

### III-073 - COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE UMA BARREIRA CAPILAR: SIMULAÇÃO FÍSICA VERSUS NUMÉRICA

**Paulo Augusto Diniz Silva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. Mestre em Geotecnia pela UnB e doutorando em Meio Ambiente pelo DESA/UFMG.

**Eduardo von Sperling**

Engenheiro Civil e Sanitarista. Doutor em Limnologia. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG [eduardo@desa.ufmg.br](mailto:eduardo@desa.ufmg.br), tel: (31) 3409.1019.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua J 80, Quadra 152 A, Lote 6, Setor Jaó – Goiânia – Goiás – CEP: 74673-420 – País: Brasil – Tel: +55(62) 8505.8365 – e-mail: [pad@cefetgo.br](mailto:pad@cefetgo.br).

#### RESUMO

Este trabalho tem como proposta o estudo do fenômeno de barreira capilar a partir da modelagem física e numérica. Tal fenômeno surge quando um fluxo de água tenta atravessar um arranjo geológico composto, pelo menos, por uma camada de material de textura fina sobreposta a uma camada de material de textura grossa que, em condições não saturadas, impede ou restringe a entrada da água nos poros maiores deste último material.

A experimentação física utilizou um modelo físico reduzido retratando um perfil geológico, contendo duas camadas horizontais, sobrepostas de solos arenosos com texturas diferenciadas, sem cobertura vegetal, sob ação da drenagem gravitacional, exposto a uma determinada condição atmosférica de infiltração. Já a simulação numérica foi feita utilizando um modelo matemático baseado no método dos volumes finitos, usando diferenças centrais para as derivadas espaciais e um esquema totalmente implícito para aproximação das derivadas temporais, cuja equação de Richards e o modelo de van Genuchten foram empregados. Os resultados mostraram claramente que o fenômeno da barreira capilar ocorre devido à diferença de condutividade hidráulica entre os meios envolvidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barreira capilar, fluxo de água em meios poros, modelagem física e numérica.

#### INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos envolve uma sistemática interação entre várias atividades tais como geração de resíduo, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final. Tal gerenciamento é função do entrosamento da autoridade local (agência reguladora), cobrindo os aspectos administrativos e financeiros, legislação, planejamento e funções de engenharia. As soluções para este problema são encontradas não apenas na engenharia, mas também numa complexa e estruturada inter-relação entre diversos campos da política urbana e planejamento regional, economia, sociologia, saúde pública etc.

A disposição final dos resíduos, seja urbanos ou industriais, requer um elenco de alternativas tecnológicas para assegurar que estes depósitos sejam eficientes para assegurar as qualidades ambientais do sítio no qual está inserido. Os sistemas de cobertura empregados no fechamento destes depósitos são elementos construtivos cujas atribuições primeiras são: promover o isolamento do material depositado do ambiente superficial, controlar o movimento de líquidos e de gases e, em alguns casos, promover a recomposição paisagista.

As alternativas normalmente utilizadas têm sido as chamadas coberturas secas que consistem no recobrimento da área do depósito com camadas de solo. As coberturas secas são camadas de materiais (solo, resíduos não inertes ou materiais geossintéticos) dispostos sobre os depósitos de resíduos, constituindo-se em barreiras físicas de proteção ambiental.

Existe uma grande variedade de sistemas de coberturas para proteção de instalações de disposição de rejeitos. Tradicionalmente, as barreiras hidráulicas, camadas de solos de baixa condutividade hidráulica, são as mais empregadas para restringir a entrada de fluido dentro do corpo do rejeito e isolar o material ali depositado do contato com atmosfera. Apesar de serem amplamente difundidas, o desempenho destas barreiras é reduzido ao longo do tempo, uma vez que as camadas de argilas compactadas são suscetíveis à degradação. Elas perdem sua eficiência na medida em que ciclos prolongados de expansão e contração levam o material à fadiga, promovendo o aparecimento de trincas e, conseqüentemente, comprometendo a sua integridade e

funcionalidade.

As barreiras capilares têm demonstrado constituir-se em uma possível alternativa para as coberturas de solo compactado e de sistemas de coberturas utilizando materiais geossintéticos, principalmente em ambientes de clima árido e semi-árido (Morris e Stormont, 1997). Estas coberturas empregam o princípio de barreira capilar e constituem-se na elaboração de camadas de diferentes tipos de solos ou de solos semelhantes com texturas diferentes. São relativamente fáceis de serem executadas e seu controle de qualidade na execução é menos oneroso quando comparado a outros sistemas de coberturas.

## JUSTIFICATIVA

Recentemente, vários têm sido os esforços para comprovar a eficiência das barreiras capilares na intenção que essas possam ser as substitutas das tradicionais barreiras hidráulicas, uma vez que elas admitem ser concebidas empregando materiais alternativos e por apresentarem menor custo de instalação. Além disso, o que se procura com a adoção desse sistema é sair da dependência do emprego exclusivo de materiais argilosos com baixo valor de condutividade hidráulica para que as exigências de fechamento dos depósitos sejam asseguradas. Elas têm sido testadas numa série de experimentos de laboratório e de campo com resultados promissores, indicando que são bem-sucedidas (Kämpf e Montenegro, 1997; Miyazaki, 1993, dentre outros).

Uma análise detalhada da eficiência das barreiras capilares sob condições naturais é tarefa difícil e muito dispendiosa. A avaliação da sua eficácia pode levar anos ou até mesmo décadas. Para contornar essa dificuldade é usual o emprego de técnicas que avaliam o efeito da barreira capilar sob condições controladas (i.e., condições atmosféricas artificiais e em campos de testes) (Barrès e Bonin, 1994). Dentre essas técnicas, é comum a utilização da modelagem matemática e de protótipos laboratoriais (Oldenburg e Pruess, 1993; Roos, 1990; Yang *et al.*, 2006).

Neste contexto, a proposta deste artigo é apresentar um estudo comparativo entre a simulação física e numérica do comportamento hidráulico de um exemplar de barreira capilar, na intenção de avaliar a eficiência deste arranjo para o fechamento e proteção ambiental de aterros sanitários.

## METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia empregada foi desenvolvida em cinco etapas, a saber, são: (i) desenvolvimento do aparato experimental: coluna de laboratório e simulador de chuva; (ii) caracterização dos materiais empregados na coluna – parâmetros físicos e hidráulicos; (iii) simulação do cenário para manifestar o fenômeno em questão; (iv) aquisição e análise dos dados representando as variações temporais e espaciais do conteúdo de água ocorridas no modelo físico; (v) elaboração de um código computacional para avaliação do comportamento do fluxo unidimensional da água na coluna.

## RESULTADOS

O cenário proposto consiste na simulação física da infiltração da água em uma coluna com 10 cm de diâmetro e 90 cm de altura, contendo duas camadas horizontais sobrepostas de solos arenosos com texturas diferenciadas, com espessuras iguais a 50 e 40 cm, respectivamente, sem cobertura vegetal, sob ação de drenagem gravitacional, durante um período de 4 horas. A coluna foi submetida a uma taxa de precipitação igual a 90 mm/hora, durante as primeiras 2 horas e o tempo restante sujeita à drenagem livre. Na Tabela 1 são apresentadas as características e as propriedades dos solos adotados no trabalho.

**Tabela 1 – Características básicas dos solos.**

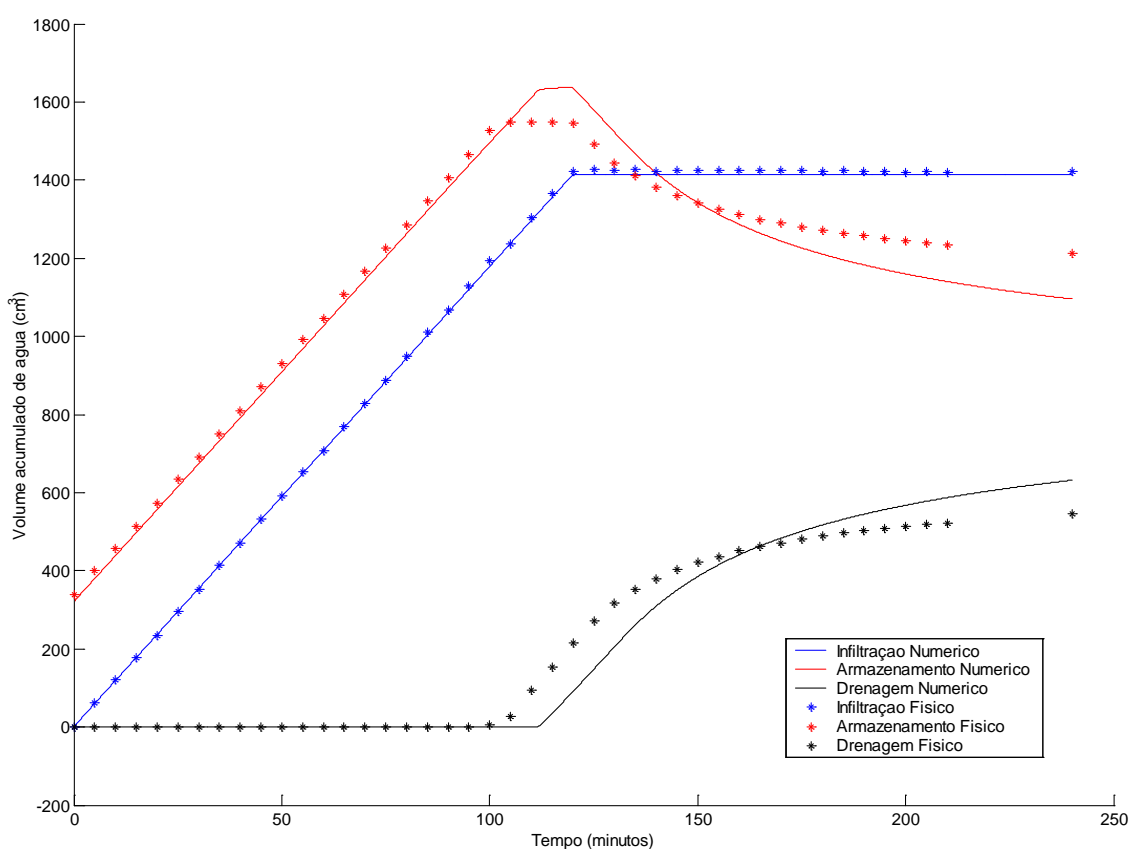
| Camada | Prof. (cm) | Descrição     | Textura | $K_s$ (m/s)          | $\theta_s^d$ | $\theta_r^d$ | $\alpha^d$ (cm <sup>-1</sup> ) | $n^d$ |
|--------|------------|---------------|---------|----------------------|--------------|--------------|--------------------------------|-------|
|        |            |               |         |                      | $\theta_s^m$ | $\theta_r^m$ | $\alpha^m$ (cm <sup>-1</sup> ) | $n^m$ |
| 1      | 0 - 50     | Areia IPT 100 | Fina    | $1,1 \times 10^{-4}$ | 0,410        | 0,037        | 0,023                          | 5,975 |
|        |            |               |         |                      | 0,410        | 0,037        | 0,028                          | 5,505 |
| 2      | 50 - 90    | Areia IPT 16  | Grossa  | $6,0 \times 10^{-2}$ | 0,415        | 0,010        | 0,139                          | 4,354 |
|        |            |               |         |                      | 0,415        | 0,010        | 0,168                          | 4,124 |

Os sobrescritos *d* e *m* referem à trajetória de drenagem e molhamento, respectivamente.

O código computacional foi escrito na linguagem do Matlab®, utilizando-se do método dos volumes finitos para resolver a equação governante do fenômeno (Equação de Richards), ou seja, integração da equação diferencial sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, empregando um esquema de diferenças centrais para a derivada espacial e um esquema totalmente implícito para a derivada temporal. A discretização do domínio é feita por uma malha de geometria unidimensional e uniforme. As relações constitutivas, ou seja, o modelo matemático para representar as relações entre o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta$ ), a sucção ( $\psi$ ) e a condutividade hidráulica ( $K$ ) escolhida foi a relação de van Genuchten (1980).

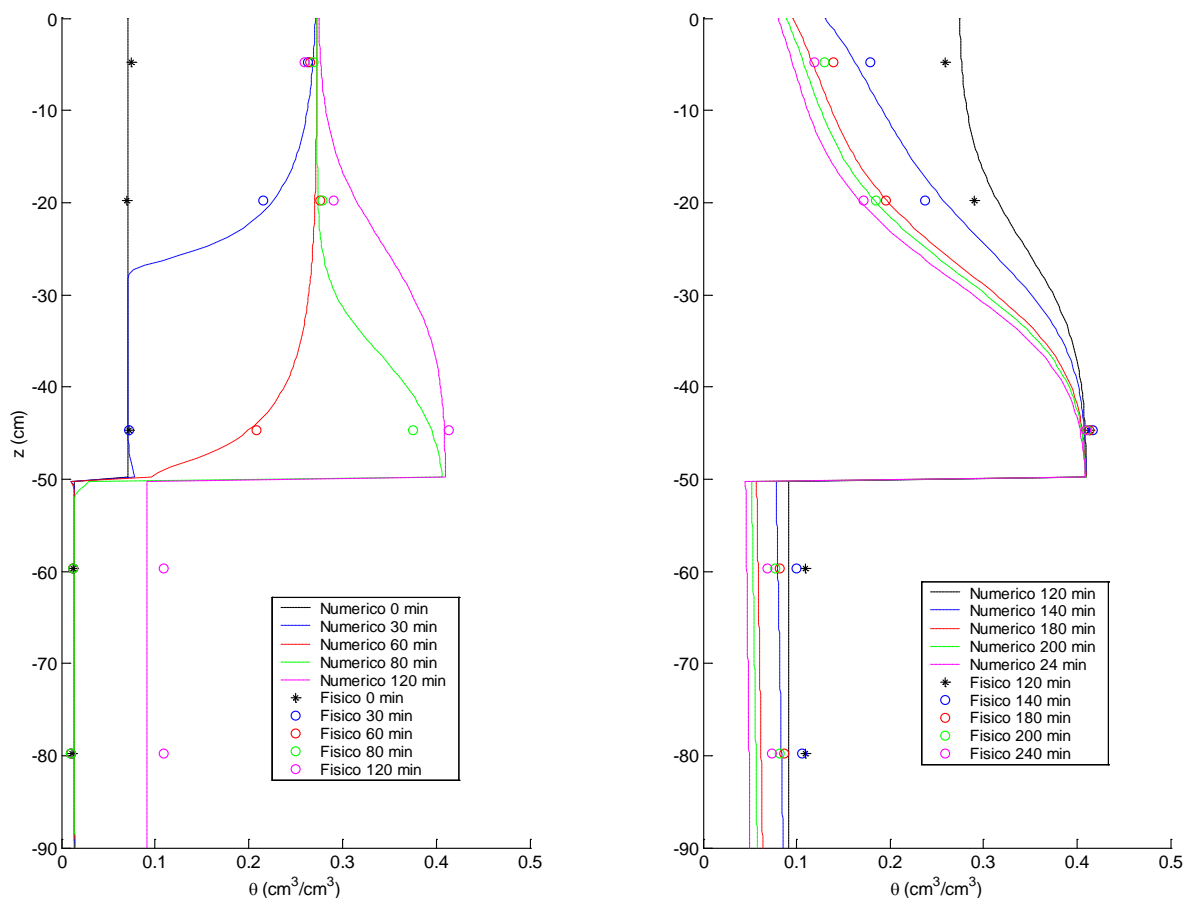
Considerando o cenário proposto, o efeito de barreira capilar foi simulado e os principais resultados obtidos são apresentados nas figuras a seguir.

Na Figura 1 é apresentada a evolução do volume de água infiltrado, drenado e acumulado na experimentação física e numérica do cenário proposto. Também, é fácil averiguar que os volumes estimados pelo modelo numérico são comparados àqueles observados no modelo físico, sendo assim, possível considerar que, em termos de volume de água, o código computacional é apropriado e eficiente.



**Figura 1 – Evolução da frente de molhamento: modelo numérico versus modelo físico.**

A comparação entre a evolução da frente de molhamento na coluna de solo simulada pelo o modelo físico e prevista pelo modelo numérico é apresentada na Figura 2. Na primeira figura, observa-se que a camada superior, quando ela recebe uma quantidade de água devido a precipitação, o formato da frente de molhamento pode ser idealizado como se fosse um pistão cujo êmbolo avança por dentro da camada, ou seja, forma monotônica, condizente com o padrão de um solo uniforme. Já a configuração do fluxo na camada inferior permanece muito semelhante daquela exibida na condição inicial durante todo o tempo de simulação. A variação no conteúdo de água ocorrida nesta camada, antes e depois da falha da barreira, é pouca pronunciada. Esse fato é devido a alta permeabilidade do material do estrato em questão.



**Figura 2 – Evolução da frente de molhamento: modelo numérico versus modelo físico.**

A dinâmica da condutividade hidráulica e da saturação efetiva ocorrida nas proximidades da interface durante a simulação do fenômeno pode ser observada na Figura 3. A entrada de água na camada inferior ocorre quando o grau de saturação da camada superior se aproxima de 1 (condição de saturação) e, por consequência a sua condutividade hidráulica aproxima-se da condutividade hidráulica saturada e quando os valores das condutividades hidráulicas dos materiais das duas camadas apresentam a menor diferença entre eles (Figura 3a).

Na Figura 3b destacam-se três estágios, a saber: (1) o surgimento e duração do efeito de barreira capilar; (2) entrada da água na camada inferior – falha da barreira capilar; (3) drenagem da água adicionada na camada inferior. Neste último estágio, o volume da água que atravessa a barreira vai, aos poucos, sendo percolado para camadas mais profundas devido à ação da gravidade. Com a passagem do tempo, a camada inferior volta a funcionar como anteparo ao fluxo de água imposto pela camada superior, na medida em que o volume de água presente na camada for sendo drenado.

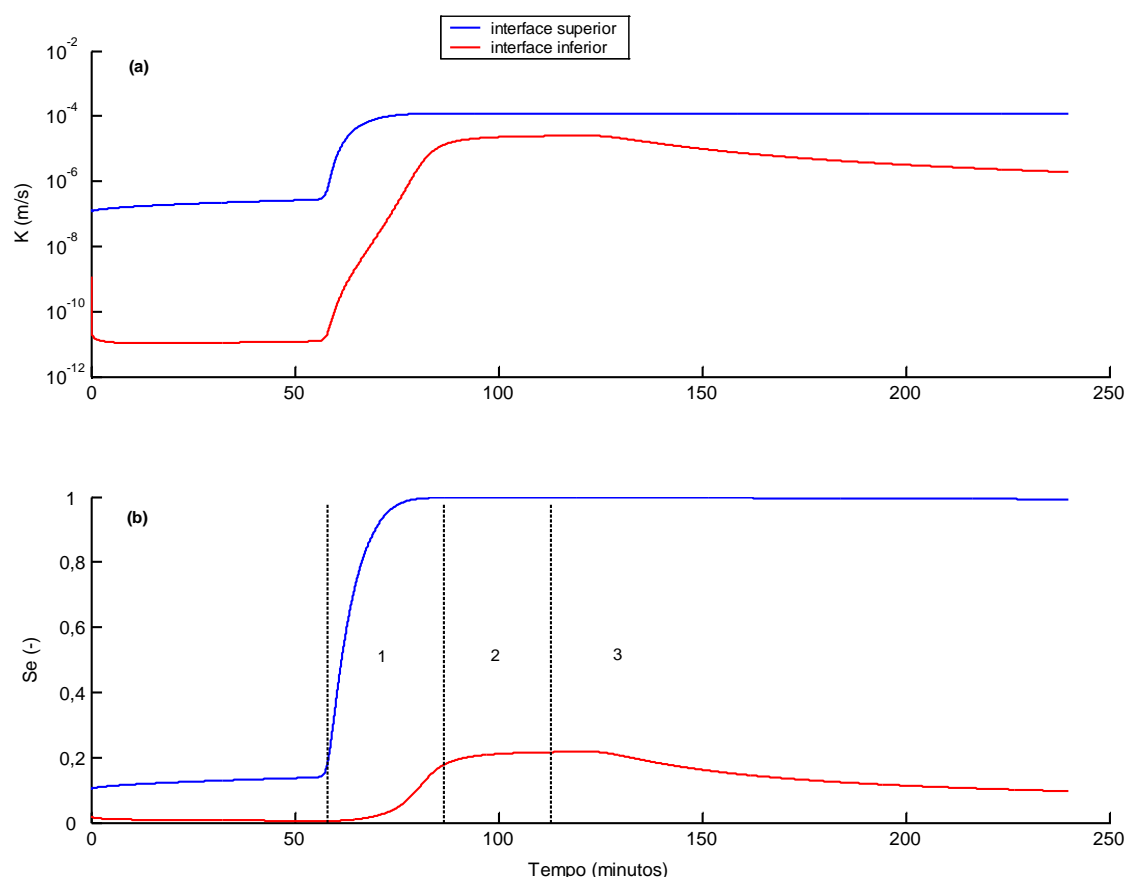


Figura 3 – Distribuição de K (a) e  $S_e$  (b) na interface entre as duas camadas de areias.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho tem como propósito simular física e numericamente o efeito de barreira capilar para mostrar a maneira como o fenômeno ocorre, desde seu surgimento até a sua falha. Os resultados mostram claramente que o fenômeno de barreira capilar ocorre devido à diferença de condutividade hidráulica entre os meios envolvidos e que o modelo numérico é capaz de estimar tanto a quantidade de água drenada, como o comportamento hidráulico deste ambiente ante o fenômeno de redistribuição da água.

A importância do estudo reside na possibilidade de que essas barreiras possam substituir as tradicionais barreiras hidráulicas, uma vez que elas podem ser concebidas empregando materiais alternativos e por apresentarem menor custo de instalação. Além disso, o que se procura com a adoção de sistemas de proteção ambiental do tipo barreira capilar é evitar a dependência do emprego exclusivo de materiais argilosos com baixo valor de condutividade hidráulica para que as exigências de fechamento dos depósitos sejam asseguradas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARRÈS, M.; BONIN, H. 1994. The Capillary Barrier for Surface Capping. T.H. Christensen; R. Cossu & R. Stegmann (Ed.). Landfilling of Waste: Barriers, 1994. p.139 –148.
2. KÄMPF, M.; MONTENEGRO, H. On the Performance of Capillary Barriers as Landfill Cover. Hydrology and Earth System Sciences, vol. 4, p. 925-929, 1997.
3. MIYAZAKI, T. (1993). Water Flow in Soils. Marcel Dekker Inc. New York, New York, USA, 296 p.
4. MORRIS, C.E.; STORMONT, J.C. Capillary Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency. Journal of Environmental Engineering, vol. 123, nº 3, p. 3-10, 1997.
5. OLDENBURG, C. M.; PRUESS, K. On Numerical Modeling of Capillary Barriers. Water Resources Research, vol. 29, nº 4, p. 1045-1056, April 1993.

6. ROOS, B. The Diversion Capacity of Capillary Barriers. *Water Resources Research*, vol. 26, nº 10, p. 2625-2629, October 1990.
7. VAN GENUCHTEN, M. TH. A Closed-form Equation for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society America Journal*, vol. 44, p. 892-898, 1980.
8. YANG, H.; RAHARDJO, H.; LEONG, E.C. Behavior of Unsaturated Layered Soil Columns During Infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 11. nº 4, p. 329-337, 2006.