

TEMPO DE TRANSBORDAMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COM RESERVATÓRIO DE BRITA¹

FERREIRA, Armando Traini (1); ILHA, Marina Sangoi de Oliveira (2)

(1) UNICAMP, e-mail: armandotraini@uol.com.br; (2) UNICAMP, e-mail: milha@fec.unicamp.br

RESUMO

O dimensionamento de sistemas de infiltração de água no solo tem sido feito considerando-se a somatória das diferenças dos volumes de escoamento de chuva e da infiltração do solo subjacente, sem considerar as variações temporais da umidade do solo durante a infiltração de água pluvial. A analogia científica do escoamento de água no solo com fluxos de calor permite equacionar a variação de umidade interna do volume de controle do pavimento e das camadas subjacentes de forma transitória. Assim, pode-se determinar com maior precisão as variáveis envolvidas, em especial o tempo de transbordamento de um sistema de infiltração de água, o qual é de fundamental importância para o amortecimento o pico de enchente a jusante desse sistema, ou seja, na rede urbana de drenagem. Este trabalho tem como objetivo propor um equacionamento para a determinação do tempo de transbordamento de um pavimento permeável com reservatório de brita. O modelo proposto foi validado por meio de dados obtidos em uma montagem experimental conduzida em outra pesquisa. Foram encontradas diferenças inferiores a 10% entre os valores obtidos pelo modelo em campo, indicando a aderência do modelo.

Palavras-chave: Analogia científica. Fluxo de calor. Água pluvial. Drenagem no lote. Pavimento permeável.

ABSTRACT

Water infiltration systems dimensioning have been done by the sum of the differences between rainwater volumes and soil infiltration, without any reference to temporal variation of soil moisture during rainwater infiltration. Scientific analogy between water flow in the soil and heat flow by conduction allows equating the transient variation of the internal moisture of the pavement and underlying layers. In consequence, it is possible to estimate the overflow time of infiltration systems. This variable is important for minimizing the flood flow damping in the urban drainage system. This article proposes an overflow time equating of permeable pavements with stones reservoir. The proposed model was validated by experimental data. Results indicate differences less than 10% between overflow times obtained by the model and in the field, which indicates the adherence of the proposed model.

Keywords: Scientific analogy. Heat flow. Rainwater. On lot drainage. Permeable pavement.

¹ TRAINI, Armando Traini; ILHA, Marina Sangoi de Oliveira. Tempo de transbordamento de pavimento permeável com reservatório de brita. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

1 INTRODUÇÃO

O acréscimo do escoamento superficial decorrente das superfícies impermeabilizadas contribui para o aumento da vazão de água pluvial que se destina ao sistema urbano, tornando cada vez mais frequentes as enchentes nas cidades.

Os sistemas de infiltração têm sido empregados para mitigar os impactos da impermeabilização do solo urbano, trata-se de uma medida não estrutural de drenagem, em que os problemas são tratados na sua origem, no caso, os lotes urbanos (GOMES-ULLATE et al, 2010).

Sistemas de infiltração atuam no amortecimento da vazão gerada pelo escoamento superficial, pois parte da água é infiltrada. Além disso, contribuem para um atraso no direcionamento dessa vazão, pois antes de extravasar, parte da água irá infiltrar conforme Scholz, Grabowieki (2006).

Nem sempre esta abordagem é suficiente para evitar as enchentes, sendo importante a limpeza e manutenção das redes urbanas de drenagem, além do adequado dimensionamento das mesmas.

Dentre os sistemas de infiltração, destacam-se os pavimentos permeáveis, os quais são compostos por uma camada superior de brita, concreto poroso, piso intertravado ou asfalto, e as camadas subjacentes de solo (CIRIA, 2015), permitindo a percolação e/ou o acúmulo temporário de água e diminuindo o escoamento superficial.

O tempo de transbordamento do pavimento permeável, também denominado de tempo de enchimento do poço, ou seja, período de tempo compreendido entre a primeira gota de chuva tocar o pavimento e a primeira gota a transbordar pelo sistema, é uma variável importante para o seu dimensionamento, pois a partir do momento em que a extravasão ocorrer, a vazão decorrente do escoamento superficial se direcionará para a rede urbana e, somada às contribuições das demais superfícies impermeabilizadas, resultará nas denominadas vazões de enchente.

Para pavimentos permeáveis com infiltração total no solo (infiltração tipo A), o tempo de transbordamento é determinado, conforme ABNT (2015), por meio da diferença entre a intensidade pluviométrica e a infiltração de água nas camadas subsequentes. Consiste em um método simplificado, que considera valores constantes e sem interações entre as camadas ao longo do tempo e que pode, em função disso, implicar em dimensionamento inadequado desse sistema.

Inserido nesse contexto, este trabalho tem como objetivo propor um equacionamento para a determinação do tempo de transbordamento de pavimento permeável com reservatório de brita, a partir da analogia científica do escoamento de água no solo com fluxos de calor por condução em meios sólidos.

2 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE TRANSBORDAMENTO

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi considerada a analogia existente entre o fluxo de calor por condução em meios sólidos e o escoamento de água no solo. Assim, inicialmente foram levantadas as equações principais que regem estes dois fenômenos.

No caso do fluxo de calor por condução, foi considerado o princípio da conservação de energia térmica de um meio sólido para um volume de controle, em que a variação da energia interna corresponde ao fluxo de calor no meio circundante durante um intervalo de tempo definido, ou seja:

$$-c\rho V dT = \frac{kAs \Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

c = calor específico do meio estudado [J/(kg.°C)]

ρ = massa específica do meio estudado [kg/m³]

V = volume do meio estudado [m³]

ΔT = variação da temperatura durante o intervalo de tempo [s]

k_s = condutividade térmica do meio circundante [W/(m.°C)]

As = área superficial [m²]

Δt = intervalo de tempo

De maneira análoga, para o escoamento de água no solo tem-se que a variação do volume hidráulico do meio estudado iguala-se ao fluxo hidráulico no meio circundante durante um intervalo de tempo definido (Δt), ou seja:

$$\frac{\Delta x * \Delta h_i * A_p}{\Delta t} = \frac{k * A_p * \Delta h_m}{\Delta x} \quad (2)$$

Em que:

Δx = espessura da camada "x" [m]

Δh_i = diferença de umidade entre a camada "i" e a camada "i+1" [%]

A_p = área do pavimento [m²]

Δt = intervalo de tempo analisado na iteração "i" [s]

k = condutividade hidráulica do elemento analisado [m/s]

Δh_m = diferença de umidade das camadas analisadas, no tempo "m" [%]

Assim, a partir da equação anterior, pode-se determinar a variação da umidade interna do pavimento permeável e das camadas de solo imediatamente abaixo dele. Para tanto, considerou-se a decomposição do

escoamento de água nas “n” camadas do sistema de infiltração, compostas pelo pavimento permeável e pelo solo até uma profundidade pré-definida em:

- Escoamento no pavimento permeável de espessura Δx_p ;
- Escoamento na primeira camada de solo imediatamente abaixo do pavimento permeável;
- Escoamento em uma camada “i” (genérica), com influência temporal na camada “i-1”;
- Escoamento na camada “n”, com influência temporal da camada “n-1”.

Para a determinação do escoamento pelo pavimento permeável, foi utilizada a espessura obtida empiricamente a partir da definição de que o tempo de enchimento do pavimento do pavimento permeável seja igual à duração da chuva de projeto. Ou seja, considerou-se que o pavimento permeável deve ter capacidade para absorver a intensidade de precipitação, descontando-se a infiltração no solo, conforme proposto por Araujo (2000). Assim, tem-se que:

$$H = \frac{\left(i_p + \frac{i_p}{A_p} * A_c - i_E \right)}{f} * t_p \quad (3)$$

Em que:

H = espessura do pavimento permeável [mm];

i_p = intensidade da chuva de projeto [mm/h];

i_E = taxa de infiltração no solo [mm/h];

t_p = duração da chuva [h];

A_c = área de contribuição para o pavimento permeável [m^2];

A_p = área do pavimento permeável [m^2];

f = porosidade do pavimento permeável [%]

Para a determinação da profundidade do solo a ser analisada, pode-se igualar o fluxo hidráulico no solo e no pavimento permeável através da mesma área e durante o mesmo intervalo de tempo Δt (Eq 2). Assim, tem-se:

$$\frac{A_s * e_p * \eta_p}{\Delta t} = \frac{A_s * e_s * \eta_s}{\Delta t} \quad (4)$$

Ou seja:

$$e_s = \frac{\eta_p}{\eta_s} * e_p \quad (5)$$

Em que:

e_s = espessura equivalente do solo [m];

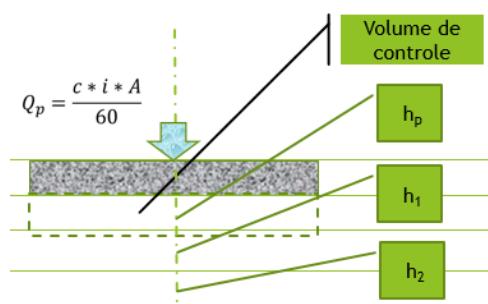
η_p = porosidade do pavimento [%]

η_s = porosidade do solo [%]

e_p = espessura do pavimento [m]

A Figura 1 apresenta o volume de controle considerado para o desenvolvimento da modelagem do escoamento de água no solo por meio da analogia com o fluxo de calor em meios sólidos. Para cada situação de análise, tem-se um processo iterativo com a verificação dos valores da umidade na condição inicial e nas camadas inferiores.

Figura 1: Definição do volume de controle na primeira camada sob o pavimento permeável com os valores iniciais de umidade no pavimento (h_p), na primeira camada inferior (h_1) e na segunda camada inferior (h_2).



Fonte: Os autores

A primeira camada, que consiste no volume de controle no próprio pavimento, recebe a influência direta da vazão de projeto Q_p , sendo que a regra de iteração temporal é dada por:

$$h_1^{n+1} = h_1 + \left(\frac{2 * h_p - 3 * h_1 + h_2}{\Delta X} \right) * \frac{k_s * \Delta t}{\Delta X * \eta_s} \quad (6)$$

Em que:

$h_{p,m+1}$ = umidade no pavimento no tempo "m+1" [%];

h_p = umidade inicial do pavimento [%];

k_s = condutividade hidráulica do solo [m/s];

A_p = área do pavimento [m^2];

h_1 = umidade na primeira camada inferior ao pavimento [%];

ΔX = espessura da primeira camada inferior ao pavimento [m];

Δt = incremento de tempo para as iterações [s];

h_p = porosidade do pavimento [%];

ΔX_p = espessura do pavimento [m].

A próxima camada a ser modelada é a imediatamente inferior ao pavimento, considerando-se a umidade h_p do pavimento e as umidades h_1 e h_2 nas respectivas camadas inferiores, sendo a regra de iteração temporal correspondente:

$$h_1^{m+1} = h_1 + \left(\frac{2 * h_p - 3 * h_1 + h_2}{\Delta X} \right) * \frac{k_s * \Delta t}{\Delta X * \eta_s} \quad (7)$$

Em que:

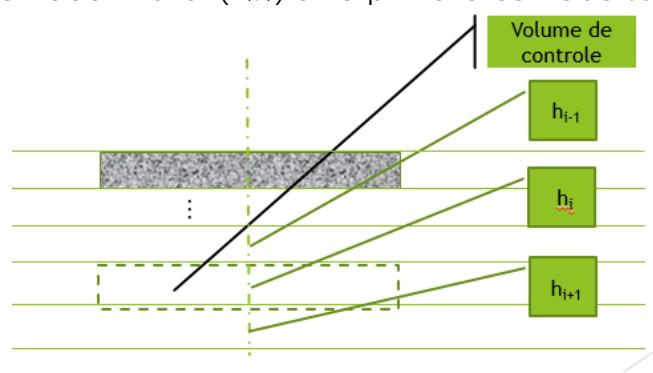
h_1^{m+1} = umidade na primeira camada sob o pavimento no tempo "m+1" [%];

h_2 = umidade na segunda camada inferior ao pavimento [%].

De maneira similar, para uma camada genérica "i", utilizando-se a umidade na camada "i-1", na própria camada "i" e na camada "i+1", tem-se (Figura 2):

$$h_i^{m+1} = h_i + \left(\frac{h_{i+1} - 2 * h_i + h_{i-1}}{\Delta X} \right) * \frac{k_s * \Delta t}{\Delta X * \eta_s} \quad (8)$$

Figura 2: Definição do volume de controle na camada "i" sob o pavimento permeável, com os valores iniciais de umidade na própria camada "i" (h_i) e na primeira camada inferior (h_{i-1}) e na primeira camada superior (h_{i+1}).

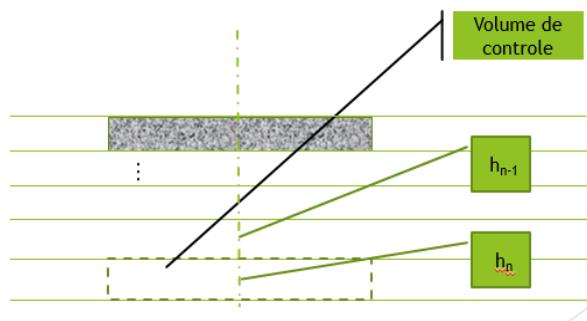


Fonte: Os autores

Por fim, para a última camada considerada ("n"), tem-se a seguinte regra de iteração (Figura 3):

$$h_n^{m+1} = h_{n-1} + \left(\frac{h_{in-1} - h_n}{\Delta X} \right) * \frac{k_s * \Delta t}{\Delta X * \eta_s} \quad (9)$$

Figura 3: Definição do volume de controle na camada "n" sob o pavimento permeável, com os valores de umidade na própria camada "n" (h_n) e na primeira camada imediatamente superior (h_{n-1}).



Para a validação da modelagem proposta, foram considerados os resultados obtidos em medições realizadas em uma montagem experimental desenvolvida por Reis, Ilha (2014). Foram analisadas dez vazões variando 4,24 m³/h a 8,54 m³/h em um pavimento permeável com espessura de 0,35 m, área de 7,5 m² (5m x 2,5m) e 1% de declividade.

A variação temporal da umidade ao longo das camadas do solo foi considerada igual a 10s, seguindo-se o mesmo critério adotado nas medições.

Assim, a partir da diferença, em minutos, entre o início do ensaio e o tempo em que a lâmina d'água extravasa o pavimento, tem-se o tempo de transbordamento do sistema, que é quando o escoamento começa a se direcionar para a rede pública de drenagem.

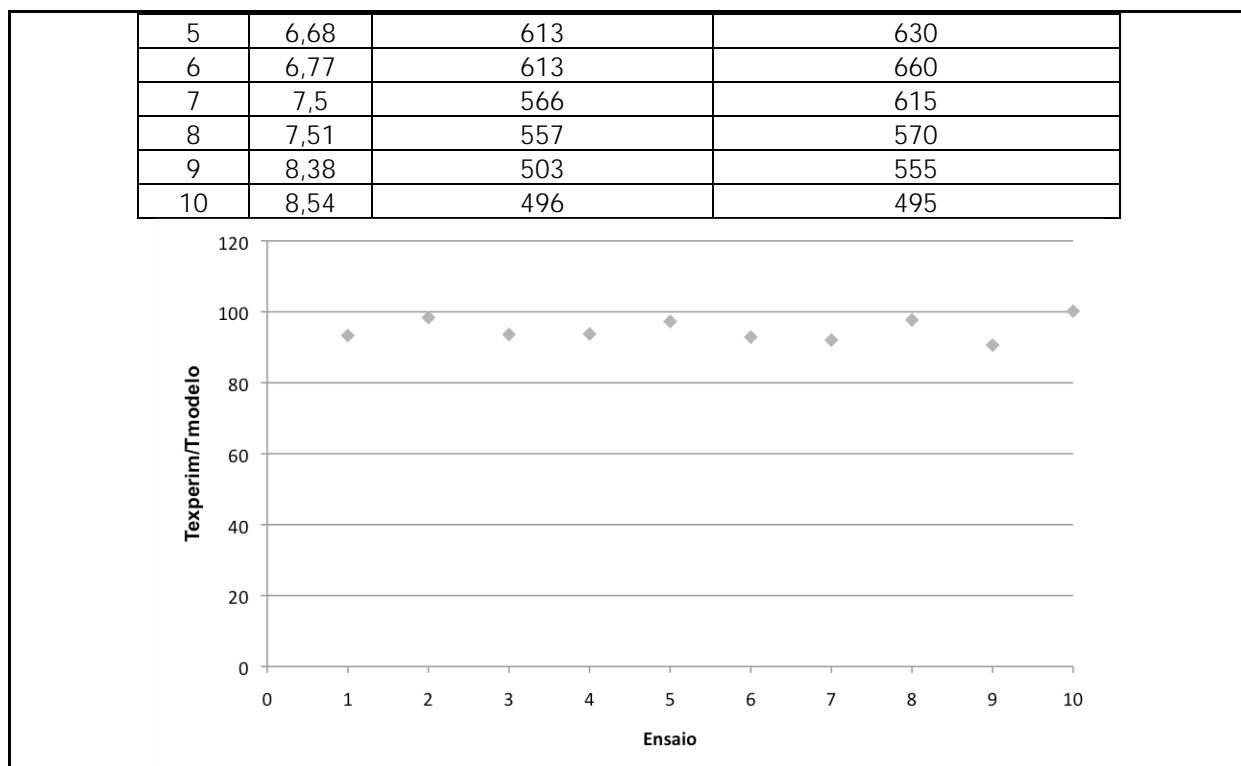
A partir da Eq. 2, considerando-se os dados obtidos por Reis, Ilha (2014) e utilizando-se o maior valor da condutividade hidráulica dos ensaios, tem-se que $e_s \approx 4 \cdot e_p$ ou seja, foram analisadas 4 camadas sob o pavimento permeável.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tempo de transbordamento obtido por Reis, Ilha (2014) para o pavimento experimental (7,5 m², espessura de 0,35m, 1% de declividade; condutividade hidráulica do solo determinada *in loco* para cada ensaio de vazão) variou entre 8 e 16min. Quando determinados pelo modelo proposto, o tempo de transbordamento variou entre 8 e 17min, indicando a sua aderência para as vazões consideradas nas simulações (Figura 4).

Figura 4: Tempo de transbordamento obtido nos ensaios (montagem experimental - T_{experim}) e com a modelagem proposta (T_{modelo})

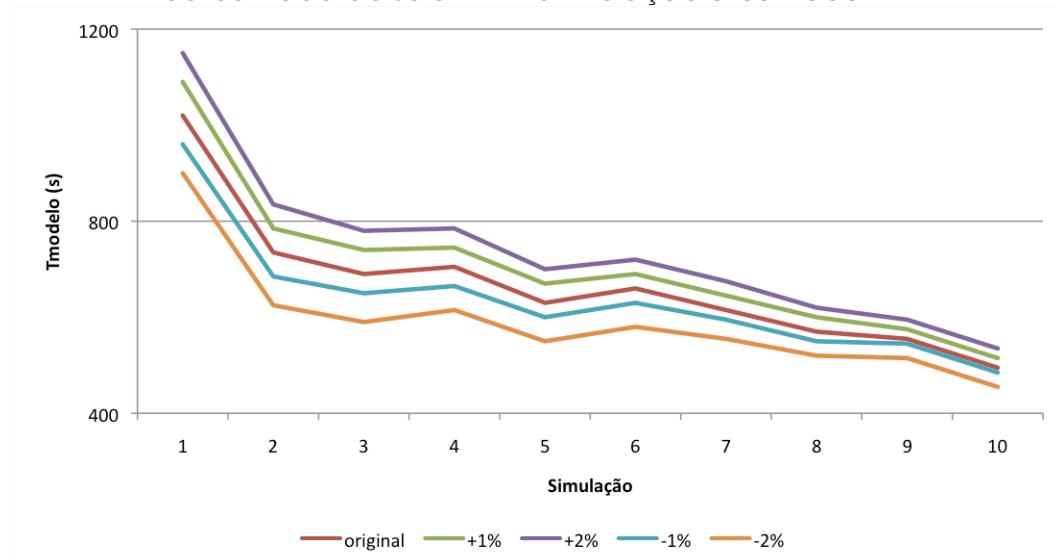
Ensaio	Vazão (m ³ /h)	Tempo de transbordamento (s)	
		Montagem experimental	Modelagem
1	4,24	952	1020
2	6,05	723	735
3	6,37	646	690
4	6,48	661	705



Fonte: Os autores

Quanto maior a condutividade hidráulica, maior o volume infiltrado e, consequentemente, maior o tempo de transbordamento. Nesse sentido, para evidenciar a sensibilidade do modelo proposto, a Figura 5 apresenta os resultados da simulação desenvolvida com uma condutividade diferenciada do solo, nesse caso, com acréscimos de 1% e 2% e diminuições de 1% e 2% nos valores dessa grandeza em relação à camada anterior, ou seja, a condutividade na camada "i+1" corresponde a acréscimos de 1% e 2% e diminuições de 1% e 2% na camada "i".

Figura 5: Análise de sensibilidade do modelo proposto, considerando-se acréscimos e diminuições de 1% e 2% e diminuições de 1% e 2% na condutividade hidráulica da camada do solo “i+1” em relação à camada “i”



Fonte: Os autores

4 CONCLUSÕES

O modelo teórico proposto nesse trabalho para determinação do tempo de transbordamento de pavimentos permeáveis com reservatório de brita está baseado na analogia entre o escoamento de água no solo e o fluxo de calor por condução em meios sólidos.

As diferenças entre os valores do tempo de transbordamento determinados pelo modelo proposto e aqueles obtidos por Reis, Ilha (2014) foram sempre inferiores a 10% para as vazões consideradas, indicando a aderência do equacionamento constante nesse trabalho.

A modelagem proposta permite a consideração de condutividades hidráulicas diferenciadas entre as camadas do solo, representando um importante avanço no método atualmente empregado para o dimensionamento de pavimentos permeáveis.

Os resultados obtidos evidenciam um grande potencial do emprego da analogia científica entre o escoamento de água no solo e o fluxo de calor por condução em meios sólidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e do IFSP – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo para o desenvolvimento dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, I.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** 2005. 155p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015

ARAUJO, P.R.; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v.5, n. 3, p. 21-29. 2000

CIRIA. The SuDs Manual. London. 2015. p. 392.

REIS, R.P.A.; ILHA, M.S.O. Performance evaluation of experimental pervious pavements with and without stone reservoir, CIB W062 Symposium. 2014.

SCHOLZ, M.; GRABOWIEKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment.** v. 42, p. 3830-3836, 2007.

GOMES-ULLATE, E. et al. Analysis and Contrast of Different Pervious Pavements for Management of Storm-Water in a Parking Area in Northern Spain. **Water Resources Management.** v. 25, n. 6, p. 1525-1535, 2011