

Influência de Aspectos Construtivos e de Uso na Eficiência de Revestimentos com Superfícies Permeáveis

Gustavo B. Lima da Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPB
gustavo@ct.ufpb.br

Thales Augustus M. Moura, Sérgio Koide, Néstor Aldo Campana

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UnB
thales.moura@caixa.gov.br, mnestor@unb.br, skoide@unb.br

Recebido: 05/08/08 – revisado: 09/12/08 – aceito: 25/03/09

RESUMO

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 com superfícies permeáveis. Neste trabalho, a eficiência de dois tipos de revestimentos permeáveis compostos por blocos de concreto foram avaliadas experimentalmente: (i) revestimento com blocos maciços e (ii) revestimento com blocos vazados. Para cada tipo de revestimento foram instaladas parcelas de 1m², variando-se o valor da declividade longitudinal e o estado de compactação do substrato. Parte dessas parcelas foi submetida à passagem de veículos e recebeu aporte de sedimentos sobre sua superfície. Por meio da aplicação de chuvas artificiais sobre as parcelas, foi possível caracterizar a evolução temporal das lâminas escoadas e determinar os coeficientes de escoamento. A partir dos resultados obtidos, constatou-se uma eficiência expressiva da superfície construída com blocos vazados no controle da geração de escoamento, mesmo para a situação em que o substrato foi compactado e para valores elevados de declividades. Entretanto, verificou-se que o efeito da passagem de veículos, juntamente com a deposição de sedimentos, pode provocar a perda quase total de eficiência desse tipo de revestimento. Os resultados permitiram, também, identificar fatores que podem contribuir de forma predominante para a produção de escoamento superficial nesses revestimentos.

Palavras-chave: Controle na fonte, Revestimento permeável, Simulação de chuva.

INTRODUÇÃO

Uma das alternativas para se diminuir os impactos da urbanização sobre o escoamento superficial 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.

Os revestimentos com superfícies permeáveis, alvo desta pesquisa, aparecem como uma alternativa à utilização das superfícies impermeáveis tradicionais, como o asfalto e superfícies em concreto, utilizadas na pavimentação de áreas destinadas a

estacionamentos de veículos, passeios públicos e até mesmo no interior de lotes. Esses revestimentos têm por finalidade a criação de espaços que favoreçam a infiltração de parte da água da chuva precipitada sobre sua superfície, permitindo a diminuição do escoamento superficial gerado e, posteriormente, conduzido para o sistema de drenagem. Por atuar no momento inicial da produção do escoamento, essas soluções são consideradas soluções de controle na fonte.

Pesquisas recentes, desenvolvidas em diferentes locais do mundo, têm procurado avaliar experimentalmente o potencial de diferentes tipos de revestimentos permeáveis com relação ao controle do escoamento superficial. Os revestimentos avaliados se distinguem, normalmente, por suas características construtivas, tais como o tipo de material da superfície, as características das camadas subjacentes, entre outros. As experiências têm sido conduzidas tanto em escala real, normalmente por meio do

monitoramento do escoamento produzido em estações de veículos construídos com esse tipo de revestimento, como em pequenas parcelas, geralmente de 1m², mediante a aplicação de chuvas artificiais (Genz, 1994; Araújo, 1999; Pagotto *et al.*, 2000; Schlüter e Jefferies, 2002; Davis *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.

Apesar do número crescente de trabalhos envolvendo revestimentos permeáveis, ainda são poucas as informações a respeito da influência de aspectos construtivos, tais como declividade longitudinal e compactação do solo no substrato, e de fatores relacionados ao uso desses revestimentos, tais como passagem de veículos e a deposição de sedimentos na superfície, sobre a sua eficiência. Além disso, tendo em vista que a eficiência dessas soluções depende fortemente do tipo de solo onde são implantadas, 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, para que se possa conhecer a sua eficiência no local. Essa é uma motivação implícita desta pesquisa

Por esses motivos, acredita-se que estudos que procurem investigar sobre os aspectos anteriormente mencionados podem contribuir para o melhor entendimento do funcionamento hidrológico desse tipo de revestimento, bem como contribuir para a definição e aprimoramento de critérios para a sua implantação.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo avaliar, em pequena escala, a eficiência de revestimentos com superfícies permeáveis no controle da geração de escoamento superficial, observando a influência da declividade longitudinal, da compactação do solo na base, da passagem de veículos e da colmatação das superfícies por sedimentos. Apesar de não ter sido um objetivo específico, outra contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de um equipamento simulador de chuva, construído especialmente para esta pesquisa.

REVESTIMENTOS COM SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS

Revestimentos com superfícies permeáveis consistem de estruturas simples sob o ponto de vista

construtivo e possuem a capacidade de reduzir diretamente a produção de escoamento pluvial, fazendo infiltrar parte da chuva precipitada sobre sua superfície para a camada de solo subjacente. Geralmente, essa camada subjacente é composta por uma camada de areia sobreposta a uma camada de material granular, como brita. Essa última funciona como um reservatório de armazenamento. Quando esse reservatório é incluído na estrutura do revestimento, ele é dimensionado para acomodar o volume de escoamento de uma chuva de projeto menos o volume infiltrado durante a chuva (Silveira, 2003). Entretanto, a presença dessa camada na estrutura do revestimento se traduz normalmente em aumentos consideráveis nos custos envolvidos na sua implantação.

Os revestimentos permeáveis são divididos, normalmente, em duas categorias: os revestimentos de blocos modulares e os pavimentos permeáveis. Os pavimentos permeáveis podem ser em asfalto poroso ou concreto poroso. Esses materiais apresentam características construtivas semelhantes ao pavimento convencional. A diferença está na eliminação do material fino da sua composição, aumentando a porosidade final da mistura (Urbonas e Stahre, 1993).

Por outro lado, os revestimentos modulares são compostos por blocos individuais fabricados, normalmente, em concreto, possuindo diversas formas geométricas, podendo ser completamente maciços ou vazados. No primeiro, a infiltração acontece apenas pelas juntas entre os blocos. No segundo, a área vazada pode ser preenchida com areia, pedregulho ou grama, aumentando a fração permeável da superfície. A figura 1 apresenta um esquema geral da estrutura desses revestimentos e a figura 2 mostra dois exemplos de revestimentos com blocos de concreto. Este trabalho, em particular, se restringiu apenas ao estudo de revestimentos permeáveis compostos por blocos.

Dentre os benefícios decorrentes da aplicação de revestimentos permeáveis pode-se citar: redução do escoamento produzido por superfícies pavimentadas, possibilidade de diminuição das dimensões do sistema de drenagem pluvial e melhoria da qualidade da água escoada superficialmente. Adicionalmente, a infiltração promovida por esses dispositivos pode permitir um aumento da taxa de recarga para os aquíferos localizados em regiões urbanas, sem contar que, por seu próprio aspecto visual, esses revestimentos permitem uma boa integração à paisagem local, adicionando valor estético à área onde é utilizado.



Figura 1 – Esquema típico de revestimento de blocos modulares (Urbonas e Stahre, 1993).

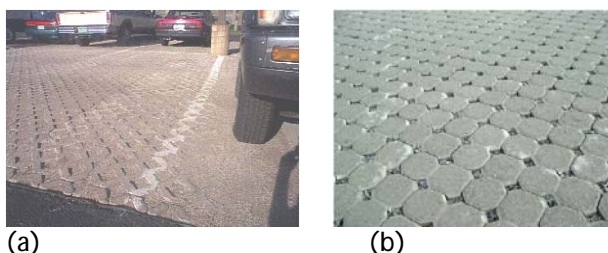


Figura 2 – Revestimentos permeáveis: (a) blocos modulares vazados (UDFCD, 2002) e (b) blocos modulares maciços (Hinman, 2005).

Entretanto, algumas restrições são impostas à sua aplicação. Recomenda-se a utilização dessa tecnologia em solos com capacidade de infiltração elevada, locais com declividades suaves e lençol freático relativamente profundo. UDFCD (2002), por exemplo, recomenda o uso em terrenos com declividades inferiores a 5%. Urbonas e Stahre (1993) recomendam solos com taxas de infiltração finais superiores a 7 mm/h e nível do lençol freático a, no mínimo, 1,2 m do fundo do dispositivo. É importante observar, entretanto, que trabalhos realizados no Brasil (Araújo, 1999; Acioli *et al.*, 2005) têm revelado uma boa eficiência de pavimentos permeáveis mesmo em solos com taxas de infiltração iguais ou inferiores à recomendada. Nesse sentido, os limites encontrados na literatura devem ser observados com cuidado, pois podem induzir, precipitadamente, a não utilização dessas soluções.

As principais ressalvas que podem ser atribuídas ao uso desses revestimentos dizem respeito ao problema da falta de controle na construção e manutenção, que podem levar a altas taxas de falha do dispositivo, sobretudo devido ao processo de colmatção da superfície por sedimentos e ao baixo poder de suporte desses pavimentos, o que reco-

menda seu uso em passeios públicos e em estacionamentos para veículos leves (Cruz *et al.*, 1999).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os revestimentos avaliados neste trabalho foram materializados em parcelas experimentais de 1 m x 1 m e sobre essas parcelas foram realizados testes de simulação de chuva para diferentes intensidades de precipitação. Nesses testes, o escoamento superficial produzido foi quantificado e os coeficientes de escoamento foram estimados pela relação entre os volumes totais escoados e precipitados. O estudo foi desenvolvido em quatro fases descritas em seguida: construção de um equipamento simulador de chuva; instalação das parcelas experimentais; montagem de um dispositivo para quantificação do escoamento superficial; realização dos testes.

Simulador de chuva desenvolvido

O simulador de chuva desenvolvido nesta pesquisa foi construído para atender aos seguintes requisitos: produzir precipitações uniformes numa área de 1m x 1m e permitir a aplicação de precipitações com intensidades variando de 0 a 200 mm/h.

A unidade básica utilizada para a geração da chuva artificial foi um microaspersor de baixo custo, disponível facilmente no comércio local (cidade de Brasília), e a determinação do arranjo final do simulador (número total de microaspersores, a posição relativa entre eles e a altura de fixação em relação ao solo) foi realizada por meio de testes realizados no laboratório de hidráulica da Universidade de Brasília.

Esses testes consistiram em simular precipitações sobre uma plataforma de 1m x 1m sobre a qual foram posicionados recipientes graduados a cada 20 cm, dispostos conforme uma malha quadrada. Para cada arranjo considerado foram realizadas, no mínimo, 6 simulações, correspondendo a diferentes vazões de alimentação dos microaspersores. As vazões foram controladas com o auxílio de um registro e um manômetro, localizados na entrada do conduto de alimentação dos microaspersores. Em cada simulação foram quantificadas a intensidade de precipitação produzida e sua uniformidade, dada pelo Coeficiente de Uniformidade Christiansen (CUC) expresso na equação 1:

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

em que, \bar{X} e SX representam a média e o desvio padrão dos volumes precipitados em todos os recipientes.

Os testes indicaram que a configuração que melhor atendeu às condições de intensidade de precipitação e de uniformidade requeridas foi aquela formada por 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 distantes do centro.

O conjunto de microaspersores foi fixado a uma base metálica, ficando posicionado a uma distância de 1,5 m do solo. Para garantir a uniformidade das precipitações produzidas, foi acoplado ao equipamento um motor elétrico acionado por uma bateria de 12V, que tinha a função de transmitir um movimento de rotação ao conjunto de microaspersores. A figura 3a mostra um esquema geral do simulador desenvolvido.

A curva de calibração do simulador foi construída em função da pressão da água na entrada dos microaspersores. Os resultados apresentados na figura 3b mostram que 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 equipamento desenvolvido podem ser encontrados em Silva (2006).

Instalações experimentais

Dois tipos de revestimentos com superfícies permeáveis foram avaliados: (i) pavimento composto por blocos modulares maciços de concreto (BM) e (ii) pavimento composto por blocos modulares vazados de concreto (BV). Para cada tipo de revestimento 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 25km da cidade de Brasília, atualmente (ano de 2007) em fase de ocupação.

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 que pudessem interferir na eficiência dos revestimentos estudados. Também foram construídas duas parcelas adicionais sem revestimento, sendo uma com solo exposto (SE) e outra com superfície gramada (SG).

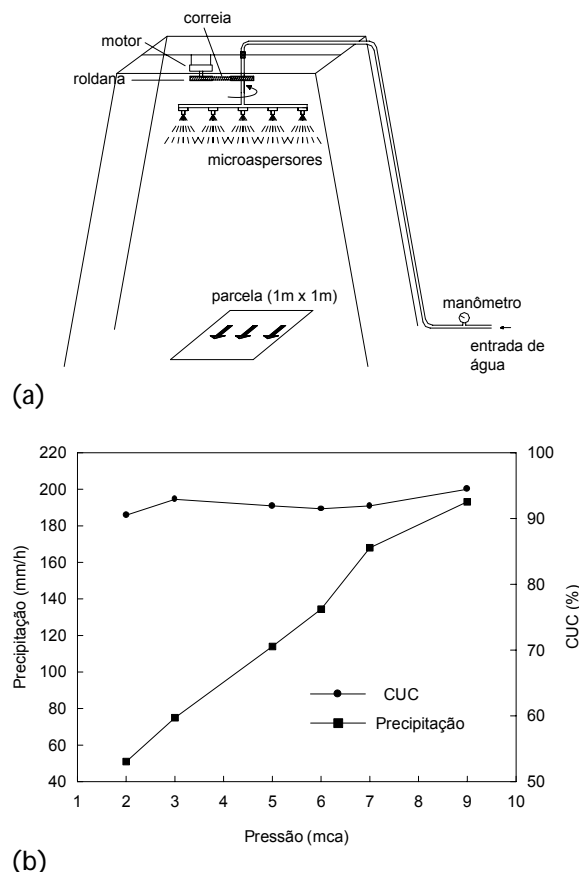


Figura 3 – (a) Esquema geral do simulador desenvolvido; (b) curva de calibração do simulador.

Para identificar cada parcela utilizou-se a seguinte notação: duas letras iniciais identificando o tipo do revestimento, seguidas da letra C identificando situações de substrato compactado (para casos sem compactação esse identificador foi suprimido) e um número correspondendo ao valor da declividade da parcela. Vale ressaltar que as declividades longitudinais das parcelas (acima de 2%) retratam condições bastante conservadoras. Entretanto, esses valores ocorreram em função do relevo acidentado na área onde as parcelas foram construídas, dificultando a obtenção de superfícies de menor declividade.

Os módulos com blocos de concreto 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 de uma escavação no solo de 1,5 m x 1,5 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 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.

Foram construídas cintas de concreto com 8 cm de espessura em torno dos módulos do grupo 2 para garantir o travamento lateral dos blocos. Esse procedimento foi necessário porque os módulos desse grupo foram submetidos, posteriormente, à passagem de veículos. Os travamentos laterais das demais parcelas foram feitos no próprio solo adjacente. As juntas entre os blocos foram preenchidas com areia. No caso dos blocos vazados, os orifícios também foram preenchidos com areia. Os módulos com solo exposto e grama não exigiram, naturalmente, nenhum tipo de processo construtivo. Entretanto, em virtude da ausência de uma superfície gramada próxima à área, foi necessário o plantio prévio da vegetação que cobriu uma área de aproximadamente 1,30 m x 1,30 m. Sobre esse espaço, a parcela SG6 foi montada posteriormente. A parcela de solo exposto foi instalada sobre o próprio terreno que já se encontrava sem a vegetação natural e, por isso, sua superfície se encontrava bastante compactada.

A área efetiva de cada módulo utilizada nos testes de simulação de chuva foi delimitada por meio de quadros metálicos construídos com quatro chapas metálicas de 10 cm de largura e 1 m de comprimento. Em uma das faces dos quadros, destinada a receber o escoamento superficial gerado pela superfície, foi feito um rasgo de aproximadamente 2 cm e adaptada uma calha de PVC para recolher o escoamento. A figura 4 apresenta quatro, das dez parcelas construídas, com os quadros devidamente instalados, mostrando os diferentes tipos de superfícies avaliadas.

Na área onde as parcelas foram instaladas, amostras de solo foram coletadas para análise granulométrica em laboratório e classificação segundo as normas da ABNT. Os resultados obtidos da classificação mostram a predominância de solo argiloso nas primeiras camadas (até 40 cm). 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.

Quantificação do escoamento superficial

Para a determinação do volume escoado superficialmente, foi construído um reservatório com base retangular de dimensões 40 cm x 25 cm, e altura de 60 cm, para o qual o escoamento gerado era direcionado. Durante as simulações, o nível da água no reservatório foi registrado a cada 30 s por meio de uma ponta linimétrica com precisão de 0,1 mm. Posteriormente, essas leituras foram convertidas em valores de lâminas escoadas, permitindo não apenas a quantificação do escoamento em termos de volumes totais, mas também a sua distribuição no tempo.

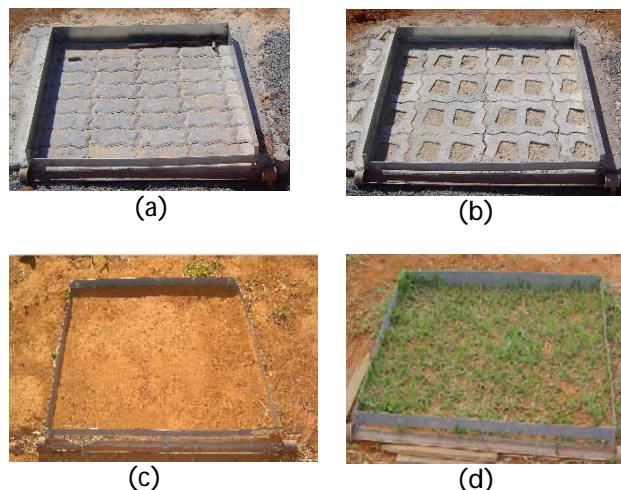


Figura 4 – Superfícies avaliadas no estudo: (a) parcela de blocos maciços de concreto; (b) parcela de blocos vazados de concreto; (c) parcela com solo exposto; (d) parcela com grama.

Experimentos realizados

Os experimentos foram realizados em duas etapas. Na etapa 1, foram realizadas simulações de chuva sobre as superfícies de referência e sobre as parcelas do grupo 1 e 2. Essas simulações ocorreram imediatamente após a implantação das parcelas. Durante essa etapa, 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.

Tabela 1 – Tipos de superfícies avaliadas

Grupo	Tipo de superfície	Identificação	Declividade (i)	Solo na base
1	Bloco maciço	BM2	2%	Não compactado
	Bloco maciço	BM7	7%	Não compactado
	Bloco vazado	BV2	2%	Não compactado
	Bloco vazado	BV7	7%	Não compactado
2	Bloco maciço	BMC2	2%	Compactado
	Bloco maciço	BMC6	6%	Compactado
	Bloco vazado	BVC2	2%	Compactado
	Bloco vazado	BVC6	6%	Compactado
Referência	Solo exposto	SE4	4%	----
	Solo gramado	SG6	6%	----

Após essa etapa, os quadros metálicos fixados sobre as parcelas do grupo 2 foram retirados, e os respectivos módulos foram submetidos à passagem de veículos durante 40 dias, de forma a simular uma situação real de uso. Nesse período, todos os módulos do grupo 1 e 2 também receberam aporte de sedimentos proveniente do escoamento superficial gerado nas áreas circunvizinhas durante a ocorrência de chuvas naturais. Após esse período, uma etapa 2 de simulações de chuva foi realizada sobre as parcelas de ambos os grupos. As simulações sobre as parcelas com solo exposto e com grama foram realizadas em uma única etapa.

As intensidades de precipitação utilizadas nas simulações foram definidas a partir de experimentos prévios, onde foi possível identificar valores adequados que permitissem observar a evolução do escoamento superficial nas parcelas. As simulações eram interrompidas apenas quando o volume escoado não apresentasse mais variações significativas em duas leituras consecutivas, de forma a permitir a caracterização das fases transitória e permanente dos hidrogramas gerados por cada uma das parcelas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 2 apresenta uma síntese das simulações realizadas. Os valores de duração da chuva, assim como os coeficientes de escoamento (Cesc), correspondem às respectivas precipitações na ordem indicada. Seguindo a sequência de execução dos experimentos, a análise dos resultados é feita inicialmente para a etapa 1 e em seguida para a etapa 2.

Etapa experimental 1

A figura 5 mostra a evolução das lâminas escoadas no tempo para as parcelas com blocos maciços (BM2, BM7, BMC2 e BMC6) e para as parcelas sem revestimento (SG6 e SE4), quando submetidas a uma chuva de mesma intensidade (120 mm/h) e mesmas condições iniciais de umidade do solo. Apesar das flutuações presentes nos dados experimentais, causadas, provavelmente, por pequenas variações observadas na pressão da água no simulador durante os testes e pelas próprias imprecisões nas leituras efetuadas, é possível identificar claramente a evolução do escoamento tanto na fase transitória quanto na fase permanente.

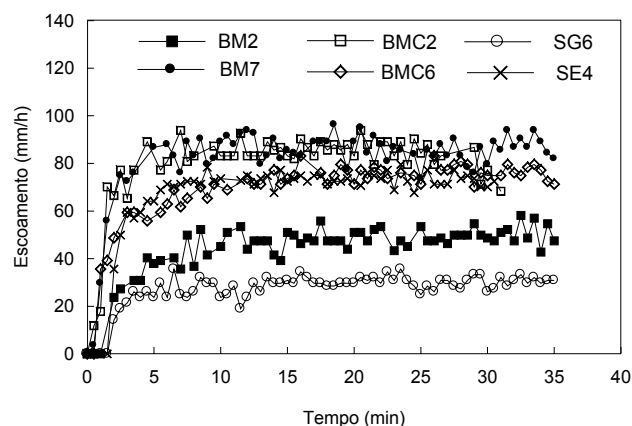


Figura 5 – Lâminas escoadas para as parcelas com blocos maciços para uma precipitação de 120 mm/h.

Com relação às parcelas não revestidas, observa-se que os valores das lâminas máximas escoadas (fase permanente) para a parcela SE4 foram significativamente superiores àqueles observados

para a parcela SG6, o que demonstra uma maior eficiência no controle do escoamento superficial por parte da parcela SG6, como era esperado. Esse comportamento se reflete nos valores dos coeficientes de escoamento, onde para a parcela SG6 o valor médio do Cesc foi de 0,22, enquanto que para a parcela SE4 esse valor ficou em torno de 0,58, resultando num aumento de mais de duas vezes e meia com relação ao valor obtido para a parcela SG6. Apesar do número limitado de testes realizados e da particularidade das situações analisadas, esses resultados retratam o impacto gerado sobre a produção de escoamento superficial em função da retirada da cobertura natural do solo, representando em pequena escala o que acontece, normalmente, no decorrer do processo de urbanização.

Com relação às parcelas com blocos maciços, é possível perceber diferenças nítidas entre os valores das lâminas máximas escoadas (fase permanente). De modo geral, a parcela BM2 foi a que apresentou melhores resultados, com valores de coeficientes de escoamento abaixo de 0,40, inferiores aos obtidos para a parcela SE4, ou seja, para a condição de solo exposto. Nota-se ainda, na figura 5, que o comportamento apresentado pela parcela BM2 foi o que mais se aproximou daquele observado para a superfície gramada. Apesar da pouca área disponível para infiltração (apenas as juntas entre os blocos), os resultados apontam para a boa eficiência desse tipo de cobertura no controle do escoamento superficial. No entanto, o perfeito estado de conservação da superfície da parcela, assegurado por sua implantação recente na época dos experimentos, e a ausência de compactação do substrato podem ter contribuído para o bom desempenho observado.

Para as parcelas com substratos não compactados, BM2 e BM7, observa-se que os Cesc obtidos para a parcela BM7 foram mais elevados em todas as simulações realizadas. Nota-se ainda que a diferença entre os Cesc da BM2 e da BM7 foi significativamente maior para intensidades de precipitação menores, como pode ser observado nos valores de Cesc correspondentes a 84 mm/h (com duração em torno de 35 min), onde se verifica um aumento de mais de quatro vezes do Cesc da BM7 com relação ao observado para a BM2. A figura 5 também mostra a diferença evidente de comportamento dessas parcelas, com o escoamento produzido pela parcela BM7 sendo significativamente superior ao observado para a parcela BM2. Nesse caso (em que o substrato não foi submetido à compactação), os resultados apontam para uma forte influência da declividade na geração de escoamento do revestimento com BM.

Já para as parcelas com substrato compactado (grupo 2), a tendência foi inversa. Como mostrado na figura 5, as lâminas máximas escoadas para a BMC2 (menor declividade) foram superiores às aquelas observadas para a BMC6, resultado que se repetiu em todas as simulações realizadas nestas parcelas, contrariando as observações feitas anteriormente para a BM2 e a BM7. Esse comportamento também se reflete nos valores de Cesc onde para intensidades de precipitação iguais a parcela BMC2 apresentou sempre valores de Cesc superiores aos obtidos para a parcela BMC6. No entanto, duas observações devem ser feitas com base nas simulações de 120 mm/h: (i) ocorreu uma variação de 15% nos valores de Cesc (de 0,61 para 0,53) da BMC6 com o aumento da duração de 35 min para 45 min e (ii) houve uma diferença de 13% entre os Cesc das parcelas BMC2 (0,69) e BMC6 (0,61) para durações de 30 min e 35 min, respectivamente. Nota-se que a variação de Cesc entre as parcelas e em uma mesma parcela foi bastante próxima. Além disso, a duração das chuvas foi variável e não houve repetições de simulações para eventos iguais (mesma intensidade e duração). Dessa forma, as diferenças verificadas entre essas parcelas parecem não ser suficientes para permitir a atribuição de qualquer relação de causa e efeito aos comportamentos observados, estando essas diferenças dentro da faixa de incertezas das simulações.

Ainda com relação às parcelas com blocos maciços, comparando-se as parcelas com declividades próximas, mas diferenciadas pela compactação do substrato, percebe-se que para as situações com declividade mais suave, BM2 e BMC2, os valores das lâminas máximas escoadas foram significativamente superiores para a parcela com substrato compactado (BMC2), como pode ser observado na figura 5. Esse comportamento também se repetiu nos valores de Cesc obtidos, sendo que para precipitações de 84 mm/h com durações de 36 min e 35 min, a diferença foi mais significativa, com Cesc de 0,13 para BM2 e 0,53 para BMC2. Essa discrepância diminuiu com o aumento da precipitação (120 mm/h), mas ainda permaneceu em torno de 80%, apesar das durações das precipitações simuladas terem sido diferentes. Nesse caso, os resultados apontam para uma forte influência da compactação do substrato na redução de eficiência nesse tipo de revestimento.

Já para as parcelas com inclinações maiores (BM7 e BMC6), observa-se na figura 5 que os valores máximos das lâminas escoadas para a parcela BMC6 foram inferiores àsqueles observados para a parcela BM7. Com relação aos valores de Cesc dessas parcelas, diferenças significativas são observadas, sobretu-

Tabela 2 – Resultados das simulações de chuva realizadas

Parcelas	Precipitação (mm/h)	Duração (min)	Coef. de escoamento - Cesc
SG6	120/120/156/156	55/60/60/50	0,24/0,23/0,17/0,22
SE4	120/120/156/156	31/25/25/26	0,57/0,63/0,52/0,58
Etapa 1			
Parcelas	Precipitação (mm/h)	Duração (min)	Coef. de escoamento - Cesc
BM2	84/120/120	36/35/25	0,13/0,38/0,39
BM7	60/84/120	36/35/35	0,48/0,62/0,70
BV2	156/156	60/120	*
BV7	156/156	60/120	*
BMC2	60/84/120	36/35/30	0,48/0,53/0,69
BMC6	84/120/120	33/35/45	0,34/0,61/0,53
BVC2	156/156	50/55	0,30/0,35
BVC6	156/156	60/60	0,30/0,35
Etapa 2			
Parcelas	Precipitação (mm/h)	Duração (min)	Coef. de escoamento - Cesc
BM2	84/120	20/20	0,81/0,82
BM7	84/120	22/15	0,80/0,93
BV2	84/120	50/40	0,37/0,40
BV7	84/120	45/30	0,64/0,68
BMC2	84/120	20/20	0,79/0,88
BMC6	84/120	20/20	0,83/0,71
BVC2	84/120	20/20	0,63/0,76
BVC6	84/120	20/20	0,75/0,81

* não apresentou geração de escoamento

do para a precipitação de 84 mm/h, onde se verifica uma variação de aproximadamente 82% em relação ao menor valor obtido (0,34). Nesse caso, em que a declividade das parcelas foi mais acentuada, o efeito da compactação do substrato sobre a geração de escoamento superficial parece ser menos significativa, diferentemente do que foi observado para a inclinação de 2%. Ou seja, com o aumento da declividade, observa-se uma tendência de redução da influência da compactação sobre a geração de escoamento no revestimento com BM.

Com relação às superfícies com blocos vazados, as parcelas BV2 e BV7 (grupo 1) não apresentaram geração de escoamento superficial, mesmo quando submetidas a uma precipitação de intensidade elevada (156mm/h) e duração superior a duas horas. Nestes casos, as eficiências dessas parcelas foram maiores até mesmo que a observada para a condição de superfície gramada.

Para as parcelas BVC2 e BVC6 (grupo 2), a figura 6 mostra o comportamento do escoamento

produzido para simulações com uma mesma intensidade de precipitação (156 mm/h). É possível observar uma nítida diferença de comportamento na fase permanente, sendo a lâmina máxima escoada menor para a parcela mais inclinada (BVC6), o que não era esperado. Surpreendentemente, esses resultados indicam a possibilidade de que, para situações com substrato compactado, a declividade não seja o fator que controla predominantemente a geração de escoamento nesse tipo de revestimento.

Em termos de totais escoados, os baixos Cesc observados (0,30 e 0,35) demonstram a boa eficiência desse tipo de revestimento no controle da geração de escoamento superficial, mesmo para a condição de substrato compactado e declividade elevada. Assim como para a parcela BM2, acredita-se que a boa condição de limpeza da superfície e o baixo conteúdo inicial de umidade na camada de areia podem ter contribuído para os bons resultados obtidos.

No entanto, é importante observar nos hidrogramas mostrados na figura 6, que as parcelas BVC2 e BVC6 apresentaram uma resposta bem mais lenta quando comparadas com aquelas observadas para as parcelas com BM. Isso aconteceu devido à maior fração permeável do revestimento, levando a perdas iniciais por infiltração mais significativas, e devido à própria acomodação da areia no interior dos orifícios, aumentando a capacidade de armazenamento inicial do revestimento. Por esses motivos, o regime de escoamento permanente só se estabeleceu por volta de 30 min, correspondendo à metade do tempo total de simulação. Em situações como essa, as perdas iniciais passam a influenciar significativamente o valor do Cesc calculado e por isso os resultados obtidos para as parcelas BVC2 e BVC6 devem ser vistos com cautela de forma a se evitarem conclusões tendenciosas a respeito do seu desempenho.

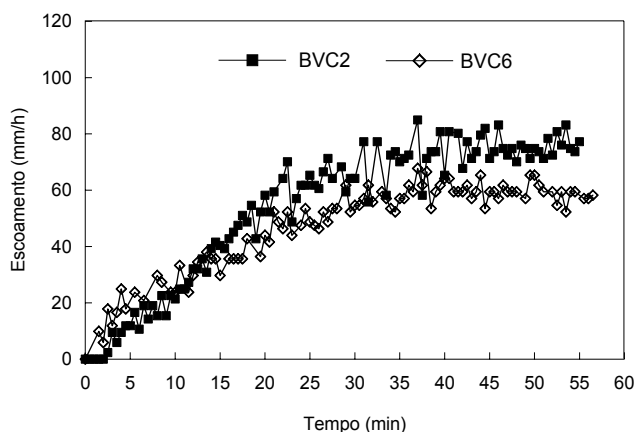


Figura 6 – Lâminas escoadas para as parcelas com blocos vazados e substrato compactado para uma precipitação de 156 mm/h.

Etapa experimental 2

A figura 7 mostra uma comparação dos comportamentos das lâminas escoadas nas parcelas de blocos maciços com declividade 2%, entre as etapas 1 e 2 do estudo, para uma chuva de mesma intensidade. Note que é possível observar claramente mudanças nos padrões de escoamento desse tipo de revestimento entre as duas etapas do trabalho.

Dessas parcelas, a BM2 foi a que apresentou maior acréscimo na lâmina máxima escoada (superior a 100%) com relação aos resultados obtidos na primeira etapa. Como é possível perceber, o comportamento dessa parcela para a etapa 2 é pratica-

mente idêntico aquele observado para a parcela BMC2 nesta mesma etapa. Essas mudanças aconteceram, em parte, pela própria compactação das juntas devido à acomodação natural do revestimento ao longo do tempo, mas principalmente pelo processo de colmatação das juntas promovido pela deposição de sedimentos sobre as parcelas durante a ocorrência de eventos naturais de chuva. Embora essa carga não tenha sido quantificada, visitas ao campo experimental após a ocorrência de eventos de chuva puderam confirmar uma quantidade significativa de sedimentos depositada sobre as parcelas.

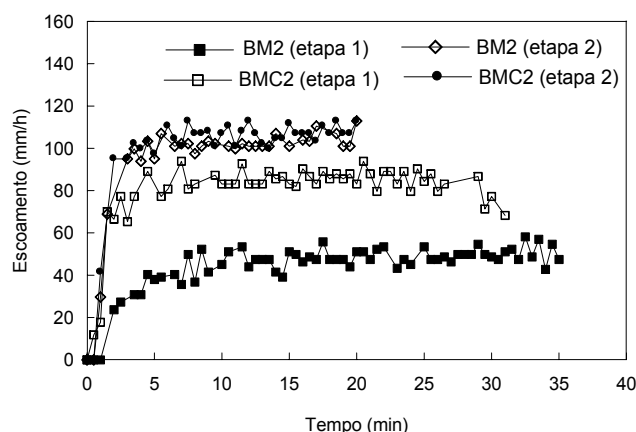


Figura 7 – Lâminas escoadas para as parcelas de blocos maciços com declividade 2% nas duas etapas para uma precipitação de 120 mm/h.

Dos dados apresentados na tabela 2, é possível observar que, para esse tipo de revestimento, a perda de eficiência parece ser mais influenciada pela deposição de sedimentos do que pela compactação da base, basta comparar os Cesc obtidos para a parcela BM2 na etapa 1, BMC2 na etapa 1 e BM2 na etapa 2, onde verifica-se, respectivamente, mudanças de Cesc de 0,39 (BM2 – sem compactação e sem sedimentos), 0,69 (BMC2 – com compactação e sem sedimentos) e 0,82 (BM2 – sem compactação e com sedimentos). Essas diferenças também ficam evidentes na figura 7, quando observadas as lâminas máximas escoadas (fase permanente). Nesse caso, os resultados obtidos mostram que com a deposição de sedimentos sobre a superfície, a compactação do substrato parece não desempenhar mais um papel predominante sobre a produção de escoamento do revestimento de blocos maciços, como era esperado.

Comparando as parcelas com blocos maciços pertencentes ao grupo 2 (BMC2 e BMC6), que além do aporte de sedimentos foram submetidas a passagem de veículos, pode-se observar aumentos

nos valores de Cesc de até 27% quando comparados àqueles obtidos na etapa 1 para uma mesma intensidade de precipitação (120 mm/h), sugerindo que a combinação desses fatores pode contribuir para a perda significativa de eficiência. Nota-se também que para a mesma duração, o Cesc aumentou com a intensidade para BMC2. Mas diminuiu para BMC6, o que não era esperado. No entanto, devido à ausência de repetições dos testes, essa diferença pode estar dentro da faixa de incertezas envolvidas nas simulações.

Com relação às superfícies com blocos vazados, também se observa que a deposição de sedimentos parece ser um fator determinante para a perda de eficiência. As parcelas BV2 e BV7 (grupo 1) que não apresentaram formação de escoamento superficial na etapa 1 passaram a produzir escoamento mesmo para precipitações simuladas de menores intensidades (tabela 2). Apesar disso, a parcela BV2 ainda se mostrou bastante eficiente, com valores de Cesc abaixo de 0,40, praticamente metade do valor obtido para BM2, com mesma declividade. Para BV7 esse valor aumentou em até 70% com relação a BV2, atingindo valores superiores a 0,65. Entretanto, por não ter sido possível controlar a quantidade de sedimentos direcionados para as parcelas, não é razoável atribuir esse comportamento exclusivamente ao aumento de declividade, visto que a superfície BV7 podia estar mais colmatada que a superfície BV2.

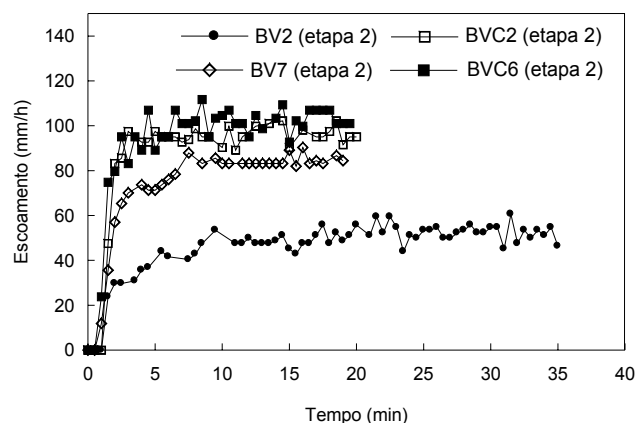


Figura 8 – Lâminas escoadas para as parcelas de blocos vazados na etapa 2 para uma precipitação de 120 mm/h.

Assim como aconteceu para as superfícies com blocos maciços, nas parcelas com blocos vazados a perda de eficiência parece ter sido mais significativa em função da deposição de sedimentos na superfície do que pela compactação do substrato.

Basta observar os aumentos nos valores de Cesc obtidos para BV2 e BV7 na etapa 1 (sem compactação e sem colmatagem), BVC2 e BVC6 na etapa 1 (com compactação e sem colmatagem) e BV2 e BV7 na etapa 2 (sem compactação e com colmatagem). Cabe ressaltar, entretanto, que, neste último caso, a influência da umidade residual maior devido à diferença entre a estação seca e a úmida na região onde os experimentos foram realizados, também pode ter contribuído para o resultado observado.

Para as parcelas BVC2 e BVC6 (grupo 2), a deposição de sedimentos sobre suas superfícies juntamente com a passagem de veículos, provocando a compactação da fração permeável dos blocos, parecem ter sido fundamentais para as reduções tão significativas de eficiência observadas, como mostram as diferenças nos resultados dos Cesc obtidos nas duas etapas (tabela 2). Nota-se, na figura 8, que o comportamento das lâminas escoadas para estas parcelas são praticamente iguais e, portanto, independente da declividade. Além disso, o comportamento do escoamento gerado foi modificado, perdendo completamente as características apresentadas na figura 6, passando a apresentar uma rápida ascensão até atingir o patamar de escoamento constante. Observações em campo confirmaram que isso ocorreu em função da deposição de sedimentos, fazendo desaparecer os espaços provocados pela acomodação da areia nos orifícios.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que os revestimentos avaliados podem apresentar comportamentos significativamente diferentes com relação à produção de escoamento superficial a depender de algumas características construtivas, como declividade e estado de compactação do substrato, e de características relacionadas ao uso desses revestimentos, como a colmatagem da superfície e a ação de veículos.

Apesar da pouca área disponível para infiltração, o revestimento com blocos maciços com pequena declividade (<2%) pode contribuir significativamente para a redução do escoamento superficial, desde que sua superfície seja mantida livre de sedimentos e o substrato não seja submetido à compactação.

O revestimento com blocos vazados se mostrou a opção mais eficiente para o controle na geração de escoamento, mesmo sem a utilização de um reservatório de pedras nas camadas subjacentes à

superfície. Em alguns experimentos, observou-se que esse tipo de revestimento foi capaz de controlar completamente o escoamento, mesmo para uma chuva de intensidade elevada de 156 mm/h e com 2 h de duração. Diferentemente do revestimento com blocos maciços, apesar da compactação do substrato e do aumento da declividade longitudinal (6%), esse revestimento apresentou coeficientes de escoamento próximos aos obtidos para uma superfície gramada.

Para os tipos de revestimentos testados, os resultados sugeriram que a colmatção da superfície por sedimentos parece ser o principal fator de redução de eficiência. Esse fator combinado à passagem de veículos provocou a perda quase que completa da eficiência para os dois tipos de revestimentos testados. É importante ressaltar, porém, que a produção de sedimentos na região onde as parcelas foram instaladas era bastante significativa, em virtude da ocupação ainda rarefeita do local e da retirada da vegetação natural em alguns locais, configurando uma situação extrema de uso.

Para as situações testadas neste trabalho, observou-se que nos casos em que os substratos dos revestimentos não foram compactados, a declividade parece controlar significativamente a produção de escoamento superficial. Isso foi observado nas parcelas BM2 e BM7 na primeira etapa dos experimentos, onde a parcela mais inclinada apresentou maiores valores de Cesc, bem como das lâminas máximas escoadas.

Por outro lado, nas situações em que os substratos foram compactados, outro comportamento foi observado. Para um mesmo tipo de revestimento, as parcelas mais inclinadas apresentaram coeficientes de escoamento menores, bem como lâminas máximas escoadas menores. Uma das hipóteses para esse comportamento é de que a compactação do substrato tenha favorecido o desenvolvimento de um fluxo subsuperficial predominante na direção da declividade da camada de areia, sendo maior nas parcelas com maior declividade. Acredita-se que o estabelecimento desse fluxo tenha favorecido uma maior infiltração da chuva nesta parcela, sendo o responsável pela diminuição da lâmina escoada superficialmente. Para reforçar essa e outras hipóteses levantadas com base nos resultados desta pesquisa, outro trabalho envolvendo a modelagem numérica do fluxo de água em um modelo de solo estratificado representando as camadas subjacentes aos revestimentos está sendo desenvolvido.

Naturalmente, vários aspectos associados aos experimentos realizados podem ser considerados como fontes de incertezas como o número limitado

de testes realizados, a ausência de repetições de simulações para eventos iguais e a falta de repetição das simulações para parcelas diferentes instaladas sob as mesmas condições. Para reduzir essas fontes de incertezas, sugere-se a realização de mais experimentos, levando em consideração as questões mencionadas. Além disso, em função da sensibilidade do Cesc às perdas iniciais e à duração da chuva, sugere-se para outros trabalhos dessa natureza, se discutir a relação da intensidade da chuva com a intensidade do escoamento superficial no regime permanente ou tentar padronizar a duração para o início do regime permanente, como forma de também se reduzir a faixa de incertezas dos resultados. É importante ainda que outras variáveis sejam monitoradas em experimentos desse tipo, como a umidade nas camadas subjacentes aos revestimentos, o que poderia contribuir para explicar melhor o funcionamento desses dispositivos.

Apesar disso, acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa podem ter contribuído no sentido de melhorar o entendimento a respeito do comportamento hidrológico desses tipos de revestimentos permeáveis, além de servirem como fonte de informações que podem ser úteis ao planejamento da drenagem urbana.

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., 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.
- BRATTEBO, B. O. e BOOTH, D. B. (2003). *Long-term storm-water 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.
- CRUZ, M. A. S., ARAÚJO, P. R. SOUZA, V. C. (1999). *Estruturas de controle do escoamento urbano na microdrenagem*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Brasil.
- DAVIS, 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.
- 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.
- HINMAN (2005). *Low Impact Development – Technical Guidance Manual for Puget Sound*. Washington State University.
- 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.
- MONTEBELLER C. A., CARVALHO, D. F., SOBRINHO, T. A., NUNES, A. C. S. e RUBIO, E. (2001). *Avaliação hidráulica de um simulador de chuva 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.
- 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.
- SSHLÜTER, W. e JJEFFERIES, 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.
- SILVEIRA, A. L. L (2003). *Pré-dimensionamento de Pavimentos Permeáveis e Trincheiras de Infiltração*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 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.

Influence of Constructive Aspects and Use on the Efficiency of Paving on Permeable Surfaces

ABSTRACT

Best urban stormwater management practices recommend the use of solutions to control surface runoff at the source. Outstanding among the options available is the use of permeable pavements. In this work the efficiency of two types of permeable pavements constructed with concrete blocks was experimentally evaluated: (i) ordinary solid blocks and (ii) modular porous blocks. For each type of pavement 1 m² parcels were installed varying the slope and the degree of compaction of the underlying filling material. Some parcels were submitted to vehicle transit and to natural sediment loaded flushes over the surface. Applying artificial rain over the parcels it was possible to characterize time evolution of runoff and to determine the runoff fractions. Based on the results obtained a remarkable efficiency of the modular porous blocks on runoff generation reduction was observed, even in the parcel in which the underlying filling material was compacted and in those with high slope values. Nevertheless the effect of vehicle transit combined with sediment deposition caused great efficiency loss in this kind of pavement. The results obtained led to the identification of the factors that may predominantly contribute to runoff generation on this type of pavements.

Keywords: *Control at the sources, permeable pavement, rainfall simulation.*