

# Aplicação de Modelagem Numérica para Solução de Modelo Físico de Percolação de Água em Solos de Dupla Camada

C. A. Ruver, K. F. Sloczinski

**Resumo** — A maioria dos projetos de geotecnia envolve a análise do fluxo e da percolação de água em solos. Essas análises consistem na determinação de diferentes parâmetros hidráulicos, por exemplo, vazão e poro-pressões, que são essenciais para o correto e seguro dimensionamento de estruturas. Muitos problemas de fluxo e percolação podem ocorrer em geometrias não regulares (problemas tridimensionais) e em solos não homogêneos, dificultando a solução analítica. Problemas desse tipo podem ser resolvidos de diferentes formas, que não a matemática. Neste trabalho, será abordada a solução de um problema típico da engenharia geotécnica por dois métodos: físico (ensaio em tanque de percolação) e numérico (uso de um software de elementos finitos). Primeiramente, foi feito um ensaio em laboratório e, após, foi feita a modelagem numérica dos fenômenos físicos. O problema proposto trata da análise da percolação de água no entorno e sob uma estrutura de contenção, inserida em um subsolo de dupla camada, composto por duas areias: grossa e fina. A comparação dos resultados dos dois métodos mostram diferenças que variam de 0,0% (valores exatos) até 6,7%, com média de 2,8%. Estas diferenças do ponto de vista da engenharia são extremamente pequenas, mostrando a eficiência de ambos os modelos, desde que empregados corretamente e respeitadas as peculiaridades de cada modelo que serão apresentadas ao longo do texto.

**Palavras-Chave** — Percolação de água em solos; Modelo físico; Modelagem numérica.

## I. INTRODUÇÃO

A DETERMINAÇÃO da percolação de água nos solos é de extrema importância para a engenharia geotécnica. Por exemplo, no estudo de barragens de terra é importante conhecer a vazão de água que percola pelo corpo da barragem e pelas fundações - cujo volume de água percolado pode ou não viabilizar o empreendimento - e as forças de percolação oriundas do fluxo para evitar o fenômeno de levantamento de fundo. Também, pode-se citar, como exemplo, os diques secos

e os subsolos de edificações, sendo fundamental nestes casos, a determinação da quantidade de água que percola sob a estrutura, para o correto dimensionamento dos sistemas de bombeamento.

Sabe-se que a presença de água nos solos, na condição estática ou em movimento, altera a tensão efetiva, o que consequentemente altera sua resistência ao cisalhamento e capacidade de suporte [1]. O fluxo de água ascendente provoca a redução da tensão efetiva, podendo chegar à zero. Quando isso ocorre, tem-se a fluidização do solo (fenômeno de liquefação), principalmente em solos arenosos de baixa compacidade [2].

A solução de problemas de fluxo de água em solos tem como objetivo determinar os seguintes parâmetros hidráulicos: (a) a vazão de água que percola pela ou sob a estrutura ( $Q$ ); (b) as cargas hidráulicas ( $H$ ) ou poro-pressão ( $u$ ) que atuam junto das estruturas; (c) forças de percolação ( $Fp$ ); (d) direções e sentidos do movimento de água, e suas respectivas velocidades ( $v$ ); (e) gradientes hidráulicos ( $i$ ); (f) variação na tensão efetiva do solo ( $j$ ); (g) coeficiente de permeabilidade do solo ( $K$ ).

Do ponto de vista matemático, a solução de problemas de percolação de água em solo consiste em resolver a equação diferencial geral de fluxo (Eq. 1), originária da teoria da continuidade ([1], [2], [3], [4] e [5]). A Eq. 1, mesmo considerando uma série de simplificações, (fluido incompressível, regime permanente - vazão de entrada igual à vazão de saída, fluxo estacionário, propriedades do solo permanecem constantes - principalmente índice de vazios e grau de saturação), na maioria das vezes, não é de solução trivial.

$$\Delta Q = Q_{entrada} - Q_{saída} = K_x \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \dots \quad (1)$$
$$\dots + K_z \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

C.A. Ruver é Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor Adjunto II da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Pesquisador e consultor do Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG. (Fone: +555332925252, e-mail: cesar.ruver@gmail.com)

K. F. Sloczinski é graduando do curso de Engenharia Civil de Escola de Engenharia Civil (Seriado) da Universidade Federal de Rio Grande - FURG. Ex-bolsista da PROGRAD/PRAE/FURG (2011-2012) nos projetos de ensino n. 20/2011 e 42/2012 (e-mail: kelter\_s@hotmail.com)

Somente para casos mais simples, a solução analítica se torna possível. Segundo [2], problemas de percolação de água em permeâmetros, ou seja, problemas unidimensionais são facilmente solucionados de forma analítica. Conforme [2], as experiências de Reynolds e D'arcy mostram que o fluxo de água em solos é do tipo linear, sendo a velocidade de fluxo ( $v$ ) proporcional ao gradiente hidráulico ( $i$ ). Desta forma, a vazão

de água ( $Q$ ) que flui pelos solos, em condição isotrópica ( $K = K_x = K_y = K_z$ ), pode ser obtida por meio da Eq. 2. Além do cálculo da vazão pode-se determinar a carga piezométrica ( $h_p$ ) (Eq. 3), com a qual pode-se determinar a poro-pressão e a força de percolação em qualquer parte do solo no interior do permeâmetro.

$$v = K.i = K \cdot \frac{\Delta H}{L} \therefore Q = K.I.A = K \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot A \quad (2)$$

Sendo,  $v$  = velocidade de fluxo (m/s);  $K$  = coeficiente de permeabilidade (m/s);  $i$  = gradiente hidráulico (adimensional);  $\Delta H$  = perda de carga total (m);  $L$  = comprimento da amostra de solo (m);  $A$  = área transversal da amostra de solo (m<sup>2</sup>)

$$h_p = (H_m - l.i) - h_a \quad (3)$$

Sendo,  $h_p$  = carga piezométrica (m);  $H_m$  = carga total a montante do permeâmetro (m);  $l$  = distância da superfície do solo a montante até o ponto desejado (m);  $h_a$  = carga altimétrica (distância do nível de referência até o ponto desejado) (m)

Para problemas tridimensionais ou bidimensionais (quando uma das dimensões da obra é mais extensa que as outras duas, por exemplo, barragens) a solução analítica da Eq. 1 é bastante complexa. Além disso, o subsolo é formado por diferentes camadas de solo, cujas propriedades hidráulicas podem não ser homogêneas e constantes. Sendo assim, problemas desta natureza podem ser resolvidos por meio de métodos analógicos (circuitos elétricos, por exemplo), gráfico (desenho da rede de fluxo), numérico (elementos finitos, diferenças finitas, etc.), ou físico (ensaios em tanque de percolação) [2]. Neste sentido, este trabalho visa verificar a aplicação e a comparação entre os dois últimos métodos citados. Para tanto, realizou-se ensaios em tanque de percolação com duas camadas de areias distintas: grossa e fina, sendo, posteriormente, aplicado o modelo de elementos finitos por meio do software SEEP/W.

## II. METODOLOGIAS DE SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE FLUXO BIDIMENSIONAL EM SOLOS

Para a solução do problema proposto, foram empregadas duas metodologias distintas: modelo físico e modelo numérico.

O modelo físico consiste em realizar ensaios em tanques de percolação. Para a realização desta pesquisa, utilizou-se o equipamento projetado e confeccionado pelo Laboratório de Geotecnia e Concreto da FURG [6]. Para a modelagem numérica, foi utilizado o software SEEP/W de elementos finitos.

Após a obtenção das soluções (determinação dos parâmetros hidráulicos) por meio de cada uma das metodologias, essas foram comparadas entre si, a fim de avaliar o desempenho de cada um dos modelos.

### A. Modelo Físico

Conforme [7], os modelos físicos são largamente utilizados

na engenharia em conjunto com as análises teóricas. Os modelos físicos são representações com dimensões reduzidas de estruturas reais. Os modelos reduzidos (físicos) são empregados quando a construção de estruturas em tamanho real se torna difícil, cara ou perigosa; para fins de pesquisa ou projeto [7].

Para o presente estudo foi empregado o tanque de percolação projetado, construído e testado na FURG por [6]. A Fig. 1 apresenta um esquema do equipamento, mostrando as dimensões, os níveis de água (NA) e do solo (NT) na jusante e na montante, e a localização dos piezômetros. A Fig. 2 mostra uma fotografia do equipamento. O tanque de percolação foi confeccionado em acrílico transparente para permitir a visualização dos ensaios.

O tanque possui uma divisória em acrílico (removível), com o objetivo de simular a estrutura de contenção (parede diafragma ou cortina de estaca prancha). O tanque é dotado de treze piezômetros, confeccionados com tubos de nylon, através dos quais é possível visualizar e medir as cargas hidráulicas. Os níveis de água são mantidos constantes durante todo o ensaio, o que é garantido por meio de extravasadores que escoam o excesso de água percolado e/ou bombeado. O abastecimento à montante é realizado por meio de bombeamento da mesma água que sai pelo extravasadores, ou seja, é realizada a recirculação, evitando o desperdício de água. O equipamento também é dotado de três injetores de corante que permite o traçado das linhas de fluxo e a visualização do movimento da água (direção e sentido) no solo. O fluxo de água do extravasador de jusante pode ser desviado para uma bureta graduada, e com isso, pode-se determinar a vazão de fluxo medindo-se o tempo necessário para coletar certo volume de água.

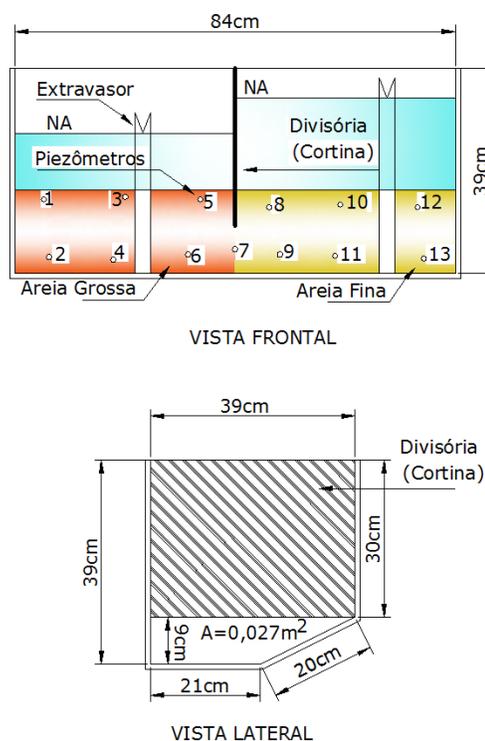


Fig. 1. Esquema do equipamento utilizado para a execução dos ensaios



Fig. 2. Fotografia do tanque de percolação

### B. Modelo Numérico

Os modelos numéricos nos últimos anos vêm se consagrando na engenharia. Tiveram grande impulso a partir dos anos 80 com a popularização do micro computador e com o avanço tecnológico. Existem diversos modelos numéricos, como os métodos de elementos finitos e diferenças finitas [8].

No presente estudo, utilizou o software SEEP/W 5.20, na versão estudantil, de livre distribuição e que pode ser obtido no site da empresa *GEO-SLOPE Internacional Ltd.* O programa utiliza o método de elementos finitos e tem uma interface gráfica do tipo CAD. O programa permite a solução de problemas que possibilitam a análise bidimensional (dimensões  $x$  e  $z$  finitas, sendo  $y$  infinito ou muito maior em relação às demais dimensões).

A modelagem consiste em desenhar uma malha de elementos finitos, que engloba a seção do solo (por exemplo, a vista frontal do tanque da Fig. 1), a qual deve ser dividida em finitos elementos (no máximo 500 elementos na versão estudantil) retangulares ou triangulares, formados por 3, 6 ou 7 e 4, 8 ou 9 nós cada elemento, respectivamente. Após define-se as condições de contorno junto aos nós da borda da malha. Em seguida, definem-se as propriedades da malha (características geotécnicas do solo, como coeficiente de permeabilidade, condições de saturação e anisotropia ou isotropia, entre outros). E por fim, roda-se a solução. Os resultados podem ser obtidos em pontos isolados, nos nós ou nos elementos da malha; ou em conjunto, por meio de diagramas de mesmas propriedades. Os resultados podem ser obtidos em formatos numéricos, tabelas, gráficos ou figuras.

### III. CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS

Antes da execução do ensaio no tanque de percolação e a modelagem numérica, as duas areias foram caracterizadas. A Tab. 1 apresenta as características geotécnicas obtidas através de ensaios de laboratório. A Fig. 3 apresenta as curvas granulométricas.

A areia fina foi coletada no interior do Campus Carreiro da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, localizado na cidade de Rio Grande/RS, sendo esta obtida de uma

formação eólica (duna), típica de todo litoral gaúcho. Esta areia, de uma forma geral, é praticamente isenta de material pulverulento e de granulometria uniforme (82,2% de areia fina).

A areia caracterizada como grossa é de origem aluvial, sendo adquirida no comércio local. Comercialmente é denominada de “areia média lavada” e é largamente empregada nas obras de construção civil da região. Vale lembrar que a areia antes de ser utilizada no ensaio passou por peneiramento para retirar grande parte da fração de areia média e quase a totalidade da fração fina, de modo a manter predominantemente a fração mais grosseira.

TABELA 1  
Características das areias

Características	Areia	
	Grossa	Fina
Pedregulho		
fino ( $2 < \phi \leq 20$ )	12,2%	0,0%
grossa ( $0,6 < \phi \leq 2$ )	62,5%	0,0%
Areia		
média ( $0,2 < \phi \leq 0,6$ )	24,1%	17,5%
fina ( $0,06 < \phi \leq 0,2$ )	1,2%	82,2%
Argila/silte	0,0%	0,3%
Diâmetro efetivo - $D_{10}$ (mm)	0,342	0,087
Coeficiente de curvatura - $C_c$	1,07	0,96
Coeficiente de uniformidade - $C_u$	0,26	0,58
Índice de vazios máximo - $e_{max}$	0,74	0,81
Índice de vazios mínimo - $e_{min}$	0,50	0,56
Massa específica real - $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,64
Classificação		
SUCS	SP	SP
HRB	A-1b	A-3
Coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) (m/s)	$3,52 \times 10^{-3}$	$1,94 \times 10^{-4}$

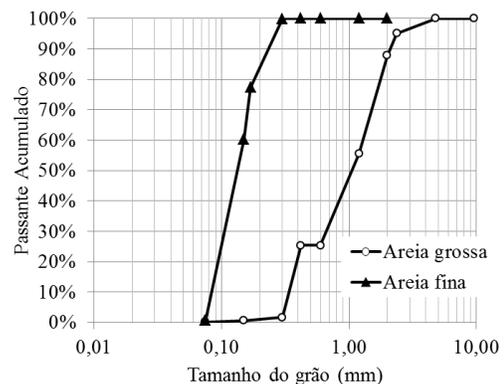


Fig. 3. Distribuição granulométrica das duas areias

### IV. EXECUÇÃO DO ENSAIO (MÉTODO FÍSICO)

A proposta do trabalho é analisar a percolação de água em dois meios distintos. Desta forma, colocou-se as duas areias separadamente no tanque, sendo colocada a areia fina no lado direito e a areia grossa no lado esquerdo. A separação física das areias, sob a divisória de acrílico foi feita por meio de papel filtro, para evitar a mistura das duas areias. A disposição das areias é mostrada na Fig. 1.

As areias foram despejadas, homogeneamente, no tanque a uma altura aproximada de 15 cm, com auxílio de um funil, até uma altura um pouco abaixo do extravasor de jusante, em

ambos os lados da divisória. A Tab. 2 apresenta a quantidade de areia utilizada para a montagem do ensaio, bem como as características (índices físicos) destas, no interior do tanque.

Uma vez colocadas no interior do tanque, despejou-se água para a imersão das areias. Depois de inundadas, ligou-se a bomba d'água e abriu-se os registros para a circulação da água pelo sistema hidráulico do equipamento. A vazão da bomba foi regulada até que houvesse equilíbrio entre a vazão de entrada no reservatório de água (retorno dos extravasadores de jusante e montante) e a quantidade bombeada para a montante. Uma vez atingido o equilíbrio da vazão, os níveis de água a jusante (lado esquerdo do tanque) e montante (lado direito do tanque) permaneciam constantes.

TABELA 2

Índices físicos das areias no interior do tanque de percolação		
Índices Físicos	Grossa	Fina
Massa de areia no tanque (kg)	43,99	40,65
Volume de areia no tanque (m <sup>3</sup> )	0,027	0,027
Peso específico aparente seco - $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,97	14,76
Índice de vazios - $e$	0,64	0,79
Porosidade - $n$	0,39	0,44
Compacidade - $D_r$	53%	10%
Umidade do solo inundado - $w$ (%)	24,3%	30,0%
Peso específico saturado - $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,85	19,19
Gradiente hidráulico crítico - $i_{cr}$	0,985	0,919

Uma vez mantidos constantes os níveis de água, a bomba d'água foi mantida ligada por cerca de duas horas, para garantir a estabilidade e constância da vazão de percolação de água pelo solo. Decorrido este prazo, efetuava-se a leitura (com régua metálica graduada de 1 mm em 1mm) das cotas de água e do solo, a partir do fundo do tanque (nível de referência). A Tab. 3 apresenta os resultados de leituras. Na Tab. 3 é mostrado o cálculo da perda de carga total ( $\Delta H = 0,11$  m), proporcionado pelo desnível de água a montante e a jusante, que é condição necessária para haver fluxo de água no solo ( $\Delta H \neq 0$ ).

TABELA 3

Medidas das cotas de areia e água no interior do tanque	
Característica	Medida
Nível de Referência (NR)	Fundo do tanque
Solo à montante (NT <sub>m</sub> )	18,5 cm
Solo à jusante (NT <sub>j</sub> )	19,0 cm
Água à montante - H <sub>m</sub> (NA <sub>m</sub> )	32,5 cm
Água à jusante - H <sub>j</sub> (NA <sub>j</sub> )	21,5 cm
Perda de carga - $\Delta H = H_m - H_j$	11,0 cm

Após a medida das cotas, foi determinada a vazão que passa sob a divisória (cortina) (abertura de 9 cm de altura, ver Fig. 1). Para a determinação da vazão, desviou-se o fluxo de jusante para uma bureta graduada. Efetuou-se um total de cinco coletas de volume ( $V$ ) e determinou-se o tempo ( $t$ ) necessário através de um cronômetro. A partir da Eq. 4, obteve-se a vazão de percolação. A Tab. 4 apresenta a vazão média obtida no ensaio. Além da vazão média, determinou-se a vazão média linear ( $Q_l$ ), que corresponde a razão da vazão média pela largura média da seção de percolação da água.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4)$$

O ensaio no tanque de percolação permite, além da determinação da vazão de percolação, determinar a pressão de água (poro-pressão) gerada no interior das duas areias. A poro-pressão pode ser obtida por meio das leituras dos 13 piezômetros instalados na face frontal do tanque. A poro-pressão ( $u$ ) é determinado pela Eq. 5. A Eq. 5 é função da carga piezométrica, e essa por sua vez pode ser obtida pela equação de carga de Bernoulli (Eq. 6).

TABELA 4

Determinação da vazão de percolação registrada no ensaio		
Volume (m <sup>3</sup> )	Tempo	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
216 x 10 <sup>-6</sup>	35 <sup>''</sup> ,4	6,10 x 10 <sup>-6</sup>
210 x 10 <sup>-6</sup>	34 <sup>''</sup> ,6	6,07 x 10 <sup>-6</sup>
233 x 10 <sup>-6</sup>	38 <sup>''</sup> ,3	6,08 x 10 <sup>-6</sup>
227 x 10 <sup>-6</sup>	37 <sup>''</sup> ,3	6,09 x 10 <sup>-6</sup>
218 x 10 <sup>-6</sup>	35 <sup>''</sup> ,6	6,12 x 10 <sup>-6</sup>
Vazão Média ( $Q$ ):		6,09 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s
Vazão Média Linear ( $Q_l$ ):		2,03 x 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s/m

$$u = h_p \cdot \gamma_w \quad (5)$$

$$H = h_a + h_p + h_v = h_a + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

Sendo,  $\gamma_w$  = peso específico da água (~ 10 kN/m<sup>3</sup>)

A equação de Bernoulli é composta por três componentes. A carga altimétrica ( $h_a$ ) corresponde a cota ou distância de um nível de referência (NR) previamente escolhido (no caso do ensaio, o fundo do tanque) até o ponto de interesse (no caso do ensaio, as saídas dos piezômetros). Para os casos de hidráulica de solos, a carga de velocidade ( $h_v$ ) pode ser desprezada, pois a velocidade da água em solos ( $v$ ) é muito pequena. Já a carga total ( $H$ ) corresponde a cota ou distância de um nível de referência (NR) previamente escolhido (no caso do ensaio, o fundo do tanque) até o nível de água do interior do piezômetro. Desta forma, a carga piezométrica pode ser determinada pela Eq. 7. A Tab. 5 traz os valores das cargas hidráulicas medidas durante o ensaio.

$$h_p = H - h_a \quad (7)$$

Ainda, procurou-se avaliar uma possível ocorrência de liquefação (areia movediça). Sabe-se que o fenômeno de liquefação ocorre pela combinação de três fatores: (a) fluxo de água ascendente; (b) somente em areias; e (c) quando o gradiente hidráulico ( $i$ ) é superior ao gradiente hidráulico crítico ( $i_{cr}$ ) (ver valores para cada uma das areias ensaiadas na Tab. 2). Segundo esses critérios, verifica-se que este fenômeno, para o ensaio realizado, somente poderia ocorrer na superfície da areia grossa (região de fluxo ascendente) e junto à divisória de acrílico. Para tanto, colocou-se um peso de balança com cerca de 2 kg nessa posição, para verificar um

possível afundamento do peso na areia. Como o peso permaneceu imóvel, verificou-se experimentalmente a não ocorrência do fenômeno de liquefação.

TABELA 5  
Cargas hidráulicas obtidas durante o ensaio

Piezômetro	$H$ (m)	$h_a$ (m)	$h_p$ (m)	$u$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	0,220	0,145	0,075	0,75
2	0,219	0,030	0,189	1,89
3	0,217	0,145	0,072	0,72
4	0,219	0,030	0,189	1,89
5	0,215	0,140	0,075	0,75
6	0,218	0,040	0,178	1,78
7	0,230	0,060	0,170	1,70
8	0,300	0,130	0,170	1,70
9	0,275	0,040	0,235	2,35
10	0,320	0,130	0,190	1,90
11	0,310	0,035	0,275	2,75
12	0,315	0,125	0,190	1,90
13	0,315	0,030	0,285	2,85

Por fim, com o objetivo de verificar o caminho e percurso da água pelas areias (traçado de linhas de fluxo), injetou-se corante na superfície da areia fina (lado direito) junto à face frontal do tanque. Como corante, utilizou-se azul de metileno (em pó) diluído em água destilada (proporção de 2g por litro de água). A escolha do azul de metileno justifica-se pelo fato de ser um excelente traçador e pelo fato de que, na concentração utilizada, não mancha ou tinga a areia, nem as paredes do tanque. A Fig. 4 mostra uma fotografia com a formação das linhas de fluxo. Pelo traçado das linhas de fluxo, foi possível observar que a linha mais externa (com maior afastamento da placa divisória) apresentou uma espessura maior que a linha interna (mais próxima da divisória). Isso ocorre pelo fato da velocidade do fluxo naquela região ser menor, o que ocasiona uma maior dispersão do corante. Também pode-se observar uma maior dispersão de corante na areia grossa em relação à areia fina (ver na Fig. 4). Como o coeficiente de permeabilidade da areia grossa é maior (18x) que o da areia fina (ver Tab. 1), a velocidade nessa é maior que aquela, provocando uma maior dispersão do corante.

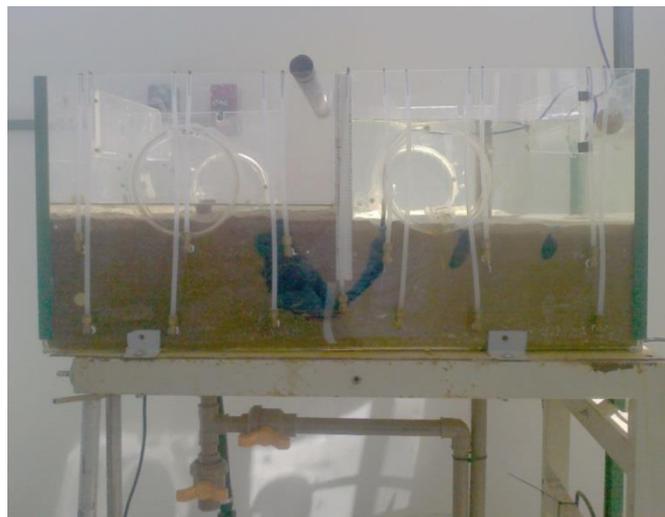


Fig. 4. Traçado das linhas de fluxo pelo corante no decorrer da execução do ensaio

## V. MODELAGEM NUMÉRICA

Para a modelagem numérica, primeiramente, lançou-se a geometria da vista frontal do tanque (Fig. 1), bem como as cotas de areia e níveis de água (Tab. 3) na interface CAD do software. Posteriormente, definiu-se a malha de elementos finitos (composta por 328 elementos retangulares, com 4 nós por elemento, totalizando 383 nós) (mostrado na Fig. 5). A seguir, introduziu-se as características de ambas as areias (Tab. 1) (equações de coeficiente de permeabilidade e de saturação em função da pressão, sendo definido um coeficiente de permeabilidade constante, o solo como sendo saturado independente das cargas, e condição isotrópica). Por fim, definiu-se as condições de contorno (laterais e fundo do tanque e entorno da cortina como sendo de fluxo total zero; e as superfícies de jusante e montante com as respectivas cargas totais), considerando os níveis de água do ensaio e o fundo do tanque como a referência. A Fig. 5 apresenta a malha de elementos finitos. O próximo passo foi rodar a solução. Após o cálculo da solução, pode-se obter os diferentes parâmetros hidráulicos.

O primeiro parâmetro hidráulico de interesse é a vazão. A vazão pelo software SEEP/W é obtida de forma direta, seccionando-se a malha de elementos finitos por uma linha de corte, como pode ser visto nas Figs. 6 e 7. Como o software SEEP/W é de análise bidimensional (comprimento infinito), obteve-se a vazão por metro cúbico linear. Para o problema proposto, obteve-se uma vazão linear ( $Q_l$ ) de  $1,9733 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$ .

O software SEEP/W permite obter os parâmetros hidráulicos isoladamente por nó ou elemento, conforme já citado. Como posicionou-se 13 nós da malha de elementos finitos, na mesma posição da saída dos piezômetros do tanque, pode-se obter os parâmetros hidráulicos nestes nós, como se fossem as leituras de piezômetros. A Tab. 6 apresenta os valores das cargas hidráulicas obtidas na modelagem numérica.



Fig. 5. Malha de elementos finitos empregada na modelagem numérica

Além das informações por nó ou por elemento, pode-se visualizar o comportamento dos parâmetros hidráulicos em toda a malha, na forma de linhas de isoparâmetros. A Fig. 6 apresenta as linhas de isocarga total e a Fig. 7 apresenta as linhas de isocarga piezométrica. Nas Figs. 6 e 7, além do traçado das linhas de mesma carga obtidas na modelagem numérica, foram colocados os valores das cargas obtidas no ensaio (Tab. 5), para posterior comparação entre os resultados.

TABELA 6

Cargas hidráulicas obtidas na modelagem numérica

Piezômetro	$H$ (m)	$h_a$ (m)	$h_p$ (m)	$u$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	0,2210	0,1508	0,0702	0,70
2	0,2105	0,0300	0,1805	1,81
3	0,2105	0,1400	0,0705	0,71
4	0,2111	0,0247	0,1864	1,86
5	0,2116	0,1400	0,0716	0,72
6	0,2135	0,0350	0,1785	1,78
7	0,2255	0,0550	0,1705	1,71
8	0,2905	0,1250	0,1655	1,66
9	0,2641	0,0350	0,2291	2,29
10	0,3150	0,1300	0,1850	1,85
11	0,3003	0,0325	0,2678	2,68
12	0,3220	0,1250	0,1970	1,97
13	0,3185	0,0275	0,2910	2,91

Na Fig. 8 são mostrados os vetores de velocidade de fluxo. Por meio dos vetores é possível verificar a direção e o sentido

da vazão de água pelo solo, bem como é possível ter uma noção da velocidade pelo tamanho das setas dos vetores.

Também avaliou-se os gradientes hidráulicos. A Fig. 9 mostra os gradientes no entorno da cortina. Constata-se que os gradientes variam entre 0,0005 (região indicada pela cor azul) a 2,21 (região indicada pela cor vermelha); sendo que os maiores gradientes hidráulicos ocorrem na base direita da placa divisória (na areia fina) e os menores, junto às laterais direita e esquerda. Os gradientes hidráulicos, junto à saída da água (lado esquerdo), região onde há possibilidade de ocorrência de liquefação, são menores que 0,2. Como esses valores de gradientes hidráulicos são inferiores ao gradiente crítico da areia grossa (Tab. 2), não haveria risco de liquefação.

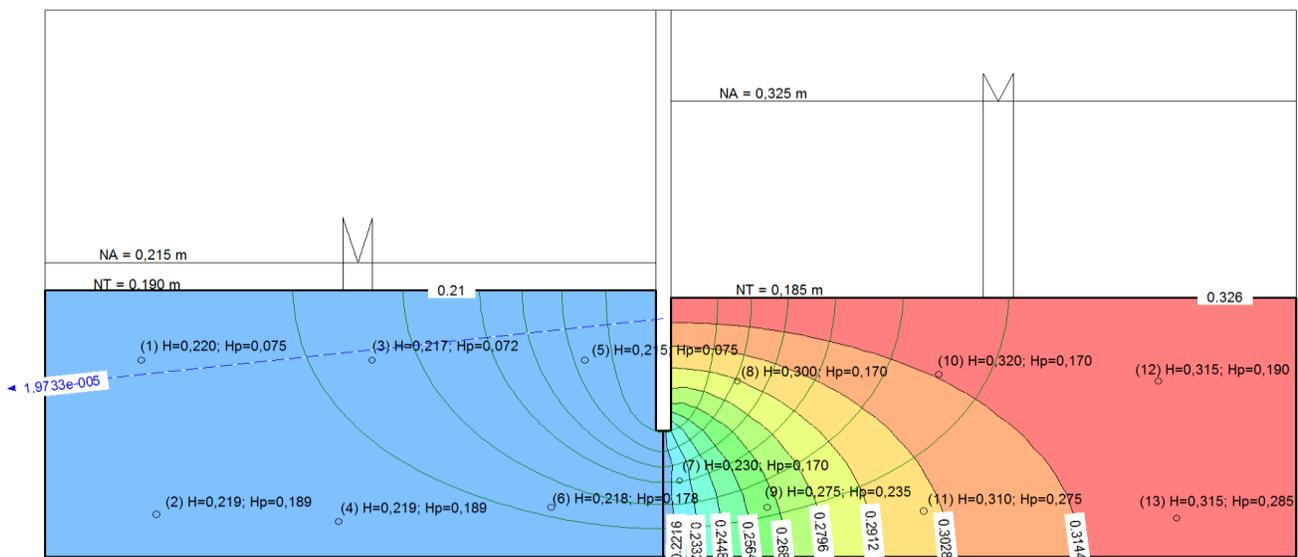


Fig. 6. Linhas de isocarga total ( $H$ ) obtidos pela modelagem numérica, com a indicação dos valores obtidos na leitura dos piezômetros no ensaio (Tab. 5)

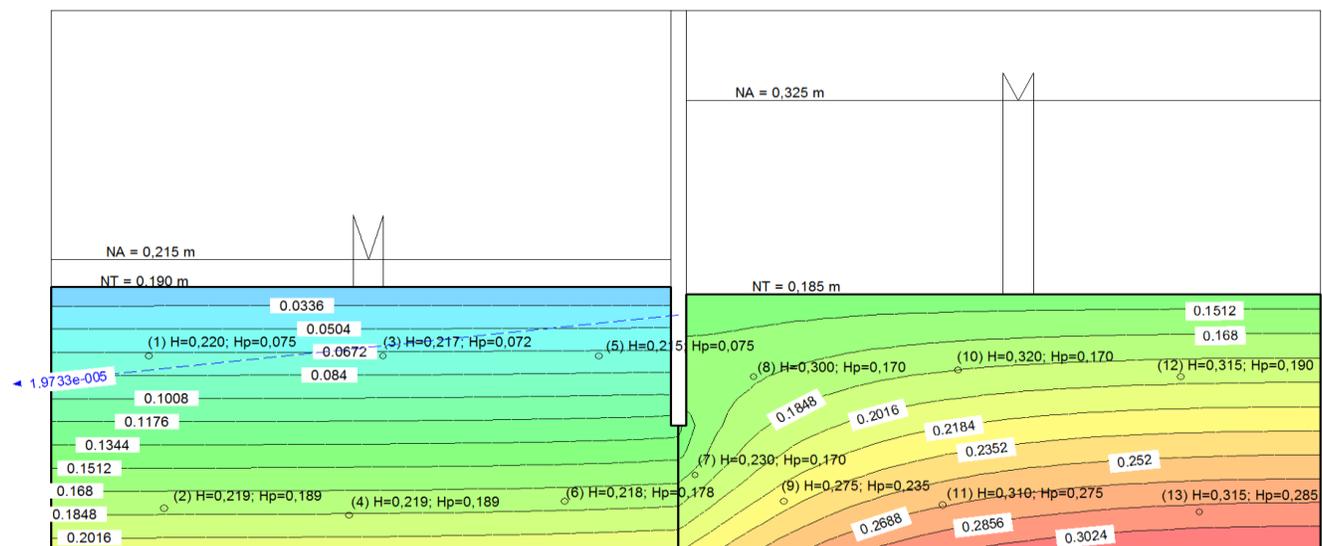


Fig. 7. Linhas de isocarga piezométrica ( $H_p$ ) obtidos pela modelagem numérica, com a indicação dos valores obtidos na leitura dos piezômetros no ensaio (Tab. 5)

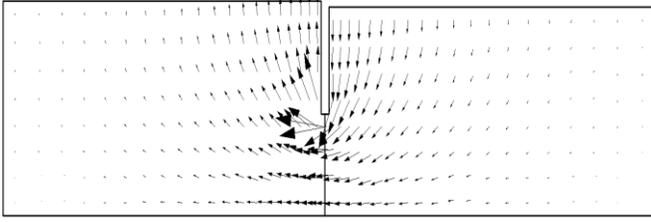


Fig. 8. Traçado das linhas de fluxo pelo corante no decorrer da execução do ensaio

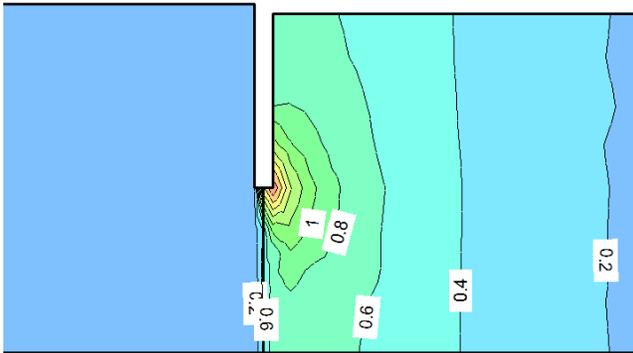


Fig. 9. Traçado das linhas de fluxo pelo corante no decorrer da execução do ensaio

## VI. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

A análise realizada mostra separadamente as soluções de um problema de percolação bidimensional realizadas por duas metodologias distintas: modelo físico (ensaio em tanque de percolação) e modelagem numérica (software SEEP/W de elementos finitos). Nesta seção os resultados de ambas as metodologias serão comparados. Para a comparação dos resultados, parte-se do princípio de que os resultados do ensaio são os valores de referência (reais), pois foram efetivamente medidos, sendo o método numérico uma simulação.

O problema proposto corresponde a um modelo reduzido (escala de laboratório) que representa um caso tipo de obras de contenção, comum em edifício com subsolos e diques secos, construídos a partir de execução de cortinas de estacas pranchas ou paredes diafragmas. Nestes casos, a determinação da vazão de percolação é fundamental. Comparando-se os resultados de vazão obtida no ensaio realizado no tanque de percolação ( $Q_l = 2,03 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) com a vazão obtida na modelagem numérica ( $Q_l = 1,9733 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), obtém-se uma diferença (determinada pela Eq. 7) de 2,8% entre ambos os resultados, o que é satisfatório do ponto de vista da engenharia.

$$\Delta = \left| \frac{MF - MN}{MF} \right| \quad (7)$$

Sendo,  $\Delta$  = diferença entre o resultado/parâmetro do ensaio e o modelo numérico (%),  $MF$  = resultado/parâmetro do ensaio;  $MN$  = resultado/parâmetro do modelo numérico

Em termos de cargas hidráulicas, comparou-se os resultados das poro-pressões obtidas em cada um dos dois métodos. A Tab. 7 apresenta os resultados comparativos (Eq. 7). Os resultados mostram uma diferença média de 2,6%, sendo a maior diferença de 6,7% (piezômetro 1) até um valor exato (0,0%) (piezômetro 6).

TABELA 7  
Diferença entre poro-pressão obtido no ensaio e na modelagem numérica

Piezômetro	$u \text{ (kN/m}^2\text{)}$		$\Delta$
	MF (tab 5)	MN (tab 6)	
1	0,75	0,70	6,7%
2	1,89	1,81	4,2%
3	0,72	0,71	1,4%
4	1,89	1,86	1,6%
5	0,75	0,72	4,0%
6	1,78	1,78	0,0%
7	1,70	1,71	0,6%
8	1,70	1,66	2,4%
9	2,35	2,29	2,6%
10	1,90	1,85	2,6%
11	2,75	2,68	2,5%
12	1,90	1,97	3,7%
13	2,85	2,91	2,1%
<b>Média:</b>			<b>2,6%</b>

Quanto ao fenômeno de liquefação, verificou-se por ambos os métodos não haver ocorrência ou risco de ocorrência. Pelo ensaio, foi verificado que o peso colocado sobre a areia grossa, lado esquerdo da placa divisória, não afundou na areia, mostrando a não fluidização da areia. Pelo método numérico, obteve-se um valor de gradiente hidráulico no valor de 0,035, sobre a areia grossa, cujo valor é bem abaixo do gradiente hidráulico crítico.

Em termos de velocidade, como já citado, verifica-se, na Fig. 4, uma maior dispersão do corante quando este atinge a areia grossa. Este fato ocorre devido a maior velocidade da água quando atinge a areia grossa. A maior velocidade na areia grossa é confirmada na análise numérica, quando se observa os vetores de velocidade (Fig. 8).

## VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho observou-se-se que a solução analítica da equação diferencial geral de fluxo de água em solos (Eq. 1) somente é viável para problemas simples (fluxo unidimensional), assumindo-se um único solo com propriedades isotrópicas (por exemplo, quando o coeficiente de permeabilidade é o mesmo em todas as direções). Problemas mais complexos, como os bidimensionais ou tridimensionais, ou quando envolvem várias camadas com solos com propriedades distintas, são mais facilmente resolvidos por outras metodologias, como: métodos físicos (por exemplo: ensaio em tanque de percolação) ou modelos numéricos (por exemplo: método de elementos finitos). Estes dois métodos foram aplicados para a solução de um problema típico de percolação de água sob uma estrutura de contenção.

O método físico consistiu na montagem de um ensaio de laboratório, em modelo reduzido, em um tanque de percolação. Como estrutura, foi utilizada uma divisória de acrílico, dividindo o tanque ao meio, deixando um vão entre o

fundo do tanque e a base da divisória para a livre percolação da água. Como solo, foram utilizadas duas areias – fina e grossa, dispostas em um sistema de dupla camada. Uma vez realizado o ensaio, efetuou-se a modelagem numérica, utilizando o software SEEP/W de elementos finitos, sendo o ensaio simulado tal qual foi realizado no laboratório (mesma geometria e propriedades das areias).

De ambos os métodos foram obtidos os diferentes parâmetros hidráulicos que fazem parte de uma análise de percolação de água em solos: (a) vazão linear; (b) cargas hidráulicas e poro-pressão; (c) gradientes hidráulicos para verificação do fenômeno de liquefação; (d) direção, sentido e velocidade do fluxo de água. Na comparação dos resultados de ambos os métodos, verificou-se que as diferenças foram bem pequenas, da ordem de 2,8%.

Considerando os resultados apresentados, o emprego de qualquer um dos métodos é recomendado para solução de problemas de percolação. O uso de tanque de percolação é uma ferramenta que possibilita a visualização dos fenômenos de percolação, porém não é muito comum nos laboratórios e universidades. Apesar de ser em modelo reduzido, pode ser utilizado para representar obras de verdadeira grandeza, desde que seja feito um tratamento escalar adequado. Os métodos numéricos vêm se tornando ferramentas cada vez mais presentes na engenharia. São frequentemente utilizados para simulação e para projeto. Apesar das inúmeras vantagens, o usuário deve conhecer muito bem a ferramenta para saber quais os parâmetros a serem inseridos e interpretar de forma correta os resultados.

#### AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) e a Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis (PRAE) da Universidade Federal do Rio Grande – FURG pelas bolsas concedidas para que fosse possível a realização do projeto de ensino PROGRAD/FURG n° 42/2012: “*Construção de Exemplos Didáticos para Ensaio de Percolação e de Drenagem a Partir de Modelo Reduzido*”

#### REFERÊNCIAS

- [1] Pinto, C. de S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, 3ª edição, Oficina de Textos, São Paulo/SP, 2006, 367p.
- [2] Ortigão, J. A. R. *Introdução Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*, 3ª edição, Terratek, Rio de Janeiro/RJ, 2007, 391p.
- [3] Caputo, H. P. *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*, volume 1, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro/RJ, 1983, 234p.
- [4] Das, B. M. *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed., Thomson, Toronto, Canada, 2006, 593p.
- [5] Lambe, T. W.; Whitman, R. V. *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1969, 548p.
- [6] Ruver, C. A.; Silva, L. R. W. da; Levien, F. V.; Sloczinski, K. F., Tardivelli, S. M. *Construção de Modelo Físico de Baixo Custo e Aplicação de Modelo Numérico para Solução de Problemas de Percolação de Fluxo de Água em Solos*, Anais do XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE 2012), ABENGE, Belém/PA, 2012, em CD-Rom;
- [7] Atkinson, J. *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations*, McGraw-Hill, London, England, 1993, 337p.
- [8] Desai, C. S.; Christian, J. T. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Chapter One - Introduction, Numerical Methods and Special Topics, Mc-Graw Hill, New York, NY, USA, 1997, 783p.