

# AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO EM REVESTIMENTOS COM SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS

**Gustavo B. Lima da Silva**

Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
Cidade Universitária, João Pessoa, PB, Brasil, CEP 58059-900  
gustavo@ct.ufpb.br

**Thales M. Moura, Sérgio Koide, Néstor Aldo**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade de Brasília, Brasil

**Resumen:** As práticas modernas de gerenciamento de águas pluviais em meio urbano recomendam o uso de soluções voltadas para o controle do escoamento superficial na fonte. Dentre as opções disponíveis, pode-se destacar a aplicação de revestimentos permeáveis, que atuam no sentido de promover a infiltração de parte da água precipitada sobre sua superfície. Neste trabalho, são apresentados os resultados de um estudo numérico-experimental, onde foi investigada a influência de aspectos construtivos, como declividade longitudinal e compactação do substrato, na infiltração de dois tipos de revestimentos permeáveis compostos por blocos de concreto: (i) revestimento com blocos maciços e (ii) revestimento com blocos vazados. Para cada tipo de revestimento foram instaladas parcelas de 1m<sup>2</sup>, variando-se o valor da inclinação e o estado de compactação do substrato. Por meio da aplicação de chuvas artificiais sobre as parcelas, foi possível caracterizar a evolução temporal da taxa de infiltração nos revestimentos. Os resultados obtidos mostraram a ocorrência de taxas de infiltração expressivas na superfície construída com blocos vazados, mesmo para a situação em que o substrato foi compactado e para valores elevados de declividades. Um estudo numérico complementar permitiu introduzir discussões preliminares a respeito da relação entre os aspectos construtivos considerados, a evolução da umidade nas camadas subjacentes aos revestimentos e o padrão de infiltração resultante. Por meio deste estudo, possíveis explicações para alguns resultados observados na fase experimental do trabalho foram sugeridas.

## INTRODUÇÃO

Uma das alternativas para minimizar os impactos da impermeabilização do solo sobre o escoamento superficial em áreas urbanas consiste na aplicação de soluções não convencionais de drenagem de águas pluviais. Essas soluções atuam no sentido de promover a detenção e a infiltração no solo da água da chuva. As práticas mais difundidas correspondem às bacias de detenção (ou retenção); os dispositivos de infiltração como trincheira de infiltração, planos de infiltração, bacias de percolação, dentre outros; e, mais recentemente, o uso de revestimentos com superfícies permeáveis (Bertoni, 2004; Chocat *et al.*, 2006).

Os revestimentos com superfícies permeáveis, alvo desta pesquisa, aparecem como uma alternativa à utilização das superfícies impermeáveis tradicionais, como o asfalto e superfícies em ci-

mento. Esses revestimentos consistem de estruturas simples sob o ponto de vista construtivo e têm por finalidade reduzir diretamente a produção de escoamento pluvial, fazendo infiltrar parte da chuva precipitada sobre sua superfície para a camada de solo subjacente.

Os revestimentos permeáveis são divididos, normalmente, em duas categorias: os pavimentos permeáveis e os revestimentos de blocos modulares (Urbonas e Sthare, 1993). Os revestimentos modulares, alvo desta pesquisa, são compostos por blocos individuais fabricados, normalmente, em concreto, possuindo diversas formas geométricas, podendo ser completamente maciços ou vazados. Normalmente, os blocos são assentados sobre uma camada de areia sobreposta a uma camada de material granular, como brita. Esta última, quando incluída, funciona como um reservatório de armazenamento. Dentre os benefícios da aplicação de re-

vestimentos permeáveis pode-se citar: redução do escoamento produzido por superfícies pavimentadas, possibilidade de diminuição das dimensões do sistema de drenagem pluvial, melhoria da qualidade do escoamento superficial e boa integração à paisagem local. Entretanto, algumas restrições são impostas à sua aplicação. Recomenda-se a utilização dessa tecnologia em solos com capacidade de infiltração elevada (superiores a 7 mm/h), locais com declividades suaves (inferior a 5%) e lençol freático relativamente profundo (Urbonas e Sthare, 1993; UDFCD, 2002). Devido à baixa capacidade de suporte desses pavimentos, recomenda-se seu uso em passeios públicos e em estacionamentos para veículos leves (Cruz *et al.*, 1999).

Pesquisas recentes, desenvolvidas em diversos locais do mundo, inclusive no Brasil, têm procurado avaliar experimentalmente a eficiência de diferentes tipos de revestimentos permeáveis com relação ao controle do escoamento superficial (Genz, 1994; Araújo, 1999; Pagotto *et al.*, 2000; Schlüter *et al.*, 2002; Davies *et al.*, 2002; Hunt *et al.*, 2002; Brattebo e Booth, 2003; Campana e Eid, 2003; Acioli *et al.*, 2005). De forma geral, os resultados obtidos revelam um desempenho satisfatório dessas soluções no que se refere à redução dos volumes escoados superficialmente.

Apesar do número crescente de trabalhos científicos recentes envolvendo revestimentos permeáveis, ainda são poucas as informações a respeito do efeito isolado dos diferentes aspectos envolvidos na construção desses revestimentos sobre o comportamento da infiltração. Essa é uma motivação implícita desta pesquisa. Além disso, tendo em vista que a infiltração nessas soluções depende fortemente do tipo de solo subjacente, não é recomendável, simplesmente, adotar resultados de pesquisas desenvolvidas em regiões com características diferentes. Há a necessidade de se experimentar o comportamento desses revestimentos para cada região. Nesse sentido, a geração de dados sobre a capacidade de infiltração de revestimentos com superfícies permeáveis para as condições locais de solo encontradas na cidade de Brasília, Brasil, é outra motivação deste trabalho.

Com base nessas observações, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar experimentalmente a influência da declividade longitudinal e da compactação do solo da base, denominado aqui de substrato, na infiltração de dois tipos de revestimentos com superfícies permeáveis. Os dois tipos de revestimentos avaliados foram:

(i) pavimento composto por blocos modulares maciços de concreto (BM) e (ii) pavimento composto por blocos modulares vazados de concreto (BV). Como hipótese inicial, considerou-se que a infiltração nesses revestimentos decresce com o aumento da declividade e com a compactação do substrato. Para complementar o estudo experimental foi realizado um estudo numérico exploratório com o objetivo de introduzir discussões preliminares a respeito da influência do padrão de evolução da umidade nas camadas subjacentes aos revestimentos sobre a infiltração e reforçar algumas hipóteses consideradas com base nos resultados experimentais.

---

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

---

O estudo experimental desenvolvido envolveu essencialmente a realização de testes de simulação de chuva sobre parcelas de 1m<sup>2</sup> materializadas com os revestimentos avaliados. Esses testes consistiram em aplicar precipitações artificiais com intensidades conhecidas sobre as parcelas e medir o volume de escoamento superficial gerado ao longo do tempo, sendo a lâmina infiltrada determinada pela diferença entre essas duas quantidades. Dessa forma foi possível não apenas determinar o volume total infiltrado em cada simulação, mas também avaliar a evolução da infiltração ao longo do tempo. Em seguida, é feita uma descrição detalhada das fases desenvolvidas nesse estudo.

### Instalação dos revestimentos em campo

Para cada tipo de revestimento avaliado foram construídas parcelas experimentais de 1m x 1m. O local escolhido para a construção das parcelas foi uma área pertencente a um condomínio horizontal localizado na cidade de Sobradinho, a 25 km da cidade de Brasília.

Inicialmente, oito módulos foram construídos, divididos em dois grupos com quatro módulos, sendo dois módulos com BV e dois com BM. Os módulos em cada grupo foram diferenciados pelo valor da declividade longitudinal e pelo estado de compactação do solo na base (substrato), conforme apresentado na Tabela 1. Essas variações foram realizadas na tentativa de se avaliar isoladamente os efeitos desses dois fatores na infiltração dos revestimentos estudados.

Os módulos foram construídos para que as superfícies prontas ficassem no mesmo nível do terreno natural, de modo que os blocos ficassem confinados lateralmente. O procedimento utilizado para a instalação incluiu: (i) a realização

Grupo	Tipo de superfície	Solo na base	Declividade (i)	Identificação
1	Bloco maciço	Não compactado	2%	BM2
	Bloco maciço	Não compactado	7%	BM7
	Bloco vazado	Não compactado	2%	BV2
	Bloco vazado	Não compactado	7%	BV7
2	Bloco maciço	Compactado	2%	BMC2
	Bloco maciço	Compactado	6%	BMC6
	Bloco vazado	Compactado	2%	BVC2
	Bloco vazado	Compactado	6%	BVC6

Tabla 1. Tipos de superfícies avaliadas

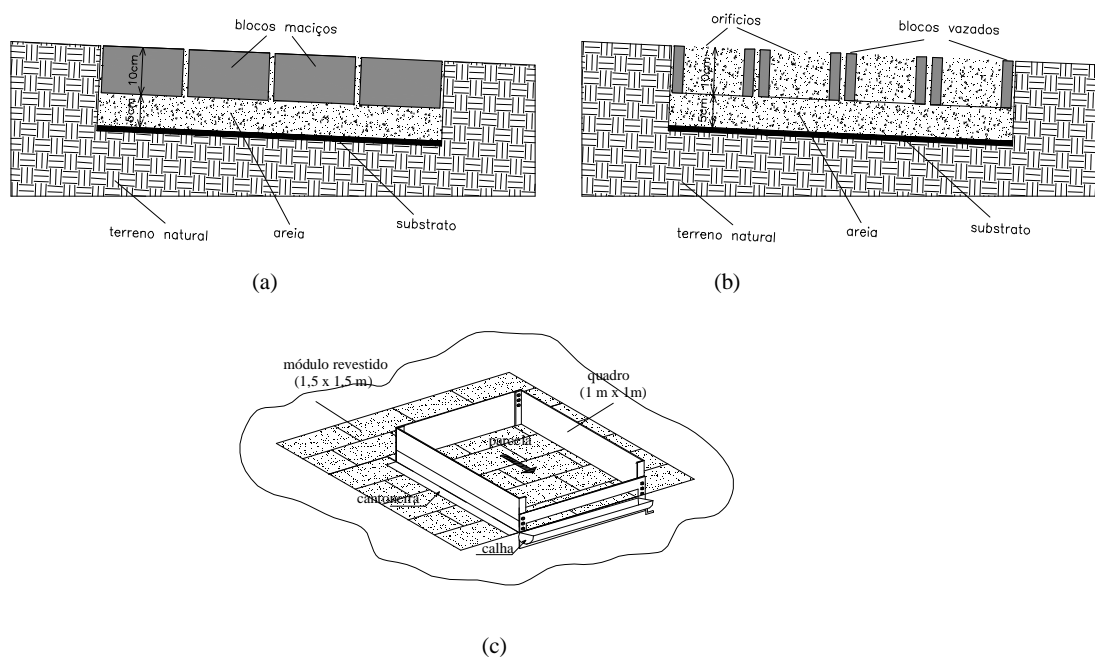


Figura 1. Disposição vertical dos revestimentos: (a) com blocos maciços e (b) com blocos vazados; (c) esquema da delimitação das parcelas com o quadro metálico

de uma escavação no solo de  $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  e 15 cm de profundidade; (ii) a compactação manual dos substratos com o auxílio de um soquete para os módulos do grupo 2 e apenas a regularização do solo para os módulos do grupo 1; (iii) a colocação de uma camada de areia com aproximadamente 5 cm de espessura; (iv) o assentamento dos blocos sobre a areia. Neste estudo, não foi utilizado o reservatório de brita abaixo da camada de areia. As juntas entre os blocos foram preenchidas com areia. No caso dos blocos vazados, os orifícios também foram preenchidos com areia, aumentando a espessura total dessa camada. As Figuras 1a e 1b mostram um corte esquemático da estrutura dos revestimentos com as respectivas camadas.

Na área onde as parcelas foram construídas, amostras de solo até uma profundidade de 40 cm foram coletadas para análise granulométrica

em laboratório. Os resultados obtidos mostraram a predominância de solo argiloso, com uma proporção de 80% de argila, 12% de silte e 8% de areia. Com relação à areia utilizada, o ensaio granulométrico apontou um material do tipo areia média. Ensaio de infiltração realizados por Moura (2005) utilizando o método do infiltrômetro de cilindros concêntricos apontaram taxas de infiltração finais em torno de 40 mm/h para o solo da região.

### Delimitação das parcelas experimentais

Sobre os módulos de  $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  foram instalados quadros metálicos de  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  para delimitar as parcelas monitoradas durante os testes de simulação de chuva (Figura 1c). Esses quadros foram construídos com quatro chapas metálicas de 10 cm de largura. Na face frontal

do quadro, destinada a receber o escoamento superficial proveniente da área delimitada, foi feito um rasgo de aproximadamente 2 cm e adaptada uma calha de PVC para coletar o escoamento. Nas demais faces do quadro foram fixadas cantoneiras de alumínio para garantir o alinhamento das chapas e aumentar área de contato com os pavimentos, facilitando a sua fixação.

Os quadros foram posicionados sobre os pavimentos de modo que a sua face frontal coincidissem com a extremidade inferior (no sentido do declive) dos módulos e foram fixados sobre os mesmos com o auxílio de uma argamassa de cimento. Para impedir o escoamento lateral de água para fora da parcela, a área de contato entre o quadro e a superfície da parcela foi preenchida com essa argamassa e vedada com uma pasta de silicone. A Figura 2 apresenta duas, das oito parcelas construídas, com os quadros devidamente instalados.

### Simulador de chuva

O simulador de chuva utilizado foi construído para a realização de experimentos em campo, sendo de fácil locomoção e operação. O equipamento possui um conjunto de 22 microaspersores dispostos em linha reta, com espaçamento variando de 7,5 cm, entre aqueles localizados mais ao centro, a 3,75 cm entre os mais próximos às extremidades. Esse conjunto é fixado a um quadro retangular metálico apoiado sobre pés tubulares de aço removíveis, ficando a uma distância de 1,5 m do solo. A linha de microaspersores possui um movimento contínuo de rotação promovido por um conjunto de polias e um motor elétrico alimentado por uma bateria de 12 Volts. Para controlar a vazão no sistema foram instalados um registro e um manômetro próximos à seção de alimentação dos microaspersores. Um esquema geral do simulador desenvolvido está mostrado na Figura 3a.

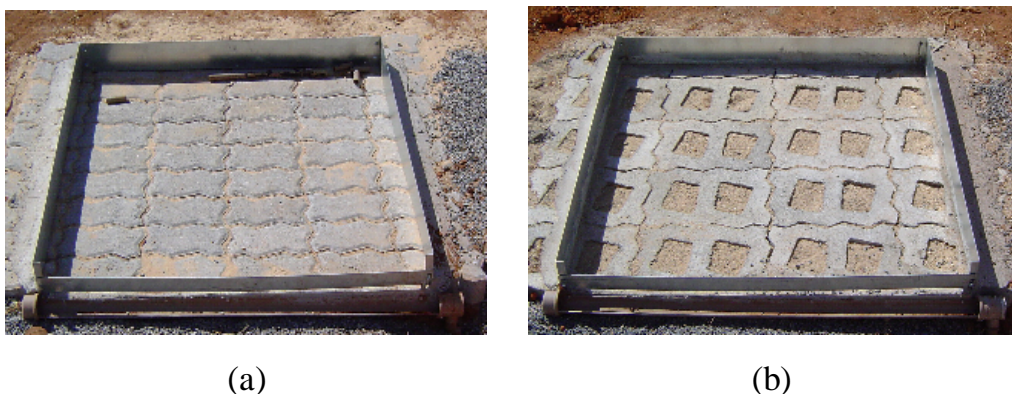


Figura 2. (a) parcela de blocos maciços e (b) parcela de blocos vazados

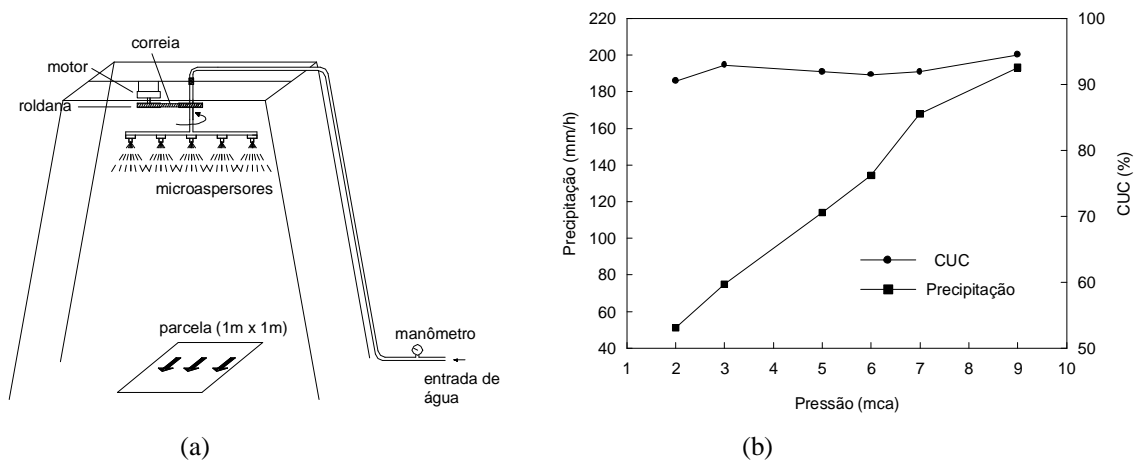


Figura 3. (a) Esquema geral do simulador de chuva desenvolvido e (b) curva de calibração do simulador

Para a calibração do simulador, o equipamento foi instalado no Laboratório de Hidráulica da Universidade de Brasília. Sob o simulador foram posicionados 36 coletores graduados em uma plataforma de 1 m × 1 m (compatível com as dimensões das parcelas instaladas em campo), dispostos conforme uma malha quadrada com 20 cm de espaçamento. Sobre essa plataforma foram realizadas simulações de chuva, fixando-se a pressão no manômetro em diferentes valores. Para cada simulação, a intensidade de precipitação foi estimada e o Coeficiente de Uniformidade foi calculado pela equação de Christiansen (CUC):

$$CUC(\%) = 100 \left( 1 - \frac{S_X}{\bar{X}} \right) \quad (1)$$

em que,  $\bar{X}$  e  $S_X$  representam a média e o desvio padrão dos volumes precipitados nos recipientes.

Os resultados da calibração estão apresentados na Figura 3b. Observa-se que, sobre uma área de 1 m × 1 m, o equipamento desenvolvido permite gerar precipitações entre 50 mm/h a 180 mm/h, com uma uniformidade praticamente constante em torno de 90%, valor considerado aceitável para a uniformidade em simuladores de chuva (Montebeller *et al.*, 2001). Observa-se, ainda, uma ligeira tendência de aumento do CUC com o aumento da intensidade da chuva. Além da boa uniformidade observada, o simulador desenvolvido possui ainda as vantagens de ter baixo custo e ser fácil de transportar e utilizar. Mais detalhes sobre o desenvolvimento do equipamento pode ser encontrado em Silva (2006).

### Experimentos de simulação de chuva

As parcelas construídas foram submetidas a precipitações artificiais de intensidades constantes por meio do simulador de chuva descrito anteriormente. As intensidades de precipitação simuladas variaram de 60 mm/h a 156 mm/h, sendo definidas a partir de experimentos prévios, onde foi possível identificar valores adequados que permitissem observar a produção de escoamento superficial e, conseqüentemente, determinar a infiltração nas parcelas.

Além da intensidade da chuva, o escoamento superficial gerado pelas parcelas foi quantificado a cada 30 segundos até o instante em que o volume escoado não apresentasse mais variações significativas em duas leituras consecutivas, de forma a permitir a caracterização das fases transiente e permanente da infiltração em cada uma das parcelas. Para a quantificação do escoamento superficial coletado foi construído um re-

servatório com base retangular de dimensões 40 cm × 25 cm, e altura de 60 cm. Durante as simulações, o nível da água no reservatório foi registrado por meio de uma ponta linimétrica com precisão de 0,1 mm e, posteriormente, os volumes correspondentes foram convertidos em valores de lâminas escoadas, considerando a área interior às parcelas (1m × 1m). Por fim, as taxas de infiltração ao longo de cada simulação foram calculadas pela diferença entre as lâminas precipitada e escoada.

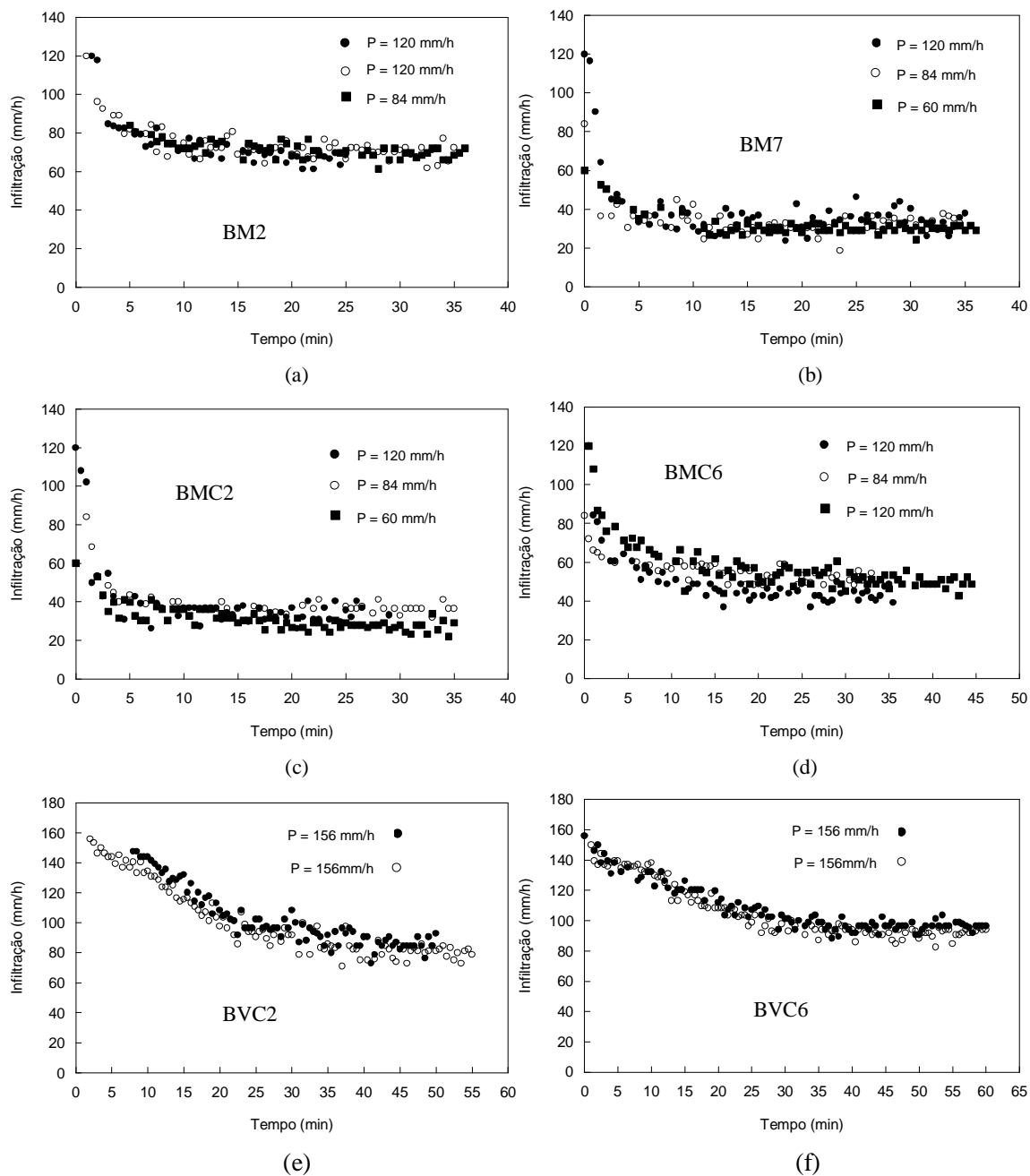
Durante os testes, a área em torno de cada parcela foi completamente cercada por uma estrutura móvel construída em madeira, de forma a reduzir a influência do vento e da evaporação sobre a chuva gerada. É importante ressaltar, ainda, que a precipitação produzida pelo simulador molhava além da área delimitada pelo quadro metálico. No entanto, como mostrado na calibração do equipamento, a uniformidade da chuva só era garantida sobre área de 1 m × 1 m monitorada.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Durante o período em que os experimentos foram realizados, não foi registrada a ocorrência de chuvas naturais na região. O intervalo de tempo entre duas simulações numa mesma parcela foi de no mínimo 48 horas, de forma a tentar manter próximas as condições de umidade inicial do solo entre simulações.

Na Figura 4 estão apresentados os resultados obtidos. Como é possível observar, a evolução da taxa de infiltração nas diferentes parcelas avaliadas pôde ser razoavelmente caracterizada, evidenciando tanto a fase transitória como a fase permanente do processo, com pouca dispersão dos resultados em torno de um comportamento médio.

Com relação às parcelas com blocos maciços do grupo 1 (Figuras 4a e 4b), observa-se que a BM2 apresentou um comportamento bastante favorável, com um decaimento mais suave da taxa de infiltração, atingindo um valor final ( $f_c$  - valor médio de infiltração depois de atingida a fase permanente) elevado, em torno de 70 mm/h, significativamente superior àquele obtido para a parcela BM7. Essa diferença de comportamento retrata o efeito global causado pelo aumento de declividade sobre a resposta do revestimento. Naturalmente, espera-se que para declividades menores, em que a disponibilidade de água na superfície seja teoricamente maior,



**Figura 4.** Evolução da taxa de infiltração nas parcelas avaliadas

criem-se condições favoráveis para que as camadas subjacentes influenciem mais diretamente a infiltração. Nesse sentido, os valores elevados de infiltração observados na parcela BM2 podem estar refletindo, parcialmente, o efeito da camada de areia combinada ao substrato não compactado sobre esse processo.

Diferenças expressivas de comportamento também são observadas entre as parcelas BM2 e BMC2 (Figura 4a e 4c), evidenciando o efeito global da compactação do substrato sobre a infiltração do revestimento com BM. Nota-se que,

além de apresentar um decaimento mais rápido da taxa de infiltração, a parcela BMC2 (substrato compactado) apresentou um valor de  $f_c$  (em torno de 32 mm/h) significativamente inferior ao obtido para a parcela BM2 (em torno de 70 mm/h). Esses resultados mostram que o estado de compactação do substrato parece atuar como um fator dominante na infiltração desse tipo de revestimento. Embora os resultados disponíveis não tenham permitido apontar os mecanismos internos responsáveis pelas diferenças observadas, acredita-se na hipótese

de que estes mecanismos estejam relacionados a modificações na dinâmica do fluxo de água nas camadas subjacentes ao revestimento provocadas pela compactação do substrato.

Ainda com relação ao revestimento com BM, um comportamento curioso pode ser observado nas Figuras 4c e 4d, referentes às parcelas BMC2 e BMC6, ambas com substrato compactado. Nesse caso, a resposta do revestimento ao aumento de declividade foi inversa àquela observada para as parcelas com substrato não-compactado (BM2 e BM7), com a parcela menos inclinada (BMC2) apresentando um decaimento mais acentuado da infiltração e um  $f_c$  (32 mm/h) inferior àquele observado para a parcela BMC6 (50 mm/h). Nesse caso, os resultados mostram que a declividade não funcionou como o fator dominante no processo de infiltração. Uma hipótese considerada é de que a ocorrência de valores de infiltração maiores para a situação aparentemente mais desfavorável (com maior inclinação) teria acontecido em função de alterações na dinâmica do fluxo de água nas camadas subjacentes, provocadas pela combinação do aumento da declividade da camada de areia e da compactação do substrato.

Com relação às parcelas com blocos vazados do grupo 1 (BV2 e BV7), não foi possível caracterizar a evolução da infiltração, pois a máxima intensidade de precipitação permitida pelo simulador não foi suficiente para se observar geração de escoamento nessas parcelas. Essas parcelas se mostraram como as mais favoráveis para a infiltração da chuva e controle da geração de escoamento superficial.

Já para as parcelas BVC2 e BVC6 (grupo 2), a evolução da infiltração ficou bem caracterizada, como mostrado nas Figuras 4e e 4f, respectivamente. Nesse caso, nota-se que as parcelas com BV apresentaram comportamentos bem diferentes daquelas com BM, com um decaimento praticamente linear da infiltração na fase transitória até atingir o patamar de infiltração permanente. Durante os experimentos, observou-se que um dos fatores que contribuíram para esse comportamento foi a ocorrência da acomodação da areia no interior dos orifícios, gerando o aparecimento de espaços que acabaram funcionando como pequenos reservatórios de água, diminuindo a geração de escoamento superficial.

É possível observar também que as taxas finais de infiltração para as duas parcelas foram bastante elevadas, ficando próximas a 90 mm/h. Esses resultados podem estar associados à ele-

vada capacidade de infiltração da areia utilizada na camada subjacente. Acredita-se na hipótese de que, em função da maior espessura dessa camada nas parcelas com BV, resultante do preenchimento dos orifícios, a frente de umidade não teria atingido o substrato durante os testes, sendo a infiltração controlada primordialmente pela camada de areia. É possível que para simulações com durações maiores, valores menores de infiltração pudessem ser observados a partir do momento que o substrato passasse a interferir no fluxo de água nas camadas subjacentes.

## ANÁLISE NUMÉRICA

Os resultados apresentados na análise experimental mostraram como a declividade e o estado de compactação do substrato podem influenciar na infiltração dos revestimentos. Com base nas informações obtidas, algumas hipóteses foram construídas, considerando-se que as alterações provocadas pela variação da inclinação e da compactação do substrato estariam associadas a mudanças na dinâmica da água nas camadas subjacentes. No entanto, os dados obtidos nos experimentos não foram suficientes para permitir uma descrição mais detalhada da evolução da umidade sob os revestimentos que levasse a confirmação das hipóteses.

Para reforçar essas hipóteses, foi realizado um estudo numérico exploratório, tomando-se como referência um modelo teórico de solo estratificado com três camadas, idealizado com base na disposição e característica das camadas subjacentes aos revestimentos. Com o auxílio de um programa computacional foram realizadas simulações bidimensionais do fluxo de água nesse modelo, considerando-se variações na inclinação e nas características hidráulicas de suas camadas. Para cada situação, foi observado o padrão de evolução do conteúdo de umidade no modelo e da infiltração pela superfície.

Apesar das simplificações adotadas neste estudo frente à complexidade inerente à natureza do problema analisado, os resultados obtidos permitiram, mesmo que de forma preliminar, melhorar o entendimento sobre a relação entre a evolução da umidade nas camadas subjacentes e a infiltração, além de apresentar prováveis causas para os comportamentos observados experimentalmente. É fundamental destacar, que, em nenhum momento, o objetivo dessa modelagem foi de reproduzir os resultados obtidos em campo, apenas uma associação qualitativa foi realizada entre os resultados numéricos e experimentais.

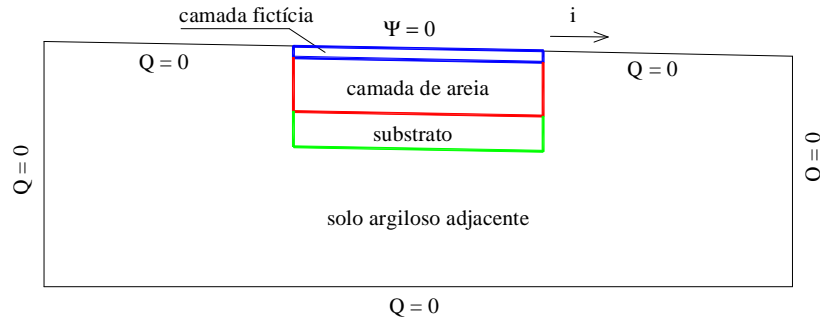


Figura 5. Modelo conceitual utilizado

### Programa computacional

As simulações foram realizadas com o auxílio do programa SSFLO (*SubSurface Flow*), desenvolvido por Koide (1990) e modificado por Campos (1998). O SSFLO foi implementado em linguagem Fortran para o cálculo bidimensional do fluxo de água em meio parcialmente saturado, heterogêneo e anisotrópico, com as direções dos eixos principais de condutividade hidráulica coincidentes com as direções dos eixos cartesianos. Nessas condições, a equação governante do fluxo é dada pela expressão:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2)$$

em que  $\Psi$  é a pressão de água no solo,  $K_{x,z}(\Psi)$  a condutividade hidráulica nas direções  $x$  (horizontal) e  $z$  (vertical),  $C$  o coeficiente de capacidade,  $t$  o tempo.

No SSFLO, a Eq.(2) é resolvida pelo método dos elementos finitos no espaço e pelo método de diferenças finitas no tempo, fornecendo-se a evolução do valor de  $\Psi$  e, conseqüentemente, do conteúdo de umidade ao longo do tempo. O elemento finito utilizado é o triangular com nós nos vértices. A formulação básica utilizada no programa corresponde àquela descrita por Neuman (1973), com funções de aproximação lineares para  $\Psi$ . Para representar a condutividade hidráulica, a formulação implementada utiliza a seguinte simplificação proposta por Neuman (1973):

$$K_x = K_r(S_e)K_x^{sat} \quad , \quad K_z = K_r(S_e)K_z^{sat} \\ S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (3)$$

em que  $K_r(S_e)$  representa a condutividade hidráulica relativa em função do grau de saturação ( $S_e$ ),  $0 \leq K_r \leq 1$ ,  $\theta_r$  representa a umidade

residual,  $\theta_{sat}$  a unidade de saturação,  $\theta$  a umidade volumétrica, e  $K_x^{sat}$  e  $K_z^{sat}$  a condutividade hidráulica saturada nas direções  $x$  e  $z$ .

O programa SSFLO permite a imposição de dois tipos de condições de contorno: valor de  $\Psi$  conhecido nos nós ou valor de vazão ( $Q$ ) conhecido nas faces dos elementos de contorno. Mais detalhes sobre a formulação utilizada na resolução das equações e o funcionamento do SSFLO podem ser obtidos em Koide (1990) e Campos (1998).

### Modelo teórico

O modelo teórico utilizado como base para este estudo foi idealizado a partir das características da estrutura subjacente aos revestimentos instalados em campo, sendo composto por uma camada de areia com 1 m de comprimento e inclinação longitudinal constante ( $i$ ), sobreposta a uma camada de solo argiloso representando o substrato, sendo ambas confinadas em um solo argiloso adjacente (Figura 5). Além das camadas citadas, considerou-se uma camada de baixa condutividade hidráulica e com pequena espessura, localizada acima da camada de areia. Essa camada teve por finalidade permitir um melhor controle do fluxo de entrada de água no sistema. Em simulações prévias, sem se considerar essa camada fictícia, observou-se a ocorrência de valores de infiltração iniciais muito elevados na camada de areia, provocando a saturação praticamente instantânea do sistema, impedindo a observação da evolução da umidade nas camadas subjacentes.

Como condições de contorno, considerou-se fluxo ( $Q$ ) nulo nos contornos laterais, visto que esses limites foram considerados distantes o suficiente da superfície submetida à infiltração (camada fictícia), de forma a se garantir condições de umidade constantes nessa região. No contorno superior, exceto na camada fictícia, considerou-se  $Q = 0$  e ao longo da ca-



mada fictícia a superfície foi considerada saturada, com  $\Psi = 0$ .

## RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

### Simulação 1. Influência da compactação do substrato

Para analisar a influência da compactação do substrato no processo de infiltração foram considerados dois modelos, ambos com inclinação longitudinal (i) de 2% sendo que em um deles o substrato foi considerado compactado. Para fins de simulação, o efeito de compactação foi introduzido apenas considerando uma redução no valor de  $K_{sat}$  (condutividade hidráulica saturada) do substrato, com relação ao adotado para o solo adjacente. As espessuras das camadas de areia, do substrato e da camada fictícia foram fixadas em 7 cm, 5 cm e 1 cm, respectivamente.

As curvas características para os solos (solo argiloso e areia, considerados isotrópicos) foram representadas pelas expressões descritas na Eq.(4):

$$\frac{\theta(\Psi) - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \frac{\alpha}{\alpha + |\Psi|^\beta} \quad K_r(\Psi) = \frac{A}{A + |\Psi|^B} \quad (4)$$

Os valores adotados para os parâmetros foram retirados da literatura (Ferreira, 2005; Elmaloglou, 1980), levando-se em conta os tipos de solos considerados na modelagem, e estão apresentados na Tabela 2. Para a camada fictícia foram adotados os mesmos parâmetros utilizados para o solo argiloso, reduzindo-se apenas o  $K_{sat}$  até um valor que resultasse num controle satisfatório da entrada de água no sistema. Como condições iniciais, adotou-se  $\Psi = -120$  cm para todo o domínio, de modo a permitir uma análise da evolução da umidade no solo desde uma condição extremamente seca.

A Figura 6 apresenta os resultados das simulações para os dois casos considerados. As curvas representam a vazão infiltrada por metro de largura no sistema ao longo do tempo. A

Figura 7 mostra a evolução da pressão de água no solo na vizinhança das camadas subjacentes (areia + substrato) para as situações analisadas.

Os resultados mostram a ocorrência de duas fases distintas (Figura 6). A fase 1, na qual os comportamentos são praticamente iguais para os dois casos analisados, é caracterizada por um decaimento brusco da vazão infiltrada e, posteriormente, uma tendência de estabilização da mesma. Analisando-se a evolução de  $\Psi$  no solo para essa fase, mostrada nas Figuras 7a e 7b, observa-se que, para ambos os casos, ocorreu o umedecimento descendente da camada de areia até um determinado instante em que esta camada passa a funcionar como uma zona de transmissão de fluxo não saturado para o substrato (patamar horizontal na fase 1).

Na fase 2, observa-se uma outra tendência de decaimento da vazão infiltrada. De acordo com as Figuras 7a e 7b o início dessa nova configuração coincidiu com a chegada da frente de umidade na interface areia-substrato. A partir desse instante, a camada de areia passou a ser umedecida no sentido ascendente devido à retenção de água na interface, resultando num padrão de distribuição de  $\Psi$  diferente para os dois casos.

Para o caso em que o substrato foi considerado não compactado, a Figura 7a mostra que após a chegada da frente de umidade na interface areia/substrato, o fluxo através da camada de areia continuou ocorrendo em condições não-saturadas e, associada a isso, o decaimento da vazão infiltrada aconteceu de forma mais suave. Já para a situação com o substrato compactado o comportamento foi diferente. Observa-se a ocorrência de retenção do fluxo pelo substrato, provocando a saturação ascendente da camada de areia (Figura 7b), o que resultou no decaimento brusco da vazão infiltrada antes da estabilização da mesma. Neste caso, o processo de percolação através do substrato passou a ser estimulado por uma lâmina de água praticamente constante acima da interface areia-substrato.

Parâmetro	Areia	Substrato	Solo adjacente	Camada fictícia
$\alpha$	56241	6035900	6035900	6035900
$\beta$	3,163	3,922	3,922	3,922
$A$	30980000	769,4	769,4	769,4
$B$	6,355	2,349	2,349	2,349
$\theta_{sat}$	0,27	0,60	0,60	0,60
$\theta_{res}$	0,06	0,25	0,25	0,25
$K_{sat}$ (cm/h)	180	0,18*/2,8**	2,80	0,54

\*Substrato compactado /\*\* Substrato não compactado

Tabla 2. Parâmetros dos solos

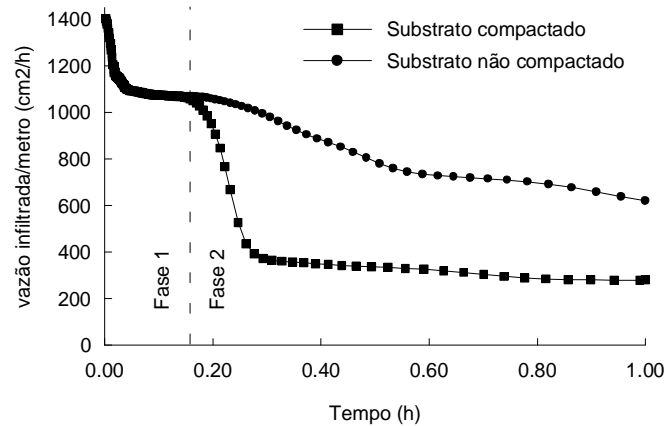


Figura 6. Resultado da simulação para modelo com declividade 2%

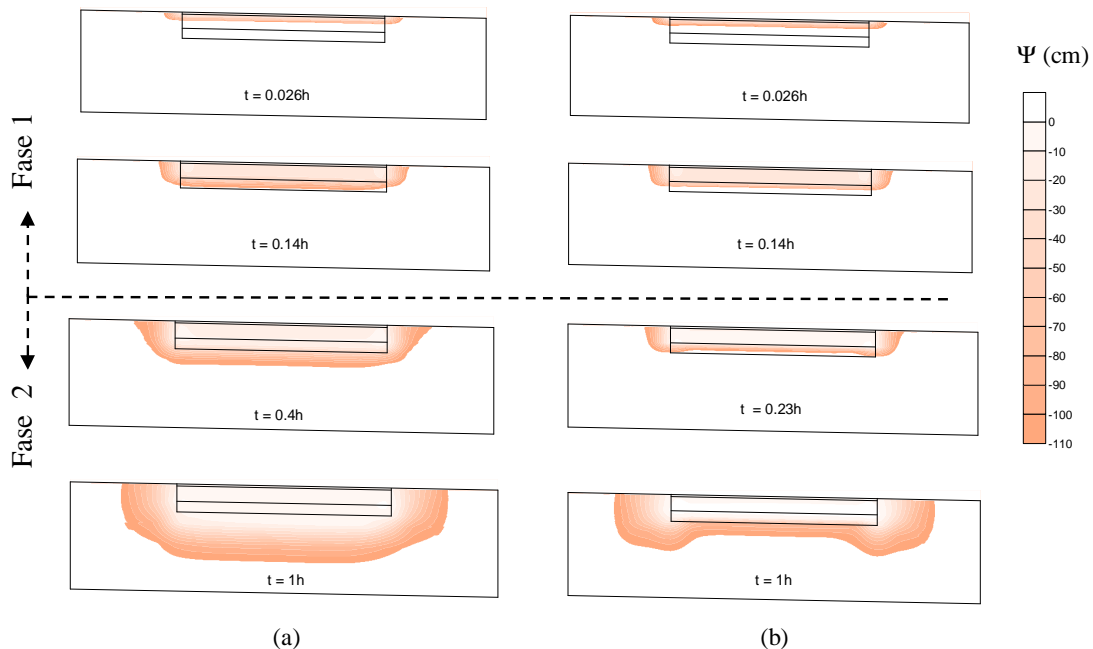


Figura 7. Evolução da pressão de água no solo para os dois modelos considerados: (a) substrato não compactado, (b) substrato compactado

Note que os resultados numéricos referentes à fase 2 na Figura 6 concordaram qualitativamente com os obtidos para as parcelas BM2 e BMC2 (Figuras 4a e 4c). Além disso, a simulação mostrou a possibilidade da compactação do substrato influenciar significativamente a infiltração pela superfície a partir de alterações provocadas no padrão de evolução da umidade nas camadas subjacentes. Assim, esses argumentos reforçam de certa forma a hipótese considerada com base nos resultados obtidos para as parcelas BM2 e BMC2.

Os resultados apresentados na Figura 6 também sugerem uma explicação para os me-

canismos internos responsáveis pelos comportamentos observados para as parcelas BVC2 e BVC6. É possível que os dados obtidos experimentalmente (Figuras 4e e 4f) correspondam à fase 1 da infiltração mostrada na simulação numérica. Ou seja, os valores elevados para as taxas de infiltração finais observadas experimentalmente podem ter ocorrido em função da duração da chuva simulada não ter sido suficiente para que a frente de umidade atingisse o substrato durante os testes em campo, tendo em vista a maior espessura da camada de areia nesse revestimento.

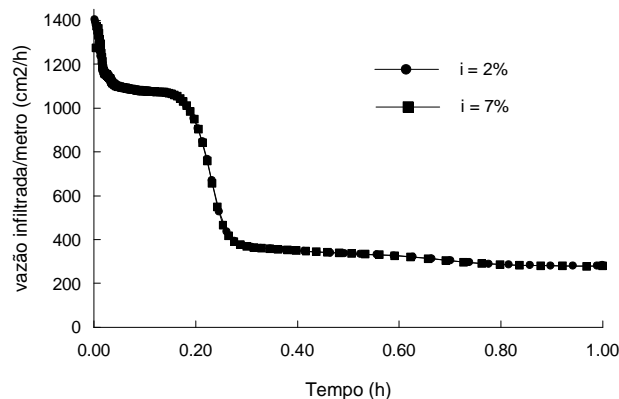


Figura 8. Resultados das simulações para situações com diferentes declividades

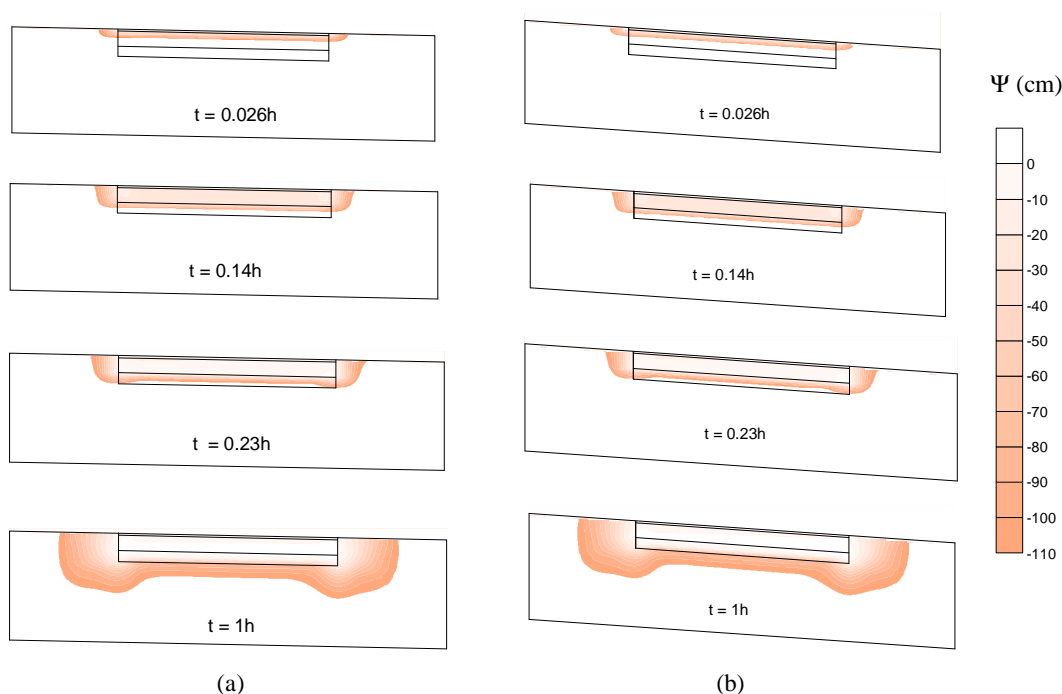


Figura 9. Evolução da pressão de água no solo na vizinhança das camadas subjacentes (areia + substrato): (a) declividade 2% e (b) declividade 7%

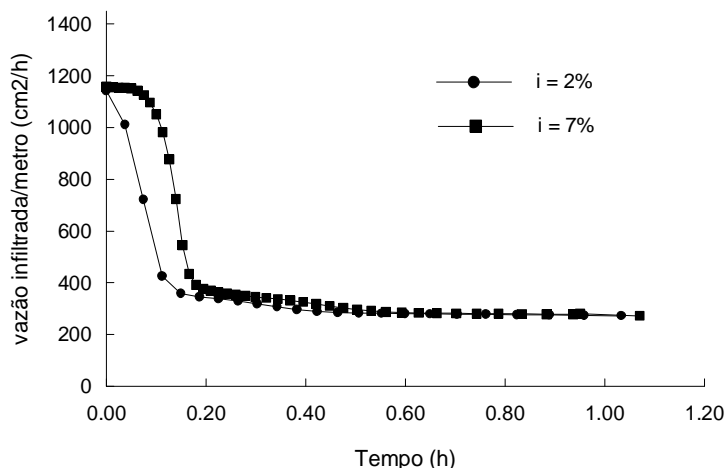
### Simulação 2. Influência da declividade

Esta simulação teve por objetivo analisar o efeito da declividade, sob a condição de substrato compactado. Para isso, foram considerados dois modelos, um com declividade 2% e outro com 7%, sendo que em ambos o substrato foi considerado compactado. A espessura da camada, assim como as condições iniciais adotadas foram as mesmas utilizadas na simulação 1. Os demais parâmetros dos solos foram os mesmos apresentados na Tabela 2.

A Figura 8 mostra os resultados obtidos, onde se percebe um comportamento semelhante ao

apresentado na Figura 6, com a presença de duas fases distintas da infiltração. Entretanto, nota-se que praticamente não houve diferença de comportamento entre as situações consideradas. A Figura 9 mostra a evolução da pressão de água no solo na vizinhança das camadas subjacentes, para os dois casos analisados.

Como é possível perceber, o aumento na declividade não foi suficiente para permitir uma mudança significativa no padrão de umidade na camada de areia de modo a alterar a infiltração pela superfície. Mesmo para o caso com declividade longitudinal de 7%, verificou-se apenas um



**Figura 10.** Resultado das simulações considerando condições iniciais úmidas

ligeiro espalhamento lateral da frente de umidade. Nesse caso, os resultados obtidos não levaram a informações que permitissem reforçar a hipótese considerada com base nos comportamentos observados para as parcelas BMC2 e BMC6.

Na tentativa de verificar se as condições iniciais de umidade poderiam influenciar os resultados obtidos, outra simulação foi realizada, onde condições iniciais mais úmidas foram adotadas. Os resultados estão apresentados na Figura 10.

É possível perceber que os comportamentos observados diferem dos resultados obtidos da análise anterior, visto que na fase de decaimento das curvas as vazões infiltradas para as duas situações apresentam diferenças evidentes. Percebe-se que para a declividade de 7% o decaimento é mais brusco, entretanto, o seu início é mais lento com relação ao da declividade de 2%. Mas, em termos de valores finais, as vazões infiltradas praticamente não diferiram.

Novamente, os comportamentos observados não concordaram com aqueles observados experimentalmente, contrariando a expectativa de que alterações nas condições iniciais de umidade pudessem reforçar a hipótese considerada com base nos comportamentos observados para as parcelas BMC2 e BMC6.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico-experimental com o objetivo de avaliar a influência da declividade e da compactação do substrato na infiltração de dois tipos de revestimentos permeáveis, além de melhorar a compreensão da relação entre esses fatores, o funcionamento hidráulico das camadas subjacentes

e a infiltração nesses revestimentos. Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se apontar as seguintes conclusões:

- verificou-se que, de modo geral, apesar da pouca área disponível para infiltração, o revestimento com blocos maciços com declividade moderada ( $< 2\%$ ) pode contribuir significativamente para a infiltração, desde que o substrato não seja submetido à compactação;
- o revestimento com blocos vazados se mostrou a opção mais favorável para infiltração, como era esperado. Mesmo para a situação de substrato compactado e declividade de 6%, esse revestimento apresentou taxas finais de infiltração bastante elevadas, acima de 90 mm/h;
- para os revestimentos analisados, a taxa de infiltração se mostrou bastante influenciada pela compactação do substrato, pois, para um mesmo tipo de revestimento, parcelas com substratos compactados apresentaram taxas de infiltração significativamente inferiores àquela onde o substrato não foi compactado;
- na ausência de compactação do substrato, observou-se um influência importante da declividade na infiltração dos revestimentos, visto que um aumento na inclinação resultou numa diminuição significativa na infiltração, como ocorreu para as parcelas com BM do grupo 1. No entanto, ao se compactar o substrato, observou-se que o efeito da inclinação não continuou a ser dominante sobre a infiltração, pois houve

situações, como observado para as parcelas com BM do grupo 2, em que ocorreram taxas de infiltração maiores para a situação com maior declividade;

- é provável que as alterações de comportamento provocadas pelo aumento de declividade e compactação do substrato estejam associadas a mudanças no padrão de evolução do conteúdo de umidade nas camadas subjacentes. As simulações numéricas realizadas mostraram que na ausência de compactação do substrato, é possível que a camada de areia do revestimento funcione como uma zona de transmissão de fluxo não saturado de água para as camadas subjacentes de solo, permitindo a ocorrência de taxas de infiltração maiores pela superfície. Já para situações com substrato compactado, os resultados mostraram a possibilidade de ocorrência de saturação ascendente da camada de areia na interface areia substrato, modificando o mecanismo de infiltração, passando esse a ser controlado predominantemente pelo substrato e estimulado por uma lâmina d'água localizada sobre o mesmo.

Apesar das informações obtidas nesse estudo terem permitido um entendimento parcial da infiltração nos revestimentos permeáveis avaliados, o número limitado de testes realizados e as particularidades das situações testadas sugerem a necessidade da realização de mais experimentos para se reforçar as hipóteses levantadas neste trabalho. Acredita-se ainda, que com a aplicação da metodologia utilizada em outros tipos de revestimentos, incluindo a análise de outros aspectos construtivos e o monitoramento de um número maior de variáveis em testes experimentais, seja possível se obter uma descrição mais completa do funcionamento desse tipo de dispositivo.

---

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/CT-HIDRO pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento do trabalho e ao Condomínio Alto da Boa Vista pela contribuição financeira à pesquisa.

---

#### REFERÊNCIAS

Acioli, L.A., Silveira, A.L.L. e Goldenfum, J.A., (2005). Monitoramento hidrológico de um

pavimento permeável para o controle do escoamento superficial na fonte. VI Encontro Nacional de Águas Urbanas, Belo Horizonte, Brasil.

Araújo, P.R., (1999). Análise experimental da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre.

Bertoni, J.C. (2004). Inundaciones urbanas en Argentina. Córdoba: Universitas, 254 pp.

Brattebo, B.O. e Booth, D.B., (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement system. *Water Research*, 37, 4369–4376

Campana, N.A. e Eid, N.J., (2003). Avaliação do desempenho de coberturas permeáveis no controle do escoamento superficial em áreas urbanas. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, Brasil.

Campos, R.F., (1998). Eficiência de diferentes algoritmos em elementos finitos para fluxo em meio saturado/não-saturado. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília.

Chocat, B., Ashley, R., Marsalek, J., Matos, M.R., Rauch, W. e Schilling, W., (2004). Urban Drainage - out-of-sight, out-of-mind? En *International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*, Lyon, Proceedings Novatech, pp. 1659-1690.

Cruz, M.A.S, Araújo, P.R. e Souza, V.C., (1999). Estruturas de controle do escoamento urbano na microdrenagem. En XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil.

Davies, J.W., Pratt, C.J. e Scott, M.A., (2002). Laboratory study of permeable pavement systems to support hydraulic modeling. *Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage*, Portland, Oregon, EUA.

Elmaloglou, S., (1980). Effets des stratifications sur les transferts de matieres dans les sols. Tese de Doutorado, Institut National Polytechnique De Grenoble, Canadá.

Ferreira, P.A., (2005). Quantificação e análise do uso da água em práticas de agricultura irrigada na bacia do Descoberto - DF. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília.

- Genz, F., (1994). Parâmetros para previsão e controle de cheias urbanas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil.
- Hunt, B., Stevens, S. e Mayes, D., (2002). Permeable pavement use and research at two sites in Eastern North Carolina. Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage, Portland, Oregon, EUA.
- Koide, S. (1990). Hillslope Subsurface Flow Study by Finite Element Method. Tese de Doutorado. University of London, London, Inglaterra, 306pp.
- Montebeller, C.A., Carvalho, D.F., Sobrinho, T.A., Nunes, A.C.S. e Rubio, E., (2001). Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 5(1), 1–5.
- Moura, T.A.M., (2005). Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento em ambientes urbanos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Neuman, S.P., (1973). Saturated-unsaturated seepage by finite element. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 99, 2233–2250.
- Pagotto, C., Legret, M. e Le Cloirec, P., (2000). Comparison of the hydraulic behaviour and quality of highway runoff water according to the type of pavement. Water Research, 34(18), 4446–4454.
- Schlüter, W. e Jefferies, C., (2002). Modelling the outflow from a porous pavement. Urban Water, 4, 245–253.
- Silva, G.B.L., (2006). Estudo experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- UDFCD, (2002). Urban Drainage And Flood Control District, Drainage Criteria Manual V.3. Stormwater Quality Management, Denver, EUA.
- Urbonas, B. e Stahre, P., (1993). Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs, Prentice Hall.