

Simulação Numérica do Efeito de Barreira Capilar

Paulo Augusto Diniz Silva, Eduardo von Sperling

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG

pad@cefetgo.br, eduardo@desa.ufmg.br

Lúcio Flávio de Souza

Departamento de Transportes e Geotecnia-UFMG

Recebido: 08/03/09 – revisado: 17/05/10 – aceito: 27/08/10

RESUMO

Este artigo avalia o efeito de barreira capilar em uma coluna contendo dois solos arenosos, sendo uma camada de solo de textura fina sobreposta a uma camada de solo de textura grossa, submetida ao evento de infiltração. Para representar a dinâmica do escoamento em meio poroso não saturado, a equação de Richards e o modelo de van Genuchten foram utilizados. 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. O cenário aqui simula o surgimento do efeito e a ocorrência da falha da barreira capilar. Atualmente este fenômeno vem sendo exaustivamente estudado, uma vez que sua aplicação em coberturas finais de depósitos de rejeitos urbanos e industriais tem apontado ser uma alternativa bastante atraente para restringir o fenômeno da infiltração em meio geológico construído. Os resultados mostram claramente que o fenômeno da barreira capilar ocorre devido à diferença de condutividade hidráulica entre os meios envolvidos.

Palavras-chave: Fluxo em meio poroso não saturado, barreira capilar, infiltração.

INTRODUÇÃO

Barreira capilar é um fenômeno que ocorre no meio não saturado devido a presença de uma camada de material de textura fina sobreposta a uma camada de material de textura grossa que, em certas condições, impede ou restringe a entrada da água nos poros maiores deste último material. Tal fenômeno surge quando um fluxo de água tenta atravessar um arranjo deste tipo em condição não saturada.

O princípio de barreira capilar é baseado no contraste entre as condutividades hidráulicas em condição não saturada dos materiais envolvidos e, portanto, não depende de materiais de baixa condutividade hidráulica para ser eficiente. Quando uma água infiltra em um perfil de solo apresentando tal formação, a interface serve como um anteparo provisório resistente ao fluxo da água. Se o contato entre as camadas é horizontal, a água armazenada deverá ser mantida na camada de solo fino, acumulando-se sobre a interface, até que a força da gravidade torne-se maior que a força da pressão capilar. A entrada da água na camada do solo de textura

grossa ocorre quando a camada superior aproxima-se da saturação, fazendo com que a diferença entre as condutividades hidráulicas seja suficientemente pequena. Por outro lado, se a interface for inclinada o fluxo da água deverá ser transportado (desviado) ao longo do contato, a uma distância tal, até encontrar uma condição favorável para penetrar na camada do solo grosso.

O mecanismo de barreira capilar pode ser interpretado a partir do modelo capilar, tal como ilustrado na Figura 1. O capilar de menor diâmetro representa o tamanho médio dos poros da camada de solo fino e o capilar de diâmetro o tamanho médio dos poros da camada de solo granular. As forças desenvolvidas no arranjo (solo fino sobre solo granular) são representadas pelas tensões capilares (ψ_1) e (ψ_2) e pelo peso da coluna de água suspensa sobre a interface ($\rho_w g H$). Fazendo o balanço das forças na vertical, pode-se demonstrar que uma certa quantidade de água deverá ficar suspensa (retida) sobre a interface, na medida em que a força capilar da camada superior (ψ_1) seja maior que a soma da força capilar da camada de baixo (ψ_2) acrescida da altura da coluna de água acumulada na interface (H). Caso a altura da água supere a diferença entre as forças

capilares ($H > \psi_1 - \psi_2$), a água deverá fluir para baixo e a barreira não mais funcionará como um obstáculo ao fluxo descendente da água.

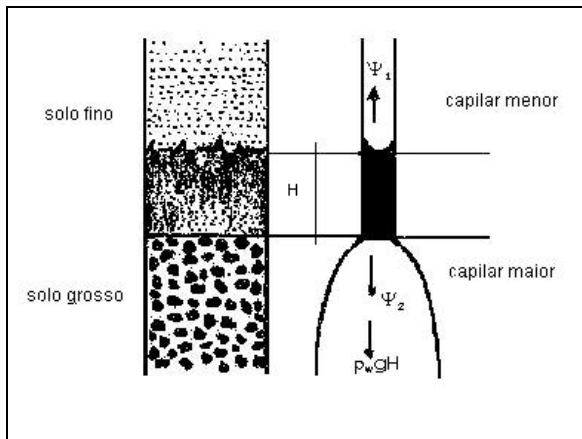


Figura 1 – Modelo capilar da retenção da água em capilares de diâmetros diferentes (modificado de Iwata *et al.*, 1995).

Outra forma, que auxilia o entendimento deste mecanismo é apresentada por Billiotte *et al.* (1988), citado por Oldenburg e Pruess (1993). Os autores explicam o fenômeno a partir da análise do desenvolvimento da condutividade hidráulica na interface do arranjo. Para um certo nível de sucção, i.e., potencial da água devido a contribuição das forças de retenção da água no solo associadas com suas interfaces líquido-ar e sólido-líquido (Libardi, 2005), o valor da condutividade hidráulica do solo grosso apresenta um forte gradiente, enquanto o valor da condutividade do solo fino é quase invariável (Figura 2). Enquanto a diferença entre as condutividades hidráulicas for significativa, o fluxo de água é restringido para a camada do solo grosso. Na medida em que água se acumula na camada superior, o valor da sucção na interface torna-se menor (negativo) e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica tende a aumentar. Quando a magnitude da sucção na interface aproximar-se do valor de sucção da entrada de água do solo grosso, o fluxo de água deverá atravessar a camada inferior, caracterizando uma falha da barreira capilar.

Esse tipo de configuração, solo fino sobre um solo granular, não é exclusividade da natureza dos solos heterogêneos e estratificados, devido à formação geológica. Estas formações também são encontradas em estruturas de engenharia com propósito de tirar proveito do efeito de barreira capilar, como é o caso das coberturas para o fechamento de

instalações de disposição de rejeitos urbanos e industriais, cujo objetivo é minimizar a quantidade de água percolando através dos resíduos.

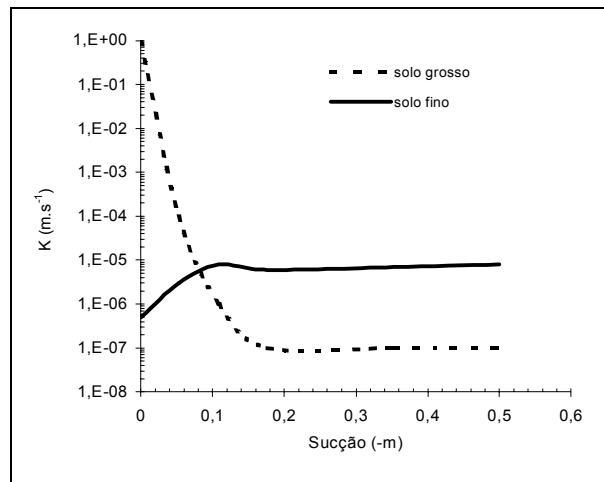


Figura 2 – Desenvolvimento típico da condutividade hidráulica em uma barreira capilar (modificado de Oldenburg e Pruess, 1993).

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.

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; Miyazaki, 1993; Roos, 1990; Yang *et al.*, 2006).

Apesar da simplicidade descritiva do fenômeno em questão, em termos matemáticos, a modelagem e interpretação não são tarefas triviais. Sem mais, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar o efeito de barreira capilar utilizando modelagem matemática.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo Matemático

A previsão do movimento de fluidos na zona não saturada (também chamada vadosa) impulsionou o desenvolvimento de vários modelos para representação física do fenômeno do fluxo de água em um meio poroso. Estes modelos são baseados na equação de Richards que apresenta uma consistente base teórica para representar o escoamento em meio não saturado. Esta equação pode ser originada da combinação lei de Buckingham-Darcy com o princípio da conservação de massa, apresentando um forte caráter não-linear devido à dependência da condutividade hidráulica com o conteúdo volumétrico de água e com o potencial da água no solo (Hillel, 1998, Selker *et al.*, 1999; Warrick, 2003 dentre outros). A equação resultante pode ser expressa por:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \pm Q \quad (1)$$

onde $C(\psi)$ a capacidade de armazenamento de água [L^{-1}]; ψ a sucção mátrica [L]; $K(\psi)$ a condutividade hidráulica na condição não saturada [$L T^{-1}$]; z a coordenada vertical, orientada para baixo [L]; Q a fonte ou sumidouro [T^{-1}].

As premissas e simplificações inerentes à equação são: (i) as propriedades da água, sobretudo

densidade e viscosidade, devem ser as mesmas em qualquer tempo e posição no solo – fluido incompressível e condições isotérmicas; (ii) o movimento de ar não deve influenciar o movimento de água – fase gasosa contínua e com pressão constante; (iii) não deve haver rearranjo das partículas do solo durante o fluxo de água – meio rígido, contínuo, homogêneo e isotrópico; (iv) o movimento de gases (fluxo de vapor) no solo é desprezado; (v) apenas o potencial mátrico e gravitacional são considerados; (vi) a história das trajetórias de tensões na água, o fenômeno da histerese, é negligenciada; e, (vii) apenas o fluxo unidimensional, na direção vertical, é considerado.

Observa-se que a variável de estado ψ , que representa o fenômeno, é função de duas variáveis independentes: o espaço (z) e o tempo (t). A dependência dos parâmetros $C(\psi)$ e $K(\psi)$ com a variável de estado manifesta o caráter não-linear da equação.

Esta equação diferencial pode ser resolvida tanto analítica como numericamente. Soluções analíticas são empregadas e exequíveis para resolver casos simples. A adoção de amplas simplificações restringe sua aplicabilidade aos solos homogêneos, submetidos a certas condições: por exemplo, perfil de umidade do solo inicialmente seco e fluxo constante na superfície do solo (Gardner, 1958; Warrick *et al.*, 1991).

Já as soluções numéricas podem ser utilizadas em problemas de fluxo mais complexos, incluindo a heterogeneidade espacial, eventos cíclicos nas condições de contorno e operações com fenômeno da histerese, tornando o modelo proposto para investigação do fluxo da água em meio poroso mais próximo da realidade. Tradicionalmente, os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos são os mais empregados. Geralmente, estes são acoplados com o algoritmo de Euler implícito ou explícito e atrasado no tempo, cujas equações algébricas não-lineares são, usualmente, resolvidas pelas técnicas iterativas de Picard e Newton (Haverkamp *et al.*, 1977; Haverkamp e Vauclin, 1979; van Genuchten, 1980; Celia *et al.*, 1990; van Dam e Fedds, 2000; Vasconcellos e Amorim, 2001; Varado *et al.*, 2006). Manzini e Ferraris (2004) apresentaram o método dos volumes finitos para resolver a equação de Richards. Segundo os autores, o método se mostrou uma técnica de aproximação bastante eficaz e apropriada para simulação de fluxos que exibem variações abruptas no gradiente hidráulico, como é o caso do fenômeno desenvolvido numa barreira capilar.

Apesar de que, nas últimas décadas, várias rotinas numéricas com diferentes esquemas têm sido desenvolvidas para resolver a equação de Richards, o caráter não-linear das funções hidráulicas do solo, a mudança abrupta das condições de umidade perto da superfície do solo e as condições de heterogeneidade dos solos constituem as principais dificuldades para a resolução desta equação. Além disso, uma solução numérica consistente, convergente e estável depende da estrutura do esquema numérico e da aplicação do passo de tempo e do tamanho da malha a ser adotada (van Dam e Fedds, 2000).

A solução requer ainda o conhecimento da relação entre o conteúdo volumétrico da água no solo (θ), a sucção (ψ) e a condutividade hidráulica (K). Estas relações são dadas por funções experimentais obtidas a partir das correlações entre a curva de retenção e as propriedades físicas e hidráulicas dos solos. Na literatura é apresentada uma vasta quantidade de modelos para diferentes tipos de solos. Neste trabalho, a relação de van Genuchten (1980) foi escolhida e dada por:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + |\alpha\psi|^n\right)^m} \quad (2)$$

onde n e m são constantes de ajustes que representam a distribuição do tamanho dos poros no solo [-]; α a constante de ajuste relativa ao valor da sucção na entrada de ar no solo [L^{-1}]; θ_s o conteúdo volumétrico de água na condição saturada [L^3L^{-3}]; θ_r o conteúdo volumétrico de água residual [L^3L^{-3}]; e S_e a saturação efetiva [-]. Para a maioria dos tipos de solos, os parâmetros n e m são relacionados a partir de $m = 1 - 1/n$.

Combinando a Equação 2 com modelo devido a Mualem (1976), obtém-se a função da condutividade hidráulica na condição não saturada, tal como:

$$K(\psi) = K_s S_e^{0,5} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right)^2 \quad (3)$$

onde $K(\psi)$ e K_s são a condutividade hidráulica na condição não saturada e saturada, respectivamente [L^T].

Solução Numérica

Para resolver a equação diferencial parcial que representa o fenômeno em questão, o método dos volumes finitos foi empregado, utilizando um esquema de diferenças centrais para a derivada espacial e um esquema totalmente implícito para a derivada temporal. Uma malha de geometria unidimensional e uniforme foi adotada para discretização do domínio. Das equações discretizadas resulta um sistema linear de equações algébricas formando uma matriz tri-diagonal que é resolvida iterativamente pelo algoritmo de Thomas (*Tridiagonal Matrix Algorithm* – Pantankar, 1980).

Neste trabalho, o critério de convergência adotado baseou-se na avaliação do erro relativo entre os valores do campo da variável dependente (ψ) nos níveis de iteração k e $k-1$, em um determinado nível de tempo t . A máxima diferença deste erro é comparada com uma tolerância adotada no modelo computacional. Caso esta máxima diferença seja menor que o valor da tolerância, o tempo t é acrescido de um Δt e, assim, avançando para um nível de tempo $t + \Delta t$. A mudança relativa máxima da sucção é definida como:

$$\xi = \max \left| \frac{\psi_i^{k-1} - \psi_i^k}{\psi_i^{k-1}} \right| \leq \text{tol} \quad (4)$$

onde ξ representa o erro relativo; tol a tolerância e k o nível de iteração.

Muitas vezes a verificação da solução de um problema de fluxo não é dada por soluções analíticas ou numéricas tabeladas. Uma maneira de verificar a validade da solução é feita a partir do balanço de massa do sistema em questão. O balanço de massa mede a habilidade do algoritmo em conservar a propriedade envolvida (massa, volume ou altura de água). Uma possível maneira de calcular o balanço de massa é apresentada a seguir:

$$B_m^t = \left| \frac{V_f^t - (V_o^t + V_{\text{aporte}}^t) - V_{\text{drenado}}^t}{V_f^t} \right| 100 \quad (5)$$

onde B_m o erro no balanço de massa (%); V_o o volume inicial de água na coluna; V_{aporte} o volume de água que entra ou sai no topo da coluna; V_{drenado} o volume de água que sai da coluna e V_f o volume de água final na coluna.

A condutividade hidráulica nas interfaces do volume de controle ($i \pm 1$) foi avaliada a partir da média geométrica, tal como proposta por Haverkamp e Vauclin (1979), dada por:

$$K_{i \pm 1/2} = \sqrt{K_i K_{i \pm 1}} \quad (6)$$

Condições de Contorno e Inicial

Além do modelo matemático e das relações constitutivas, duas outras condições são necessárias para estabelecer o tratamento adequado para resolver numericamente o fenômeno em questão. As condições de contorno e iniciais são aquelas que definem o problema como único e particular do fenômeno que se pretende simular. A condição inicial utilizada para todo o domínio e para o tempo inicial de simulação foi especificada como:

$$\psi(z, t = 0) = \psi_0(z) \quad (7)$$

Já a condição de contorno de fluxo especificada na interface atmosfera-superfície e na base do perfil de solo é dada pela expressão:

$$q = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \quad (8)$$

onde q representa o fluxo de água ocorrido na base e no topo da coluna de solo.

O evento de precipitação foi representado por uma função que considera uma chuva distribuída uniformemente na superfície durante o período de sua ocorrência, cujo valor instantâneo é dado por:

$$P(t) = \frac{A}{t_f - t_i} \quad (9)$$

onde P é a precipitação diária instantânea [$L T^{-1}$]; A o termo que representa a amplitude da função [L]; t o tempo [T]; t_i o horário inicial da chuva [T]; e t_f o horário final da chuva [T].

O volume real de água infiltrado no perfil do solo é determinado a partir de uma rotina de cálculo que verifica a capacidade de armazenamento de água deste perfil, utilizando o valor da condutividade hidráulica saturada K_s como parâmetro para limitar o volume de água infiltrado. O somatório deste volume de água resulta no valor efetivo do volume de água infiltrado na coluna.

Estabeleceu que a experimentação fosse submetida a uma condição de drenagem livre cujo fluxo ocorresse exclusivamente devido a gravidade. Para tal, o fluxo na base da coluna deverá assumir o valor da condutividade hidráulica da fronteira, $K(\psi_b)$ – onde ψ_b é a sucção calculada no último ponto nodal do domínio.

Cenário de Simulação

O cenário proposto consiste na simulação da infiltração da água em uma coluna com 100 cm de altura, contendo duas camadas horizontais sobrepostas de solos arenosos com texturas diferenciadas, com espessuras iguais a 70 e 30 cm, respectivamente, sem cobertura vegetal, sob ação de drenagem gravitacional, durante um período de 26 dias. A coluna foi submetida a uma sequência de precipitação com taxas constantes, tal como mostrado na Tabela 1. Uma malha igualmente espaçada de 1 cm e um incremento de tempo igual a 1 minuto foram usados para discretizar o domínio. Na Tabela 2 são apresentadas as características e as propriedades dos solos aqui adotados.

Inicialmente foi considerado um perfil seco (i.e., os poros totalmente preenchidos de ar), retratando uma condição de um longo período de estiagem, o que leva a saturação próxima de seu valor residual.

$$\begin{cases} \psi(z, 0) = -144,6 \text{ cm} & 0 < z < 70 & (S_e = 7\%) \\ \psi(z, 0) = -35,1 \text{ cm} & 70 < z < 100 & (S_e = 3\%) \end{cases} \quad (10)$$

Na base da coluna foi considerado que o fluxo de drenagem ocorre exclusivamente devido a gravidade e no topo foi adotada condição atmosférica de precipitação:

$$\begin{cases} \text{base : } q = K(\psi_b) = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \\ \text{topo : } q = P = -K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \end{cases} \quad (11)$$

Tabela 1 – Sequência de precipitação imposta à coluna.

Data	Precipitação mm/dia	Data	Precipitação mm/dia	Data	Precipitação mm/dia
31/10/2008	41,10	09/11/2008	13,60	18/11/2008	1,00
01/11/2008	0,00	10/11/2008	18,60	19/11/2008	4,00
02/11/2008	0,00	11/11/2008	8,80	20/11/2008	0,00
03/11/2008	0,60	12/11/2008	0,90	21/11/2008	0,00
04/11/2008	5,40	13/11/2008	31,90	22/11/2008	0,00
05/11/2008	0,00	14/11/2008	31,30	23/11/2008	0,00
06/11/2008	13,80	15/11/2008	0,00	24/11/2008	0,00
07/11/2008	0,00	16/11/2008	0,00	25/11/2008	0,00
08/11/2008	7,00	17/11/2008	11,00	26/11/2008	0,00

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – Estação Belo Horizonte 83587.

Tabela 2 – Características básicas dos solos.

Camada	Prof. (cm)	Descrição	Textura	K_s (m/s)	θ_s *	θ_r *	α * (cm ⁻¹)	n *
1	0 - 70	areia IPT 100	fina	$1,35 \times 10^{-4}$	0,438	0,010	0,0159	4,149
2	70 - 100	areia IPT 16	grossa	$1,10 \times 10^{-2}$	0,422	0,045	0,1076	3,633

Fonte: * Santos (2005).

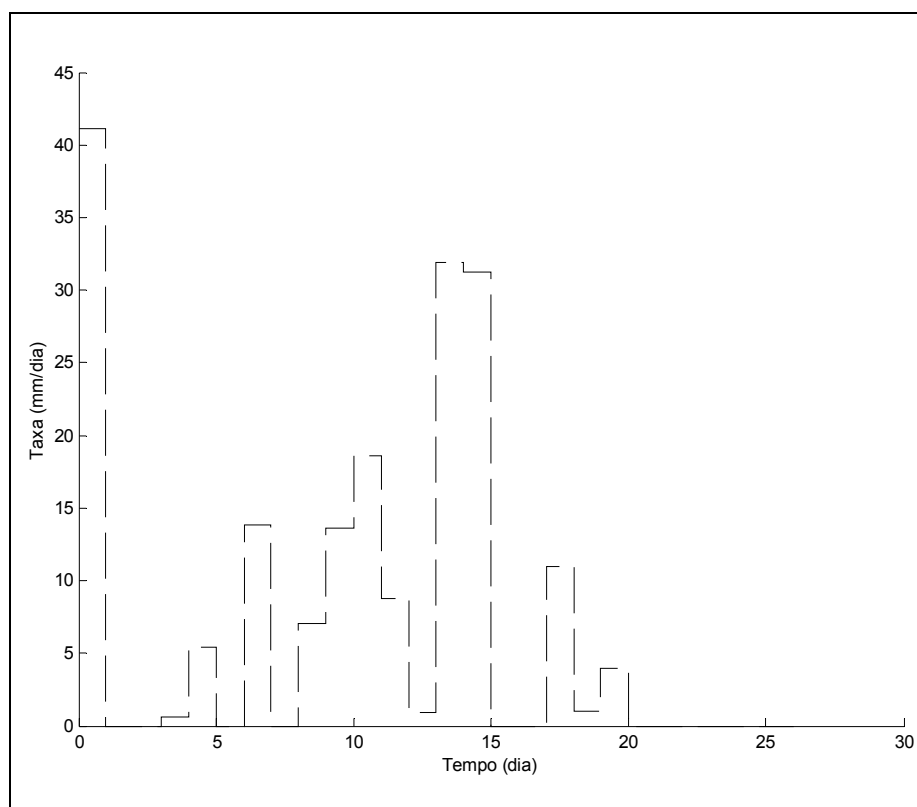


Figura 3 – Sequência de precipitação imposta ao topo da coluna de solo.

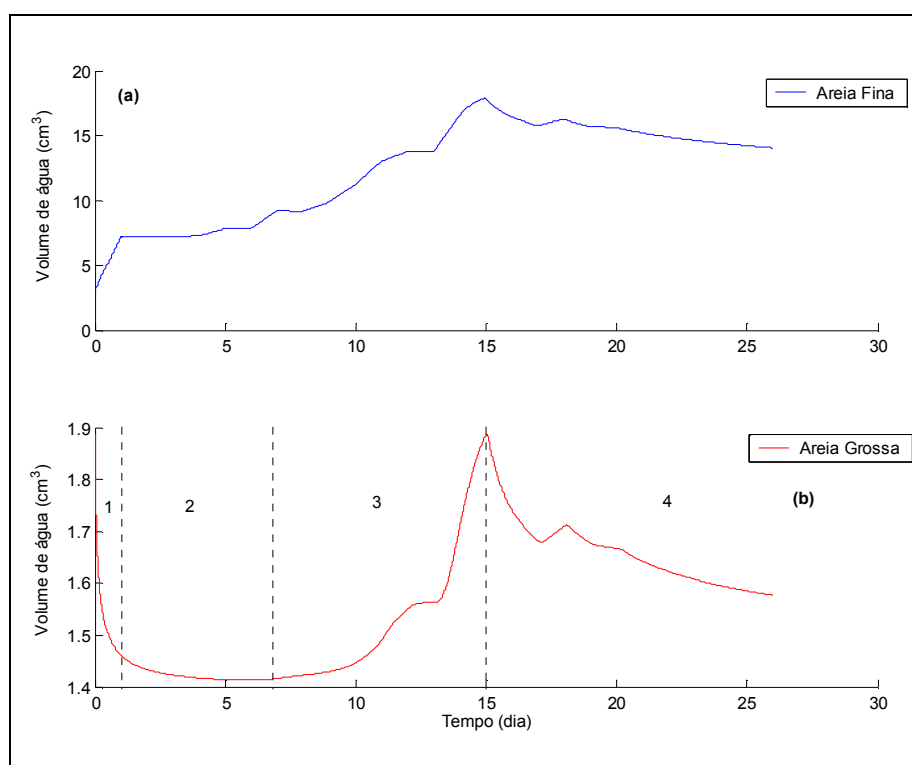


Figura 4 – Evolução do volume de água na coluna: (a) camada superior; (b) camada inferior.

RESULTADOS

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

Os eventos de infiltração impostos à experimentação são mostrados na Figura 3. Nela toda água precipitada no topo da coluna é convertida em volume de água infiltrado, de tal modo que, o escoamento superficial seja nulo.

Em termos de volume de água, pode-se observar uma significativa influência da interface, promovendo um acúmulo de água na camada superior devido à infiltração da água imposta à coluna (Figura 4a). A evolução do volume de água na camada inferior pode ser dividida em quatro estágios, conforme destacados na Figura 4b, a saber: (1) drenagem da água inicial da camada inferior; (2) surgimento do efeito de barreira capilar sustentando a água acumulada sobre a interface; (3) entrada da água na camada inferior (falha da barreira capilar); (4) drenagem da água adicionada na camada inferior (recuperação do efeito de barreira capilar). 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 voltar 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.

A evolução da frente de molhamento na coluna de solo é apresentada na Figura 5, destacando-se dois momentos: o início da precipitação, dia 31/10 (Figuras 5a a e 5b) e a falha da barreira, entrada de água de água na camada inferior, entre os dias 14 e 15/11 (Figuras 5c e 5d). Nas primeiras figuras, observa-se que a camada superior, quando ela receber 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.

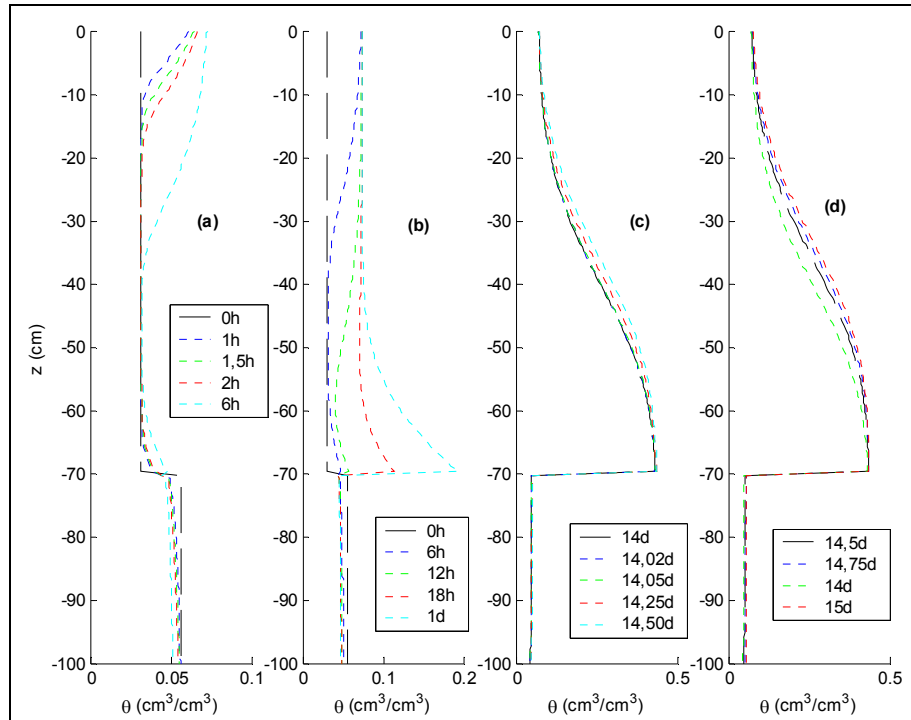


Figura 5 – Evolução da frente de molhamento: (a) início da precipitação; (b) início do acúmulo de água na interface; (c) saturação do solo acima da interface e (d) início da falha da barreira.

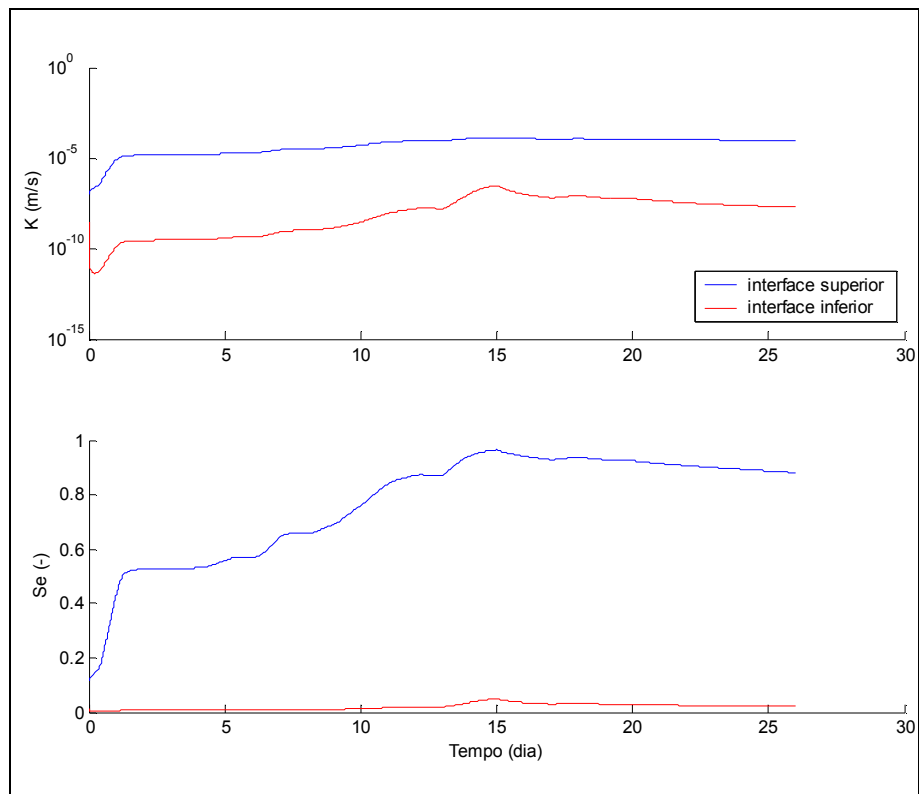


Figura 6 – Distribuição de K e Se na interface entre as duas camadas de solo.

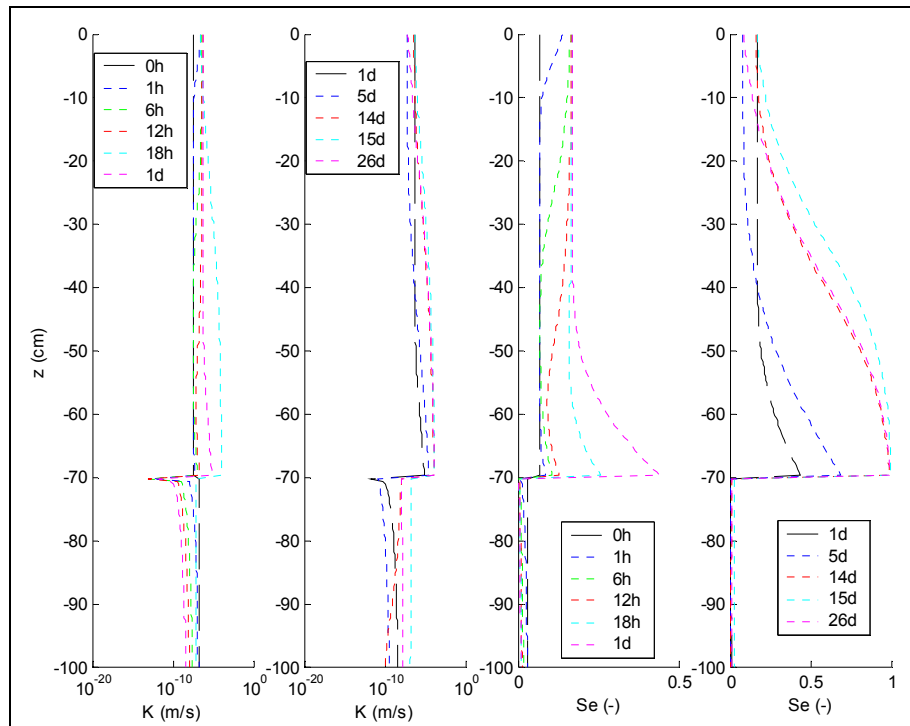


Figura 7 – Distribuição temporal e espacial de K, e S_e na coluna de solo.

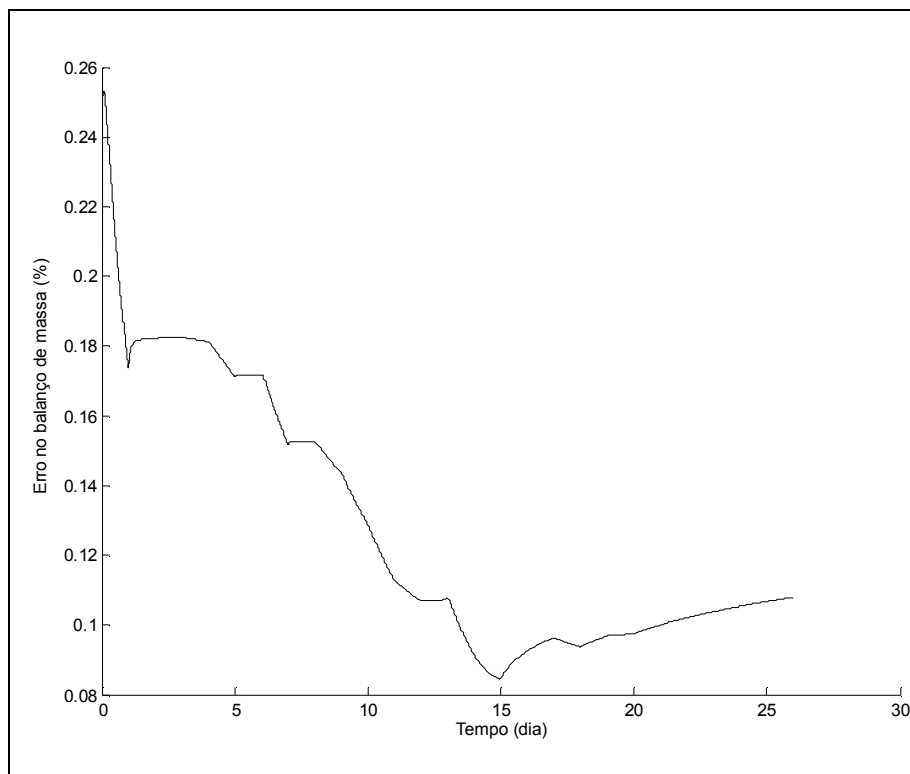


Figura 8 – Erro no balanço de massa de água na coluna de solo.

A dinâmica da condutividade hidráulica e da saturação efetiva ocorrida na interface durante a simulação do fenômeno pode ser observada na Figura 6. 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. Novamente, é possível verificar, em termos de saturação efetiva, a pequena variação no conteúdo de água ocorrida logo abaixo da interface – domínio da camada inferior.

As distribuições temporais e espaciais da condutividade hidráulica e da saturação efetiva são mostradas na Figura 7. As descontinuidades observadas nas curvas retratam a diferença entre as propriedades hidráulicas dos materiais que compõem as duas camadas de solo do arranjo em questão. A condutividade hidráulica mostra-se ser um parâmetro muito sensível à variação no conteúdo de água.

Por fim, conforme dito anteriormente, uma maneira de verificar a validade da solução é a análise balanço de massa do sistema em questão. O resultado apresentado na Figura 8 revela que o esquema numérico é bastante acurado, pois o erro máximo no balanço de massa foi igual a 0,26%. Julga-se que este valor é perfeitamente aceitável em se tratando de aproximações numéricas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como propósito simular 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.

Do ponto de vista da modelagem numérica, o efeito de barreira capilar é um caso particular dos mecanismos de fluxo de fluidos imiscíveis em um meio poroso heterogêneo e/ou estratificado (Zaslavsky, 1964; Wildenschild e Jensen, 1999; Yang *et al.*, 2006). O fato da condutividade hidráulica do solo passar a ser, também, função da coordenada de posição $K(\psi, z)$ torna o problema bastante complexo. Uma estratégia usualmente empregada para resolver tal questão é dividir o perfil em camadas, assumindo que cada uma delas é uma unidade de

solo homogêneo. Dessa forma, o fenômeno pode ser descrito com os mesmos princípios da dinâmica da água empregados para os solos uniformes.

Dentre as hipóteses simplificadoras adotadas no modelo matemático (ver item 2), talvez a não consideração do fenômeno da histerese seja a mais significativa. A histerese é um comportamento exibido pela curva de retenção do solo, onde a relação entre o conteúdo volumétrico (θ) e potencial da água no solo (ψ) à medida que o solo seca (drenagem) é diferente da relação à medida que o solo é umedecido (molhamento). Em geral, a curva de retenção não é única, seja para um grupo similar de solo ou até mesmo para um tipo individual de solo. A forma e a posição da curva dependem, além das propriedades do solo em questão, do histórico dos eventos de molhamento e drenagem ao qual o material foi submetido. Um mesmo solo pode conter diferentes quantidades de água para um mesmo potencial mátrico. Revisões sobre o assunto são apresentadas nos trabalhos de Bear (1979), Hassani-zadeh (2002), Likos e Lu (2002) e Zhou e Yu (2005).

A modelagem do fluxo histerético exige pelo menos o conhecimento dos parâmetros que descrevem as curvas principais de retenção de molhamento e de drenagem, bem como a relação entre condutividade hidráulica e conteúdo volumétrico de água do meio poroso (Kool e Parker, 1987).

Embora o referido fenômeno não tenha sido contemplado no modelo computacional, isso não prejudica em nada a interpretação do fenômeno de barreira capilar. É de se esperar que os resultados desta simulação possivelmente estejam um pouco adiantados e, portanto que a falha da barreira capilar tenha sido antecipada e o efeito restritivo do arranjo tenha sido subestimado. De fato, a dinâmica da água simulada neste trabalho segue o mesmo padrão de comportamento apresentado na literatura pertinente (Zaslavsky, 1964; Matthews *et al.*, 2004).

De acordo com Whisler e Klute (1965) e Zhang *et al.* (2009), a não consideração da histerese faz com que o avanço da frente de molhamento seja superestimado, quando apenas as relações da curva de retenção de água, seguindo a trajetória de molhamento, são empregadas e seja subestimado, quando apenas as relações da curva de retenção de água, seguindo a trajetória de drenagem são consideradas.

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 alter-

nativos 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. Os sistemas de proteção ambiental concebidos considerando o efeito de barreira capilar têm sido testados em uma série de experimentos de laboratório e de campo com resultados promissores, indicando que são bem-sucedidas (Kämpf e Montenegro, 1997; Miyazaki, 1993, dentre outros).

REFERÊNCIAS

- BARRÈS, M.; BONIN, H. The Capillary Barrier for Surface Capping. In: Christensen, T. H.; Stegmann, R. C. Landfilling of Waste Barriers. London: E & FN SPON, 1994, v. 1, 2.8, p. 139-148.
- BEAR, J. Hydraulics of Groundwater. USA: McGraw-Hill Inc., 1979. 569 p.
- CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E.; ZARBA, R. A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation, *Water Resources Research*, v. 26, n. 7, p. 1483-1496, Jul. 1990.
- GARDNER, W. R. Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation within Application to Evaporation from a Water Table, *Soil Science*, v. 85, p. 288-232, 1958.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. A Note on Estimating Finite Difference Interblock Hydraulic Conductivity Values for Transient Unsaturated Flow Problems, *Water Resources Research*, v. 15, n. 1, p. 181-197, Fev. 1979.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M.; TOUMA, J.; WIERENGA, P. J.; VACHAUD, G. A Comparison of Numerical Simulation Models for One-Dimensional Infiltration, *Soil Science*, v. 41, p. 285-294, 1977.
- HASSANIZDEH, S. M.; CELIA, M. A. e DAHLE, H. Dynamic Effect in the Capillary Pressure – Saturation Relationship and its Impacts on Unsaturated Flow, *Vadose Zone Journal*, v. 1, p. 38-57, 2002.
- HILLEL, D. Environmental Soil Physics. San Diego, California, USA: Academic Press, 1998. 771 p.
- IWATA, S.; TABUCHI, T. e WARKENTIN, B. P. Soil-Water Interactions: mechanics and applications. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 1995. 440 p.
- KOOL, J. B.; PARKER, J. C. Development and Evaluation of Closed-form for Hysteretic Soil Hydraulic Properties, *Water Resources Research*, v. 23, n. 1, p. 105-114, Jan. 1987.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. São Paulo, SP, Brasil: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335 p.
- LIKOS, W. J. e LU, N. Hysteresis of Capillary Cohesion in Unsaturated Soils, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, 15^o, 2002, Columbia University. New York, USA, 2002. p. 2-5.
- MANZINI, G.; FERRARIS, S. Mass-Conservative Finite Volume Methods on 2-D Unstructured Grids for the Richards' Equation, *Advances in Water Resources*, v. 27, p. 1199-1215, 2004.
- MATTHEWS, C. J.; COOK, F. H.; KNIGHT, J. H.; BRADDOCK, R. D. Handling the Water Content Discontinuity at Interface between Layered Soils within a Numerical Scheme, *Supersoil 2004*, Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference, 3^o, 2004, University of Sidney. Australian, 2004. 4 p.
- MORRIS, C. E.; STORMONT, J. C. Capillary Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency, *Journal of Environmental Engineering*, v. 123, n. 3, p. 3-10, 1997.
- MUALEM, Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resources Research*, v. 12, n. 1, p. 513-522, Jan. 1976.
- OLDENBURG, C. M.; PRUESS, K. On Numerical Modeling of Capillary Barriers, *Water Resources Research*, v. 29, n. 4, p. 1045-1056, Abr. 1993.
- PANTAKAR, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 193 p.
- ROOS, B. The Diversion Capacity of Capillary Barriers, *Water Resources Research*, v. 26, n. 10, p. 2625-2629, Out. 1990.
- SANTOS, R. A. Propriedades de Retenção de Água por Espaços Porosos não Homogêneos: Experimentos e Simulação Computacional. 2005, 146 p. (Dissertação de Mestrado) -Universidade Estadual de Ponta Grossa. Rio Grande do Sul, RG, Brasil, 2005.
- SELKER, J. S., KENT KELLER, C. e McCORD, J. T. Vadose Zone Processes. USA: Lewis Publishers, 1990. 337p.
- VAN DAM, J. C.; FEDDS, R. A. Numerical Simulation of Infiltration, Evaporation and Shallow Groundwater Levels with the Richards Equation, *Journal of Hydrology*, v. 233, p. 72-85, 2000.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VARADO, N.; BRAUD, I.; ROOS, P. J.; HAVERKAMP, R. Assessment of an Efficient Numerical Solution of the 1D Richards' Equation on Bare Soil, *Journal of Hydrology*, v. 323, p. 244-257, 2006.
- VASCONCELLOS, C. A. B.; AMORIM, J. C. C. Numerical Simulation of Unsaturated Flow in Porous Media Us-

- ing a Mass-Conservative Model, Proceedings of COBEM, Fluids Mechanics, v. 8, p. 139-148, 2001.
- WARRICK, A. W. Soil Water Dynamics. New York, USA: Oxford University Press Inc., 2003. 391 p.
- WARRICK, A. W.; ISLAS, A.; LOMEN, D. O. An Analytical Solution to Richards' Equation for Time-Varying Infiltration, Water Resources Research, v. 27, n. 5, p. 763-766, Mai. 1991.
- WHISLER, F. D.; KLUTE, A. The Numerical Analysis of Infiltration, Considering Hysteresis, into a Vertical Soil Column at Equilibrium under Gravity, Soil Science Society America Proceeding, v. 29, n. 5. p. 489-494, Set/Out. 1965.
- WILDENSCHILD, D.; JENSEN, K. H. Numerical Modeling of Observed Effective Flow Behavior in Unsaturated Heterogeneous Sands, Water Resources Research, v. 35, n. 1, p. 29-42, Jan. 1999.
- YANG, H.; RAHARDJO, H; LEONG, E. C. Behavior of Unsaturated Layered Soil Columns During Infiltration, Journal of Hydrologic Engineering, v. 11, n. 4, p. 329-337, Jul. 2006.
- ZASLAVSKY, D. Theory of Unsaturated Flow into a Non-uniform Soil Profile, Soil Science, v. 97, p. 400-410, 1964.
- ZHANG, QI; WERNER, A. D.; AVIYANTO, R. F.; HUTSON, J. Influence of Soil Moisture Hysteresis on the Functioning of Capillary Barriers, Hydrological Processes, v. 23, p. 1369-1375, 2009.
- ZHOU, J.; YU, J-L. Influences Affecting the Soil-Water Characteristic Curve, Journal of Zhejiang University Science, v. 6A, n. 8, p. 797-804, 2005.

The results clearly show that the capillary barrier phenomenon occurs due to the difference in the hydraulic conductivities of the soil layers.

Key-words: Flows in non-saturated porous medium, capillary barrier, infiltration.

Numerical Simulation of the Effect of a Capillary Barrier

ABSTRACT

This article evaluates the effect of a capillary barrier in a soil column. The soil column is composed by two sandy soils, with a layer of fine textured soil superimposed on a layer of coarse textured soil, exposed to an infiltration event. The Richards equation and van Genuchten model were used to represent the flow dynamics in the unsaturated porous media. The numerical simulation used a mathematical model based on a finite volume method with central differences for spatial derivatives and a fully implicit scheme to approximate time derivatives. This scenario simulates both the emergence of the effect and the failure of the capillary barrier. Lately this phenomenon has been extensively studied, since its use in the final cover of urban and industrial waste deposits has proved a very attractive alternative to restrict infiltration in built geologic media.