

ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE ATERRO Small Scale Studies of Seepage in Earth Eams

JOSÉ COUTO MARQUES ⁽¹⁾ e MÁRIO UNAS ⁽²⁾

⁽¹⁾ Prof. Associado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, jmarques@fe.up.pt

⁽²⁾ Mestre em Engenharia Civil - Geotecnia, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec05131@fe.up.pt

Resumo

O equipamento didáctico desenvolvido na FEUP para estudo experimental em modelo reduzido de problemas de percolação tinha já permitido obter resultados muito interessantes para os casos de uma cortina, de uma ensecadeira e de uma barragem de aterro de secção homogénea. No presente trabalho o estudo experimental com o referido equipamento e a correspondente simulação numérica por elementos finitos têm como objecto quatro secções-tipo de barragem de aterro dotadas de dispositivos destinados a controlar a percolação no corpo da barragem, frequentemente utilizados em estruturas deste tipo. São eles um tapete drenante, um dreno de pé de talude, um dreno de chaminé e um núcleo central de reduzida permeabilidade.

Palavras-chave: Estudo experimental, modelação por elementos finitos, tapete drenante, dreno de pé de talude, dreno de chaminé.

Abstract

The didactic equipment developed at FEUP for small scale experimental study of seepage problems has provided very interesting results for the cases of flow around a sheet-pile wall, into a trench and through a homogeneous earth dam. In the present paper the experimental study with that equipment and the corresponding finite element numerical simulation is directed to four earth dam cross-sections equipped with seepage control devices frequently used in such structures, namely a drainage blanket, a toe drain, a chimney drain and a central core with low permeability.

Keywords: Experimental study, finite element modelling, drainage blanket, toe drain, chimney drain.

1. Introdução

Com o intuito de enriquecer o Laboratório de Geotecnia da FEUP com novas ferramentas didácticas que visam reforçar a sua componente experimental de apoio ao ensino, foi desenvolvido um equipamento para o estudo de problemas de percolação em modelo reduzido, no contexto de uma tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil (Ferreira, 2008).

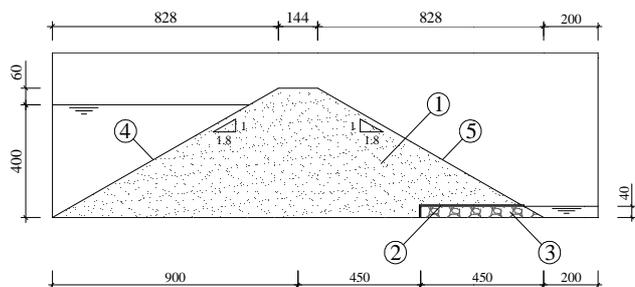
Este equipamento começou por ser aplicado à análise da percolação em torno de uma cortina, de uma ensecadeira e através do corpo de uma barragem homogénea (Marques *et al.*, 2009), tendo permitido obter resultados muito interessantes.

Na sequência deste primeiro trabalho e dando continuidade à exploração das potencialidades do equipamento, decidiu-se avançar para a realização de estudos em modelo reduzido de diversas soluções correntemente adoptadas em barragens de aterro para o controle da percolação através do respectivo corpo, que visam entre outros objectivos evitar a ressurgência no paramento de jusante que se observa em secções-tipo com características homogéneas. Esta pesquisa foi de novo levada a cabo no âmbito de uma tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil (Unas, 2010).

Neste artigo relatam-se os resultados obtidos em quatro casos, que envolveram o recurso, isoladamente ou em associação, a tapete drenante, dreno de pé de talude, dreno de chaminé e núcleo de permeabilidade reduzida.

A geometria e o modelo físico correspondentes a estas quatro secções-tipo encontram-se ilustrados nas Figuras 1 a 4, respectivamente. Houve a preocupação de complementar o estudo experimental com a modelação numérica por elementos finitos e ainda com o recurso ao método gráfico clássico de Casagrande (1937) para o traçado da superfície livre.

Os resultados apresentados atestam o substancial valor pedagógico deste equipamento para a introdução ao estudo dos escoamentos em meios porosos, tema que sempre suscita alguma dificuldade na apreensão dos conceitos-base por parte dos estudantes de Engenharia Civil, dado que a sua sensibilidade é, ao longo do curso, mais desenvolvida para os aspectos mecânicos e estruturais. A combinação da abordagem experimental com a numérica visa estabelecer uma ligação concreta entre a realidade física e a modelação computacional, desejavelmente propiciatória de uma aprendizagem mais profunda em que a teoria seja "vista em acção" e assim vivenciada de modo intuitivo.

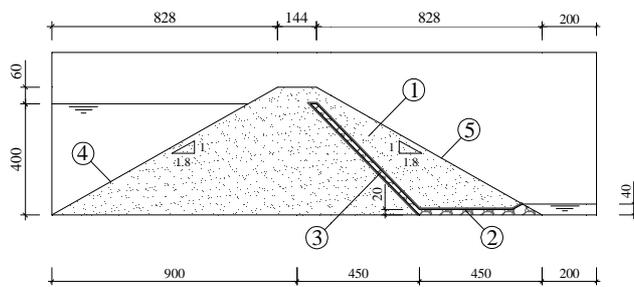


Legenda

- 1 - Corpo da barragem - Solo A
- 2 - Manta Geotêxtil
- 3 - Dreno horizontal - Cascalho médio
- 4 - Paramento de montante
- 5 - Paramento de jusante



Figura 1. Geometria (em mm) e vista parcial do modelo físico da barragem homogénea com dreno horizontal.

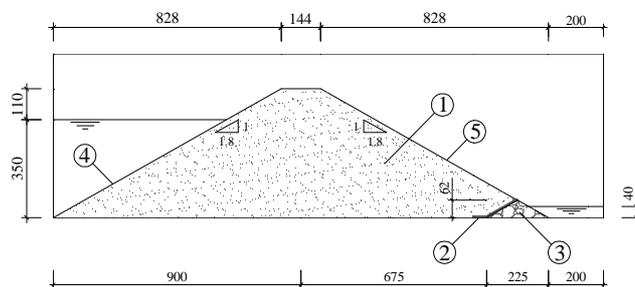


Legenda

- 1 - Corpo da barragem - Solo A
- 2 - Manta Geotêxtil
- 3 - Dreno de chaminé - Cascalho médio
- 4 - Paramento de montante
- 5 - Paramento de jusante



Figura 3. Geometria (mm) e modelo físico da barragem homogénea com dreno de chaminé.

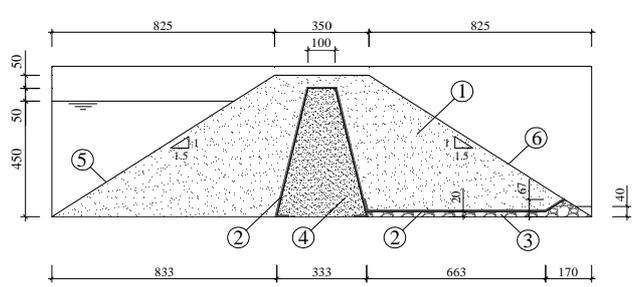


Legenda

- 1 - Corpo da barragem - Solo A
- 2 - Manta Geotêxtil
- 3 - Dreno de pé do talude - Cascalho médio
- 4 - Paramento de montante
- 5 - Paramento de jusante



Figura 2. Geometria (mm) e modelo físico da barragem homogénea com dreno de pé de talude.



Legenda

- 1 - Corpo da barragem - Solo A
- 2 - Manta Geotêxtil
- 3 - Dreno horizontal - Cascalho médio
- 4 - Núcleo central - Solo B
- 5 - Paramento de montante
- 6 - Paramento de jusante



Figura 4. Geometria (mm) e modelo físico da barragem zonada.

2. Modelos Experimentais de Secções-Tipo de Barragens de Aterro

Para a execução dos modelos experimentais foram utilizados três geomateriais para a constituição do corpo da barragem e órgãos de controlo da percolação e uma manta de geotêxtil para colocação nas interfaces entre solos distintos de modo a evitar eventuais evoluções granulométricas por migração das partículas de um solo para outro.

Em relação aos geomateriais importará referir sobretudo as suas propriedades hidráulicas.

O solo utilizado para materializar o corpo dos modelos das barragens apresenta um coeficiente de permeabilidade com uma ordem de grandeza de 10^{-3} m/s. Os drenos foram constituídos com um cascalho médio cuja condutividade hidráulica é cerca de três ordens de grandeza superior à do material anterior.

Para a execução do núcleo central da barragem zonada utilizou-se um solo mais fino com adição de uma fracção de passados no peneiro n.º 200 da série ASTM, tendo-se conseguido garantir um coeficiente de permeabilidade de valor próximo de 10^{-5} m/s, ou seja duas ordens de grandeza inferiores ao do material granular usado para o corpo das barragens. Esta diferença de permeabilidades foi claramente suficiente para simular o efeito da dissipação energética do escoamento no núcleo central, evidenciando dessa forma o mecanismo actuante nas barragens zonadas que evita que o escoamento se estabeleça no corpo de jusante.

Refira-se que antes da medição das alturas piezométricas e dos caudais percolados houve um período de espera após ser atingido o nível máximo de montante, de modo a garantir que o escoamento se processasse em regime permanente.

Tal foi conseguido à custa da leitura do tempo necessário para escoar um volume de água pré-definido.

Considerou-se instalado o regime permanente quando os tempos medidos se tornaram idênticos. Este procedimento simples revelou-se adequado e eficaz.

3. Modelos Numéricos de Secções-Tipo de Barragens de Aterro

No que se refere à modelação numérica dos vários problemas recorreu-se à aplicação do Método dos Elementos Finitos através do programa Phase2®.

Na construção dos modelos numéricos respeitou-se a geometria idealizada na fase experimental. Como em todos os casos considerados se está perante escoamentos não confinados foram associadas aos meios porosos em causa funções de condutividade hidráulica que traduzem correctamente a capacidade que um solo tem de conduzir a água em condições saturadas e não saturadas. As funções de condutividade hidráulica para solos granulares devem ser bastante sinuosas de modo que seja adequadamente representada a perda acentuada da condutividade à medida que o grau de saturação diminui, Figura 5.

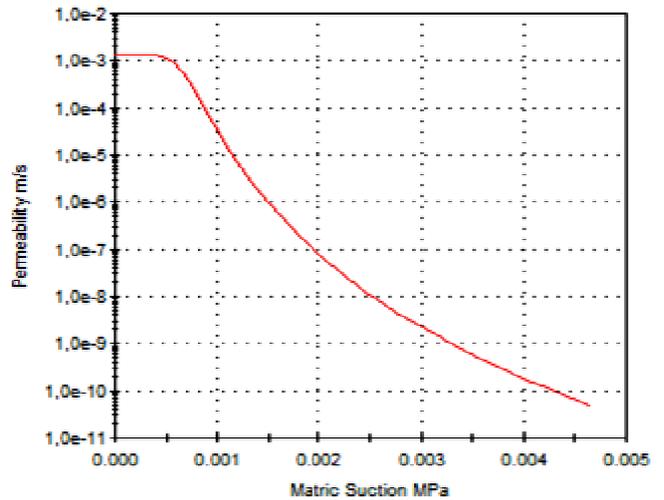


Figura 5. Função de condutividade hidráulica típica de solos granulares de acordo com a proposta de van Genuchten.

Nas malhas de elementos finitos ilustradas na Figura 6 pode-se constatar que se refinou a discretização do meio contínuo nas regiões onde a posição das linhas de corrente varia de forma mais nítida, junto dos drenos onde os gradientes hidráulicos são superiores e em regiões onde se verificam variações mais acentuadas da perda de carga.

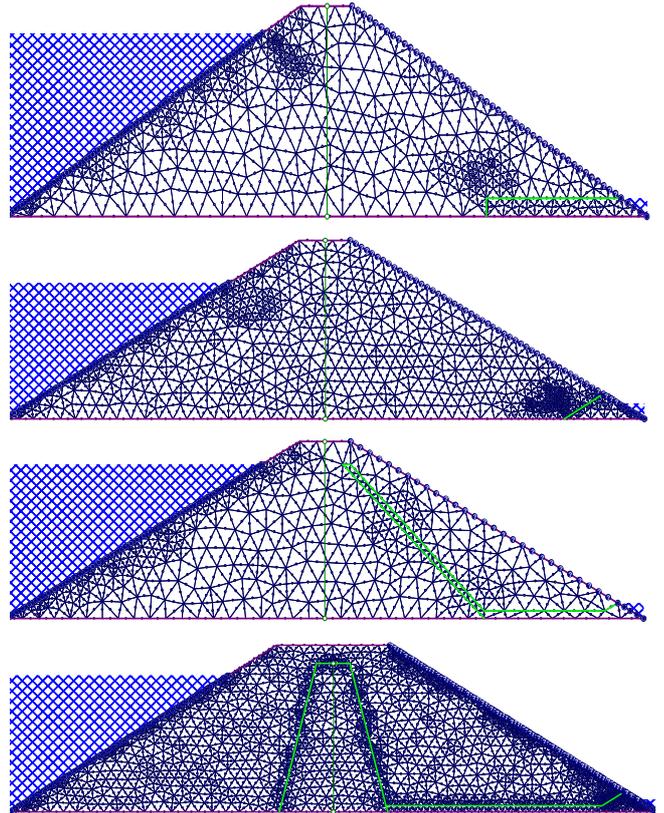


Figura 6. Modelos numéricos das quatro secções-tipo em estudo.

Procurou-se também que os níveis de água de montante e jusante intersectassem os respectivos paramentos em nós de canto. Como a configuração da superfície livre não é conhecida à partida, em todos os nós da malha que se situam no paramento de jusante, exceptuando aqueles cuja carga hidráulica seja conhecida, foi activada a opção de fluxo nulo com revisão iterativa.

4. Comparação de Resultados

4.1. Barragem homogénea com tapete drenante

A Figura 7 mostra a trajectória do produto corante através do meio granular. Nela se percebe que a representação do fluxo através de linhas de corrente, que assume que o escoamento é laminar, não é completamente verdadeiro. Na figura fica bem patente que a trajectória das partículas de água ao longo dos canalículos do solo granular é bastante sinuosa dando origem a regiões em vez de linhas coloridas como seria de esperar.

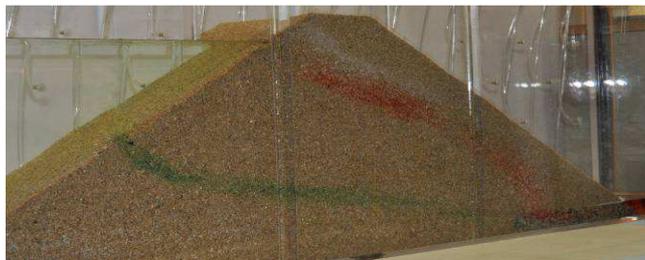


Figura 7. Trajectória do produto corante no meio poroso da barragem homogénea com dreno horizontal.

Na Figura 8 é possível verificar que as posições da superfície livre conseguidas pelas vias numérica e gráfica se aproximam de forma bastante razoável da solução experimental.

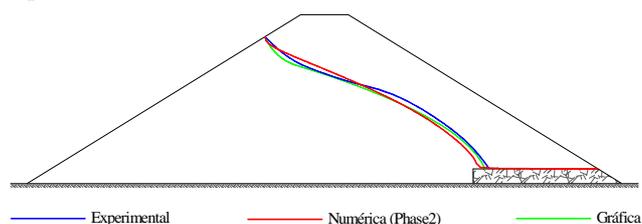


Figura 8. Posição da superfície livre da barragem homogénea com dreno horizontal de acordo com as soluções experimental, numérica e gráfica.

Após o ajuste dos parâmetros hidráulicos no modelo numérico verificou-se que os valores das alturas piezométricas referentes às coordenadas da grelha de pontos do tanque de percolação apresentam um desvio máximo nos resultados de 5mm sendo o valor médio igual a 2.95mm. Constatou-se também que o erro médio entre a solução experimental e a numérica foi de 1.06%.

4.3. Barragem homogénea com dreno de pé de talude

A Figura 9 permite comparar os resultados obtidos para a configuração da superfície livre da barragem com dreno de pé de talude por via experimental, numérica e gráfica.

Para este caso registou-se um desvio máximo nos resultados das alturas piezométricas de 29mm sendo o valor médio igual a 8.10mm. Constatou-se também que o erro médio entre a solução experimental e a numérica foi de 3.9%. O motivo para que se tenha verificado um desvio maior nas leituras deveu-se provavelmente a uma pequena discrepância na geometria dos modelos pois no modelo experimental ocorreu uma ligeira ressurgência da água no paramento de jusante e portanto os valores da carga hidráulica medidos experimentalmente foram nessa região forçosamente superiores.

Este facto deveu-se provavelmente ao deficiente nivelamento do paramento de jusante na fase de realização do modelo experimental.

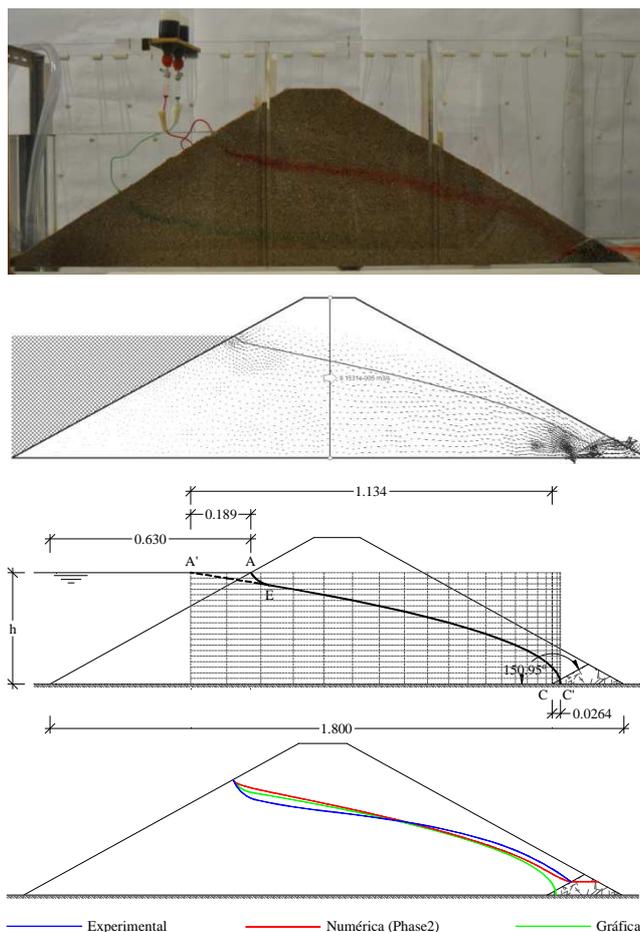


Figura 9. Posição da superfície livre da barragem com dreno de pé de talude de acordo com as soluções experimental, numérica e gráfica.

4.2. Barragem homogénea com dreno de chaminé

Na Figura 10 pode-se observar a trajectória do produto corante através do meio granular da barragem homogénea com dreno de chaminé.



Figura 10. Trajectória do produto corante na barragem com dreno de chaminé.

Da comparação entre os resultados obtidos pela via experimental e numérica constata-se que nas regiões com menores gradientes hidráulicos os desvios estão mais controlados. Pelo contrário junto da região de transição do material granular para o dreno, onde se verificam gradientes hidráulicos acentuadamente superiores, os desvios entre as duas soluções assumem maior importância (Figura 11).

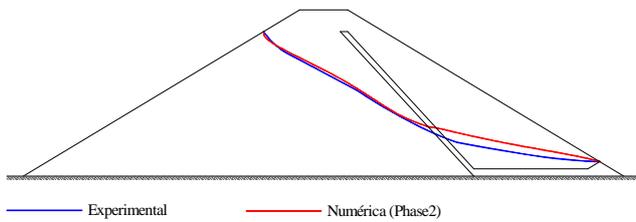


Figura 11. Posição da superfície livre da barragem com dreno de chaminé de acordo com as soluções experimental e numérica.

4.4. Barragem zonada

Como o material que constitui o núcleo apresenta uma permeabilidade substancialmente mais baixa do que a do material granular o escoamento processou-se de forma muito mais lenta do que se tinha verificado até então e por isso a visualização integral das linhas de corrente com o recurso ao produto corante mostrou-se particularmente difícil.

Observa-se na Figura 12 a boa correspondência entre a solução numérica e experimental da posição da superfície livre. Com efeito verificou-se que o desvio máximo nos resultados das alturas piezométricas foi de 46mm sendo o valor médio igual a 6.45mm.

Constatou-se também que o erro médio entre a solução experimental e a numérica foi de 3.51%. Este erro seria ainda inferior caso a leitura da altura piezométrica junto da interface núcleo-corpo de jusante não fosse tão discrepante.

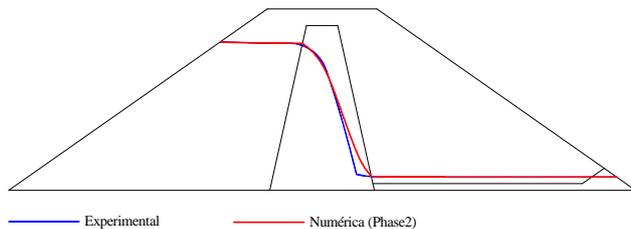


Figura 12. Posição da superfície da barragem zonada de acordo com as soluções experimental e numérica.

Nota-se pela Figura 13 como é facilmente perceptível o princípio de funcionamento de uma barragem zonada pois se constata imediatamente que o núcleo central funciona como meio dissipador de energia para conduzir e controlar o percurso da água através do meio poroso.

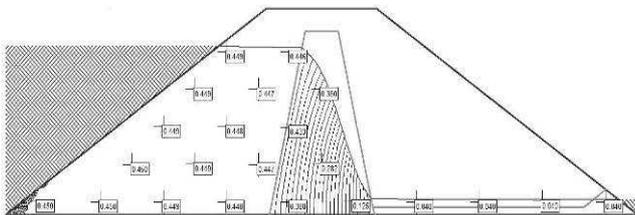


Figura 13. Carga hidráulica na grelha de pontos do tanque de percolação obtida numericamente.

Através dos resultados numéricos e experimentais obtidos neste estudo foi possível concluir que a superfície livre não é uma linha de corrente. Esta afirmação é particularmente evidente para o caso de estudo da barragem zonada (Figura 14).

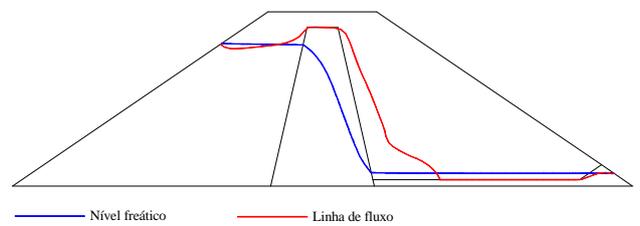


Figura 14. Posição da superfície livre e da linha de corrente associada ao ponto de injeção do corante.

Quando se pretende estudar os escoamentos não confinados em meios porosos cuja região não saturada assuma proporções desprezáveis face à região em condições saturadas, será lícito pressupor que a primeira linha de fluxo coincide com a superfície livre pois o erro em que se incorre é pequeno.

Repare-se no entanto que nos casos analisados as dimensões das regiões não saturadas são da ordem de grandeza dos modelos pelo que este pressuposto perde validade.

5. Estudos Paramétricos

A boa concordância obtida na conjugação do estudo experimental com a modelação numérica permite conferir aos resultados algo abstractos desta um carácter mais concreto e físico, o que é pedagogicamente valioso.

Mas importa também salientar que a flexibilidade da ferramenta numérica se pode traduzir numa substancial mais-valia quando devidamente explorada, por exemplo através da realização expedita de estudos paramétricos que permitam obter indicações elucidativas sobre o efeito da alteração de certas características do modelo em análise, estudos esses que seriam incomparavelmente mais morosos se levados a cabo por via experimental.

A exploração deste potencial na avaliação de alternativas, além de permitir aprofundar o conhecimento sobre o modo de funcionamento deste tipo de estruturas, não deixa também de ter alguma correspondência com o procedimento iterativo de afinação da solução em fase de projecto, pelo que é duplamente positivo em termos pedagógicos.

Como exemplo do que acaba de se referir apresentam-se em seguida cinco estudos paramétricos.

5.1. Comprimento do tapete drenante

A Figura 15 ilustra o efeito na configuração da superfície livre da adopção de três valores distintos para o comprimento do tapete drenante.

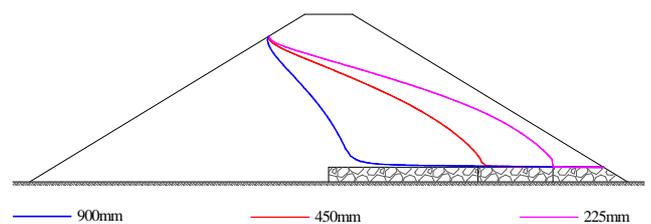


Figura 15. Variação da superfície livre com o comprimento do dreno horizontal.

5.2. Espessura do tapete drenante

Na Figura 16 o parâmetro em estudo é a altura da camada drenante horizontal, cujo aumento tem um efeito positivo perceptível na eficiência do funcionamento do tapete.

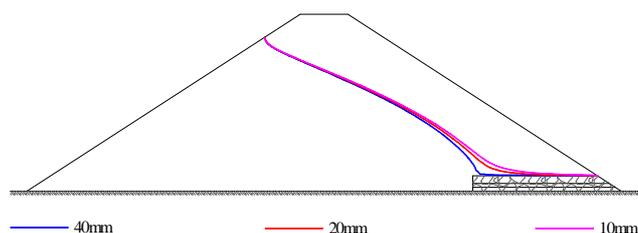


Figura 16. Variação da superfície livre com a espessura do dreno horizontal.

5.3. Permeabilidade do dreno de pé de talude

A progressiva redução da permeabilidade do dreno de pé de talude leva a que se criem condições para a ocorrência de ressurgência no paramento de jusante (Figura 17).

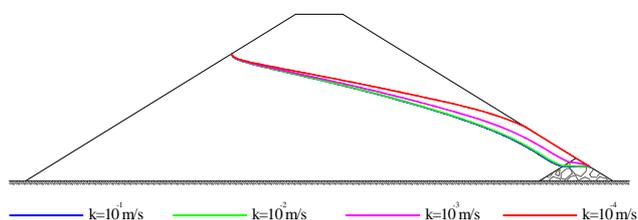


Figura 17. Variação da superfície livre com a permeabilidade do dreno de pé de talude.

5.4. Inclinação do dreno de chaminé

O aumento da inclinação do dreno de chaminé a partir da posição vertical, mantendo fixa a sua extremidade superior, leva a que o ponto de intersecção com a superfície livre se desloque progressivamente para jusante (Figura 18).

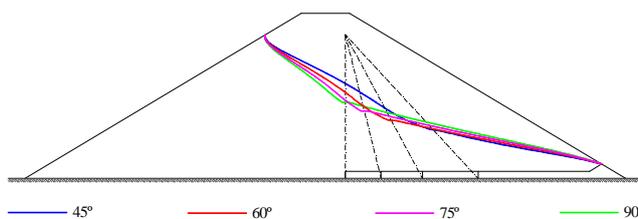


Figura 18. Variação da superfície livre com a inclinação do dreno de chaminé.

5.5. Permeabilidade do núcleo central

A redução da permeabilidade do núcleo central tem um efeito determinante no controlo da percolação no maciço estabilizador de jusante (Figura 19).

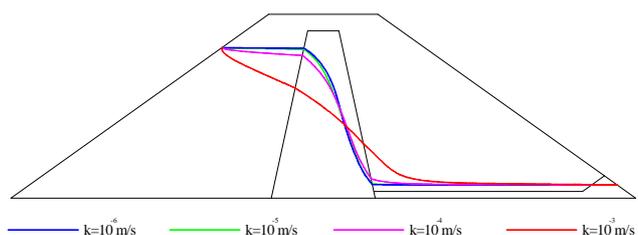


Figura 19. Variação da superfície livre com a permeabilidade do núcleo central.

6. Considerações Finais

Importará referir finalmente algumas conclusões adicionais relacionadas com factores associados ao fenómeno da percolação.

Num breve estudo paramétrico verificou-se que, para além de outros factores com influência na permeabilidade, a temperatura da água deverá ser controlada sempre que os resultados determinados em ensaios experimentais sejam utilizados em estudos numéricos diferidos no tempo e em condições térmicas da água distintas da inicial.

Relativamente à equação diferencial de continuidade geralmente utilizada no âmbito dos escoamentos bidimensionais em meios porosos, faz-se também uma breve chamada de atenção no que diz respeito a assumir como válido o regime permanente pois quando o índice de vazios dos geomateriais ou o grau de saturação variam no tempo, esta hipótese perde validade, estabelecendo-se então um regime transitório. Tal poderá ocorrer nos casos em que haja evolução granulométrica dos geomateriais (pela sua natureza ou pelas deficientes condições de execução da estrutura em obra) ou em situações de drenagem ou infiltração de água no meio bidimensional analisado.

Nunca será de mais salientar o imenso potencial didáctico deste equipamento de estudo da percolação em modelo reduzido. Note-se que para além da visualização das linhas de corrente é também possível determinar a altura piezométrica instalada em diversos pontos do domínio poroso e por esta via ter a percepção qualitativa e quantitativa das perdas de carga hidráulica associadas ao mecanismo físico da percolação.

Através da análise em modelo reduzido de barragens de aterro constituídas com elementos drenantes ou núcleos centrais torna-se imediatamente patente a diferença entre o controlo do escoamento pela capacidade de drenagem do sistema ou pela dissipação da energia potencial trazida pela água que circula no meio poroso.

Agradecimentos

Os autores agradecem à U.Porto/Santander Totta o financiamento que tornou possível a realização deste trabalho no contexto do Projecto "SeepTool - Equipamento de Estudo em Modelo Reduzido da Percolação de Água em Solos", enquadrado no programa de Projectos Pluridisciplinares de Iniciação à Investigação.

Os autores expressam a sua gratidão ao Prof. António Viana da Fonseca, Director do Laboratório de Geotecnia, e à Professora Maria de Lurdes Lopes, Directora do Laboratório de Geossintéticos, pelo apoio técnico e logístico generosamente concedido.

Às Engenheiras Cláudia Pinto e Daniela Coelho e ao Sr. Pinto são devidas contribuições valiosas na fase experimental do estudo.

Referências

- Casagrande, A. (1937). *Seepage through dams*, Journal of the New England Water Works Association, 51, 131-172. ISSN 0028-4939.
- 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.
- Marques, J. C., Ferreira, C. R. (2009). *A percolação de água em solos. Estudos em modelo reduzido*. 4as. Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, pp. 167-171. ISBN: 978-989-95557-3-0.
- Unas, M. S. P. (2010). *Estudo Experimental e Numérico de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido*, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Geotecnia, FEUP, Porto.