

Artigo Técnico

Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil

Evaluation of best management practices' construction and operation: the fine particles transportation, the infiltration capacity, the soil infiltration loading rate and the geotextile permeability

Alessandro Hirata Lucas¹, Loide Angelina Sobrinha², Rodrigo Braga Moruzzi³, Ademir Paceli Barbassa⁴

RESUMO

Este trabalho avaliou aspectos da construção e operação de técnicas compensatórias em drenagem urbana e seu efeito na taxa de infiltração das unidades em escala real. Para tal, foram estudados dois sistemas, a saber: i) filtro-vala-trincheira de infiltração (FVT) e ii) poço de infiltração (PI). A infiltração do solo foi avaliada por meio de ensaios de campo (ensaios de duplo anel e poço invertido) e por medidas das unidades experimentais. Além disso, foram investigados o teor de material pulverulento e a permeabilidade de amostras do geotêxtil utilizado no FVT e PI, nas condições pré e pós-instalação. Apesar das proteções instaladas, houve transporte de finos para o interior das unidades e que esses influenciaram na permeabilidade da manta geotêxtil (redução de 30 a 90% para o FVT e de 40 a 70% para o PI) e nas taxas de infiltração nas unidades em escala real (de $4,7 \times 10^{-6}$ a 10^{-5} m.s⁻¹).

Palavras-chave: técnicas compensatórias em drenagem urbana; construção; infiltração.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate some aspects of construction and operation of full-scale best management practices and their effects on infiltration loading rate. Two systems were studied: i) filter-swale-trench (FST) and ii) infiltration well (IW). In these units, field essays and full-scale measurements were made in order to assess the soil permeability. Further, the fine particles transportation and the geotextile blanket permeability were determined before and after operation. The results pointed out that there were soil transportation to inside the FST and IW systems, despite of the installed protections, and that these material were responsible for diminishing the geotextile (reduction from 30 to 90% for FST and 40 to 70% for IW) and the full-scale infiltration loading rates (varying from $4,7 \times 10^{-6}$ to 10^{-5} m.s⁻¹).

Keywords: best management practices; urban drainage; construction; infiltration.

INTRODUÇÃO

O uso do solo para fins urbanos altera as características da superfície da área ocupada, modificando a infiltração da água no solo e incrementando o escoamento superficial direto (ESD). Como consequência, a rede de drenagem da bacia hidrográfica local deve conduzir maiores vazões quando comparada às condições de pré-ocupação. As inundações urbanas ocorrem na saturação da capacidade dos sistemas, naturais ou construídos, de escoar a vazão produzida pela precipitação excedente.

Dentre o rol de alternativas para abordagem do problema das cheias urbanas destacam-se as técnicas compensatórias, as quais constituem em medidas de controle de escoamento na fonte de geração, aplicadas de forma difusa na bacia hidrográfica. Tais estruturas têm o objetivo precípuo de aumentar a parcela da água pluvial retida ou infiltrada, recuperando ou minimizando os efeitos decorrentes do ESD gerado pela ocupação urbana.

Nesse contexto, valas, trincheiras e poços de infiltração constituem alternativas que visam propiciar a infiltração em áreas reduzidas

¹Tecnólogo em Construção Civil, Mestre em Engenharia Urbana, Professor na Fundação Herminio Ometto (UNIARARAS) - São Paulo (SP), Brasil.

²Engenheira Ambiental, Doutoranda na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC - USP) - São Carlos (SP), Brasil.

³Professor Adjunto da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) - Rio Claro (SP), Brasil.

⁴Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - São Carlos (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Rodrigo Braga Moruzzi - Avenida 24 A,1,515 - Bela Vista - 13506-900 - Rio Claro (SP), Brasil - E-mail: r.moruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 23/01/13 - **Aceito:** 18/08/14 - **Reg. ABES:** 79923

e sob condições controladas. O grande entrave à aplicação segura dessas estruturas reside na determinação e na manutenção das taxas de infiltração de projeto, as quais dependem de aspectos ligados ao solo, tais como umidade, profundidade do lençol freático e condutividade hidráulica. O carreamento de material pulverulento para o interior dessas estruturas interfere na taxa de infiltração real e no tempo de funcionamento.

Assim, a taxa de infiltração real constitui em um importante parâmetro de projeto das estruturas que empregam a infiltração, visando a retenção da precipitação no solo. Por sua vez, a colmatagem do solo, dada pelo carreamento de finos, é o principal responsável pela diminuição da taxa de infiltração na fase de operação dos sistemas, podendo comprometer o funcionamento e a vida útil das estruturas.

A contenção dos finos carreados pode ser feita por meio de manta geotêxtil, instalada sobre as superfícies de infiltração. Como a manta geotêxtil desempenha o papel de proteção contra a colmatagem precoce dos sistemas de infiltração, esta tem o risco de ser colmatada primeiro. Para Baptista, Nascimento e Barraud (2005), a colmatagem ocorre principalmente no fundo e na metade inferior das paredes. Shueler (1987) e Lowndes (2000), entretanto, advertem que a colmatagem da estrutura ocorre inicialmente na parte superior.

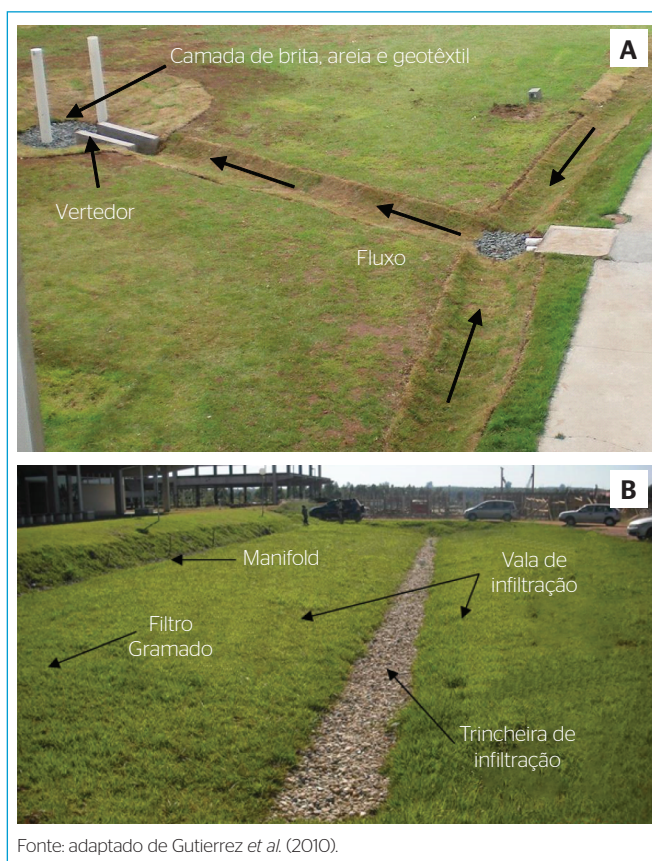
De qualquer forma, a manta deve ser substituída depois de constatada sua colmatagem, o que pode ocorrer após um período de funcionamento de aproximadamente 5 anos, enquanto a substituição da camada colmatada sob o geotêxtil instalado no fundo e dos agregados de preenchimento utilizados deve ser realizada após, aproximadamente, 15 anos de funcionamento (SHUELER, 1987). Evidentemente, esses períodos podem variar conforme características do material, do regime pluviométrico, do meio físico e do uso e da ocupação do solo onde as estruturas foram implantadas.

Da mesma forma, a prevenção da colmatagem precoce de sistemas de infiltração durante a fase de construção é outro fator fundamental ao bom funcionamento do sistema, conforme apontam Gutierrez et al. (2010). Outros trabalhos, tais como o da EPA (1999b), o do MDE (2000) e o de Loyd, Wong e Porter (2002), citam que durante a fase de construção de técnicas compensatórias é necessário protegê-las do transporte de sedimentos durante eventos chuvosos, sendo recomendado o uso de técnicas para contenção e isolamento da técnica compensatória. Shueler (1987) recomenda que o ESD seja afastado das áreas onde a vegetação ainda não esteja estabilizada para controle da erosão e de transporte de sedimentos. Além disso, recomenda-se que os agregados utilizados na construção de sistemas de infiltração, em geral a brita, sejam previamente lavados, visando minimizar o efeito da colmatagem precoce da estrutura causada pelos finos presentes no próprio agregado (SHUELER, 1987; EPA, 1999a; MDE, 2000; LOWNDES, 2000).

Isso posto, este trabalho visou avaliar o transporte de material pulverulento (finos), a permeabilidade da manta geotêxtil, a capacidade de infiltração do solo e a taxa de infiltração real das duas técnicas compensatórias investigadas construídas em escala real.

METODOLOGIA

Os sistemas constituídos por poço de infiltração (PI) e filtro-vala-trincheira de infiltração (FVT) foram construídos em escala real no campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em São Carlos (SP). Tanto o PI quanto o FVT receberam águas pluviais escoadas por telhado. O PI drenou área de 241,8 m² em telha de zinco. O FVT drenou área de 1701,3 m² em telha de zinco. Os dois edifícios têm menos de cinco anos de construção. Na Figura 1 é apresentada uma visão geral das unidades experimentais, com indicação de suas partes constituintes. Os sistemas foram dimensionados por meio do método da curva-envelope (*rain-envelope method*), utilizando a equação de chuva da cidade de São Carlos. Foram avaliados diferentes períodos de recorrência (de 1 a 10 anos) visando avaliar seu efeito no volume útil requerido de cada estrutura. O PI foi dimensionado para TR de 1 ano, e o FVT, para 10 anos. As principais dimensões dos sistemas são apresentadas na Tabela 1.



Fonte: adaptado de Gutierrez et al. (2010).

Figura 1 - Fotografias do poço de infiltração (A) e do filtro-vala-trincheira (B), construídos em escala real nas dependências da Universidade Federal de São Carlos, campus de São Carlos (SP).

Tabela 1 - Principais dimensões dos sistemas poço de infiltração e filtro-vala-trincheira de infiltração.

Dimensões	Poço*	Trincheira	Vala
Comprimento (m)	n.a.	40,00	43,50
Largura/diâmetro (m)	1,85	0,80	8,00
Profundidade (m)	1,93	1,30	0,45
Volume (m ³)	4,01	19,97	86,40

Fonte: adaptado de Gutierrez *et al.* (2010).

*base circular; n.a.: não se aplica.

Descrição e funcionamento dos sistemas

O PI foi construído com anéis de concreto perfurado e revestido com manta geotêxtil. Foi instalado tubo de PVC perfurado para inserção do medidor de nível. As laterais internas e externas do poço foram revestidas com tijolos furados e manta geotêxtil. Sua base foi assentada sobre blocos de concreto e o fundo do poço foi preenchido por uma camada de 10 cm de brita nº 3. O dispositivo de entrada do poço é constituído por: uma tampa circular de metal, uma manta geotêxtil, uma camada de 10 cm de areia grossa e uma camada superficial de brita nº 3.

O funcionamento do PI se dá como segue: as águas precipitadas sobre o telhado são encaminhadas ao PI por meio dos canais gramados, os quais convergem para a canaleta de entrada. Na entrada do poço passam pelo vertedor triangular, onde foi instalado um medidor de nível, e entram no poço por meio da tampa, passando respectivamente pelas camadas de brita, areia e geotêxtil nela instaladas. Posteriormente, a água proveniente do ESD é armazenada no poço para o processo de infiltração no solo propriamente dito.

O FVT foi escavado e nivelado sobre o solo. A vala foi coberta com placas gramadas, e o interior da trincheira, com manta geotêxtil e preenchido com brita nº 3. Na parte superior da trincheira há um filtro de areia de 0,10 m, que também auxilia na remoção de finos e prevenção da colmatagem da trincheira (URBONAS & STAHR, 1993). A camada de areia foi recoberta por uma camada de 0,05 m de seixo rolado.

O funcionamento do sistema FVT seguiu as seguintes etapas, segundo Gutierrez *et al.* (2010):

1. a água proveniente do ESD sobre as áreas de captação, composta principalmente pelo telhado, é encaminhada por meio do sistema predial de água pluvial e canaletas de drenagem;
2. na canaleta, com 0,60 m de largura, é feita a medição de vazão com vertedor triangular;
3. o escoamento é distribuído por meio de um canal diafragma (tubulação de 250 mm de PVC perfurado, recoberto com brita, envolto por lona plástica) para um filtro gramado;
4. o filtro gramado (plano com inclinação de 2%) tem como principal função a remoção de parte dos poluentes;
5. em seguida, as águas são conduzidas para a vala de infiltração (plano com inclinação de 11,5%);

6. após o escoamento pela vala de infiltração, as águas são retidas na trincheira de infiltração;
7. em caso de extravasamento do sistema, as águas são encaminhadas para a rede de drenagem convencional existente. O extravasador foi instalado a 1,75 m de altura em relação ao fundo da trincheira.

No caso do PI, a brita e a areia foram lavadas antes da instalação. O mesmo não ocorreu no caso do sistema FVT.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados alguns detalhes construtivos do PI e do FVT, respectivamente.

Ensaio para determinação da capacidade de infiltração, da permeabilidade e do material pulverulento

O ensaio de granulometria e a determinação da escala granulométrica foram executados de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984b) e a NBR 6502 (ABNT, 1995). Os ensaios de compactação seguiram a NBR 6457 (ABNT, 1986a) e a NBR 7182 (ABNT, 1986b). Os índices físicos foram determinados de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984a).

De acordo com a ABNT de 1987, materiais pulverulentos são as partículas com dimensão inferior a 0,075 mm, e, de acordo com a ABNT de 1995, tais partículas de solo recebem a terminologia de “finos”. Logo, a determinação do teor de materiais pulverulentos é a determinação da porcentagem de finos — material capaz de colmatar estruturas de infiltração.

Os componentes dos sistemas PI e FVT (areia, brita e manta geotêxtil) foram avaliados comparando-se amostras pré-operação do sistema e após um período de funcionamento que compreendeu de 2 a 12 meses. A caracterização do teor de materiais pulverulentos na areia e na brita foi realizada de acordo com a normativa ABNT (1987) em amostras extraídas do interior das unidades. Na manta geotêxtil foram realizados ensaios de permissividade, espessura e gramatura em amostras retiradas do PI e amostras de geotêxtil novo. Este ensaio indica a quantidade de água que passa por um geotêxtil em condição isolada, permitindo verificar a taxa de infiltração conforme normativa D 4491-99a da *American Society for Testing and Material* (ASTM, 1999).

A determinação da capacidade de infiltração foi realizada por meio de ensaios de campo, utilizando o método denominado por poço invertido, conforme MDE (2000), e de duplo anel, conforme definido e descrito em Paiva e Paiva (2003). Nesses ensaios, a capacidade de infiltração instantânea foi tomada em intervalos de minutos. Assim, foi possível avaliar os valores da capacidade de infiltração inicial e após a saturação do solo (capacidade de infiltração mínima) para amostras duplicatas e triplicatas em cinco diferentes posições nas vizinhanças dos sistemas instalados (FVT e PI). A equação de Horton (1939) foi empregada para ajuste aos dados experimentais (Equação 1). A Equação 2 foi empregada para a determinação da taxa de infiltração pelos ensaios de poço invertido em diferentes profundidades, segundo apresentado por Cauduro

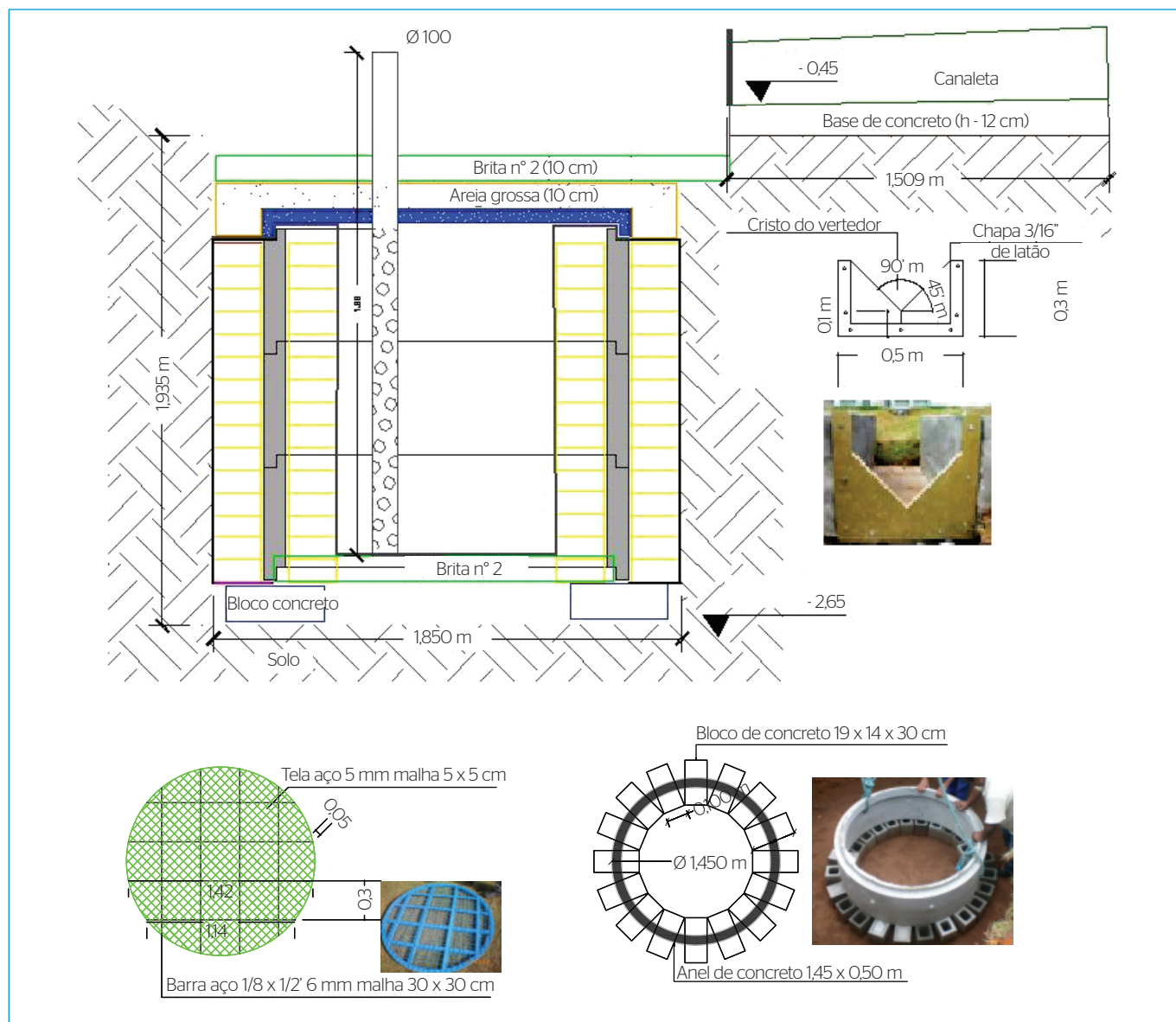
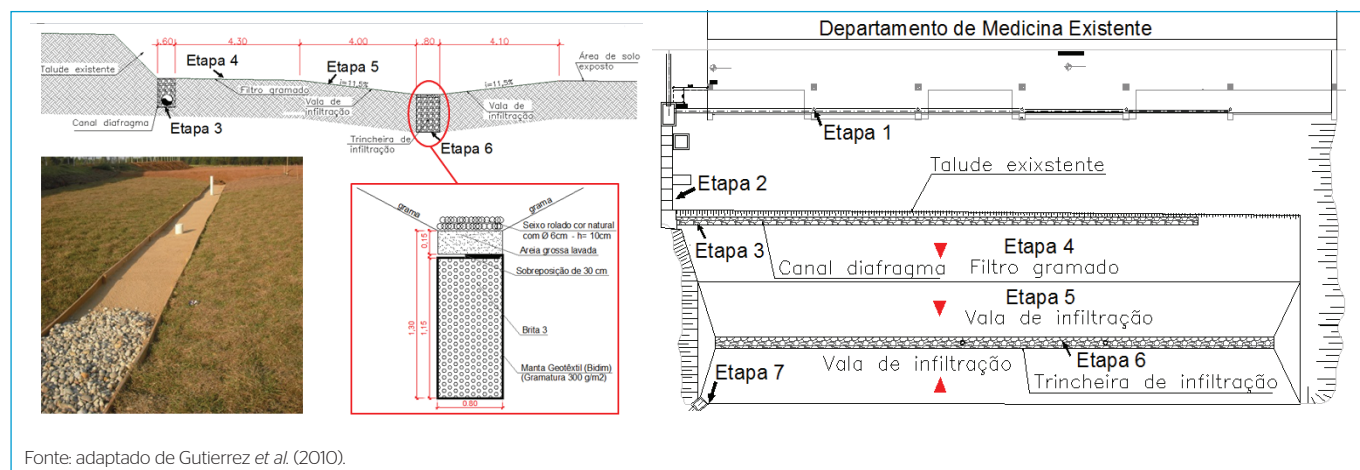


Figura 2 - Corte típico e detalhes construtivos do vertedor de entrada, do assentamento dos anéis e da tampa que constituiram parte do sistema do poço de infiltração construído em escala real nas dependências da Universidade Federal de São Carlos, *campus* de São Carlos (SP).



Fonte: adaptado de Gutierrez et al. (2010).

Figura 3 - Corte típico, detalhe do corte transversal da trincheira e planta do sistema filtro-vala-trincheira de infiltração construído em escala real nas dependências da Universidade Federal de São Carlos, *campus* de São Carlos (SP).

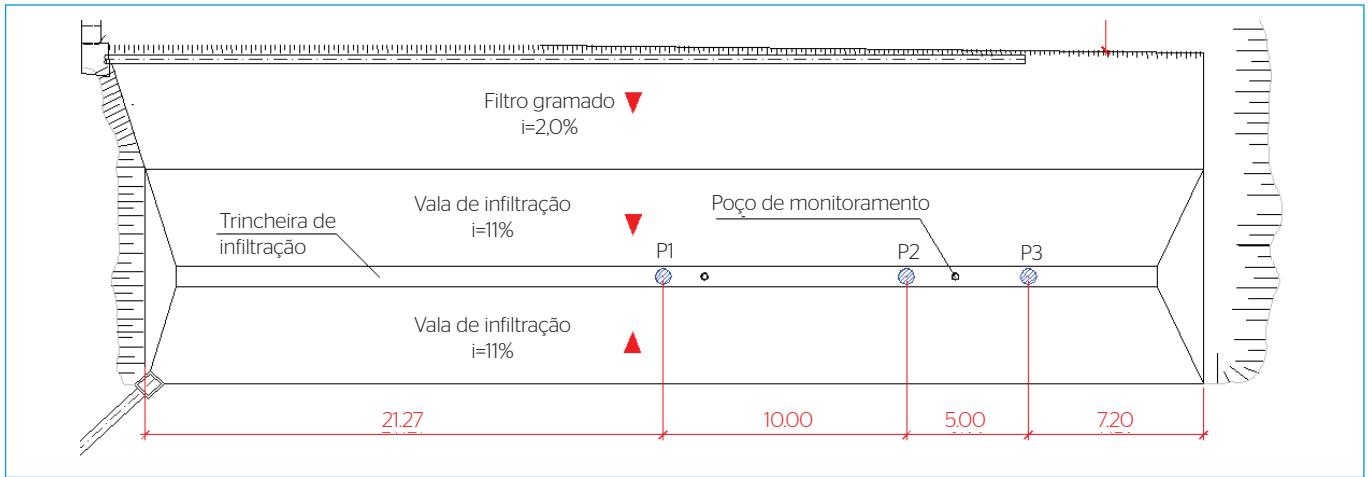


Figura 4 - Planta do sistema filtro-valeta-trincheira com indicativo dos pontos de amostragem para avaliação pós-uso.

e Dorfman (1990). A taxa de infiltração real no poço em escala plena (PI) foi determinada conforme equação 3, proposta por Pratt e Powell (1992), os quais determinam que a taxa de infiltração no solo deve ser calculada entre os níveis correspondentes a 75 e 25% da profundidade. A área de superfície lateral do PI foi considerada variável nos intervalos de medidas, correspondentes a cada medida de nível com o tempo e para cada ensaio em função do valor do nível de água máximo atingido.

Na trincheira, a vazão de infiltração foi calculada a partir da equação de continuidade, que relaciona vazão de entrada, vazão de saída e armazenamento em um reservatório (Equações 4 e 5). As taxas de infiltração da trincheira foram calculadas por meio da razão entre vazão e área de infiltração, composta pelo fundo da trincheira de infiltração e por suas paredes laterais com área variando com o nível de água (h) no tempo, conforme equação 6.

Em relação à avaliação das mantas, diferentes amostras foram extraídas do interior das unidades e a permeabilidade foi comparada à manta nova, antes da instalação. Assim, as amostras P1, P2 e P3 foram extraídas em diferentes posições e profundidades do sistema FVT após o período de 12 meses de operação do sistema. Da mesma forma, as amostras denominadas de G1 a G4 foram coletadas nos diferentes constituintes do sistema PI e em diferentes profundidades de amostragem após o período de oito meses de operação, constituindo amostras de geotêxtil da tampa, das paredes e do fundo do PI.

Por meio das Figuras 4 e 5, associadas às informações constantes nas Tabelas 2 e 3, pode-se verificar os pontos de amostragem de brita, areia e geotêxtil para avaliação pós-uso das unidades FVT e PI investigadas neste estudo.

$$f = fc + (fo - fc) \cdot e^{-Bt} \tag{1}$$

$$K = \frac{1,15 \cdot r \cdot (\log(h_1 + \frac{r}{2}) - \log(h_2 + \frac{r}{2}))}{t_1 - t_2} \tag{2}$$

$$q_{PI} = \frac{S_{75-25}}{a_{50} \cdot t_{75-25}} \tag{3}$$

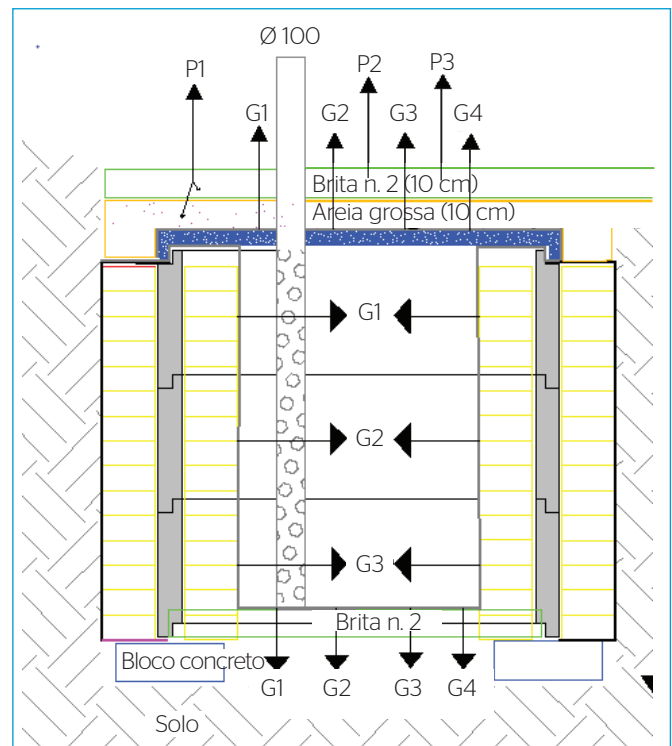


Figura 5 - Corte do sistema poço de infiltração com indicativo dos pontos de amostragem para avaliação pós-uso.

Tabela 2 - Localização e quantidade de ensaios de brita, geotêxtil e filtro de areia no filtro-valeta-trincheira.

Ensaio	Pontos	Nº de ensaios ou amostras no mesmo ponto	Profundidade aproximada de ensaio ou coleta de amostra
Brita	P1, P2 e P3	3	Superficial*, 0,30 a 0,60 m e 1,30 m
Filtro de areia	P1, P2 e P3	1	Superficial
Geotêxtil	P1, P2 e P3	4	Superficial, 0,30 a 0,60 m e 1,30 m

*amostras coletadas no nível do solo.

Tabela 3 - Localização e quantidade de ensaios de brita, geotêxtil e filtro de areia no filtro-vala-trincheira.

Ensaio	Pontos	Nº de ensaios ou amostras no mesmo ponto	Profundidade aproximada de ensaio ou coleta de amostra
Brita	P1, P2 e P3	1	Superficial*
Filtro de areia	P1, P2 e P3	1	Superficial
Geotêxtil	G1, G2, G3 e G4	4	Superficial (fundo e tampa), 0 a 0,50 m; 0,50 a 1,0 m; e 1,0 a 1,50 m

*amostras coletadas no nível do solo.

$$\frac{dV}{dt} = I - Q \tag{4}$$

$$\bar{Q} = \bar{I} \cdot \frac{(V_{t+1} - V_t)}{\Delta t} \tag{5}$$

$$q_{FVT} = \frac{\bar{Q}}{L_t(2 \cdot h + l_t)} \tag{6}$$

Em que: f é a taxa de infiltração (mm.hora⁻¹); f_c é a taxa de infiltração em condição de saturação (mm.hora⁻¹); f_o é a taxa de infiltração inicial (mm.hora⁻¹); t é o tempo (minutos); β é o parâmetro que deve ser determinado a partir de medições no campo (minuto⁻¹); r é o raio interno do poço invertido; $t_{1,2}$ são os intervalos de tempo entre os níveis $h_{1,2}$; q_{PI} é a taxa de infiltração no poço; S_{75-25} é o volume de água compreendido entre 75 e 25% da altura do ensaio; a_{50} é a área da superfície interna, incluindo a base (fundo); t_{75-25} é o tempo durante o qual o nível passa da posição 75 para 25% da altura; I é a vazão de entrada no sistema de infiltração (m³.s⁻¹); Q é a vazão de infiltração (m³.s⁻¹); V é o volume de água reservado (m³); t é o tempo medido (s); q_{FVT} é a taxa de infiltração na trincheira (m.s⁻¹); L_t é o comprimento da trincheira (m); l_t é a largura da trincheira (m); h é o nível médio de água (m), armazenado na trincheira no intervalo discretizado de tempo (Δt).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo foi classificado como areia média argilosa — SC, segundo a Classificação Unificada citada por Souza Pinto (2000) e pelo método Soil Conservation Service (SCS), conforme composição granulométrica apresentada na Tabela 4. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as curvas granulométricas da área do entorno dos sistemas FVT e PI, respectivamente, para diferentes profundidades em relação ao nível do solo. O teor de finos (material que passa na peneira nº 200 da ABNT), constituído de silte e argila, variou de 30 a 40% da razão mássica das amostras de solo, destacando o potencial de material disponível para arraste no interior dos sistemas de infiltração. Nesse caso, a adoção de medidas preventivas durante a fase de construção,

Tabela 4 - Composições granulométricas do solo em diferentes profundidades nas proximidades do sistema filtro-vala-trincheira e poço de infiltração.

	Profundidade (m)	Composição granulométrica (%)				
		Argila	Silte	Areia		
				Fina	Média	Grossa
FVT	0,80-1,00	31	7	23	29	10
	1,40-1,60	31	7	25	28	9
	2,00-2,20	30	6	25	30	9
PI	0-0,40	21	7	27	38	7
	0,60-0,80	21	9	27	32	11
	1,0-1,2	26	5	27	34	8
	1,4-1,6	28	6	26	32	8
	1,8-2	31	7	23	30	9

FVT: filtro-vala-trincheira; PI: poço de infiltração.

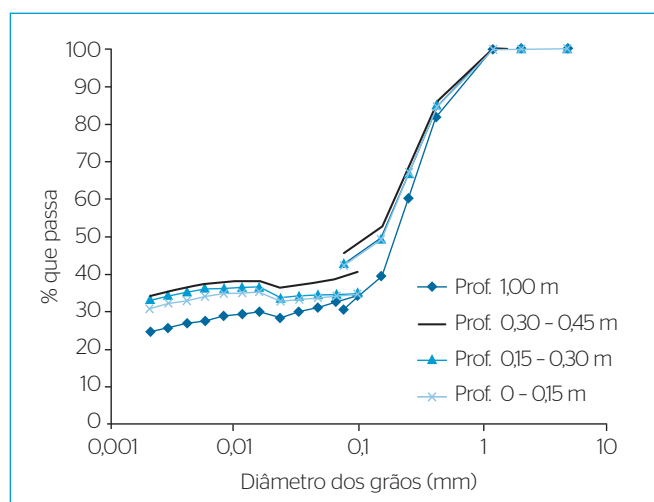


Figura 6 - Curva granulométrica de amostras coletadas nas proximidades do sistema filtro-vala-trincheira para diferentes profundidades em relação ao nível do solo.

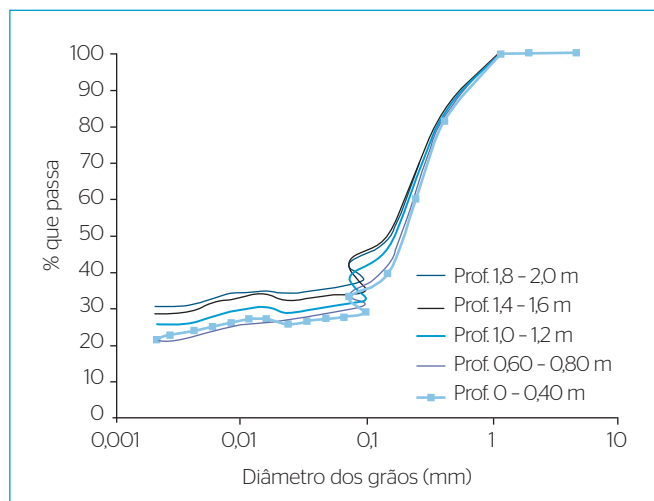


Figura 7 - Curva granulométrica de amostras coletadas nas proximidades do sistema poço de infiltração para diferentes profundidades em relação ao nível do solo.

bem como a instalação da manta geotêxtil no interior das unidades de infiltração, torna-se fundamental para a manutenção das condições de permeabilidade do solo.

Os problemas construtivos detectados na fase de instalação dos sistemas podem ser resumidos por:

1. falta de cadastro dos sistemas intervenientes (rede de água, coleta de esgoto, telefonia, etc.);
2. alocação e nivelamento das estruturas;
3. compactação do solo por máquinas utilizadas nas escavações;
4. construção em período chuvoso, conforme observado por Gutierrez *et al.* (2010).

O atraso na obra foi apontado como uma das principais justificativas a não observância das especificações constantes no projeto. Como consequência, a escavação da vala-trincheira e a instalação do geotêxtil, e posterior preenchimento com brita, ocorreram durante o período chuvoso. Tendo em vista o estado do solo exposto (sem estabilização ideal no entorno, com plantio de grama) e a erosão das áreas adjacentes, a proteção da trincheira foi realizada por meio da instalação de barreiras, constituídas por tábuas de madeira e lona plástica, com a finalidade de conter o arraste de solo para o interior da trincheira até o estabelecimento da grama, plantada sobre a vala que compõe o FVT. Essas especificações constavam no detalhamento do projeto, todavia a falta de tradição e de conhecimento acerca das especificidades necessárias a construção dessas estruturas dificultou sua implantação.

Ao contrário, a lavagem dos materiais de preenchimento (areia e brita) não fez parte das especificações de projeto do sistema FVT. No caso do PI, a areia e brita foram previamente lavadas. A Figura 8 apresenta o teor de material pulverulento presente em amostras de brita e areia nos sistemas FVT e PI, coletadas em diferentes profundidades e com diferentes tempos de operação dos sistemas investigados. Pela Figura 8 pode-se observar o efeito da lavagem inicial dos agregados na presença de material pulverulentos, quando comparados os dois sistemas. O FVT, que não teve seus agregados lavados, tem material pulverulento detectado no início da operação, ao contrário do PI. Assim, no decorrer da operação do PI observa-se o efeito de retenção de finos nos agregados dispostos sobre a tampa de entrada do PI. Ao contrário, observa-se a lavagem dos agregados no FVT com o passar do tempo. Comparando a evolução do material pulverulento no PI, fica evidente que os agregados possuem função de retenção no início da operação, sendo os finos posteriormente arrastados da areia para a brita, dispostos nessa ordem em função do sentido de fluxo. Assim, resta ao geotêxtil a função de prevenir o arraste de finos para o interior do sistema. Acredita-se que a quantidade de material pulverulento encontrado na areia do PI após 4 meses de operação (16%) deve-se à concentração do fluxo

escoado para uma pequena área de infiltração (sistema com controle localizado), ao contrário do que ocorre no FVT (sistema de controle linear).

Os ensaios apresentados na Figura 9 referem-se às análises de permeabilidade do geotêxtil antes da instalação e após a operação dos sistemas, considerando a variação relativa entre as taxas inicial e posterior à operação. O efeito do transporte de finos para o interior das estruturas de infiltração investigadas (FVT e PI) foi avaliado por meio dos ensaios de infiltração obtidos nas estruturas em escala real, conforme metodologia descrita, bem como por meio da medida de permeabilidade das mantas instaladas nessas unidades.

Na Figura 10 são apresentados os valores de permeabilidade do geotêxtil e as respectivas variações em relação à condição original.

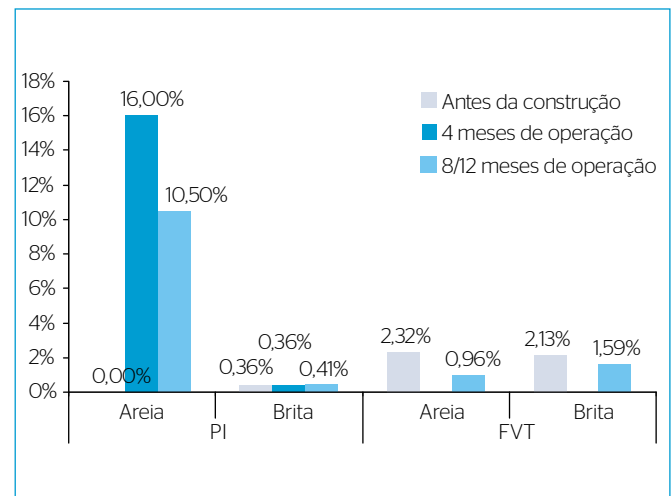


Figura 8 - Percentual médio de material pulverulento presente em diferentes amostras de areia e brita dos sistemas filtro-vala-trincheira e poço de infiltração para diferentes tempos de operação.

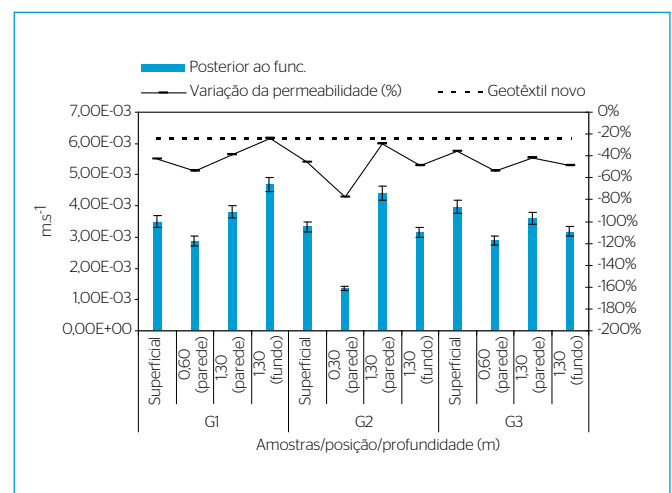


Figura 9 - Permeabilidade do geotêxtil antes da instalação e posterior à operação do sistema filtro-vala-trincheira. Amostras retiradas após doze meses de operação.

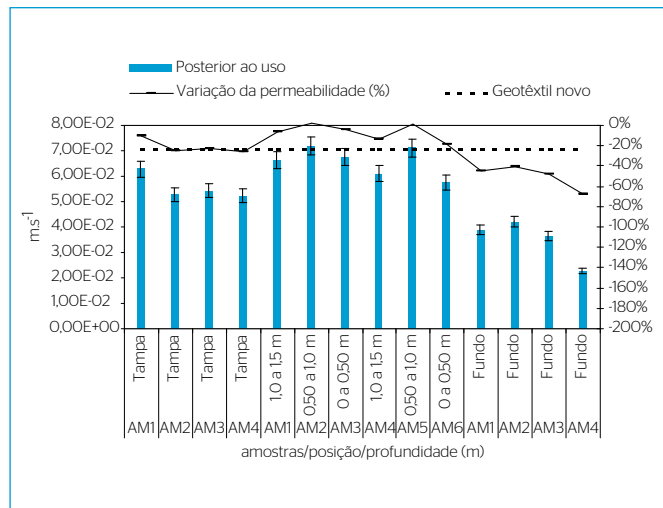


Figura 10 - Permeabilidade do geotêxtil antes da instalação e posterior à operação do sistema poço de infiltração. Amostras retiradas após oito meses de operação.

Verifica-se claramente o decréscimo da permeabilidade do geotêxtil nas amostras coletas após o funcionamento para as duas estruturas investigadas (FVT e PI), quando comparadas aos valores de permeabilidade da manta nova. No caso do sistema FVT, as amostras da parede sofreram maior redução (de 30 a 90%), ao contrário do preconizado pela literatura, que aponta a colmatação do fundo como responsável pela diminuição da capacidade de infiltração dos sistemas e recomenda a desconsideração dessa área no projeto de sistemas de infiltração. Já no caso do PI, verifica-se que a maior perda deu-se nas amostras coletadas no fundo da estrutura de infiltração (de 40 a 70%). Nos dois casos atribuiu-se o transporte de finos como o responsável pela diminuição da capacidade de infiltração da manta geotêxtil. Acredita-se que o sentido do fluxo de entrada (água pluvial escoada) tenha influência no depósito de finos transportados, já que no sistema FVT a entrada se deu ao longo da parede lateral. Vale mencionar que, ainda que houvesse redução incontestável,

Tabela 5 - Análise estatística descritiva dos ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema filtro-vala-trincheira.

	Duplo anel (m.s ⁻¹)		Poço invertido (m.s ⁻¹)		Taxa de infiltração real* (m.s ⁻¹)
	Taxa t=0	Taxa última [†]	Taxa t=0	Taxa última [†]	q _{FVT}
Mínimo	1,66E-05	2,78E-06	1,80E-05	1,30E-05	4,17E-06
1º quartil	2,42E-05	3,32E-06	2,76E-05	2,00E-05	7,59E-06
Média	3,32E-05	6,31E-06	3,51E-05	2,30E-05	1,00E-05
3º quartil	5,94E-05	8,75E-06	4,73E-05	2,72E-05	1,03E-05
Máximo	7,39E-05	9,05E-06	2,67E-04	3,05E-05	1,77E-05
-IC95%	2,20E-05	3,61E-06	6,68E-05	1,77E-05	8,22E-06
Média	4,10E-05	6,06E-06	7,19E-05	2,28E-05	1,01E-05
+IC95%	6,00E-05	8,50E-06	7,70E-05	2,79E-05	1,19E-05
Desvio semi-interquartilico relativo (-)	5,32E-01	4,30E-01	2,81E-01	1,57E-01	1,35E-01

[†]referente às medidas da taxa após saturação do solo, sem variação no tempo; *medida no sistema em escala real; (-): adimensional; IC95%: intervalo de confiança de 95%; q_{FVT} é a taxa de infiltração na trincheira (m.s⁻¹).

Tabela 6 - Análise estatística descritiva dos ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema poço de infiltração.

	Duplo anel (m.s ⁻¹)		Poço invertido (m.s ⁻¹)		Taxa de infiltração real* (m.s ⁻¹)
	Taxa t=0	Taxa última [†]	Taxa t=0	Taxa última [†]	q _{PI}
Mínimo	1,67E-05	1,11E-06	3,84E-05	2,30E-05	1,90E-06
1º quartil	3,33E-05	2,22E-06	6,47E-05	2,46E-05	3,01E-06
Média	5,00E-05	3,33E-06	9,10E-05	2,61E-05	4,73E-06
3º quartil	7,50E-05	8,40E-06	1,49E-04	2,63E-05	4,84E-06
Máximo	2,17E-04	1,18E-05	2,06E-04	2,65E-05	7,20E-06
-IC95%	2,07E-05	2,06E-06	1,47E-05	2,30E-05	2,92E-06
Média	7,14E-05	5,36E-06	1,12E-04	2,52E-05	4,22E-06
+IC95%	1,22E-04	8,65E-06	2,09E-04	2,74E-05	5,52E-06
Desvio semi-interquartilico relativo (-)	4,17E-01	9,27E-01	4,62E-01	3,33E-02	1,93E-01

[†]referente às medidas da taxa após saturação do solo, sem variação no tempo; *medida no sistema em escala real; (-): adimensional; IC95%: intervalo de confiança de 95%; q_{PI} é a taxa de infiltração no poço.

conforme mostram os resultados das Figuras 7 e 8, a permeabilidade da manta geotêxtil é da ordem de 100 a 1.000 vezes a permeabilidade do solo saturado (Tabelas 5 e 6), reafirmando a importância da instalação do geotêxtil para manutenção da taxa de infiltração do solo.

Nos ensaios de campo duplo anel e poço invertido a taxa última de infiltração foi calculada na fase assintótica, visando identificar a taxa mínima, que tende à condição de saturação para $t \rightarrow \infty$, cujos resultados de um ensaio são exemplificados na Figura 11. O ensaio de poço invertido obedeceu a um tempo de umedecimento prévio de 24 horas, conforme Barbassa *et al.* (2009). Os resultados foram ajustados por

regressão não linear para obtenção dos parâmetros f_0 , f_c e β , conforme equação de Horton (equação 1), e permitiram analisar o tempo em que ocorre a taxa última de infiltração para cada um dos pontos analisados. As Tabelas 5 e 6, bem como as Figuras de 12 a 15, apresentam os resultados da análise estatística descritiva para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e para as medidas da taxa de infiltração em escala real nos sistemas FVT e PI, respectivamente. Nas Figuras 16 e 17 foram destacadas as taxas últimas obtidas para os ensaios de campo e para as medidas em escala real para os sistemas FVT e PI, respectivamente. De maneira geral, a

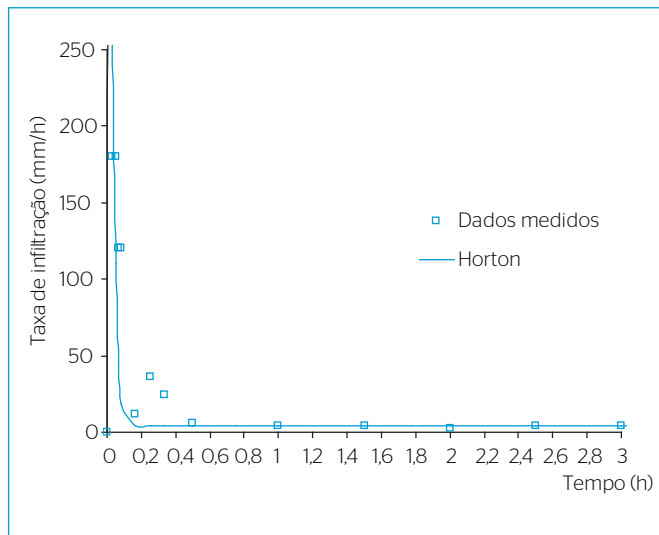


Figura 11 – Resultado ilustrativo de ensaio típico visando avaliação das condições de infiltração por meio de ensaio de duplo anel, ajustados por regressão não linear para obtenção dos parâmetros f_0 , f_c e β , conforme modelo proposto por Horton (1939).

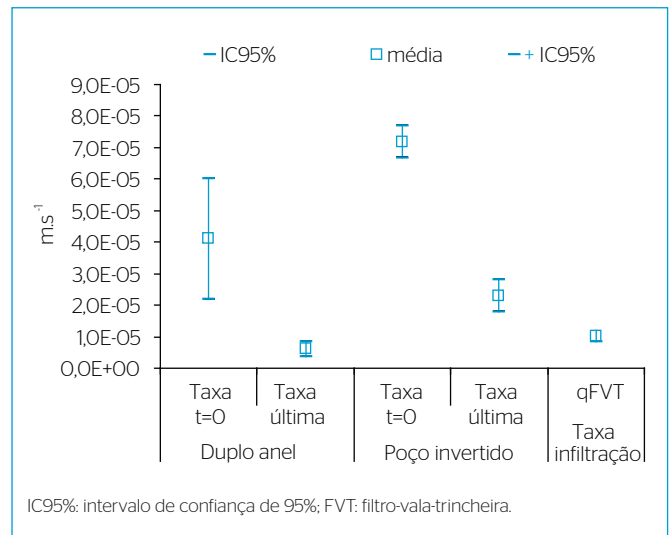


Figura 13 – Distribuição para intervalo de confiança de 95% para a média dos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema filtro-vala-trincheira.

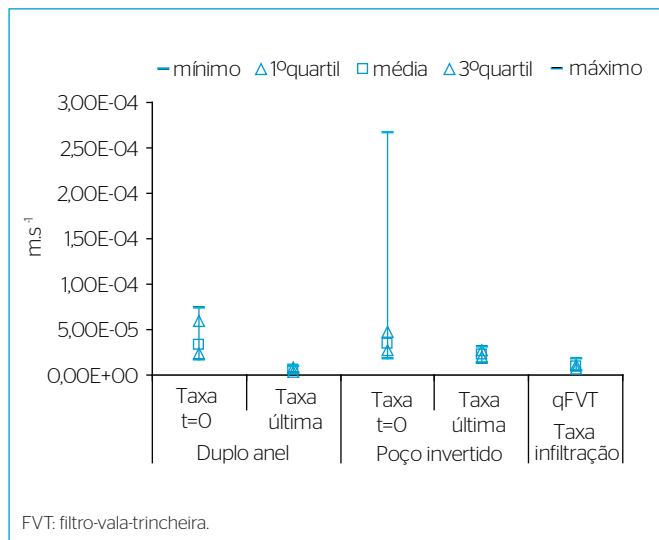


Figura 12 – Distribuição estatística dos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema filtro-vala-trincheira.

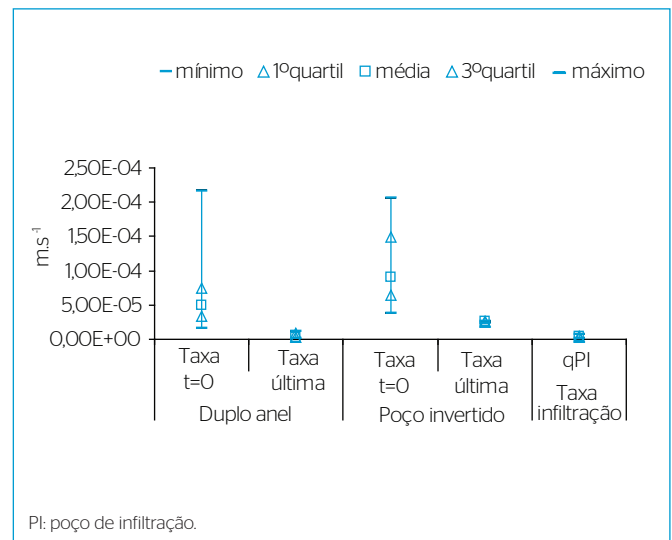


Figura 14 – Distribuição estatística dos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema poço de infiltração.

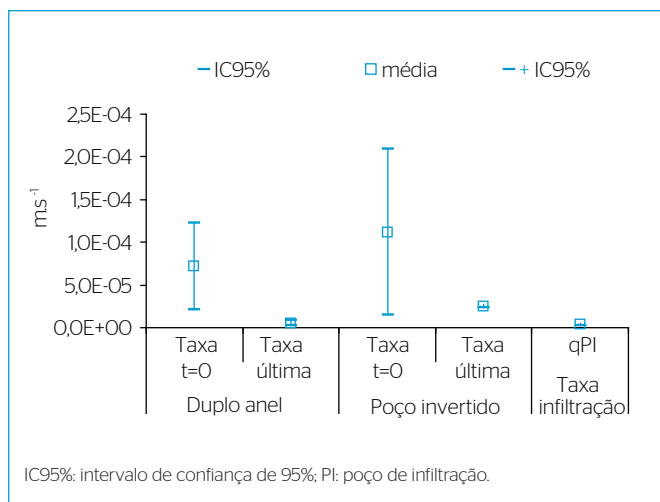


Figura 15 - Distribuição para intervalo de confiança de 95% para a média dos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema poço de infiltração.

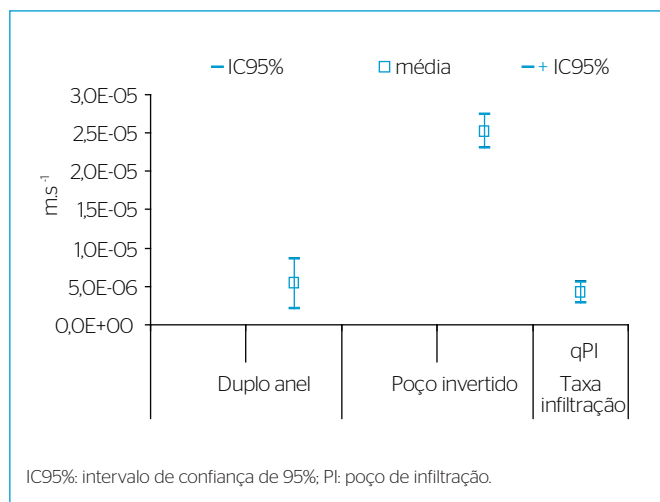


Figura 17 - Distribuição para intervalo de confiança de 95% para a média das taxas de infiltração última referentes aos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema poço de infiltração.

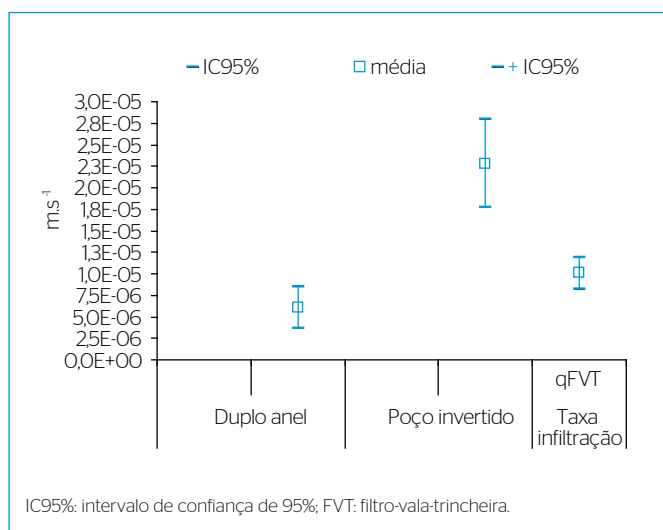


Figura 16 - Distribuição para intervalo de confiança de 95% para a média das taxas de infiltração última referentes aos pontos amostrados para os ensaios de infiltração de campo (duplo anel e poço invertido) e das medidas da taxa de infiltração em escala real no sistema filtro-vala-trincheira.

análise dos resultados evidencia a diferença entre a taxa inicial de infiltração e a taxa última, com grande dispersão de dados nas taxas iniciais (t=0), caracterizados por desvios semi-interquartílicos relativos à média da ordem de 40 a 50% para os ensaios de duplo anel e de 30 a 45% para os ensaios de poço invertido. Em relação à taxa última, os ensaios com duplo anel apresentaram maiores dispersões, com desvios semi-interquartílicos relativos à média da ordem de 45 a 90%. Acredita-se que a dispersão dos dados foi fortemente influenciada pelas variações de compactação do solo na superfície, as quais apresentaram grau de compactação da ordem de 80 a

90%, considerando a razão entre massas específicas secas (aparente e máxima). Nos ensaios de poço invertido os desvios semi-interquartílicos relativos à média foram da ordem de 15 a 30%.

Devido ao método, inerente a cada ensaio de campo (duplo anel e poço invertido), esperava-se que as camadas superficiais de solo apresentassem valores menores de infiltração, dada a compactação medida do solo. Todavia, verificou-se que os ensaios de duplo anel, na condição de capacidade de infiltração última, podem ser considerados estatisticamente iguais aos resultados obtidos pelas medidas da taxa de infiltração nos sistemas em escala real, tanto para o FVT quanto para o PI (Figuras 16 e 17).

Destaca-se que o objetivo maior da comparação entre os ensaios de campo e os valores de taxa de infiltração obtidos nas unidades em escala real não foi o de estabelecer o método mais apropriado de avaliação da permeabilidade, mas sim fornecer uma base racional que permitisse a comparação do efeito do transporte de finos para o interior das unidades em escala real. Nesse sentido, os valores medidos em escala real assemelharam-se àqueles obtidos em ensaios de infiltração em superfície, cujo grau de compactação medido foi da ordem de 80 a 90% (ensaios de duplo anel).

Dessa forma, constatou-se que houve o transporte de finos para o interior das unidades, a despeito das barreiras físicas instaladas e dos cuidados para retenção desse material, e que este influenciou nas medidas de permeabilidade do solo e da manta geotêxtil. Ademais, atribuiu-se também como causa da colmatação do solo e da manta geotêxtil a construção durante o período chuvoso, o que, devido à umidade e ao trânsito de maquinário, provocou a compactação adicional do solo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados apresentados neste artigo, pôde-se concluir que:

- apesar das proteções instaladas, houve transporte de finos para o interior das unidades investigadas, demonstrando que os finos transpassaram as camadas de areia, brita e manta instaladas como dispositivos de proteção;
- o material transportado interferiu na permeabilidade da manta geotêxtil, instalada como uma das medidas de proteção dos sistemas

contra colmatação do solo, resultando em redução de 30 a 90% para o FVT e de 40 a 70% para o PI;

- o material fino transportado interferiu na taxa de infiltração real das unidades (média de $4,7 \times 10^{-6}$ a 10^{-5} m.s⁻¹), sendo esta comparada à permeabilidade do mesmo solo (classificado como areia média argilosa — SC) na superfície com grau de compactação de 80 a 90% (média de 3×10^{-6} a 6×10^{-6} m.s⁻¹), constituindo em valores estatisticamente iguais para o intervalo de confiança de 95% para a média.

REFERÊNCIAS

- ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. (1996) *Ensaio de Permeabilidade em Solos: orientações para sua execução no campo*. 3. ed. Boletim 04. São Paulo: ABGE.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984a) *NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984b) *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986a) *NBR 6457: Preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio)*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986b) *NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1987) *NBR 7219: Agregados: Determinação do teor de materiais pulverulentos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1995) *NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASTM - American Society for Testing and Material. (1999) *D 4491-99a: Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity*.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2005) *Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH. BRASIL. Ministério das Cidades. (2006) Programa Drenagem Urbana Sustentável. *Manual para apresentação de proposta*. Brasília: Ministério das Cidades. 23 p.
- CAUDURO, F.A. & DORFMAN, R. (1990) *Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem*. Porto Alegre: PRONI/IPH-UFRGS.
- CEDERGREN, H.C. (1988) *Seepage, drainage, and flow nets*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- EPA - Environmental Protection Agency. (1999a) *Storm Water Technology Fact Sheet Infiltration Trench*. Disponível em: <<http://www.epa.gov/owm/mtb/infiltrenc.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2011.
- EPA - Environmental Protection Agency. (1999b) *Storm Water Technology Fact Sheet Vegetated Swale*. Disponível em: <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2002_06_28_mtb_vegswale.pdf>. Acesso em: 01 maio 2011.
- FRANCISS, F.O. (1980) *Hidráulica de meios permeáveis: escoamento em meios porosos*. Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo.
- GUTIERREZ, L.A.R.; LUCAS, A.H.; ANGELINI SOBRINHA, L.; BARBASSA, A.P.; MORUZZI, R.B.; TEIXEIRA, B.A.N. (2010) Problemas construtivos em um sistema vala-trincheira de infiltração. *In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14 Anais...* Porto.
- HORTON, R.E. (1939) Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. *Transactions American Geophysical Union*, v. 20, p. 693-711.
- LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. (1979) *Soil Mechanics, SI version*. Massachusetts Institute of Technology. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- LOWNDES, M.A. (2000) *The Wiscosin Storm Water Manual: Infiltration basins and trenches*. Wiscosin: Wiscosin Department of Natural Resources, University of Wiscosin. 15 p.
- LOYD, S.D.; WONG, T.H.F.; PORTER, B. (2002) The planning and construction of an urban stormwater management scheme. *Water Science and Technology*, v. 45, n. 7, p. 1-10.

MDE – Maryland Department of the Environment. (2000) Maryland Stormwater Design Manual. Center for Watershed Protection. v. II. Maryland: Department of the Environment.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Orgs.) (2003) *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH. 628 p.

PRATT, C.J.; POWELL, J.J.M. (1992) *Design of infiltration systems: the new UK approach*. International conference on innovative technologies in domain of urban storm water drainage-Novatech 1992. Lyon: p.155-164.

SHUELER, T.R. (1987) *Controlling Urban Runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs*. Department of Environmental Programs. Washington: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board.

SOUZA PINTO, C. (2000) *Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos. 247 p.

URBONAS, B.; STAHRÉ, D. (1993) *Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management*. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 449 p.