

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DO SOLO POR MEIO DA METODOLOGIA BEERKAN PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO EM UMA BACIA URBANA NA CIDADE DO RECIFE - PE

Victor Gabriel Alves de Souza¹ & Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral²

RESUMO – O sistema convencional de drenagem urbana atual juntamente com a alta impermeabilização dos grandes centros urbanos vem causando alagamentos e transtornos, principalmente quando sua intensidade é maior do que a prevista para o período de retorno de dimensionamento do sistema usual. Com isso, as técnicas compensatórias que se baseiam na retenção / detenção das águas, e na priorização da infiltração ao escoamento rápido, estão sendo utilizadas para redução dos picos de vazões e da quantidade escoada superficialmente. Este trabalho teve como objetivo apresentar o ensaio de infiltração pela metodologia Beerkan, de modo a subsidiar a implantação de uma trincheira de infiltração de 200 metros de comprimento em uma bacia urbana na cidade do Recife – PE. No trabalho foi apresentado o procedimento de obtenção e realização dos ensaios, de modo que, o solo analisado cumpriu o objetivo principal de possuir condições adequadas para implantação do dispositivo.

ABSTRACT– The current conventional urban drainage system together with the high waterproofing of large urban centers has been causing flooding and inconvenience, especially when its intensity is greater than that predicted for the return period of dimensioning the usual system. As a result, compensatory techniques that are based on water retention / detention and prioritization of infiltration over rapid flow, are being used to reduce peak flows and the amount drained from the surface. This work aims to present the infiltration test by the Beerkan methodology, in order to support the implantation of a 200 meter long infiltration trench in an urban basin in the city of Recife - PE. In the work, the procedure for obtaining and carrying out the tests was presented, so that, the analyzed soil fulfilled the main objective of having a suitable conditions for implanting the device.

Palavras-Chave – Drenagem Urbana; Técnicas compensatórias; Ensaio de infiltração.

1) Afiliação: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Rodovia PE 320, KM 126, Zona Rural, Caixa Postal 78, Serra Talhada, PE - Brasil

2) Afiliação: Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 - Recife, PE – Brasil, Telefone: (81) 21268223 e Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, R Benfica, 455, Madalena, Recife, 50720-001

1. INTRODUÇÃO

As alterações causadas pelo homem no meio ambiente produzem diversos impactos. A urbanização e o crescimento demográfico implicam em alterações significativas no escoamento das águas pluviais em decorrência do desmatamento e impermeabilização do solo, que reflete em alterações no ciclo hidrológico e no balanço hídrico, com o aumento da produção do escoamento superficial direto e ampliação dos picos de vazão, que por sua vez, demandam o redimensionamento de estruturas hidráulicas (Lucas *et al.* 2010).

As técnicas compensatórias são alternativas ao sistema convencional de drenagem urbana, que se baseiam essencialmente no aumento do tempo de retenção/detenção e na infiltração das águas precipitadas, amortecendo, assim os picos das vazões, diminuindo os volumes escoados, reduzindo a probabilidade de inundações, melhorando a qualidade da água, reduzindo os custos com as tubulações do sistema convencional e infiltrando maior quantidade de água, obtendo uma recarga maior do aquífero. As principais técnicas compensatórias são as bacias de detenção, as trincheiras de infiltração/detenção, as valas de detenção/infiltração, o pavimento permeável e o telhado verde (Baptista *et al.* 2011).

Assim, as trincheiras de infiltração são dispositivos de controle do escoamento superficial, que têm a função de coletar, armazenar e infiltrar as águas de chuva (Mikkelsen e Jacobsen, 1993).

Visando minimizar as inundações no Núcleo de educação física e desportos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), campus Recife – PE, foi implantada uma trincheira de infiltração com 200 metros de comprimento, profundidade de 2,35 metros, sendo 1,85 metros de material granular (brita – envolto por uma manta geotêxtil) e 0,50 metros de areia, com uma seção transversal trapezoidal, variando de 3 metros de largura na parte superior até 1 metro na parte inferior, conforme Figura 1.

Para isso, foram realizados 3 ensaios de infiltração com anel simples por meio da metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006), para identificar a infiltração do solo da trincheira.

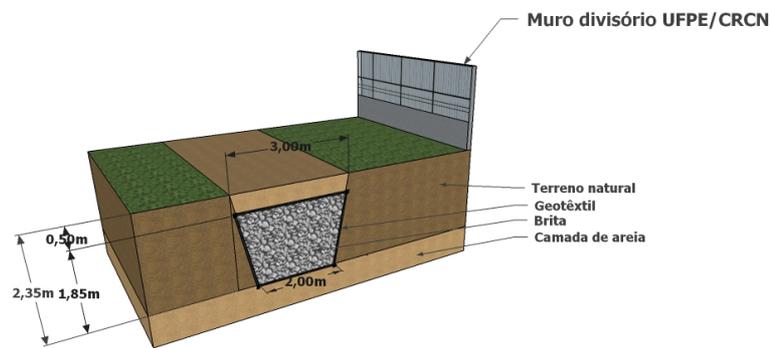


Figura 1 – Modelo esquemático da trincheira de infiltração

Fonte: O próprio autor

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados três ensaios de infiltração do solo, localizados na superfície do terreno e no eixo geométrico da trincheira, ou seja, na posição $x = 100$ metros, conforme Figura 2, de modo que os três ficassem diametralmente opostos afastados de 1 metro cada, formando um triângulo equilátero.

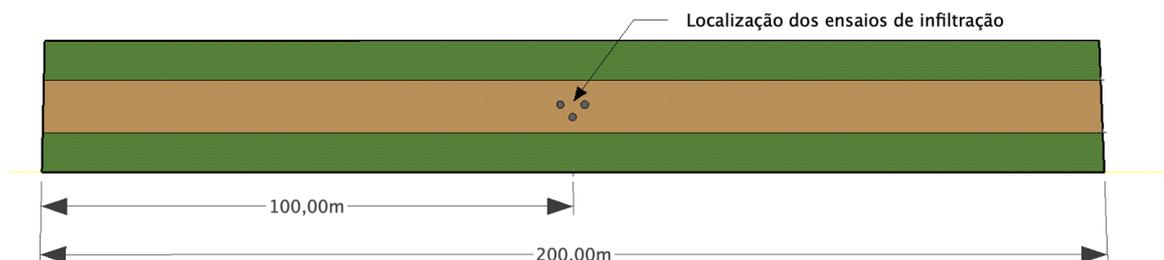


Figura 2 – Pontos de realização dos ensaios de infiltração no dispositivo

Fonte: O próprio autor

O método utilizado para a realização dos ensaios foi a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006), para determinar o coeficiente de infiltração, e o ensaio em campo com anel simples, segundo Figura 3, no qual equivale a adicionar um volume conhecido de água, neste caso particular de 50 ml, medido com um Becker graduado, em um anel simples de material metálico de diâmetro de 7 centímetros e observar o tempo que o líquido leva para infiltrar no solo, tomando nota de cada tempo, de modo que ao fim do ensaio, a taxa de infiltração esteja praticamente constante.



Figura 3 – Realização do ensaio de infiltração de campo

Fonte: O próprio autor

A sequência de procedimentos utilizados para o ensaio, foi:

1. Coletar amostras iniciais para a determinação da umidade inicial do solo e da granulometria do terreno;
2. Posicionar o anel no solo, de modo que estivesse penetrado 3 cm no terreno e com o auxílio de um nível, nivelá-lo;
3. Com o auxílio de um Becker graduado, medir os volumes e posicionar vários volumes conhecidos, de modo que ao fim de cada infiltração do volume, o próximo já estivesse preparado;
4. Iniciar o ensaio, marcando o tempo com o auxílio de um cronômetro e anotar os tempos de infiltração de cada volume de água, com o critério de parada, quando a taxa de infiltração estiver constante.
5. Ao fim do ensaio, coletar uma amostra indeformada do solo para verificar a umidade final.

Para a avaliação da curva de retenção, foi utilizada a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006) que consiste na determinação da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, pelo modelo de Van Genuchten (1980) e a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$, pelo método de Brooks e Corey (1964), conforme equações abaixo:

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \text{ (Burdine, 1953)} \quad (1)$$

$$K(\theta) = K_s * \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (2)$$

No qual:

- θ é a umidade volumétrica;
- θ_r é a umidade volumétrica residual;

- θ_s é a umidade volumétrica saturada;
- h é o potencial matricial;
- h_g é o comprimento capilar;
- m e n são parâmetros de forma;
- K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo;
- η é o parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica;

As equações apresentadas acima, segundo modelos de Van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), apresentam parâmetros de forma e parâmetros de normalização. Os de forma são m/n e η , o qual derivam da textura (HAVERKAMP et al., 1998), e os de normalização são θ_s , K_s e h_g , que dependem da estrutura do solo (Coutinho, 2011). Para a resolução dos parâmetros foi utilizado o software Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration Experiments (BEST), segundo Lassabatère *et al.* (2006).

Assim, para a determinação dos parâmetros de forma, segundo Haverkamp e Parlange (1986), conforme citado por Coutinho (2011), é assumida uma similaridade de forma entre a distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e $\theta(h)$, expressando-a da seguinte maneira:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^n \right]^{-m} \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (3)$$

No qual:

- D é o diâmetro da partícula;
- D_g é o critério da dimensão das partículas;
- m e n são os critérios de forma da curva granulométrica do tamanho das partículas;

Ainda segundo Zatarain *et al.* (2003), conforme Coutinho (2011), o índice de forma do meio (ρ_m) pode ser solucionado por meio de n e m usando a seguinte equação:

$$\rho_m = \frac{mn}{1+m} (1 + K)^{-1} \quad (4)$$

No qual K é (Fuentes *et al.*, 1998):

$$K = \frac{2s-1}{2s(1-s)}, \text{ onde } s \text{ é a dimensão fractal} \quad (5)$$

Em relação a solução dos parâmetros de normalização, são obtidos por intermédio da minimização de $I(S, K_s)$, ou seja, dos quadrados das diferenças entre as lâminas de água infiltrada por observação e pela lâmina calculada, sendo a lâmina de água infiltrada (I) solucionada pela

equação de Haverkamp *et al.* (1994), pertinente a tempos curtos e médios, vide equação 6 (Coutinho, 2011).

$$I(S, Ks) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} [I_i - (S * \sqrt{t_i} - a * S^2 * t_i + b_2 * Ks * t_i)]^2 \quad (6)$$

Na qual:

$$a = \frac{\gamma}{r * \Delta\theta} \quad (7)$$

$$b_2 = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} * \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (8)$$

- I é a lâmina de água infiltrada;
- S é a sorvidade;
- R é o raio do cilindro;
- $\gamma = 0,75$;
- $\beta = 0.6$;

Dessa maneira, com o auxílio do algoritmo do BEST (Lassabatère *et al.*, 2006), calcula-se a taxa de infiltração dos solos em [mm/h], consoante as hipóteses de Burdine e Mualem, com o software RETC.

Após a determinação da condutividade hidráulica do solo, pode-se, então, caracterizar o solo hidrologicamente, por meio da condutividade hidráulica saturada, segundo Rawls *et al.* (1992), na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica (Rawls *et al.*, 1992)

Classificação Hidrológica do Solo	Condutividade Hidráulica do Solo (Ks) [mm/h]
Grupo A	Ks > 7,6 mm/h
Grupo B	3,8 mm/h < Ks < 7,6 mm/h
Grupo C	1,3 mm/h < Ks < 3,8 mm/h
Grupo D	Ks < 1,3 mm/h

3. RESULTADOS

Para a qualificação hidrodinâmica do solo, foram realizados três ensaios de infiltração de anel simples e aplicados a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère

et al., 2006), com os dados de campo sintetizados nas Figuras 4 e 5.

Na análise da Figura 4, é possível observar que para um tempo de infiltração de aproximadamente de 4500 segundos a lâmina acumulada no ponto 1 é de 100 milímetros, para o ponto 2 é de 75 milímetros e para o ponto 3 é de 50 milímetros. Na Figura 5, é notório que o ponto 1 inicia-se com um fluxo maior de valor 0,1 mm/s, seguido pelo ponto 2, que inicia com um fluxo de 0,065 mm/s e pelo ponto 3, que começa com um fluxo de 0,033 mm/s.

Assim, no tempo de 3700 segundos, é possível verificar a constância do fluxo da água, entre os pontos, mas com valores de fluxo diferentes entre si.

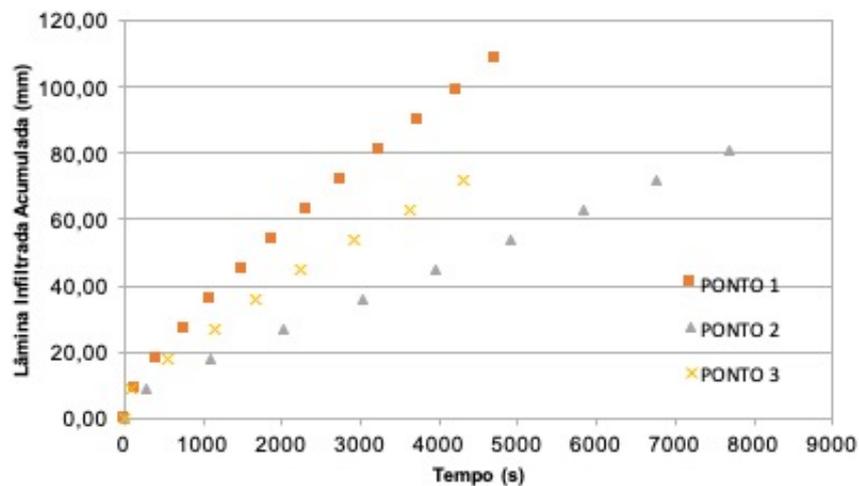


Figura 4 – Gráfico correspondente a lâmina acumulada de água e o tempo necessário a realização dos ensaios

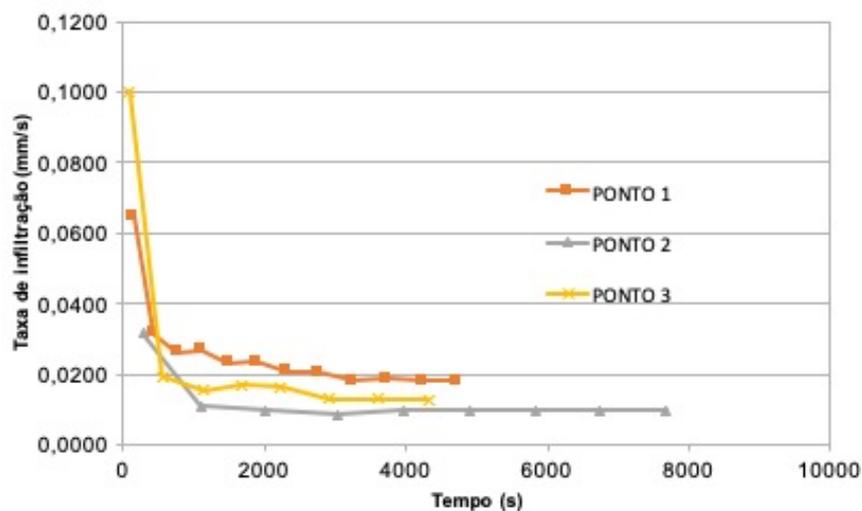


Figura 5 - Gráfico referente ao fluxo de água em mm/s e o tempo relacionado dos ensaios de infiltração

Por meio do algoritmo do BEST (Lassabatère *et al.*, 2006), foi possível obter as características dos solos, inerentes aos ensaios, com importância especial a taxa de infiltração dos solos em [mm/h], conforme hipótese de Burdine, apresentado na Tabela 2. Na mesma Tabela, também foi apresentado os resultados obtidos com a hipótese de Mualem, obtidos com auxílio do software RETC.

Tabela 2 – Características hidráulicas obtidas pela metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005) com o auxílio do BEST (Lassabatère *et al.*, 2006)) para a hipótese de Burdine e para hipótese de Mualem.

	$\Theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\Theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\alpha(1/\text{mm})$	n	$K_s(\text{mm}/\text{h})$
Hipótese de Burdine	0,0000	0,3500	0,0324	2,1958	49,08
Hipótese de Mualem	0,0000	0,3500	0,0265	1,2037	49,08

Assim, as informações relativas ao K_s (condutividade hidráulica) dos 3 pontos analisados são:

- Ponto 1: $K_s = 0,0182$ mm/s ou 65,52 mm/h
- Ponto 2: $K_s = 0,0097$ mm/s ou 34,92 mm/h
- Ponto 3: $K_s = 0,0130$ mm/s ou 46,80 mm/h

Desse, segundo a Tabela 2, os três ensaios realizados pertencem ao grupo A, conforme os dados apresentados na Tabela 1, com condutividade hidráulica maior que 7,6 mm/h, resultando em um bom solo para implantação de dispositivos de infiltração, a exemplo da trincheira.

4. CONCLUSÕES

Assim, os três ensaios realizados pertencem ao grupo A, conforme os dados apresentados na Tabela 1, com condutividade hidráulica maior que 7,6 mm/h e pertencente ao grupo considerado bom para implantação de dispositivos de infiltração, a exemplo da trincheira.

Durante o período de monitoramento da trincheira de infiltração, foi verificado que a capacidade de infiltração se apresentou bastante eficiente, conforme ensaios realizados em campo pela metodologia Beerkan.

Dessa maneira, com o estudo apresentado espera-se que cada vez mais os dispositivos de infiltração de água no solo sejam implantados isoladamente ou conjuntamente com o sistema de drenagem urbana cada vez mais, a fim de minimizar os picos de vazões das chuvas, infiltrando mais do que escoando, reduzindo assim as inundações e transtornos causados principalmente nos grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO N. O.; BARRAUD S. “*Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*”. Porto Alegre: ABRH, 206 p, 2011.
- BRAUD, I.; DE CONDAPPA, D.; SORIA, J. M. U.; HAVERKAMP, R.; JARAMILLO, A. R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. “*Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method)*”. European Journal of Soil Science, v.56, p.361-374, 2005.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1964) “*Hydraulic properties of porous media*”. Hydrology Paper, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p.
- COUTINHO, A. P. “*Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife*”. Dissertação (Mestrado). Recife, 2011.
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y. “*Predicting the water retention curve from particle distribution: I Sandy soils without organic matter*”. Soil Science, v.142, p.325 – 335, 1986.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. “*Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer*”. 2. Physically based infiltration equation. Water Resources Research, v.30, p.2931-2935, 1994.
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y.; CUENCA, R.; ROSS, P.J. (1998). “*Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling*” in: Sposito, G(Ed). Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 190-223.
- FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J.Y.; HAVERKAMP, R. “*Soil water conductivity of a fractal soil*” in: Baveye, P.; Parlange, J.Y.; Stewart, B.A. (eds). Fractal in soil science. Boca Raton: CRC, 1998. Cap 11, p.333- 340, 1998.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. “*Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST*”. Soil Science Society of American Journal, Madison, v.70, p.521-532, 2006.
- LUCAS, A. H.; GUTIERREZ, L. A. R.; RHÔM S. A.; LOLLO, J. A. “*Proposta para Seleção de Áreas Potenciais para Implantação de Trincheiras de Infiltração: Estudo de Caso*”- Campus da UFSCar, São Carlos — SP. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 15, n.4, Out/Dez 2010, p. 135-141, 2010.

MIKKELSEN, P.S.; JACOBSEN, P. (1993). “*Stormwater infiltration design based on rainfall statistics and soil hydraulics*”. Proc. ASCE International Symposium on Engineering Hydrology, San Francisco, California, July 25-30, pp. 653-658.

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. “*Infiltration and soil water movement*”, in Handbook of Hydrology. Ed. David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51. 1993.

VAN GENUCHTEN, M.Th. “*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*”. Soil Science Society of American Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. “*Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica*” in Congreso Nacional de Irrigación, 13, Zacatecas. Resumos. Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p. 212-219, 2003.