

Artigo Técnico

Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção

Stormwater source control with infiltration wells under a new conception

Thays Santos Ferreira¹, Ademir Paceli Barbassa², Rodrigo Braga Moruzzi^{3*}

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar uma nova concepção de poço de infiltração como técnica de controle de drenagem pluvial na fonte. Esse poço, denominado P-GHidro, possui furos na parede dos anéis de concreto, camada de brita externa aos anéis para melhorar a distribuição de água, pré-filtro de geotêxtil na tampa e filtros adicionais no fundo e na lateral, entre a brita e o solo. Usou-se como referência o poço de infiltração comumente empregado em São Carlos, São Paulo (P-SC), cuja construção foi realizada com anéis de concreto justapostos ao solo sem furos laterais e sem pré-filtro. Foram realizados seis ensaios de chuvas simuladas para cada poço de infiltração. Os dados experimentais de vazão de água infiltrada foram modelados pelo método de Puls. A condutividade hidráulica, constante ou variada, foi empregada como parâmetro de calibração do modelo aos dados experimentais; o ajuste foi avaliado por meio dos coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Sutcliffe (NS). O P-GHidro apresentou melhor desempenho na infiltração de água pluvial, com volume armazenado 25% menor e tempos de esvaziamento 4% menores que os do P-SC. A modelagem apresentou boa representatividade dos dados experimentais para condutividade hidráulica constante (média de R^2 de 0,92 e de NS de 0,56) e melhor ainda para condutividade hidráulica variada (média de R^2 de 0,97 e de NS de 0,97).

Palavras-chave: técnicas compensatórias; poço de infiltração; método de Puls.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate a new concept of infiltration well as in loco stormwater drainage source control. This infiltration well, namely P-GHidro, has holes in the wall of the concrete rings, layer of gravel external to the rings in order to improve the water distribution, a geotextile prefilter on the cover, and additional filters on the bottom and on the sides between the gravel and the soil. An infiltration well common in San Carlos (P-SC), São Paulo, Brazil, was used as reference, and its construction uses concrete rings juxtaposed to the soil without side holes or prefilter. Six tests of simulated rain were performed for each design infiltration well. The experimental data of infiltrated water flow were modeled by Puls method. The hydraulic conductivity, constant or variable, was used as a model adjustment parameter to the experimental data, and the adjustment was assessed using the coefficients of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe (NS). P-GHidro had a better performance in the stormwater infiltration, with stored volume and emptying times smaller than the P-SC. The modeling showed good adjustments to the experimental data for constant hydraulic conductivity (average $R^2 = 0.92$ and $NS = 0.56$) and even better adjustments for variable hydraulic conductivity (average $R^2 = 0.97$ and $NS = 0.97$).

Keywords: compensatory techniques; infiltration well; Puls method.

INTRODUÇÃO

A urbanização não planejada, acompanhada da impermeabilização do solo, do desmatamento e das ocupações das áreas de risco, alterou as características do ambiente natural de tal forma, que desencadeou o surgimento de graves problemas de drenagem urbana, na medida em que diminui a infiltração do solo e aumenta a velocidade do escoamento superficial.

Com o objetivo de mitigar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, a partir da década de 1970, deu-se o início efetivo do uso de técnicas compensatórias (TCs) em drenagem urbana, também

conhecidas como Best Management Practices (BMPs). Alternativamente à abordagem higienista, esses recursos utilizam combinações tecnológicas a fim de evitar a transferência rápida da água a jusante e facilitar a infiltração (BAPTISTA *et al.*; 2005).

No cenário internacional, algumas pesquisas sobre TCs foram recentemente desenvolvidas. Apt (2010) estudou a remoção de poluentes presentes em águas pluviais após passarem por telhado verde, concreto poroso e outras TCs; Bourgogne (2010) avaliou a operação, o monitoramento e a gestão de bacias de retenção em uma região da França; Coughlin *et al.* (2012) avaliaram a infiltração e a colmatação

¹Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – São Carlos (SP), Brasil.

²Professor titular do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar – São Carlos (SP), Brasil.

³Livre-Docente e Professor adjunto III do Departamento de Planejamento da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Rio Claro (SP), Brasil.

*Autor correspondente: rromuzzi@rc.unesp.br

Recebido: 14/03/2016 – Aceito: 03/03/2017 – Reg. ABES: 161116

em pavimentos permeáveis de concreto; Chahar *et al.* (2012) estudaram trincheiras de infiltração; Graf (2015) avaliou a utilização de poços de infiltração no Arizona.

No Brasil, há estudos sobre trincheiras de infiltração apresentados por Lima (2009) e Lucas *et al.* (2013) modelaram um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração; Tecedor *et al.* (2015) modelaram um plano de infiltração; e Moruzzi *et al.* (2016) estudaram a remoção de material particulado em canal gramado.

No Brasil, especificamente poços de infiltração foram investigados por Reis *et al.* (2008); Reis & Ilha (2014); Carvalho (2008; 2013); Barbassa *et al.* (2014); e Lucas *et al.* (2015).

A concepção das TCs que se baseiam na infiltração deve considerar as características do solo, por ser esse o exutório da água pluvial, e avaliar possível contaminação do aquífero freático e evitar problemas sanitários, tal como apontado por Baptista *et al.* (2005). Além disso, aspectos construtivos, como material de suporte das paredes e sua permeabilidade, a existência ou não de pré-tratamento a montante do poço e a distribuição de água pelas paredes, podem afetar o desempenho do poço (CARVALHO, 2008; BARBASSA *et al.*, 2014; REIS *et al.*, 2008).

Atualmente, legislações municipais, tais como a de São Carlos, São Paulo (SÃO CARLOS, 2011), obrigam os proprietários de lotes a implantarem poços de infiltração para controle de cheias. A legislação de São Carlos (2011) estabelece, resumidamente, que o volume do poço de infiltração deve ser de 5 L/m² de área impermeabilizada. Não são apresentados outros parâmetros de projeto que visem à proteção ambiental, como os relacionados ao tipo de solo, à qualidade da água, ao nível do aquífero freático etc. Na prática, os poços são construídos com anéis de concreto sobrepostos entre si e justapostos ao solo, sem furos e sem pré-tratamento do escoamento superficial predial direto. A água superficial é lançada diretamente no interior do poço.

Esta pesquisa visou avaliar experimentalmente e pelo método de Puls o comportamento hidrológico de uma nova concepção de poço de infiltração (P-GHidro), o qual prevê anéis de concreto perfurados e brita entre os anéis e o solo para promover a infiltração por toda a parede, além do fundo, e pré-filtro de geotêxtil sobre a tampa para remoção de material particulado. Da mesma forma, avaliou-se um poço de infiltração, denominado P-SC, concebido conforme legislação de São Carlos (2011). Objetivou-se ainda identificar o papel das áreas do fundo e das paredes dos poços na infiltração da água por meio de modelagem, pois experimentalmente seria bastante difícil fazê-lo. Investigaram-se duas representações de permeabilidade do solo em relação ao tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS

A nova concepção proposta neste estudo foi avaliada com base em poço de infiltração dimensionado e construído conforme São Carlos (2011),

com volume útil de 5 L/m² de área impermeabilizada. Os poços P-SC e P-GHidro foram instalados no *campus* da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo. O solo local foi caracterizado por meio de ensaios granulométricos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984) e classificado de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995). Os ensaios indicaram areia média argilosa, com média de 18% de areia fina, 40,4% de areia média, 36,2% de argila e parcelas menos significativas de silte e areia grossa.

A área de contribuição do P-SC é de 287,80 m², correspondente à área impermeabilizada, resultando em um volume útil mínimo de 1,44 m³. Foram utilizados anéis de concreto pré-moldados na construção desse poço, totalizando um volume útil de 1,94 m³. Para efeito de comparação, na construção do P-GHidro utilizou-se o mesmo número de anéis de concreto. Esse poço, no entanto, possui volume útil de 2,26 m³ devido à camada de brita externa aos anéis.

Os poços tiveram seu desempenho medido por meio dos parâmetros tempo de esvaziamento, volume de água no interior do poço e volume infiltrado.

Características construtivas e funcionamento dos poços de infiltração

O P-SC foi construído conforme demonstrado na Figura 1A. Foram utilizados 5 anéis de concreto de 1,10 m de diâmetro interno. Apenas quatro anéis correspondem ao volume útil do poço, pois o extravasor situa-se imediatamente acima do quarto anel. À medida que o solo foi retirado do fundo, desceram-se os anéis de modo que ficassem justapostos ao solo lateral (Figura 1B). A tubulação que conecta a instalação predial ao poço penetra a parede do anel de concreto para acesso ao seu interior (Figura 1C). No P-SC, a água pluvial é lançada diretamente no interior do poço a uma altura de 2 m sobre uma camada de 10 cm de brita nº 2 no fundo antes de infiltrar. Após atingir o nível máximo, a água pluvial excedente segue para o extravasor, que a leva ao sistema de drenagem convencional (sarjeta).

O P-GHidro foi desenvolvido pelo Grupo de Estudos em Sistemas Hídricos Urbanos (GHidro), da UFSCar (Figura 2), com o objetivo de aumentar a distribuição da água nas paredes do poço, facilitando sua infiltração. A construção desse poço se deu do seguinte modo:

- o solo foi escavado até a profundidade de 2,5 m com 1,5 m de diâmetro;
- foram dispostos bloquetes de concreto (12 × 22 × 6 cm) circularmente para servir como base e dar estabilidade para os anéis de concreto de 1,10 m de diâmetro interno – os espaços entre os bloquetes foram preenchidos com brita (camada de 6 cm);
- foi colocada manta geotêxtil no fundo sobre os bloquetes; colocaram-se os anéis de concreto dentro do solo escavado, a manta lateral justaposta ao solo e a brita no espaço entre a manta os anéis (Figura 2B);

- sobre o quarto e último anel foi colocada a tampa perfurada, mostrada na Figura 2C, uma camada de 15 cm de brita sobre a tampa e a manta geotêxtil por cima;
- adicionou-se pequena camada de brita sobre a manta, apenas para fixá-la no local. A manta utilizada foi de geotêxtil não tecido, com gramatura 400 g/m² e abertura de filtração de 80 µm. Nesse poço, além dos 2 m de profundidade, há ainda 0,15 m correspondentes à camada de brita sobre a tampa e o filtro em relação à superfície do solo. Desse modo, o nível de água (NA) pode chegar a 2,15 m sem extravasamento da estrutura.

No P-GHidro, antes de entrar no poço, a água passa pelo filtro de geotêxtil e pela camada de brita da tampa, conforme Figura 2A. Os filtros de geotêxtil (parede, fundo e tampa) têm a função de reter o material particulado presente no escoamento superficial, evitando, assim, a colmatagem prematura do sistema. Nesse poço, além da infiltração pelo fundo, existem furos nas laterais dos anéis de concreto para que a infiltração ocorra também através da parede. A brita lateral colocada entre os anéis e o geotêxtil da parede tem a função de facilitar o espalhamento da água em toda a superfície da parede.

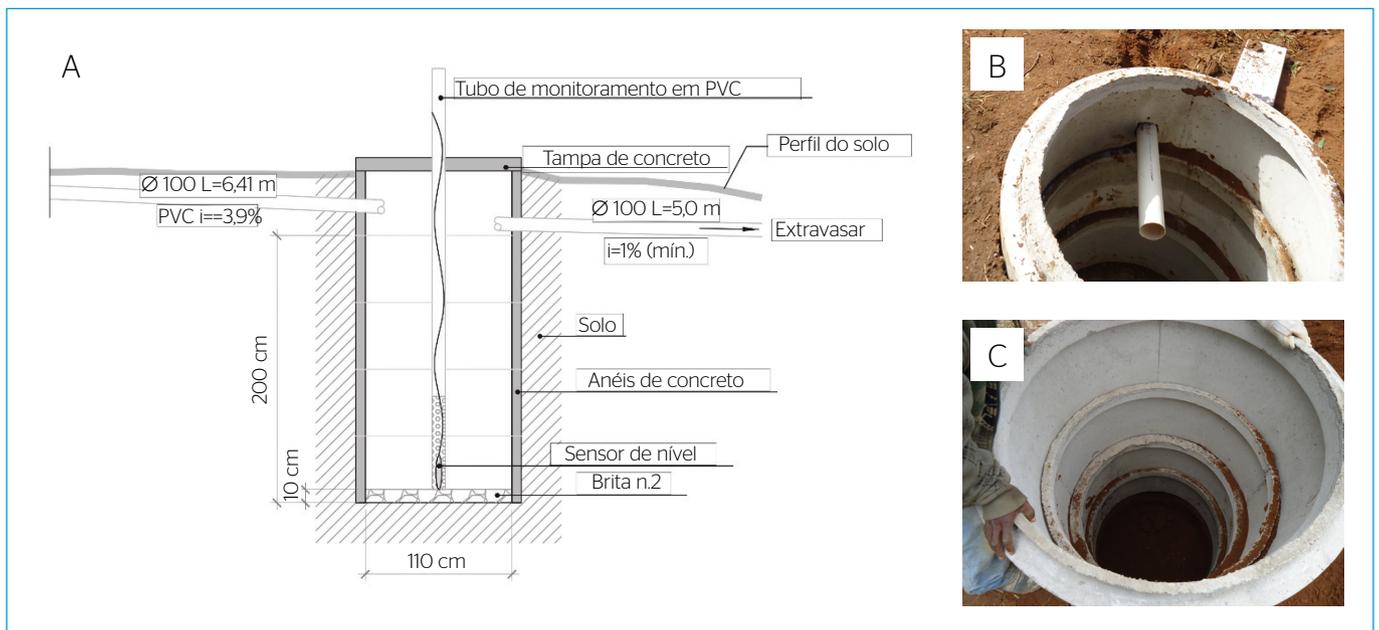


Figura 1 - (A) Corte P-SC; (B) colocação dos anéis; (C) tubulação de entrada.

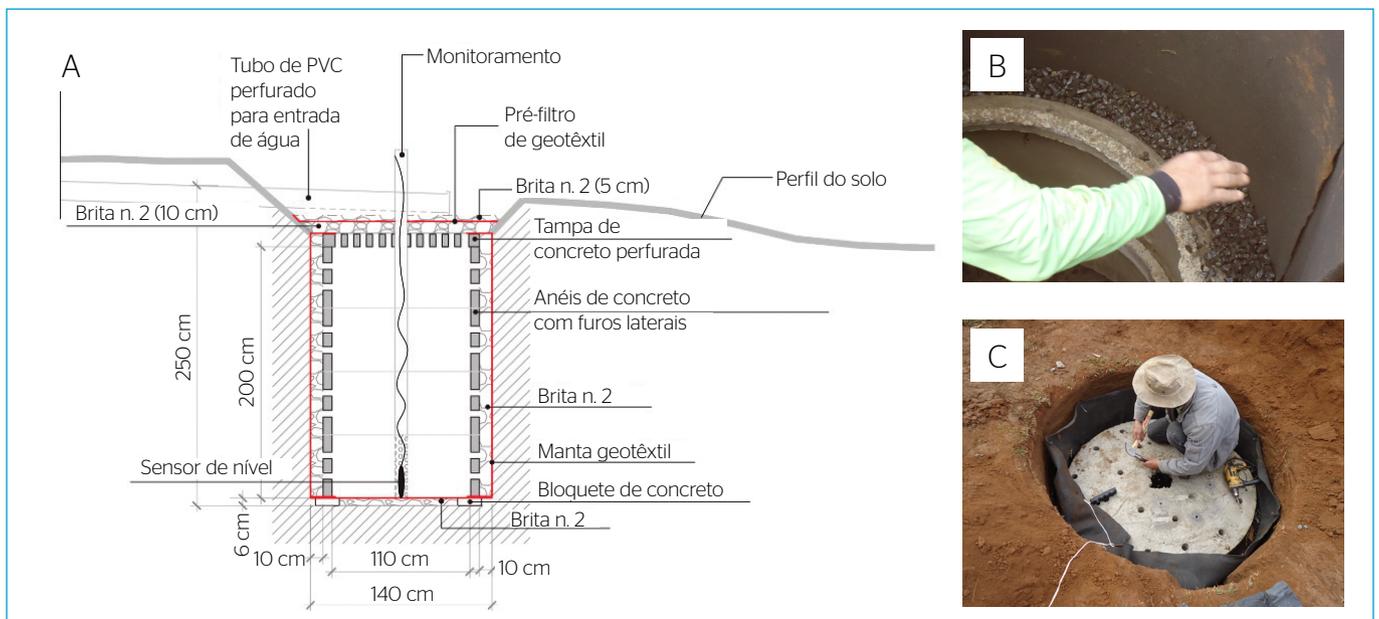


Figura 2 - (A) Corte P-GHidro; (B) brita na lateral dos anéis; (C) tampa de concreto perfurada.

Simulação de chuvas e monitoramento dos poços

Nas simulações do escoamento superficial direto da água de chuva foram utilizados um reservatório de polietileno de 2.000 L conectado a um tubo de PVC de 55 mm e um registro de esfera para efetuar a descarga de água nos poços. Essas descargas, com registro totalmente aberto, foram obtidas pelo medidor do NA em função do tempo registrado por um sensor instalado em seu interior, conforme Moruzzi *et al.* (2016). O hidrograma resultante é mostrado na Figura 3. Realizaram-se três ensaios em cada um dos poços em 2014 e três ensaios em 2015, sob as mesmas condições de descarga. A descarga de água no P-SC foi feita na canaleta da instalação predial pluvial até o interior do P-SC (Figura 4A). No P-GHidro, a descarga de água foi feita diretamente sobre a tampa perfurada, por meio da qual ocorre a entrada de água no poço (Figura 4B).

Monitorou-se também o NA no interior dos poços pela instalação de sensores de nível. Obtiveram-se linigramas dos poços com NAs a intervalo de tempo de um minuto.

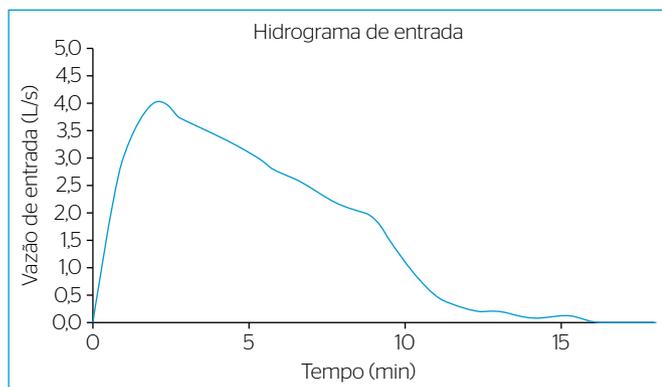


Figura 3 - Hidrograma típico da descarga do reservatório de 2.000 L.

Comportamento hidrológico dos poços

Os poços foram avaliados e comparados a partir dos seguintes parâmetros:

- tempo de esvaziamento, definido como a diferença entre o instante em que ocorre o NA máximo e o instante em que água atinge o nível da brita no fundo dos poços, indicado nas Figuras 1 e 2;
- volume de água no interior do poço em função do tempo, calculado a partir do NA monitorado e da geometria de cada poço;
- percentual de volume infiltrado acumulado em função do tempo.

Para calcular o volume de água infiltrado em ambos os poços nos eventos monitorados, foram feitos balanços de massa para cada evento. Considerando os poços como volumes de controle, pela lei da conservação da massa, tem-se (Equação 1):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entrada de água} \\ \text{no sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Saída de água} \\ \text{no sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variação de volume} \\ \text{no sistema} \end{array} \right) \quad (1)$$

A vazão de entrada corresponde às descargas medidas no reservatório de 2.000 L. Considerando que não houve extravasamento dos poços, o balanço pode ser reescrito conforme Equação 2.

$$Q_e \Delta t - Q_s \Delta t = (V_{e \Delta t}) - (V_{inf \Delta t}) = V_{P_t} - V_{P_{(t-1)}} \quad (2)$$

Em que:

Q_e ($m^3 \cdot s^{-1}$) = a vazão média de entrada no poço no intervalo Δt ;

Q_s ($m^3 \cdot s^{-1}$) = a vazão média de saída no poço no intervalo Δt ;

$V_{e \Delta t}$ (m^3) = o volume de água de entrada no intervalo Δt ;

$V_{inf \Delta t}$ (m^3) = o volume de água infiltrada no intervalo Δt ;

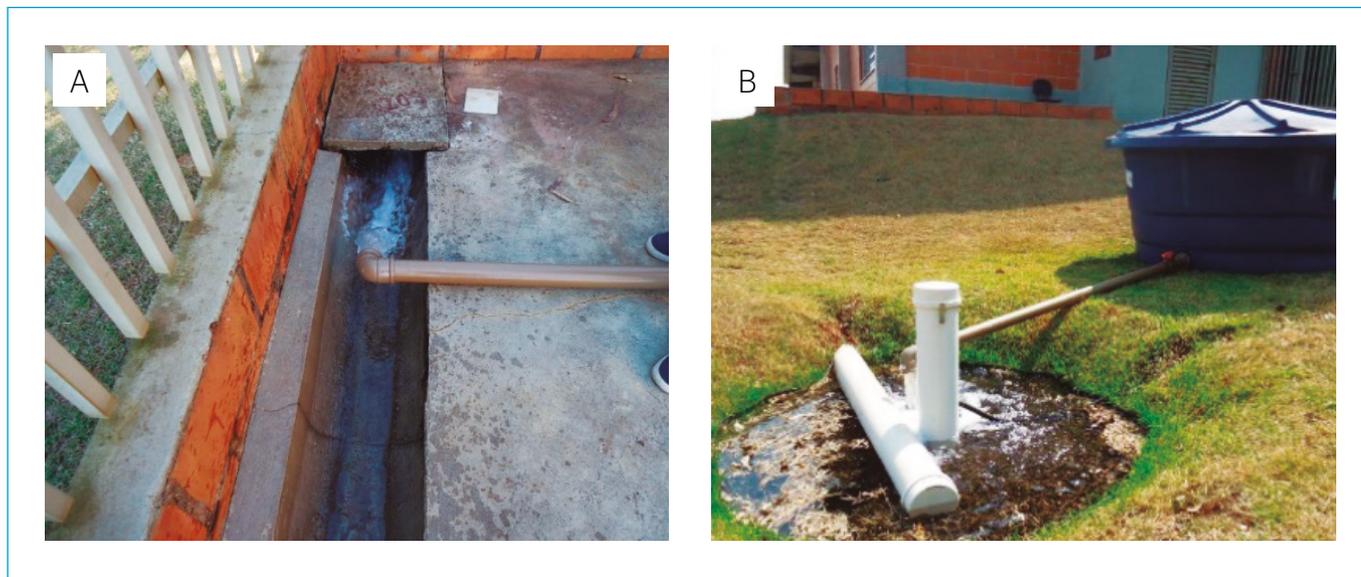


Figura 4 - Chuva simulada no P-SC e lançada no interior do poço (A) e sobre a tampa do P-GHidro (B).

V_{P_t} (m^3) = o volume no interior do poço no instante t ;
 $V_{P_{(t-1)}}$ (m^3) = o volume no interior do poço no instante $t-1$;
 Δt (s) = o intervalo de tempo entre as medidas.

A somatória de $V_{inf_{\Delta t}}$ no intervalo de tempo 0 até t representa o volume infiltrado acumulado no tempo t ($V_{infacum}(t)$), conforme Equação 3.

$$V_{infacum}(t) = \sum_0^t V_{inf_{\Delta t}} = \sum_0^t (V_{e_t} - V_{P_t} + V_{P_{(t-1)}}) \quad (3)$$

- modelagem dos poços de infiltração: as vazões de entrada e os NAs medidos nos eventos simulados foram modelados pelo método adaptado de Puls apresentado por Cudworth Júnior (1989), que emprega a equação da continuidade e a relação cota-volume-vazão do reservatório.

A equação de continuidade, apresentada na Equação 4, representa o princípio de conservação da massa (BAPTISTA *et al.*, 2005).

$$\overline{Q_e} - \overline{Q_s} = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Na qual:

$\overline{Q_e}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) = a vazão média de entrada;

$\overline{Q_s}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) = a vazão média de saída;

V (m^3) = o volume armazenado dentro da estrutura no intervalo de tempo t (s).

Integrando a Equação 3 em cada intervalo de tempo, obtém-se a Equação 5.

$$\int_{V_t}^{V_{t+1}} dV = \int_t^{t+1} Q_e(t) \cdot dt - \int_t^{t+1} Q_s(t) dt \quad (5)$$

Reescrevendo a Equação 2 integrada na forma de diferenças finitas, obtém-se (Equação 6):

$$\left(\frac{2V_{(t+1)}}{\Delta t} + Q_{s_{t+1}} \right) = (Q_{e_t} + Q_{e_{t+1}}) + \left(\frac{2V_t}{\Delta t} + Q_{s_t} \right) \quad (6)$$

As incógnitas, portanto, são os volumes e as vazões em $t+1$: $V_{(t+1)}$ e Q_{t+1} , que podem ser obtidas resolvendo-se iterativamente a Equação 6 e a relação entre Q versus $2V/dt + Q_s$, construída a partir da relação entre o NA no poço e o volume e a descarga no solo (CUDWORTH JÚNIOR, 1989). As vazões de saída foram separadas nas parcelas de fundo e parede, pois o nível varia com o tempo (Equações 7 e 8). A Equação 9 representa a soma das vazões do fundo e da parede.

$$Q_{f(t)} = K \cdot A_f \quad (7)$$

$$Q_p(NA(t)) = K \cdot NA(t) \cdot \pi D \quad (8)$$

$$Q_s(t) = \sum_{t=0}^t Q_f(t) + Q_p(t) \quad (9)$$

Em que:

Q_f = a saída por infiltração pelo fundo do poço ($m^3 \cdot s^{-1}$);

K = a condutividade hidráulica, usada como parâmetro de ajuste do modelo aos resultados experimentais ($m \cdot s^{-1}$);

A_f = a área de fundo do poço (m^2);

D = o diâmetro do poço (m);

$Q_p(NA(t))$ = a vazão de infiltração pelas paredes do poço ($m^3 \cdot s^{-1}$), a qual depende do NA em cada intervalo discretizado de tempo (t);
 $NA(t)$ = o NA no poço (m) para cada intervalo de tempo t discretizado em intervalos de tempo de um minuto.

Calibração do método de Puls

O método de Puls foi calibrado variando-se automaticamente o valor de K para diferentes configurações de área de infiltração utilizando os dados de NAs experimentais dos seis ensaios para cada poço, por regressão não linear. Usou-se a Equação 10 como função objetivo e o ajuste do modelo foi calculado pelas Equações 11 e 12.

$$F_o(t) = \sum (NA_{puls}(t) - NA_{obs}(t)) \quad (10)$$

Em que:

$F_o(t)$ = a função objetivo;

$NA_{puls}(t)$ = o NA calculado com os valores de permeabilidade do solo otimizados (m);

$NA_{obs}(t)$ = o NA medido pelo sensor de nível (m);

t = o tempo (min).

O ajuste do modelo foi verificado por meio dos coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Sutcliffe (NS).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (NA_{puls} - \overline{NA_{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (NA_{obs} - \overline{NA_{obs}})^2} \quad (11)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (NA_{obs} - NA_{puls})^2}{\sum_{i=1}^n (NA_{obs} - \overline{NA_{obs}})^2} \quad (12)$$

Em que:

n = o número de observações;

NA_{puls} (m) = o NA calculado pelo método de Puls;

NA_{obs} (m) e $\overline{NA_{obs}}$ = respectivamente nível e nível médio, ambos medidos.

O método de Puls foi calibrado a fim de investigar as seguintes possibilidades de funcionamento:

- infiltração só pelo fundo, com K constante e somente para o P-SC, visto que se admitia ser esse o funcionamento desse poço devido à justaposição dos anéis ao solo. Para o P-GHidro, essa situação foi descartada, pois os furos nos anéis permitiam a passagem da água pela parede;
- infiltração só pela parede (P-SC e P-GHidro), com K constante;
- infiltração pelo fundo e pela parede (P-SC e P-GHidro), com K constante e K variável simplificado.

O valor de K variável simplificado foi representado por uma taxa de infiltração inicial maior nos primeiros dez minutos de ensaio, e uma taxa de infiltração final menor no restante do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se, na Tabela 1, os resultados experimentais dos 12 ensaios realizados, lembrando que os volumes úteis são diferentes, porém

Tabela 1 - Resultados dos ensaios em triplicata para o P-SC e o P-GHidro com chuva simulada em anos consecutivos.

Ensaio-data	Volume máximo atingido (m³)	Tempo de esvaziamento (min)
P-SC		
1-19/08/2014	1,13	110
2-21/08/2014	1,21	128
3-24/08/2014	1,18	126
Média	1,18	121
Desvio padrão Cv	0,04 0,03	9,9 0,08
4-14/08/2015	1,12	109
5-17/08/2015	1,16	131
6-18/08/2015	1,19	129
Média	1,16	123
Desvio padrão Cv	0,04 0,03	12,2 0,10
P-Gidro		
1-26/08/2014	0,87	102
2-27/08/2014	0,92	123
3-28/08/2014	0,92	122
Média	0,90	116
Desvio padrão Cv	0,03 0,03	11,8 0,10
4-04/08/2015	0,78	118
5-10/08/2015	0,88	118
6-12/08/2015	0,88	115
Média	0,85	117
Desvio padrão Cv	0,06 0,07	1,7 0,01

Cv: coeficiente de variação.

os poços receberam o mesmo volume de entrada de 2 m³ de água. Verifica-se que o tempo de esvaziamento do P-SC é ligeiramente maior (5%) do que no P-GHidro. Os volumes máximos médios atingidos (correspondente ao NA máximo) do P-SC foram 31% maiores em 2014 e 36% maiores em 2015, comparados aos do P-GHidro.

Confirma-se, no gráfico da Figura 5, que o volume armazenado dentro do P-SC é sempre maior do que no P-GHidro e, conseqüentemente, há menor volume infiltrado acumulado — calculado pela Equação 3 e mostrado na Figura 6. Por exemplo, no ano de 2014, em 10 minutos de ensaio, o P-GHidro já tinha infiltrado 43% do volume máximo e o P-SC, apenas 28%. Em 2015, nesse mesmo tempo, o P-GHidro tinha infiltrado 49% do volume máximo, e P-SC, 30%.

Essas análises evidenciam que o P-GHidro é mais eficiente. Atribui-se esse desempenho à distribuição de vazões proporcionada pelos furos no anel de concreto e à camada de brita entre o anel e o solo do P-GHidro.

Verifica-se que o percentual de volume infiltrado pelo P-SC em 2014, Figura 6A, é muito próximo do percentual do mesmo poço em 2015, Figura 6B. Esse comportamento também foi notado para o P-GHidro. Então, a operação por um ano não provocou redução sensível da infiltração.

Modelagem dos poços com permeabilidade do solo constante no tempo

Neste item apresentaram-se os resultados referentes ao uso da condutividade hidráulica constante como parâmetro de ajuste do modelo aos dados experimentais nos dois poços avaliados.

A calibração do Puls com imposição de infiltração somente pelo fundo resultou em valores de permeabilidade constante do solo maiores que 1.427 mm/h, os quais não se aplicam para solos compatíveis com a área de implantação, cujos valores esperados são da ordem de 360 mm/h. Assim, a infiltração unicamente pela área do fundo do poço foi descartada.

Considerando a área de infiltração somente pelas paredes, os valores de permeabilidade calibrados variaram de 456 a 655 mm/h para ambos os poços, valores ainda acima do esperado. Isso indica que a infiltração deva ocorrer simultaneamente pelo fundo e pela parede dos poços.

Dessa forma, o modelo foi construído com base na infiltração simultânea pela parede e pelo fundo. Os resultados da modelagem são apresentados na Tabela 2. O método de Puls apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de NAs do P-SC (R^2 de médio de 0,98 e NS médio de 0,82) que aos do P-GHidro (R^2 médio de 0,85 e NS de 0,30). Entretanto, as permeabilidades correspondentes foram praticamente iguais (médias de 355 e 346 mm/h, respectivamente).

O ajuste do modelo matemático aos dados experimentais por meio do valor constante da condutividade hidráulica (K) limita a representação do modelo. Tal restrição é mais evidente para o P-GHidro, que obteve maiores taxas de infiltração, quando comparado ao P-SC.

Modelagem dos poços com permeabilidade do solo variável

Neste item são apresentados os resultados referentes ao uso da condutividade hidráulica variável como parâmetro de ajuste do modelo aos dados experimentais nos dois poços avaliados. A simplificação consistiu na representação do decaimento por dois patamares discretos, conforme Tecedor *et al.* (2015). O primeiro patamar representa a permeabilidade média dos dez minutos iniciais (K_{ini}), e o segundo, a permeabilidade média contada a partir desse tempo até o final dos registros (K_{final}). O intervalo de dez minutos foi definido a partir dos dados das taxas de infiltração, calculadas utilizando os valores medidos,

pois se registrou variação acentuada da permeabilidade até o intervalo de tempo de dez minutos. Os valores de K_{ini} e K_{final} foram empregados como parâmetros de ajuste dos valores de NAs calculados aos NAs medidos nos ensaios de campo.

Verificou-se que o método de Puls ajustou-se muito bem aos dados experimentais para ambos os poços em todos os ensaios, como indicado pelos valores de R^2 e de NS superiores a 0,95 (Tabela 3). Confirma-se essa qualidade de ajuste visualmente nas Figuras 7A e 7B.

Os valores de K_{ini} foram altos para ambos os poços (de 1.537 a 3.769 mm/h), conforme Tabela 3. Os valores de K_{final} , entretanto, encontraram-se dentro de faixas esperadas para o solo do local de estudo para

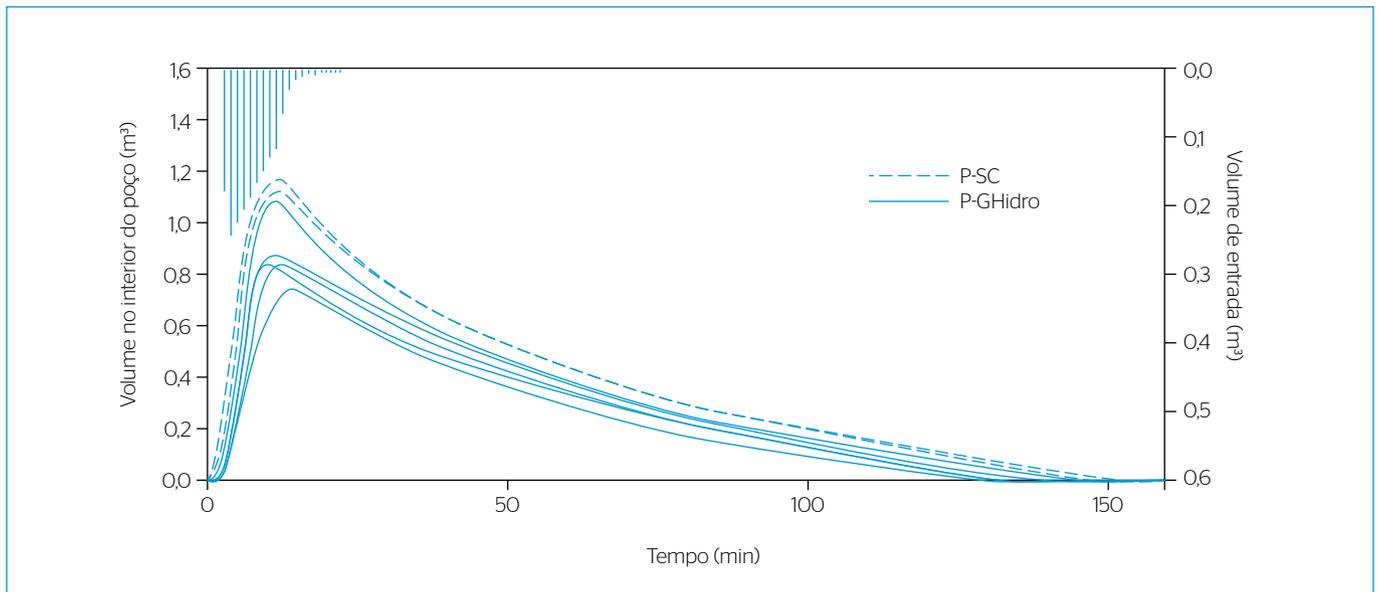


Figura 5 - Volumes de água de entrada (histograma) e no interior dos poços de infiltração (linhas) em ensaios em triplicata realizados em 2014 e 2015.

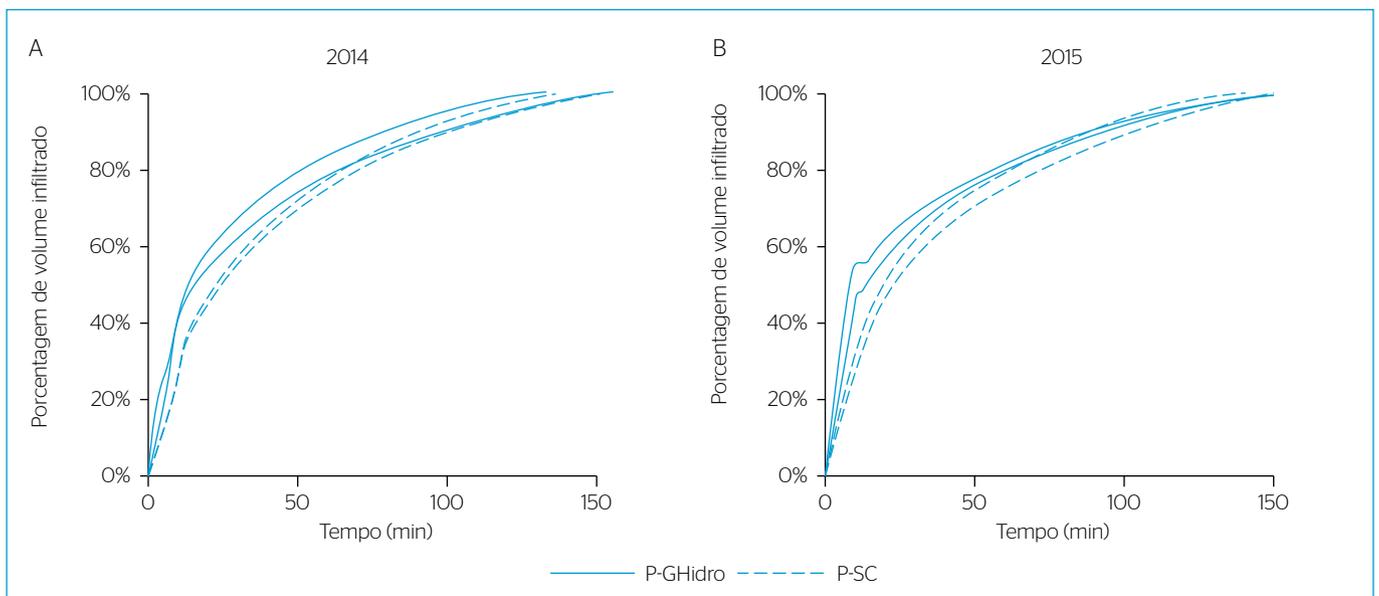


Figura 6 - Percentagem de volume infiltrado em função do tempo nos poços em 2014 (A) e em 2015 (B).

os dois poços (de 119 a 260 mm/h). As variações de K_{ini} e K_{final} durante um ano operação não são significativas (variações menores que X%).

Tecedor *et al.* (2015) também apresentam resultados de modelagem aplicada a plano de infiltração, empregando valores de K variável e K constante com diferenças de ajuste em termos de

valores médios de R^2 de 0,75 e 0,72, respectivamente. Neste trabalho notou-se maior diferença na modelagem entre os valores de K constante e variável. Tal fato deve-se, provavelmente, aos maiores registros de lâminas (NA) no poço, quando comparados ao plano de infiltração Figuras 8A e 8B.

Tabela 2 - Valores de permeabilidade do solo constante e calibrados considerando áreas de infiltração pelo fundo e pela parede dos poços.

P-SC				P-GHidro			
Ensaio-data	K (mm/h)	R ²	NS	Nº do ensaio-data	K (mm/h)	R ²	NS
1-19/08/2014	381	0,97	0,81	1-26/08/2014	410	0,87	0,47
2-21/08/2014	322	0,98	0,86	2-27/08/2014	321	0,90	0,44
3-24/08/2014	329	0,99	0,84	3-28/08/2014	318	0,88	0,39
4-14/08/2015	391	0,97	0,81	4-04/08/2015	390	0,73	-0,13
5-17/08/2015	326	0,99	0,77	5-10/08/2015	341	0,87	0,33
6-18/08/2015	329	0,99	0,83	6-12/08/2015	347	0,84	0,27
Média desvio padrão	346 31	0,98	0,82	Média Desvio Padrão	355 37	0,85	0,30

R²: coeficiente de determinação; NS: coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Tabela 3 - Valores de K_{ini} e K_{final} otimizados variáveis para os ensaios de chuvas simuladas considerando infiltração nas paredes e fundo nos dois poços.

P-SC					P-GHidro				
Nº ensaio-data	K inicial (mm/h)	K final (mm/h)	R ²	NS	Nº ensaio-data	K ini (mm/h)	K final (mm/h)	R ²	NS
1-19/08/2014	3.769	260	0,96	0,95	1-26/08/2014	2.382	119	0,96	0,96
2-21/08/2014	3.411	231	0,97	0,97	2-27/08/2014	1.954	138	0,98	0,98
3-24/08/2014	3.546	232	0,97	0,96	3-28/08/2014	2.006	137	0,97	0,97
4-14/08/2015	1.986	163	0,98	0,98	4-04/08/2015	1.736	257	0,97	0,97
5-17/08/2015	1.818	139	0,98	0,98	5-10/08/2015	1.720	213	0,98	0,98
6-18/08/2015	1.537	135	0,97	0,97	6-12/08/2015	1.562	224	0,96	0,97
Média desvio padrão	2.678 1.000	193 54				1.893/290	181 57		

R²: coeficiente de determinação; NS: coeficiente de Nash-Sutcliffe.

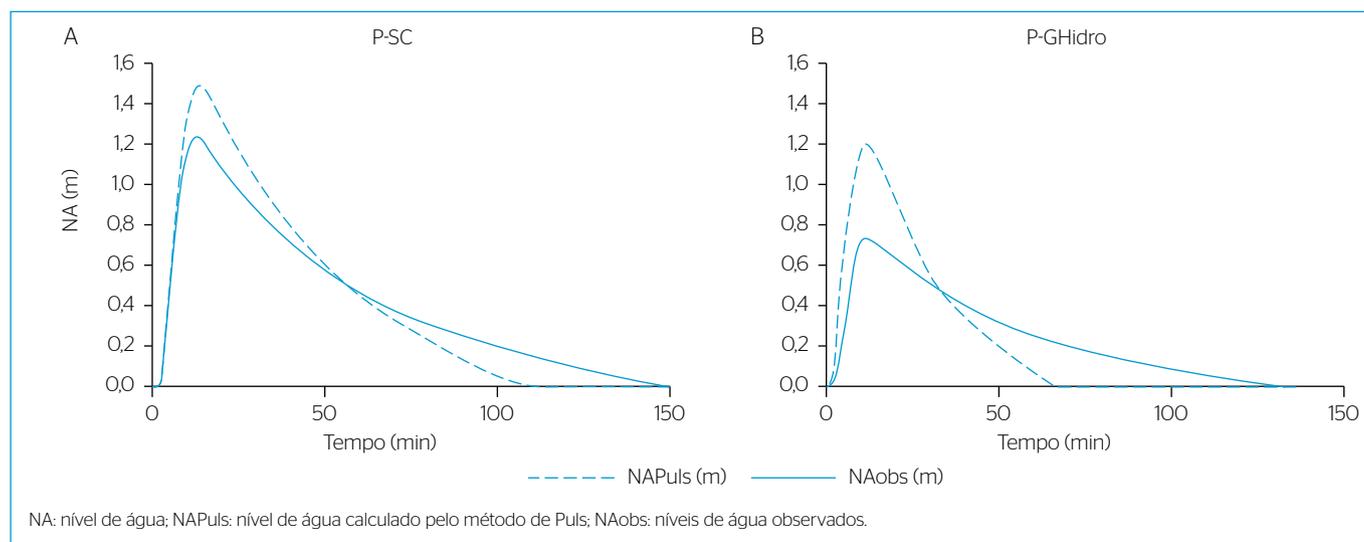


Figura 7 - Níveis de água observados e níveis de água modelados médios em função do tempo, considerando infiltração no fundo e parede dos poços e K constante - (A) P-SC e (B) P-GHidro.

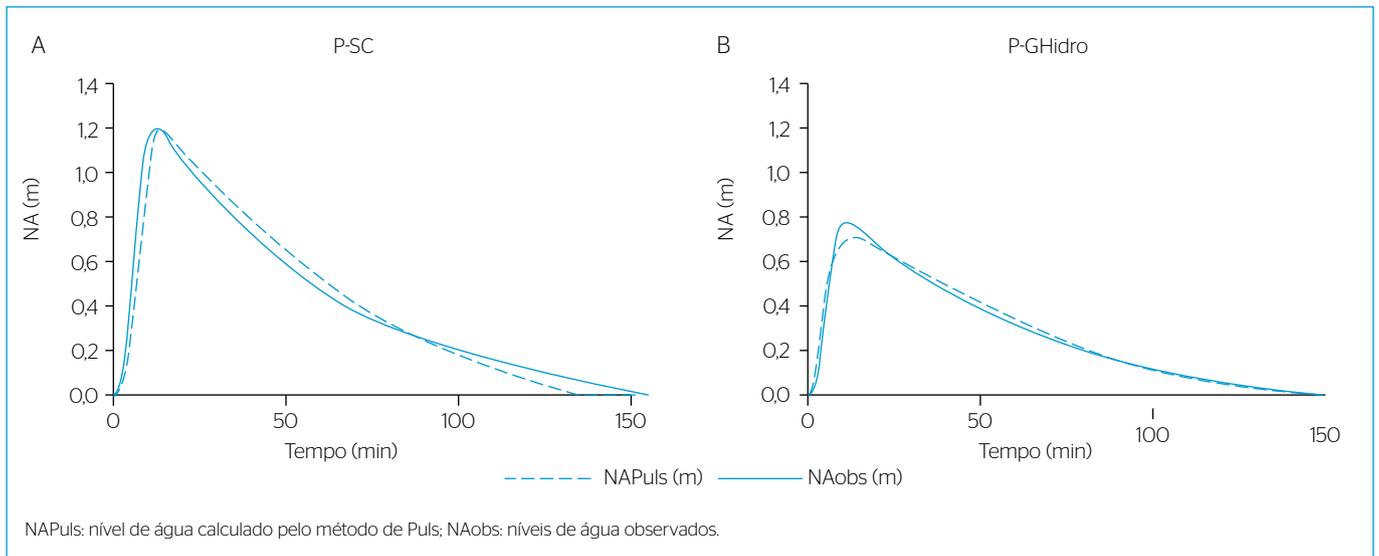


Figura 8 - Níveis de água observados e níveis de água modelados médios em função do tempo considerando infiltração no fundo e parede dos poços e K variável - (A) P-SC e (B) P-GHidro.

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o comportamento hidrológico de dois poços de infiltração de diferentes concepções, sendo o P-SC conforme usualmente construído no município de São Carlos, São Paulo, e o P-GHidro sob nova concepção. Os dados medidos foram representados pelo método de Puls e calibrados considerando permeabilidade constante e variável no tempo. A pesquisa também investigou se a infiltração ocorria somente pelo fundo do poço, somente pela parede ou pelas paredes e pelo fundo.

O P-GHidro, experimentalmente, mostrou-se mais eficiente na infiltração da água pluvial no solo, pois o P-SC apresentou maior volume de água armazenada no seu interior durante os ensaios de campo controlados. Ou seja, para um mesmo instante dos ensaios o volume infiltrado do P-GHidro foi sempre maior. O tempo de esvaziamento do P-Ghidro foi levemente menor

(5%) do que o P-SC. Atribui-se tal comportamento às diferenças de projeto dos poços, posto que o solo e as condições de ensaios foram iguais.

Descartou-se a hipótese de infiltração apenas pela área do fundo dos dois poços, pois os resultados das calibrações foram inaceitáveis. Pelas mesmas razões, a possibilidade de infiltração somente pelas paredes também foi eliminada. Os bons resultados da modelagem evidenciaram que a infiltração, em ambos os poços, ocorreu pelas áreas dos fundos e das paredes, pois se obtiveram muito bons ajustes.

O método de Puls representou o comportamento hidrológico dos poços ensaiados significativamente melhor ao se considerar taxa de infiltração variável no tempo, mesmo que simplificada.

Estudos relativos à qualidade e à vida útil das estruturas estão sendo desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

APT, D. (2010) Integrating Rainwater Harvesting and Low Impact Development. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN STORM DRAINAGE, 2010, Lyon. *Anais...* Disponível em: <<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/35785/12204-341APT.pdf?sequence=12010>>. Acesso em: 1º fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1982) *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT.

_____. (1995) *NBR 6502: Rochas e solos - Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2005) *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH. 318p.

BARBASSA, A.P.; ANGELINI SOBRINHA, L.; MORUZZI, R.B. (2014) Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 91-107. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000200007>

BOURGOGNE, P. (2010) 25 ans de solutions compensatoires d'assainissement pluvial sur la communauté urbaine de Bordeaux. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN URBAN STORM DRAINAGE, 2010, Lyon. *Anais...* Disponível em: <<http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/35597/13201-109BOU.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

CARVALHO, E.T.L. (2008) *Avaliação de elementos de águas pluviais na Zona Norte de Goiânia*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

_____. (2013) *Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

CHAHAR, B.R.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. (2012) Storm-Water Management Through Infiltration Trenches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 138, n. 3, p. 274-281. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000408)

COUGHLIN, J.P.; CAMPBELL, C.D.; MAYS, D.C. (2012) Infiltration and Clogging by Sand and Clay in a Pervious Concrete Pavement System. *Journal of Hydrology Engineering*, v. 17, p. 68-73. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000424)

CUDWORTH JÚNIOR, A.G. (1989). *Flood Hydrology Manual: A Water Resources Technical Publication*. Denver: United States Government Printing Office.

GRAF, C. (2015) Dry wells for stormwater management: an involving viewpoint. *Arizona Water Resource*, v. 23, n. 2.

LIMA, V.C.G.da R. (2009) *Análise Experimental e Numérica de Trincheiras de Infiltração em Meio Não Saturado*. 168f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos .

LUCAS, A.H; ANGELINA SOBRINHA, L.; MORUZZI, R.B.; BARBASSA, A.P. (2015) 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. *Revista Engenharia Sanitária e*

Ambiental, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020000079923>

LUCAS, A.H.; BARBASSA, A.P.; MORUZZI, R.B. (2013) Modelagem de um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração pelo Método de PULS Adaptado para Calibração de Parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 225-236.

MORUZZI, R.B.; FELIPE, M.; BARBASSA, A.P. (2016) Avaliação e modelagem matemática da remoção de material particulado em canal gramado construído em escala real. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 263-273.

REIS, R.P.A.; ILHA, M.S.O. (2014) Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 79-90. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000200006>

REIS, R.P.A.; OLIVEIRA, L.H.; SALES, M.M. (2008) Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 99-117.

SÃO CARLOS. (2011) *Lei nº 15.958*: Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de São Carlos, e dá outras providências. São Carlos.

TECEDOR, N.; BARBASSA, A.P.; MORUZZI, R.B.; GONÇALVES, L.M. (2015) Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 594-604.