

XIII SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS
DESEMPENHO E INOVAÇÃO
DE SISTEMAS PREDIAIS HIDRÁULICOS
SÃO PAULO – 04 DE OUTURO DE 2019

Uso de coeficientes de interface no dimensionamento de pavimentos permeáveis

Use of interface coefficients in the design of permeable pavements

FERREIRA, Armando Traini[1]; ILHA, Marina Sangoi de Oliveira[2]

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, Rua Pedro Vicente, 625 – São Paulo, S.P, traini@ifsp.edu.br
[2] Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, milha@fec.unicamp.br

RESUMO

Pavimentos permeáveis são componentes destinados a permitir a infiltração de água no solo e auxiliar na atenuação do pico de enchente na rede urbana, contribuindo para a gestão do escoamento de água pluvial no lote. O equacionamento hidráulico desses sistemas é complexo, pois há dificuldade em se modelar os fenômenos envolvidos nas interfaces dos seus componentes, o ar armazenado nos vazios e o solo. Este trabalho propõe o uso de coeficientes de interface para a representação desses fenômenos, os quais são análogos às resistências térmicas no fluxo de calor em meios sólidos. Os coeficientes de interface foram obtidos em um pavimento permeável experimental considerando-se vazões entre 3,23 m^3/h a 13,05 m^3/h. Para a formulação das equações para a determinação dos coeficientes de interface foi considerado o Teorema do PI de Buckingham, com a seleção da equação com o maior coeficiente de correlação com os dados medidos. Assim, foi determinada a equação do tempo de enchimento da camada de brita sob o pavimento permeável em função da vazão de projeto. Os valores dos tempos de enchimento modelados não foram significativamente diferentes dos dados observados experimentalmente, considerando o teste t-pareado para o nível de significância de 2%, o que indica a aderência do equacionamento proposto, constituindo-se em uma alternativa para o dimensionamento de pavimentos permeáveis.

Palavras-chave: Drenagem no Lote; Gestão de Águas Pluviais; Pavimento Permeável; Analogia científica.

ABSTRACT

Permeable pavements are components that allow the water infiltration into the soil and help to attenuate the peak flow in the urban network, contributing to the on-lot drainage management. The dimensioning of these systems is complex, since it is difficult to model the phenomena that occurs in the interfaces among their components, the air in the soil voids and the soil. In this paper it was proposed the use of interface coefficients for the representation of these phenomena, which are analogous to thermal resistance in the heat flux in solid media. The interface coefficients were obtained in an experimental permeable pavement using flows between 3,23 m^3/h and 13,05m^3/h. The Buckingham PI Theorem was used for the formulation of the interface coefficients' equations, with the selection of the equation with the highest coefficient of correlation with the measured data. Finally, the equation of the filling time of the gravel layer under the permeable pavement was determined. The values of the filling times were not significantly different from the experimental data, considering the t-paired test for the significance level of 2%, which indicates the adherence of the proposed equations and resulting in an alternative for the permeable pavement sizing.

Keywords:*.On-Lot Drainage; Stormwater Management; Permeable Pavement; Scientific Analogy.*

1 INTRODUÇÃO

O pavimento permeável consiste em uma técnica estrutural para o controle de escoamento superficial, composta usualmente por uma camada de brita e o solo abaixo dessa camada. Dependendo das condições do solo, este sistema permite reduzir os volumes de escoamento superficial e vazões de pico a valores iguais ou até inferiores ao período anterior à urbanização (ARAUJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

O escoamento de água no solo envolve diferentes variáveis e, devido a sua complexidade, o dimensionamento de sistemas de infiltração tem sido feito de forma empírica, resultando, de um lado, em instalações subdimensionadas, em que uma parcela significativa da água de chuva se encaminha para a rede urbana de drenagem, ou, de outro, em instalações superdimensionadas, conforme exemplificado em Franco (2004), cuja utilização se inviabiliza em função do espaço disponível nos lotes urbanos.

Nesse sentido, Ferreira e Ilha (2016) propuseram um modelo para a determinação do tempo de enchimento de pavimentos permeáveis, utilizando o delineamento da TDA - Transferência de Domínios via Analogia. A TDA consiste na transferência de conhecimento de um domínio base (fonte ou origem), que contém informações já consolidadas, para o entendimento de um domínio meta (alvo), que é a questão a ser resolvida (KLENK, FORBUS, 2009).

O presente trabalho apresenta uma evolução do modelo TDA proposto pelos referidos autores, no sentido de representar o fenômeno tridimensional do escoamento, por meio das resistências que se desenvolvem no contato entre diferentes materiais/meios envolvidos no pavimento permeável, quais sejam: camada de brita; ar e solo.

2 MÉTODO

Os coeficientes de interface, que representam a variação da condutividade hidráulica entre as camadas, ao longo do eixo e ao redor da camada de brita, além das interações entre materiais diferentes que compõem o sistema em estudo, foram incorporados às equações para a determinação da umidade propostas por Ferreira e Ilha (2016), resultando em:

- Para a camada de brita:

$$h_b^{m+1} = C_{ar,b}\left\{h_b^m + \left[\frac{2*k_1*k_2*k_{s,1}\left(h_1^m - h_b^m\right)+Q_p}{\Delta X}\right] * \frac{\Delta t}{\left(\eta_b * \Delta X_b\right)}\right\} \quad \text{(eq. 1)}$$

- Para a camada de solo imediatamente inferior ao pavimento:

$$h_1^{m+1} = C_{b,s}\left\{h_1^m + \left[\frac{2*h_b^m - 3*h_1^m + h_2^m}{\Delta X}\right] * \frac{k_1*k_2*k_{s,1}*\Delta t}{\left(\eta_{s,1}*\Delta X\right)}\right\} \quad \text{(eq. 2)}$$

- Para uma camada genérica "i":

$$h_i^{m+1} = C_{i,i+1} * \left\{h_i^m + \left(\frac{h_{i+1}^m - 2*h_i^m + h_{i-1}^m}{\Delta X}\right) * \frac{k_1*k_2*k_{s,i}*\Delta t}{\left(\eta_{s,i}*\Delta X\right)}\right\} \quad \text{(eq. 3)}$$

- Para a última camada considerada ("n"):

$$h_n^{m+1} = h_{n-1}^m + \left(\frac{h_{n-1}^m - h_n^m}{\Delta X}\right) * \frac{k_1*k_2*k_{s,n}*\Delta t}{\left(\eta_{s,n}*\Delta X\right)} \quad \text{(eq. 4)}$$

Em que:

$C_{ar,b}$ = coeficiente de interação ar-brita [adimensional];
k_1 = coeficiente da variação da condutividade hidráulica do solo ao redor do eixo da camada de brita [adimensional];
k_2 = coeficiente da variação da condutividade hidráulica do solo ao longo da profundidade do solo [adimensional];
$C_{b,s}$ = coeficiente da interação brita-solo [adimensional];
$C_{i,i+1}$ = coeficiente da variação da condutividade hidráulica entre camadas diferentes de solo [adimensional];
h_b^{m+1} = umidade na camada de brita no instante "m+1" [%];
h_b^{m} = umidade na camada de brita no instante "m" [%];
$k_{s,1}$ = condutividade hidráulica da primeira camada de solo sob a camada de brita [m/s];
Q_p = vazão de projeto [m^3/h];
ΔX = espessura da primeira camada inferior à camada da brita [m];
Δt = incremento de tempo para as iterações [s];
η_b = porosidade da brita [%];
ΔX_b = espessura da camada de brita [m];
h_1^{m+1} = umidade na primeira camada de solo sob a camada de brita no instante "m+1" [%];
h_1^{m} = umidade na primeira camada de solo sob a camada de brita no instante "m" [%];
h_2^{m} = umidade na segunda camada sob a camada de brita no instante "m" [%];
$\eta_{s,1}$ = porosidade drenável na primeira camada de solo sob a camada de brita [%];
h_i^{m+1} = umidade na camada genérica "i" sob a camada de brita no instante "m+1" [%];
h_i^{m} = umidade na camada genérica "i" sob a camada de brita no instante "m" [%];
h_{i+1}^{m} = umidade na camada genérica "i+1" sob a camada de brita no instante "m" [%];
h_{i-1}^{m} = umidade na camada genérica "i-1" sob a camada de brita no instante "m" [%];
$k_{s,i}$ = condutividade hidráulica da camada genérica "i" de solo sob a camada de brita [m/s];
$\eta_{s,i}$ = porosidade drenável na camada genérica "i" de solo sob a camada de brita [%];
h_n^{m+1} = umidade na última camada de solo sob a camada de brita no instante "m+1" [%];
h_{n-1}^{m} = umidade na penúltima camada de solo sob a camada de brita no instante "m" [%];
h_n^{m} = umidade na última camada de solo sob a camada de brita no instante "m" [%];
$k_{s,n}$ = condutividade hidráulica da última camada de solo sob a camada de brita [m/s];
$\eta_{s,n}$ = porosidade drenável na última camada de solo sob a camada de brita [%].

Para a definição dos coeficientes de interface foi também utilizada a TDA, tendo como domínio base as resistências térmicas. Segundo Kreith (2003, p. 9): "quando duas superfícies condutoras diferentes são colocadas em contato, uma resistência térmica está presente na interface dos sólidos...".

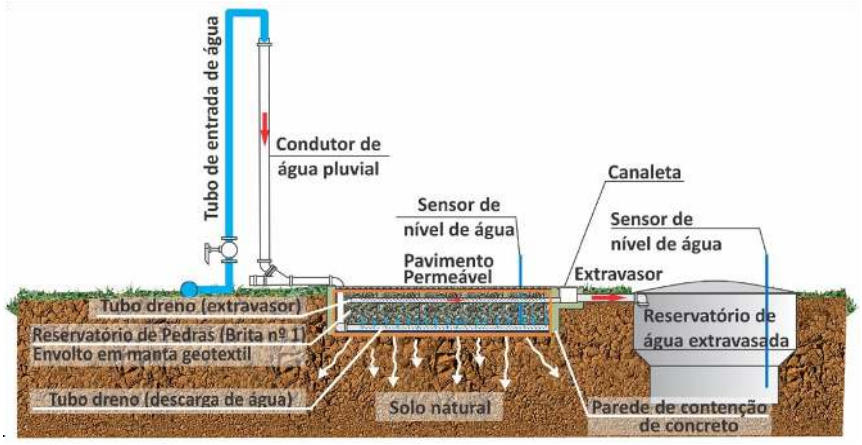
A resistência térmica pode ser expressa por meio da relação entre o fluxo de calor e a diferença de temperatura entre os meios ou, ainda, em função da relação entre a condutividade térmica e a área transversal à passagem do fluxo de calor (KREITH, 2003).

Analogamente, no escoamento de água no solo, a resistência hidráulica, aqui denominada de coeficiente de interface, pode ser expressa por meio da relação entre a vazão de projeto

e a diferença de umidade entre as camadas do solo ou, ainda, em função da relação entre a condutividade hidráulica e a área transversal à passagem do fluxo de água.

Os coeficientes de interface foram obtidos em um pavimento permeável experimental, (Figura 1) com dimensão de 5,0 x 2,5 m e 1,0% de declividade, composto por um sistema modular denominado Ecopavimento®, componente disponível no mercado nacional (REIS, 2018). O dimensionamento do pavimento permeável foi feito considerando-se um período de retorno de 5 anos e uma duração da chuva de 10 min, precipitada sobre uma cobertura de 50 m^2. A intensidade pluviométrica foi definida de acordo com a equação proposta por Zuffo e Leme (2005).

FIGURA 1 - Pavimento permeável experimental.



Fonte: Reis (2018)

Considerando-se as Equações 1 a 4, o instante inicial, quando a primeira gota de chuva toca a superfície da brita e o instante final, quando a umidade na camada de brita é igual ao valor da sua porosidade, a partir de 41 valores de vazões de projeto (3,23 m^3/h a 13,05 m^3/h) ensaiadas em um pavimento permeável experimental, foram determinados os coeficientes de interface, os quais variaram de 0,95 a 1,05.

Para a formulação das equações para a determinação dos coeficientes de interface foi utilizado o Teorema do PI de Buckingham, o qual pode ser expresso por (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2014):

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \ldots \Pi_n) = 0 \qquad \text{(Eq. 5)}$$

Em que Π_1, Π_2, Π_3, ... Π_n são os parâmetros independentes, obtidos pela combinação de parâmetros pré-definidos.

Assim, a partir da consideração de diferentes tipos de equações, foi selecionada aquela que apresentou o maior coeficiente de correlação com os dados medidos.

Para a definição dos parâmetros independentes (Quadro 1) foram consideradas as analogias entre: vazão de projeto e fluxo de calor; condutividade hidráulica e condutividade térmica; e área transversal da camada de brita e área transversal ao fluxo de calor.

QUADRO 1 - Parâmetros para a determinação dos coeficientes de interface.

Coeficiente de interface	Parâmetro
Interação ar-brita ($C_{ar,b}$)	• vazão de projeto • área da brita
Variação da condutividade hidráulica ao redor do eixo do da brita (k_1)	
Variação da condutividade hidráulica ao longo da profundidade do solo (k_2)	• condutividade hidráulica do solo • área da brita
Interação brita-solo ($C_{b,s}$)	
Variação da condutividade hidráulica entre camadas diferentes de solo ($C_{i,i+1}$)	

A partir disso, a equação do tempo de enchimento da camada de brita em função da vazão de projeto foi determinada em função das vazões experimentais utilizadas para a definição dos coeficientes de interface, ajustando-se para uma equação na forma potencial. Substituindo-se as vazões de projeto experimentais na equação ajustada foram determinados os respectivos tempos de enchimento modelados, os quais foram comparados, por meio do teste t-pareado, para nível de significância de 2%, com os valores medidos em campo.

3 RESULTADOS

Os coeficientes de interface determinados nesse trabalho são apresentados no Quadro 2. Verifica-se que o k_2 resultou em uma constante, o que indica uma uniformidade da condutividade hidráulica ao longo da profundidade experimental.

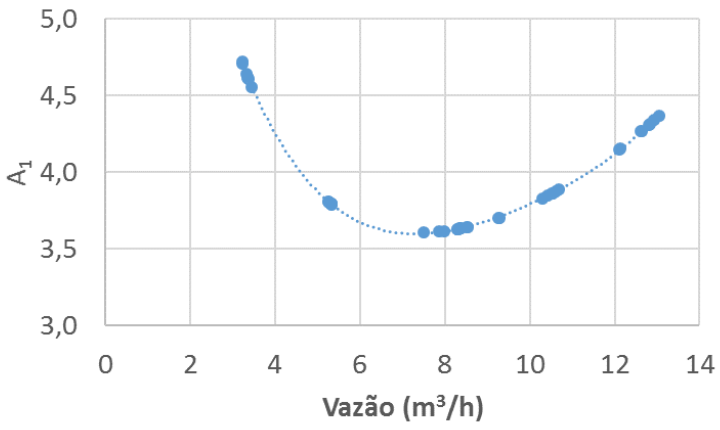
O valor mínimo da função da variável A_1 representa, aproximadamente, o valor da vazão de projeto utilizada no sistema (Figura 2).

QUADRO 2 – Coeficientes de interface.

Coeficiente de interface	Equação	
A_1	$A_1=\frac{9{,}877e^{0{,}134Q_p}}{Q_p}$	(eq 5)
Interação ar-brita (Car,b)	$C_{ar,b}=1{,}004*\left(\frac{A_1}{0{,}8115*A_1+2*10^{-5}}\right)$	(eq 6)
Variação da condutividade hidráulica ao redor do eixo do pavimento (k_1)	$k_1=\frac{\log(C_{ar,b})+0{,}2959}{(0{,}3136*C_{ar,b})}$	(eq 7)
Variação da condutividade hidráulica ao longo da profundidade do solo (k_2)	$k_2=0{,}90$	(eq 8)
Interação brita-solo ($C_{b,s}$)	$C_{b,s}=\frac{e^{\frac{[0{,}9807*ln(k_2)+0{,}0318]}{0{,}013}}}{300}$	(eq 9)
Variação da condutividade hidráulica entre camadas diferentes de solo ($C_{i,i+1}$)	$C_{i,i+1}=\frac{701{,}018k_1^3+2*10^6*k_1^2-2*10^6*k_1+706{,}099}{4.654{,}3}$	(eq 10)

A1 = representa o comportamento tridimensional da vazão de projeto, a qual foi modelada de forma unidimensional [adimensional]
Qp = vazão de projeto [m^3/h]

FIGURA 2 – Função da variável A1



A equação do tempo de enchimento da camada de brita do pavimento permeável experimental resultou em:

$$T_{e,E,P}=aQ_p^b \quad \text{(eq. 11)}$$

Em que:
$T_{e,E,P}$ = tempo de enchimento da camada de brita do pavimento permeável experimental [s];
a,b = coeficientes de ajuste da curva vazão de projeto x tempo de enchimento da camada de brita [adimensionais];
Q_p = vazão de projeto [m^3/h]

Ou, com R^2 = 0,9924, tem-se:

$$T_{e,E,P}=5.046,4Q_p^{-0,984} \quad \text{(eq. 12)}$$

Por sua vez, a equação do tempo de enchimento modelado da camada de brita do pavimento permeável resultou em:

$$T_{e,M,P}=cQ_p^d \quad \text{(eq. 13)}$$

Em que:
$T_{e,M,P}$ = tempo de enchimento modelado da camada de brita do pavimento permeável [s];
c,d = coeficientes de ajuste da curva vazão de projeto x tempo de enchimento da camada de brita [adimensionais];
Q_p = vazão de projeto [m^3/h]

Ou, com R^2 =0,9968, tem-se:

$$T_{e,M,P}=5.667,9Q_p^{-1,046} \quad \text{(eq. 14)}$$

Substituindo-se a vazão de projeto de 6,54 m^3/h, a qual foi utilizada no dimensionamento do pavimento permeável experimental na Equação 12 e na Equação 14, obtém-se, respectivamente, $T_{e,E,P}$ = 795,2 s (13,2 minutos) e $T_{e,M,P}$ = 794,9 s (13,2 minutos). Pode-se dizer que esses valores são praticamente idênticos, indicando a aderência do equacionamento proposto.

4 CONCLUSÕES

Pavimentos permeáveis têm sido utilizados como ferramenta de gestão de águas pluviais, atenuando picos de enchentes a jusante do lote. O equacionamento deste sistema requer a modelagem entre as várias interfaces envolvidas no fenômeno.

Os modelos unidimensionais propostos nesse trabalho contemplam o uso de coeficientes de interfaces para representação do comportamento tridimensional do escoamento de água no solo, considerando-se a interação entre o ar e a brita; a variação da condutividade hidráulica ao redor do eixo da camada de brita; a variação da condutividade hidráulica ao longo da profundidade do solo; a interação entre a brita e o solo e a variação da condutividade hidráulica entre camadas diferentes de solo.

Os valores do tempo de enchimento modelados não foram significativamente diferentes dos dados observados experimentalmente, para o nível de significância de 2%. O modelo proposto permite determinar o comportamento do fluxo de água e as interações temporais

com as camadas de solo subjacentes. podendo ser utilizado em outros locais, desde que com características físicas e hidrológicas similares.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Projeto 311525/2015-6); à FAPESP (Projeto 2012/04807-3) e ao Centro Cultural de Inclusão e Integração Social da Unicamp (CISGuanabara/Unicamp) pelo apoio ao desenvolvimento do presente trabalho; e às empresas Aqualimp, Eternit, Amanco e Ecotelhado pela doação dos componentes utilizados no aparato experimental.

REFERÊNCIAS

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

FERREIRA, A.T.; ILHA, M.S.O. Tempo de transbordamento de pavimento permeável com reservatório de brita. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, 2016, **Anais.**

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T**. Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S. A., 2014. 504 p.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

KLENK, M.; FORBUS, K. Domain transfer via cross-domain analogy. **Scince Direct**. v. 10, p. 240-250, 2009.

KREITH, F.; BOHN, M. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 683p

REIS, Ricardo P. A. Avaliação de desempenho e modelagem numérica de sistemas de infiltração de água de chuva integrados aos sistemas prediais, 2018. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

ZUFFO, A. C.; LEME, P. E. GRADEX e Santa Barbara: método híbrido para cálculo de vazão de projeto para macrodrenagem urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., João Pessoa, 2005. **Anais**... João Pessoa, 2005.