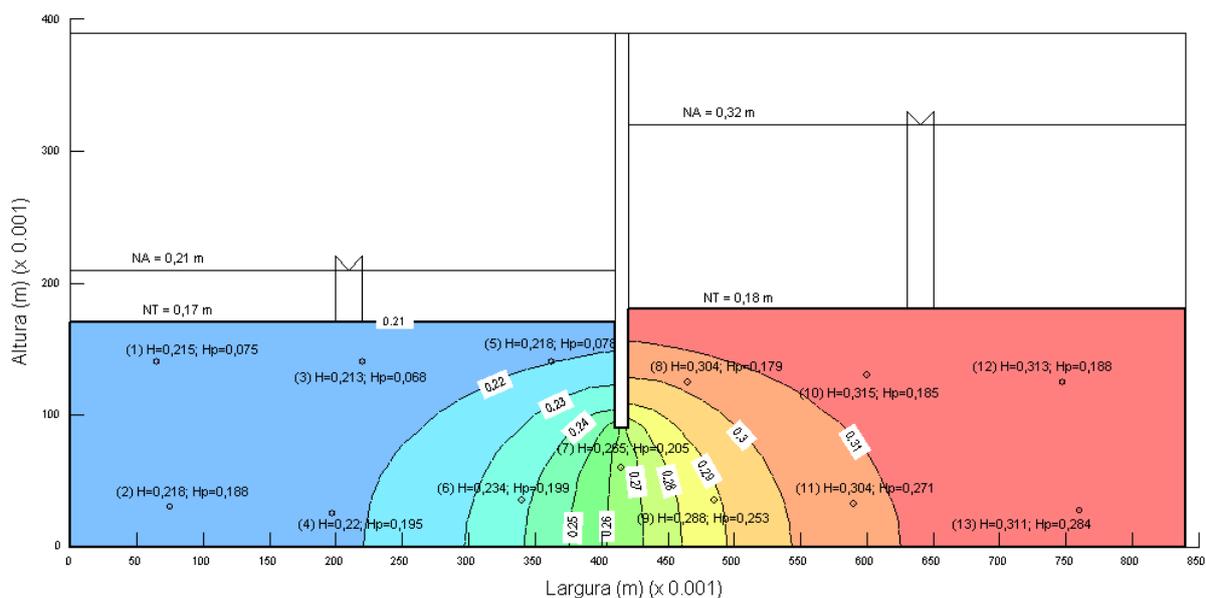
Figura 7 - Traçado da malha da rede fluxo obtida na análise numérica ($n_c = 8$ e $n_q = 17$)

$$Q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \Delta H \cdot \frac{n_c}{n_q} \quad (5)$$

Onde: Q = vazão linear ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$); k = coeficiente de permeabilidade isotrópico (m/s); i = gradiente hidráulico; A = área de percolação (m^2); ΔH = variação da carga hidráulica total (m); n_c = canais de fluxo e n_q = quedas de carga

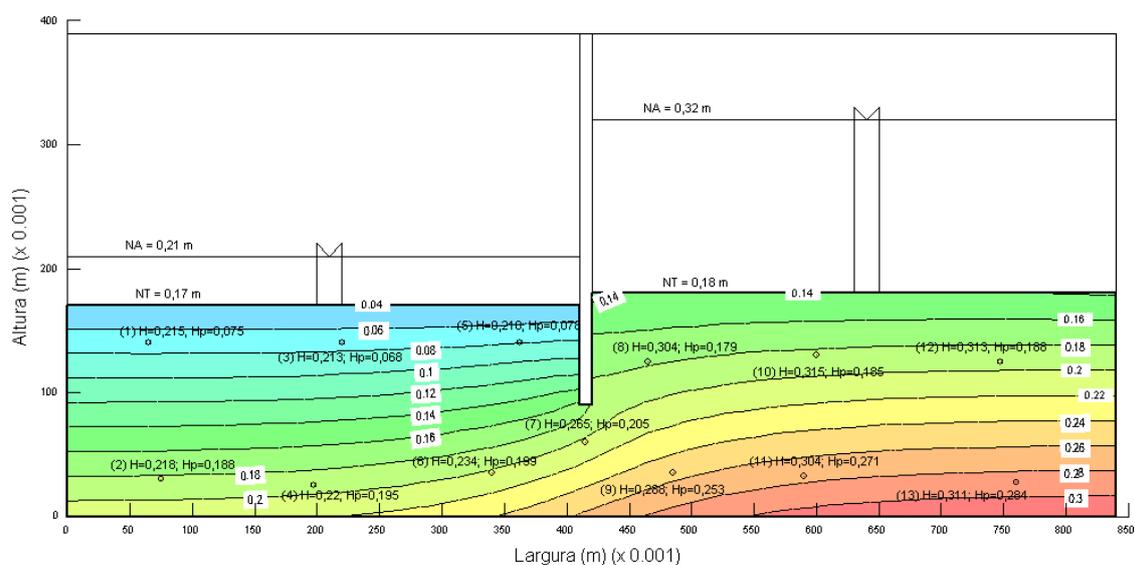


Para verificar a validade das cargas hidráulicas lidas nos piezômetros, comparou-se estas leituras (Tabela 1) com as obtidas na modelagem numérica. Para tanto, no desenho inserido na análise numérica, representou-se os piezômetros (pequenos círculos e a sua identificação entre parênteses) e as respectivas cargas hidráulicas totais e piezométricas (dados da Tabela 1). De modo a comparar os valores lidos nos ensaios com os valores das cargas fornecidas pelo *software*, obteve-se o desenho das isóbaras totais e piezométricas geradas no interior do tanque (figuras 8 e 9). Pelas figuras 8 e 9 é possível verificar que os valores das cargas registrados pelos piezômetros encontram-se dentro das isóbaras definidas pelo *software*, mostrando a compatibilidade entre o ensaio e a modelagem numérica.



Observações: cargas lidas em “cm”

Figura 8 - Isóbaras de carga total (H_T)



Observações: cargas lidas em “cm”

Figura 9 - Isóbaras de carga piezométrica (H_P)



7. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra ser possível desenvolver (neste caso, o equipamento de percolação) e utilizar (neste caso, *softwares* de modelagem numérica na versão gratuita) poderosas ferramentas de ensino de baixo custo. Neste sentido, consegue-se sair de uma abordagem puramente teórica e matemática, através de experimentos/ensaios de laboratório e simulação em computador, onde é possível a visualização dos fenômenos até então de difícil entendimento por parte dos alunos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) e à Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis (PRAE) da Universidade Federal do Rio Grande – FURG (Edital Conjunto PROGRAD/PRAE nº 05/2011) pelos recursos financeiros disponibilizados e pelas bolsas concedidas aos discentes, para que fosse possível a realização do projeto de ensino PROGRAD/FURG nº 20/2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502: Rochas e Solos*. Rio de Janeiro: ANBT, 2005. 18p;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro: ANBT, 1984. 13p;

BROMHEAD, Edward N. *Flow nets and textbooks*. **Geotechnical Engineering**, ICE, n. 160, Issue GE4, p. 203–207, 2007;

DAS, Braja M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 561 p;

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. *Soil Mechanics*. New York: John Wiley, 1969. 553 p;

ORTIGÃO, J. A. R. *Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 386 p;

PACHECO, Alexandre de Oliveira; ALVES, Maria Cristina; LOPE, Francisco de R. *Desenvolvimento de um Modelo Didático de Percolação em Solo*. **Anais: XVIII Congresso Regional De Iniciação Científica e Tecnológica**, Itajaí: UNIVALI, 2003;

PINTO, Carlos de Souza. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 356 p



CONSTRUCTION OF PHYSICAL MODEL OF LOW COST AND APPLICATION OF NUMERICAL MODEL FOR SEEPAGE AND FLOW OF WATER THROUGH SOILS PROBLEMS

***Abstract:** To solve problems of seepage and flow water through soils it is necessary use the flow differential equation that can be extremely complex and hard. In certain problems, simplified analytical solutions, numerical models, physical models, graphical methods or models of analogy with electrical circuits can be adopted. Traditionally, the soil mechanics classes, are seen only the simplified analytical solutions and graphical methods whose solutions are extremely theoretical. In this way, was constructed, in the Federal University of Rio Grande, a low-scaling model of seepage tank (with recycled materials) with aim to incorporate a new tool to solve this kind of problems and allows the visualization of the phenomena of seepage and water flow through soils. At the same time, encouraging students to solve and compare laboratory simulated cases with numerical modelling by finite element method.*

***Key-words:** Seepage Problems, Flow Water through Soils, Seepage Tank, Numerical Model, Low Cost*