Simpósio ABRH 2003 Curitiba/PR

PRÉ-DIMENSIONAMENTO HIDROLÓGICO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

André Luiz Lopes da Silveira[1]

RESUMO - Apresenta-se uma solução explícita de pré-dimensionamento hidrológico aplicável a pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. A chuva de projeto é obtida de uma equação IDF com a formulação de Talbot, o método racional fornece as vazões de entrada e os volumes de saída nominais dos dispositivos, por infiltração no solo, obedecem a taxas máximas constantes. Com estas simplificações, as equações de balanço são construídas para dar explicitamente dimensões iniciais de projeto das estruturas mencionadas.

ABSTRACT - An explicit method is presented which yields preliminary estimates for the hydrologic design parameters of permeable pavements and infiltration trenches. The design rainfall is obtained from an IDF equation using Talbot's formulation; flows into the devices are obtained using the rational method; and the nominal volumes of output infiltrating the soil are considered constant. With these simplifications, water-balance equations are calculated which yield initial estimates of design parameters for the devices.

PALAVRAS – CHAVE - Drenagem Urbana; Pavimento Permeável; Trincheira de Infiltração

INTRODUÇÃO

A prática de projeto de obras pluviais de pequeno porte exige métodos simples e confiáveis de dimensionamento para não tornar complexo um estudo de alternativas que, muitas vezes, pode envolver um arranjo com diversas medidas de controle (MCs) na fonte, entre elas pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. Neste contexto, o pré-dimensionamento hidrológico, entendido aqui como a etapa que associa uma chuva de projeto a um balanço hídrico simplificado, para cálculo de volumes de armazenamento, serve para atribuir valores referenciais para as dimensões mínimas dos dispositivos de controle na fonte.

[1] Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500, Cx Postal 15029, 91501-970 Porto Alegre/RS, andre@iph.ufrgs.br

O objetivo deste artigo é, então, propor fórmulas explícitas e gerais para o pré-dimensionamento hidrológico de MCs, com aplicação a pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração, onde os parâmetros poderão ser adaptados localmente em função de características da chuva e do solo.

Ao pré-dimensionamento hidrológico, não se pode esquecer, devem superpor-se outras exigências, como as requeridas, por exemplo, pelo dimensionamento estrutural, como no caso específico dos pavimentos permeáveis. Assim as equações obtidas não devem ser utilizadas para dimensionamentos definitivos sem um julgamento adequado por parte do projetista.

MÉTODO DA CURVA ENVELOPE

Um método clássico que promove um balanço hídrico simplificado para dimensionamento de estruturas com armazenamento é método da "curva envelope", tradicionalmente usado no dimensionamento expedito de bacias de detenção (DAEE/CETESB, 1980). Por esse método a curva de massa, no tempo, dos volumes afluentes ao dispositivo é comparada com a curva de massa dos volumes dele efluentes, e a máxima diferença entre as duas curvas é o volume de dimensionamento.

O método pode ser adaptado então para qualquer MC com algum volume de armazenamento. O que se apresenta abaixo é uma adaptação deste método, considerando-se os volumes expressos em lâminas de água equivalentes sobre a área em planta do dispositivo.

A curva afluente é dada pela curva HDF (altura-duração-frequência das chuvas) afetada por coeficientes de escoamento e de relação de áreas enquanto que a curva efluente será, por simplicidade, uma reta, representando uma vazão de saída constante do dispositivo.

Assim define-se inicialmente, as seguintes variáveis de massa (função do tempo) :

- H_E = lâmina d'água de entrada acumulada rebatida sobre a área em planta da MC;
- H_S = lâmina d'água de saída acumulada, também rebatida sobre a área em planta da MC.

A função H_E é construída pela IDF multiplicada pelo tempo (o que vem a ser uma HDF) e por fatores de escoamento e relações de área.

Parte-se de relações IDF com a expressão geral análoga a de Talbot (Azzout et al, 1994), porque permitirá uma solução explícita do volume máximo :

$$i = \frac{aT^b}{t+c} \tag{1}$$

onde :

i = intensidade da chuva em mm/h

T = período de retorno em anos

t = duração em minutos

a, b, c, os parâmetros da equação

Desta forma, a expressão de HE, em mm, é dada por :

$$H_E = \beta \frac{aT^b}{t+c} \frac{t}{60} \tag{2}$$

onde :

β = produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo.

A função H_S, em mm, por sua vez, é obtida pela multiplicação da vazão de saída constante pelo tempo, conforme segue :

$$H_S = \gamma H q_s \frac{t}{60} \tag{3}$$

onde :

q_s = vazão de saída constante do dispositivo, em mm/h

γH = razão entre a área de percolação e a área do dispositivo em planta (H é a profundidade média, em mm, do volume de acumulação do dispositivo);

t = duração em minutos.

Expressão do Volume Máximo

O volume máximo, ou de dimensionamento, é obtido através da maximização da diferença entre H_E e H_S, no tempo, de cujo desenvolvimento resulta :

$$\beta \frac{caT^b}{(t+c)^2} - \gamma H q_S = 0 \tag{4}$$

Portanto, é possível explicitar o tempo do volume máximo, o qual, aplicado à diferença entre H_E e H_S fornece a expressão do volume máximo :

$$V_{\max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} T^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{H} \sqrt{q_S} \right)^2 \tag{5}$$

Através desta expressão parâmetros de pré-dimensionamento para diferentes MCs podem ser obtidos.

Conversão para uma IDF tipo Talbot

A expressão de Talbot para a IDF não é muito comum, sobretudo no Brasil, onde predomina a equação potencial :

$$i = \frac{kT^m}{(t+d)^n} \tag{6}$$

Entretanto, a partir de simulações numéricas expressões de conversão para “a”, “b” e “c” da IDF de Talbot puderam ser estabelecidas e valem como uma primeira aproximação para um caso específico, sendo provavelmente necessário ainda aplicar ajustes finos adicionais. Estas aproximações são :

$$a = 0{,}68k \exp\left(0{,}06n^{-0{,}26} d^{1{,}13}\right) \tag{7}$$

$$b = m \tag{8}$$

$$c = 1{,}32n^{-2{,}28} d^{0{,}89} \tag{9}$$

Uma IDF recentemente estabelecida para Porto Alegre foi (Bemfica et al, 2000) :

$$i = \frac{1297{,}9T^{0{,}171}}{(t + 11{,}6)^{0{,}85}} \tag{10}$$

Assim os parâmetros Talbot pelas expressões acima são :

$$a = 2395{,}4$$

$$b = 0{,}171$$

$$c = 16{,}9$$

Entretanto comparando-se as intensidades de chuva de ambas IDF, verificou-se, neste caso de Porto Alegre, que o coeficiente “a” deveria ser ainda majorado com 1,09.

Assim a versão Talbot final da IDF acima passou a ser então :

$$i = \frac{2611T^{0{,}171}}{t + 16{,}9} \tag{11}$$

Evidentemente há outras formas de estabelecer, direta ou indiretamente IDFs Talbot necessárias ao método, mas isto não será tratado aqui.

PRINCÍPIOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração são dispositivos de controle dos excessos pluviais por infiltração no solo. Portanto, o princípio que norteia seus pré-dimensionamentos é de infiltrar no solo todo o excesso pluvial a elas destinado, com determinado risco de ocorrência da chuva. Em outras palavras, no contexto de uma área maior, as áreas controladas pelos dispositivos terão escoamento superficial tecnicamente nulo, para o período de retorno de projeto.

Em resumo, na análise do escoamento gerado por um empreendimento onde há áreas controladas e áreas não controladas, é preciso verificar se o conjunto do empreendimento gera, no máximo, a vazão de restrição local. Pode haver áreas não controladas que gerem mais do que a vazão de restrição, mas isto deve ser contrabalançado pelas áreas controladas pelos dispositivos.

PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL

O pavimento permeável é admitido aqui como tendo uma camada suporte porosa (geralmente brita) abaixo do pavimento (revestimento) propriamente dito (Silveira et al, 2001). O que é pré-dimensionado é a espessura dessa camada reservatório.

Para o pavimento permeável tem-se a área de percolação coincidente com a área do dispositivo em planta, deste modo $\gamma H = 1$, logo :

$$\sqrt{\gamma}\sqrt{H} = 1$$

Em conseqüência, a equação 5 simplifica-se para :

$$V_{\max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} T^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_S} \right)^2 \qquad (12)$$

A partir de V_{max}, o cálculo da espessura da camada reservatório do pavimento é obtido facilmente por :

$$H = \frac{V_{\max}}{\eta} \qquad (13)$$

onde η é a porosidade do material de enchimento da camada porosa.

Exemplo de pré-dimensionamento de um pavimento permeável

Considere-se um empreendimento implantado em Porto Alegre sobre uma área total de 12.000 m^2 (1,2 hectares), que vai ocupar 2.000 m^2 com edificações, reservar 4.000 m^2 para estacionamento pavimentado e preservar 6.000 m^2 como área verde com bosque. Admita-se que a vazão máxima que este empreendimento pode produzir como escoamento superficial destinado à rede pluvial pública local seja 20,8 l/(s.ha). E que a municipalidade exija que se avalie a situação para um período de retorno de 2 (dois) anos. Se nenhum controle na fonte for realizado, via de regra toda área edificada e de estacionamento constituem áreas com grande taxa de impermeabilização. Neste caso a vazão máxima pode ser calculada pelo método racional :

$$Q = 0{,}278CiA \qquad (14)$$

onde :

Q = vazão máxima em m^3/s;

C = coeficiente de escoamento médio superficial ponderado;

i = máxima intensidade da precipitação (em mm/h);

A = área da bacia contribuinte em km^2.

O tempo de concentração da área total do empreendimento, sem controle na fonte, foi avaliado em 15 minutos, assim a intensidade de chuva correspondente pela equação 11, para T=2 anos, é 92,1 mm/h.

O coeficiente de escoamento médio superficial é ponderado entre as áreas de edificação, estacionamento e a área verde. Para a área edificada, que comporta alguns jardins internos, definiu-se um C_{edif} = 0,80. Para o estacionamento impermeável, considerou-se C_{pav} = 0,95. Para a área verde com bosque, C_{ver} = 0,10 é adequado. Assim o coeficiente de escoamento médio superficial ponderado fica em 0,50. Sabendo-se que a área total do empreendimento é de 12.000 m^2 ou 0,012 km^2, o valor da vazão máxima fornecida pela equação 14 é de 0,154 m^3/s ou 154 l/s, portanto maior que a vazão máxima permitida de 20,8 l/s.

Assim é preciso tomar alguma medida de controle na fonte para respeitar este limite. A opção escolhida foi a de um pavimento permeável com revestimento de asfalto poroso e camada porosa (reservatório) de brita sobre solo suporte permeável, para infiltração total da água da chuva com o período de retorno adotado de 2 anos. Isto eqüivale a admitir como escoamento superficial no empreendimento apenas aquele gerado na área de bosque, assim o coeficiente de escoamento médio superficial ponderado para toda a área do empreendimento, resume-se a :

C = (0,10.6000)/12000 = 0,05

Com este C a nova vazão máxima gerada pelo empreendimento será, por efeito do pavimento permeável, igual a 0,015 m^3/s ou 15 l/s. Portanto, o pavimento permeável propicia o atendimento da restrição de vazão, já que 15 l/s é menor que a vazão limite que é de 25 l/s (20,8 l/s/ha em 1,2 ha). Note-se que manteve-se o mesmo tempo de concentração e, portanto, a mesma intensidade de chuva, mas evidentemente o tempo de concentração poderia ser reavaliado para a nova situação, mas para uma fase de pré-dimensionamento é aceitável o que foi feito.

Parte-se a seguir para o pré-dimensionamento efetivo do pavimento permeável. Há possibilidade de utilização de 50% da área de estacionamento como pavimento poroso (boxes para os carros).

O pré-dimensionamento inicia-se com a equação de β :

$$\beta = \frac{A_{pav} + CA}{A_{pav}} \tag{15}$$

onde :

A_{pav} = 2.000 m^2 (área do pavimento permeável ou 50% da área de estacionamento) ;

A = 4.000 m^2 (área de edificação, 2.000 m^2, mais 50% do estacionamento, outros 2.000 m^2, com pavimento comum cujo escoamento deve ser absorvido pelo pavimento permeável);

No cálculo do coeficiente C de escoamento ponderado da área A acima, considerou-se o valor de 0,85 para a parcela edificada e de 0,95 para a parcela com pavimento comum), chegando a um valor ponderado de 0,90. Com os valores acima, obtém-se pela equação 15 o parâmetro β = 2,8. O solo teve sua permeabilidade K_{sat} avaliada em 15 mm/h, mas por medida de precaução usou-se um redutor α = 0,1 (colmatação) para obtenção de q_s que ficou com o valor de 1,5 mm/h.

A equação de V_{max} para Porto Alegre, com base nas equações 6 e 7 é :

$$V_{\max} = \left(6{,}60\sqrt{\beta}T^{0{,}086} - 0{,}53\sqrt{q_S}\right)^2 \tag{16}$$

Com os valores de β = 2,8 e q_s = 1,5 mm/h, sendo T=2 anos, obtém-se :

$$V_{\max} = 123mm$$

Usando-se brita com permeabilidade η = 0,35, a profundidade da camada porosa é :

$$H = 123/0{,}35 = 351mm$$

Portanto 2000 m^2 de pavimento permeável, com camada porosa (reservatório) de 35 cm de brita com porosidade 0,35, propicia que o empreendimento como um todo gere apenas 15 l/s, respeitando o limite de 20,8 l/s/ha ou 25 l/s.

Para chuvas maiores que a chuva de projeto (períodos de retorno maiores), o pavimento permeável naturalmente deve contar com dispositivos de deságüe para um exutório (um córrego ou uma rede pluvial do bairro, por exemplo).

PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UMA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

A trincheira de infiltração é uma MC linear de infiltração com volume de reservação em material poroso, geralmente de brita (Souza, 2001). É um dispositivo mais adequado para controle de escoamento gerado em pequenas áreas contribuintes. Sendo um dispositivo linear adapta-se bem na borda ou num canteiro interno da área contribuinte.

Pode-se fixar seu comprimento com base no traçado arquitetônico (por exemplo, comprimento coincidente com a largura de um estacionamento). A largura da trincheira, por sua vez, não deve ser muito estreita, de modo que dificulte sua própria execução, nem muito larga, para não exigir muito espaço no terreno (larguras de 80 cm a 1 m são normalmente utilizadas). Fixando-se o comprimento e a largura, a profundidade da trincheira é definida basicamente pelo dimensionamento da profundidade de brita. O que se procura então é calcular a profundidade da trincheira, ou seja, o valor de H.

Definidos o comprimento L e a largura B da trincheira, a área de captação do dispositivo é BL. Assim é possível calcular β, que é adimensional, como :

$$\beta = \frac{CA}{BL} \tag{17}$$

onde :

A = área contribuinte à trincheira;

C = coeficiente de escoamento da área contribuinte;

B = largura da trincheira

L = comprimento da trincheira

A área de percolação, ou seja, de passagem da água da trincheira para o solo, corresponde à área das paredes laterais (a área de fundo não é considerada pois admite-se colmatação rápida).

Desta forma tem-se:

$$\gamma = \frac{2L}{BL} = \frac{2}{B} \tag{18}$$

sendo B em mm.

A expressão de γ , independente de H, introduzida na de V_{max} (equação 5), estabelece uma equação do tipo :

$$V_{\max} = \eta H = \left(k_1 - k_2\sqrt{H}\right)^2 \tag{19}$$

onde :

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{a}{60}}\sqrt{\beta}T^{b/2} \\ k_2 &= \sqrt{\frac{c}{60}}\sqrt{\gamma}\sqrt{q_S} \end{aligned} \tag{20}$$

sendo η a porosidade do material de enchimento da trincheira.

A solução do sistema de equações 19 e 20, para a profundidade H da trincheira, em cm, é :

$$H = \frac{1}{10}\left[\frac{k_1\left(k_2 - \sqrt{\eta}\right)}{\eta - k_2^2}\right]^2 \tag{21}$$

Exemplo de pré-dimensionamento de uma trincheira de infiltração

Imagine-se uma trincheira de infiltração para drenar um trecho de rua, com pavimento impermeável com 100 m de comprimento e 10 m de largura de pista, em Porto Alegre. A trincheira é colocada na lateral da rua e portanto seu comprimento também será de 100 m. Define-se também, *a priori*, a largura, resumindo o dimensionamento no cálculo da profundidade do reservatório de brita. Optou-se por dimensionar uma trincheira com 0,80 m de largura para um período de retorno de 2 anos.

O pré-dimensionamento inicia-se com o cálculo de β que exige a definição dos parâmetros abaixo :

A = 1000 m^2 (área da pista que é a área cujo escoamento, direcionado para a trincheira, deve ser por ela controlado);

C = 0,95 (coeficiente de escoamento da área A acima, ou seja da pista);

B = 0,80 m (largura da trincheira);

L = 100 m (comprimento da trincheira).

Calculando-se obtém-se :

$\beta = 11{,}875$

No cálculo de γ a largura B deve estar com a unidade de mm, assim :

$\gamma = 2/800 = 0{,}0025\ mm^{-1}$

O passo seguinte é a definição de q_s que é o produto da permeabilidade K_{sat} do solo suporte (avaliada por ensaio de campo em 36 mm/h) e de um fator redutor α por colmatação. O projetista, avaliando as condições locais, achou razoável considerar $\alpha = 0{,}5$ assim q_s fica em 18 mm/h.

Para a IDF considerada de Porto Alegre, os fatores k_1 e k_2 são:

$$k_1 = 6{,}60\sqrt{\beta}T^{0{,}086} \tag{22}$$

$$k_2 = 0{,}53\sqrt{\gamma}\sqrt{q_S} \tag{23}$$

Portanto, substituindo-se as variáveis pelos seus valores no problema, obtém-se $k_1 = 24{,}14$ e $k_2 = 0{,}1124$.

Supondo que a brita selecionada para execução da trincheira tenha porosidade $\eta = 0{,}38$, o cálculo da espessura H da camada reservatório, em cm, pela equação 21 fornece :

$H \cong 110\ cm$

Como a trincheira de infiltração é dimensionada para eliminar, por infiltração, todo o escoamento superficial da sua área contribuinte (para o período de retorno adotado), na prática, no contexto de uma área maior que deve respeitar a vazão limite local, a trincheira elimina sua área contribuinte da avaliação do escoamento desta área maior.

CONCLUSÃO

Adaptando-se as relações IDF de uma localidade para o formato da equação IDF de Talbot é possível estabelecer equações explícitas para pré-dimensionamentos hidrológicos facilitados de dispositivos de controle pluvial na fonte.

As equações de pré-dimensionamento podem ser generalizadas para qualquer localidade, desde que se disponha de parâmetros locais de chuvas intensas (IDF tipo Talbot), solo (condutividade hidráulica saturada) e condições limitantes de vazão (vazão de pré-ocupação ou de restrição). As limitações são aquelas método da curva envelope, destacando-se a simplificação de uma vazão de saída constante independente do volume armazenado no dispositivo.

As aplicações para os casos de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração mostraram a adequação da abordagem naquilo que se propôs, sobretudo a facilidade de execução dos cálculos e a versatilidade para pré-dimensionamentos de dispositivos de controle pluvial na fonte.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece apoio do projetos REHIDRO/FINEP, CT-HIDRO/FINEP e do PRONEX/MCT/MEC desenvolvidos no IPH/UFRGS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZZOUT, Y., BARRAUD, S., CRES, F. N., ALFAKIH, E. 1994.; Techniques alternatives en assainissement pluvial. Paris: Technique et Documentation – Lavoisier.

BEMFICA, D. C., GOLDENFUM, J.A., SILVEIRA, A.L.L., 2000, Verificação da Aplicabilidade de Padrões de Chuva de Projeto a Porto Alegre, Revista Bra-sileira de Recursos Hídricos, Vol. 5, N.4, out/dez, pp 5-16.

DAEE/CETESB, 1980, Drenagem Urbana, Manual de Projeto, Departamento de Águas e Energia Elétrica e Companhia de Tecnologia de Saneamento, São Paulo.

SILVEIRA, A L. L., GOLDENFUM, J.A., FENDRICH, R., 2001, Urban drainage control measures. In: Urban drainage in humid tropics. Paris: Unesco, 2001. p.125-156.

SOUZA, V. C. 2001. Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento Superficial. Tese de Doutorado. 127 pp. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.