

# A PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO

## Groundwater flow in soils Small scale studies

JOSÉ COUTO MARQUES <sup>(1)</sup> e CÉSAR ROMÃO FERREIRA <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, jmarques@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Mestre em Engenharia Civil - Geotecnia, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, ec02075@fe.up.pt

### Resumo

A percolação de água em solos é um interessante e importante tema que integra a formação em Engenharia Civil. No presente trabalho apresenta-se uma breve descrição de um equipamento didáctico desenvolvido na FEUP para o estudo experimental em modelo reduzido de problemas de percolação, seguida de exemplos práticos da sua aplicação, complementados pela respectiva modelação numérica pelo método dos elementos finitos.

**Palavras-chave:** Equipamento didáctico, estudo experimental, modelação por elementos finitos, percolação.

### Abstract

Groundwater flow in soils is an interesting and important topic of the Civil Engineering curriculum. The present work presents a brief description of a didactic equipment developed at FEUP for a small scale experimental study of seepage problems, followed by practical application examples complemented by their finite element modelling.

**Keywords:** Didactic equipment, experimental study, finite element modelling, groundwater flow.

## 1. Introdução

A percolação é um dos temas abordados na disciplina de Mecânica dos Solos que é habitualmente parte integrante dos cursos de Engenharia Civil (Matos Fernandes, 2006). A nossa experiência na FEUP tem mostrado que há, por parte dos estudantes, alguma dificuldade na apreensão dos conceitos físicos subjacentes a este fenómeno. Tal poderá dever-se à maior ênfase que é dedicada desde o início do curso ao desenvolvimento da sensibilidade para os problemas mecânicos e estruturais, não obstante a formação de espectro largo que é dada no chamado "tronco comum". De facto, nesses quatro primeiros anos há dois semestres de Mecânica, de Resistência de Materiais, de Teoria das Estruturas e de Estruturas de Betão, sendo estas três últimas disciplinas consideradas por muitos como "a espinha dorsal" da formação de um Engenheiro Civil. Estamos em crer que tal conjuntura será igualmente sentida noutras escolas. Acrescem ainda as dificuldades decorrentes do carácter multifásico do material solo que torna a interpretação do seu comportamento naturalmente mais difícil que a de um sólido ou de um fluído.

A percepção destas circunstâncias levou a que, no âmbito da tese de Mestrado Integrado do segundo autor (Ferreira, 2008), se decidisse apostar na concepção, projecto e construção de um equipamento didáctico para o estudo experimental em modelo reduzido de problemas de percolação, com o objectivo de tornar mais intuitivo o tema através da sua visualização, combinando o "ver para crer" com o "experimentar para melhor compreender".

No presente trabalho apresenta-se uma breve descrição do equipamento, seguida de exemplos práticos da sua aplicação, complementados pela respectiva modelação numérica pelo método dos elementos finitos.

## 2. Protótipo Experimental

O equipamento experimental tem três componentes principais:

- Tanque de acrílico;
- Estrutura de suporte;
- Circuito hidráulico.

### 2.1. Tanque de acrílico

O tanque de acrílico tem a forma de um paralelepípedo rectângulo, com 2000 mm x 585 mm x 200 mm (dimensões interiores) e 12 mm de espessura de parede (Figura 1).

O tanque possui três tubos de controlo de nível de água, duas placas rectangulares de acrílico com 8 mm de espessura, posicionáveis em calhas verticais para simulação de cortinas impermeáveis e 48 orifícios de medição de pressão distribuídos em quincôncio por cinco fiadas horizontais na parede posterior.

As paredes verticais de maior desenvolvimento estão ligadas entre si nos topos por três peças aparafusadas que as solidarizam de modo a evitar deformações excessivas por efeito da pressão do solo contido no tanque.

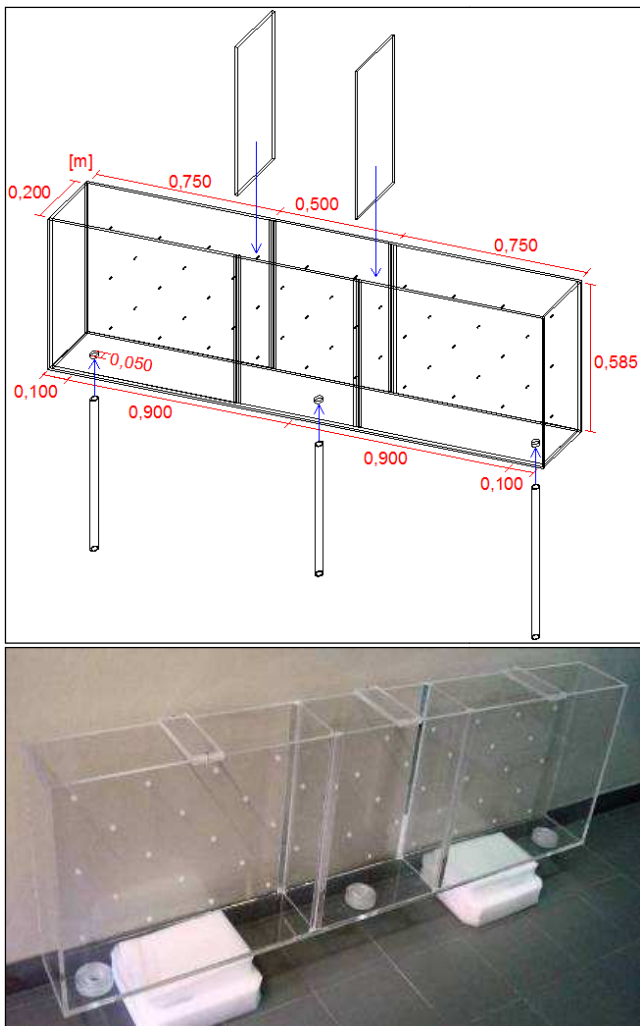


Figura 1. Tanque de acrílico: dimensões e vista geral.

Os tubos de controlo do nível de água, com diâmetro exterior de 50 mm e 3 mm de espessura, são ajustáveis em altura através de um sistema de aperto constituído por duas peças roscadas e um *o-ring* que garante a estanquidade (Figura 2).



Figura 2. Tubo de controlo do nível de água - vistas superior (à esquerda) e inferior do sistema de ajuste da altura.

Cada um dos orifícios de medição de pressão dispõe de uma rede fina que impede a saída de grãos de solo. Uma peça metálica roscada realiza a ligação ao tubo piezométrico.

Estes tubos estão dispostos na vertical e fixos em grupos de três ou de dois no topo da parede posterior do tanque (Figura 3).

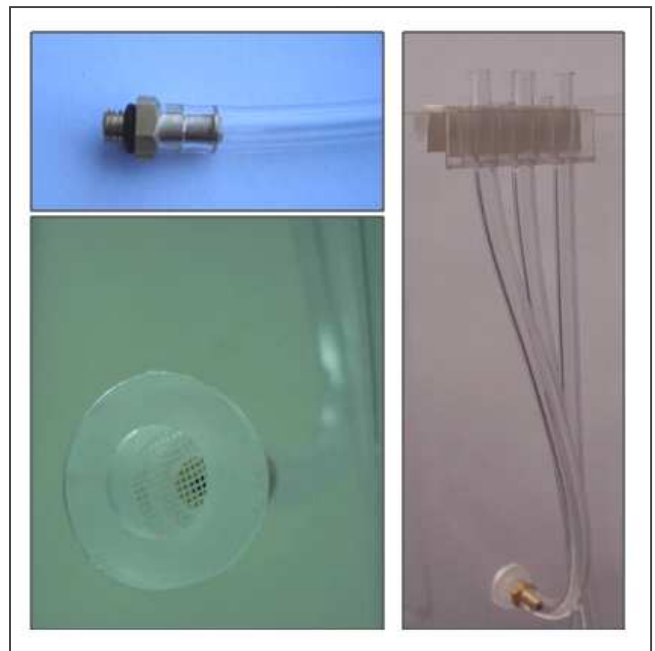


Figura 3. Orifício de medição de pressão (vista do interior, em baixo à esquerda). Peça metálica de ligação (em cima à esquerda). Tubos piezométricos e dispositivo de fixação (vista do exterior, à direita).

## 2.2. Estrutura de suporte

Dadas as dimensões do tanque de acrílico, o seu peso com solo e água pode facilmente exceder 300 kg. Assim a estrutura de suporte é chamada a desempenhar três importantes funções: garantir a estabilidade do tanque durante a realização de ensaios; evitar deformações deste por flexão, que poderiam pôr em causa as ligações por colagem das suas diversas faces; permitir a movimentação do conjunto no interior do laboratório.

Através do recurso a cantoneiras metálicas perfuradas foi realizada a estrutura representada na Figura 4, dotada de 6 rodas e de duas plataformas de aglomerado de madeira: uma superior, com duas zonas laterais em consola onde encaixa o tanque, e outra inferior para alojar os dois depósitos de água, de 100 litros cada um, que alimentam o circuito hidráulico.

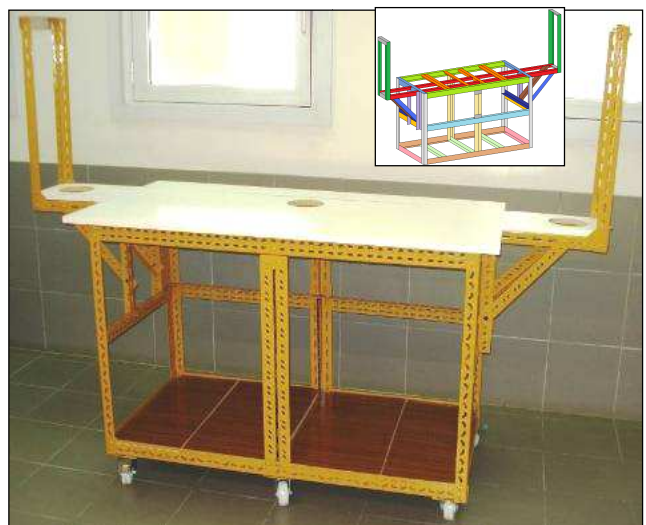


Figura 4. Estrutura de suporte - esquema estrutural e vista de conjunto.

### 2.3. Circuito hidráulico

O circuito hidráulico está esquematizado na Figura 5, na configuração correspondente ao estudo de uma ensecadeira descrito mais adiante no ponto 3.1.

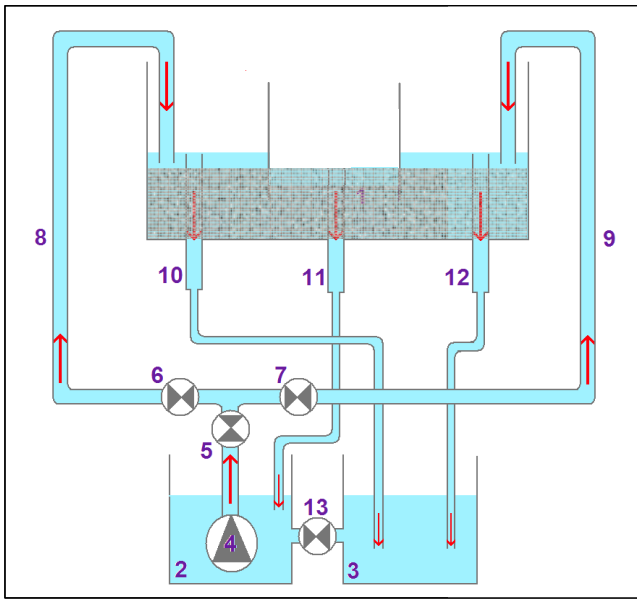


Figura 5. Circuito hidráulico.

Trata-se de um circuito fechado em que a bomba eléctrica submersível (4) situada dentro do depósito esquerdo (2) faz chegar a água pelos tubos flexíveis (8 e 9) às zonas laterais esquerda e direita do tanque de acrílico (1) onde os tubos de controlo (10 e 12) mantêm o nível constante. A percolação da água através do solo leva-a a passar por baixo das duas cortinas para a zona central, onde o tubo de saída (11) efectua o retorno ao depósito.

A Figura 6 mostra a tubagem de saída do depósito esquerdo em PEAD (polietileno de alta densidade) preto e as válvulas amarelas de controlo de caudal, bem como a bomba submersível e respectivo cabo de alimentação eléctrica dotado de uma ficha com interruptor.



Figura 6. Elementos do circuito hidráulico.

## 3. Casos de Estudo

São em seguida apresentados dois exemplos de aplicação deste equipamento ao estudo em modelo reduzido de uma ensecadeira e de uma barragem de aterro homogénea.

### 3.1. Ensecadeira

A Figura 7 apresenta a geometria e uma vista geral da montagem experimental para o estudo da percolação em torno de duas cortinas no qual se procura reproduzir a situação típica de uma ensecadeira após o estabelecimento de um regime permanente de escoamento.

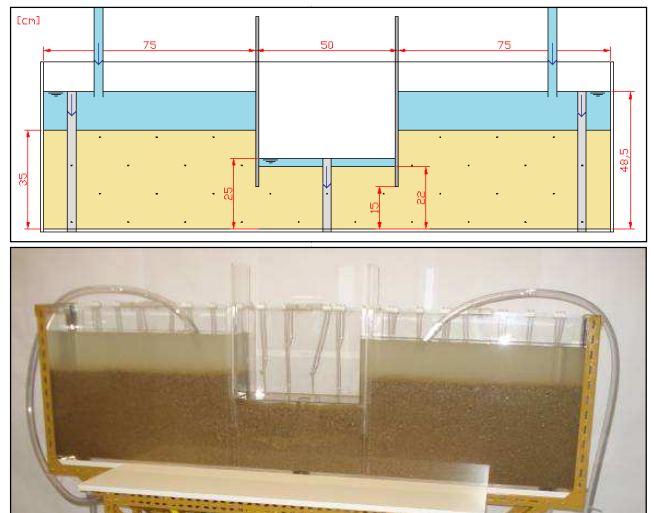


Figura 7. Ensecadeira - esquema cotado e vista da montagem experimental.

O solo utilizado é uma areia bastante bem graduada cuja curva granulométrica se representa na Figura 8. O coeficiente de permeabilidade foi estimado por via experimental tendo-se obtido  $k=1,3 \times 10^{-3}$  m/s, ou seja dentro do intervalo  $[10^{-3}, 10^{-2}]$ , o que parece razoável dada uma certa predominância da fracção classificada como areia grossa (46%).

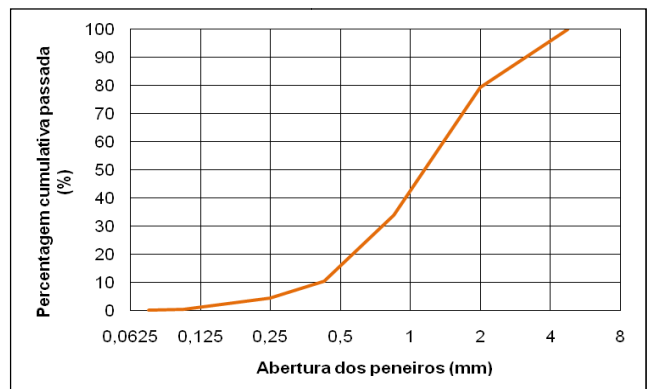


Figura 8. Curva granulométrica da areia utilizada.

A injeção de um corante permitiu a visualização de uma linha de corrente, que foi reproduzida com grande verosimilhança na modelação numérica por elementos finitos, como se pode constatar na Figura 9.

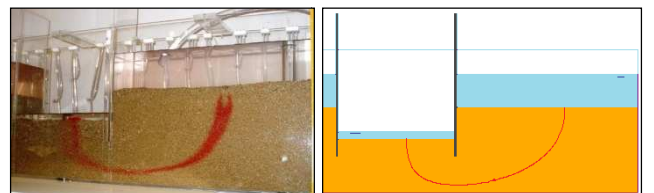


Figura 9. Linha de corrente obtida por via experimental e numérica.

O campo de velocidades de percolação obtido numericamente ilustra com clareza a razão pela qual a zona de solo adjacente à face de jusante das cortinas é a mais susceptível à ocorrência de fenómenos de levantamento hidráulico (Figura 10).

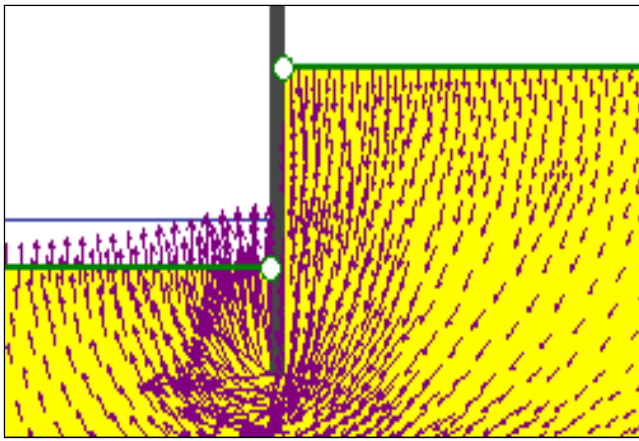


Figura 10. Pormenor do campo de velocidades de percolação.

Tirando partido da simetria do problema em análise, a Figura 11 permite estabelecer a comparação entre os valores da carga total obtidos experimentalmente a partir da cota atingida pela água nos tubos piezométricos (do lado esquerdo) com os valores calculados por recurso ao método dos elementos finitos (do lado direito).

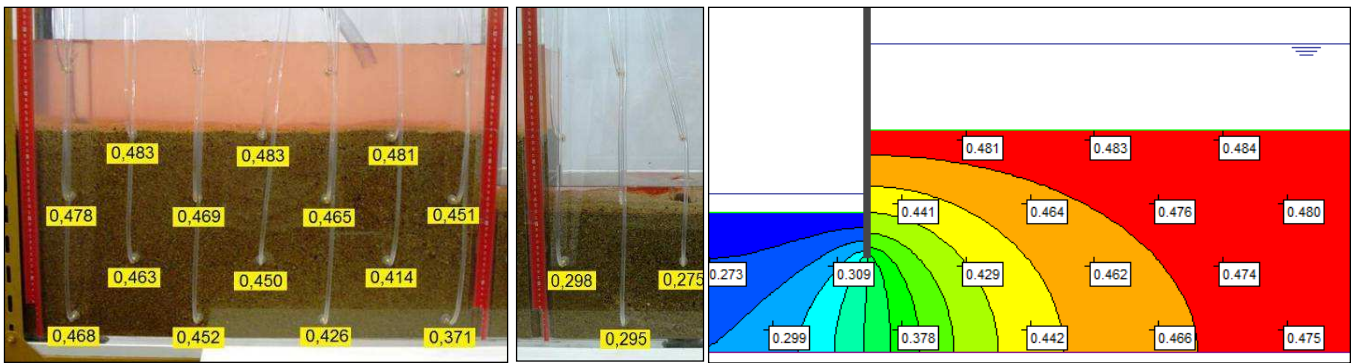


Figura 11. Comparação entre os valores experimentais e numéricos da carga total.

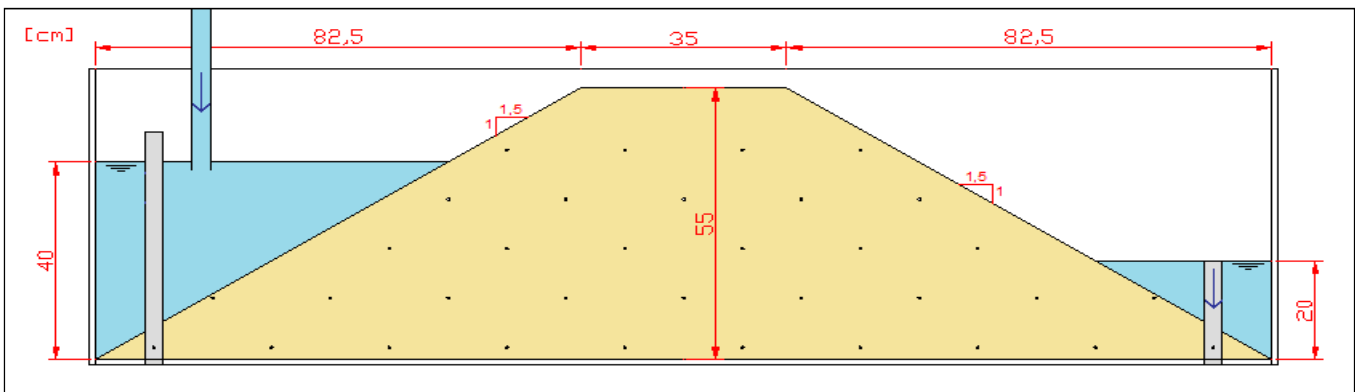


Figura 12. Secção da barragem de aterro.



Figura 13. Danos no coroamento e paramento de jusante.

Note-se que a cota da água nos tubos é medida tomando como referência o plano horizontal da base do tanque (na sua face interior) com o auxílio das régua vermelhas graduadas em mm que estão fixadas verticalmente na face posterior do tanque, conforme mostra a Figura 11. A maior diferença registada entre os valores experimentais e numéricos é de 3,62% e a média dos desvios é de 1,7%, o que parece ser um valor perfeitamente razoável.

### 3.2. Barragem de aterro homogénea

As características da secção da barragem de aterro ensaiada estão descritas na Figura 12. Previa-se inicialmente que a cota de água a montante fosse de 45 cm, mas antes que o lento enchimento da "albufeira" atingisse esse valor, a percolação da água através do corpo da barragem começou a produzir alguns danos, pelo que se estabilizou a cota nos 40 cm, como ilustra a Figura 12. Com efeito, além da erosão devida à ressurgência no paramento de jusante, surgiu uma fenda vertical no coroamento, conforme ilustra a Figura 13. Tendo-se assim estabilizado o processo de degradação da barragem procedeu-se à injeção de corante para visualização de linhas de corrente (Figura 14).

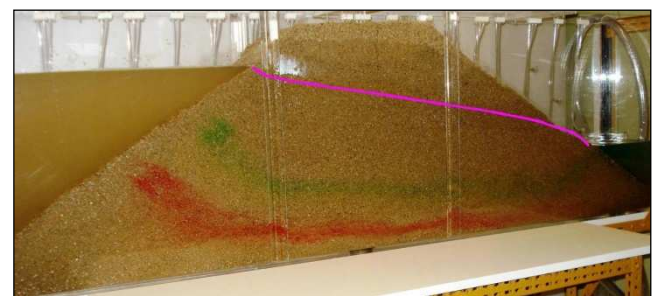


Figura 14. Linhas de corrente e superfície livre.

Estas foram bem reproduzidas através da modelação por elementos finitos (Figura 15).

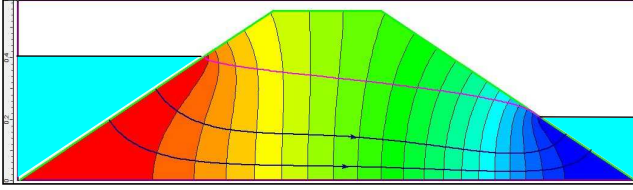


Figura 15. Linhas de corrente e superfície livre obtidas por via numérica.

#### 4. Considerações finais

Os casos de estudo apresentados demonstram o enorme potencial pedagógico deste equipamento experimental de percolação. Importa referir que o custo final do seu desenvolvimento representa cerca de 20% do preço de equipamentos similares existentes no mercado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Direcção da FEUP, na pessoa do Prof. Carlos Costa, o financiamento que tornou possível a realização deste trabalho. Os autores expressam a sua gratidão ao Prof. Ferreira Lemos, Director do Departamento de Engenharia Civil, à Prof<sup>a</sup> Maria Fernanda Proença, Directora do Laboratório de Hidráulica, e ao Prof. António Viana da Fonseca, Director do Laboratório de Geotecnia, pelo apoio técnico e logístico generosamente concedido.

#### Referências

- Ferreira, C. R. (2008). *Desenvolvimento de um equipamento laboratorial para o estudo de problemas de percolação em modelo reduzido*, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Geotecnia, FEUP, Porto, 110 pp.
- Matos Fernandes; M. (2006). *Mecânica dos Solos - Conceitos e Princípios Fundamentais, Volume I*, FEUP Edições, Porto, 451 pp. ISBN 972-752-086-3