- NOTA TÉCNICA -

PRÉ-DIMENSIONAMENTO HIDROLÓGICO DE DISPOSITIVOS DE CONTROLE PLUVIAL NA FONTE

André Luiz Lopes da Silveira e Joel Avruch Goldenfum
Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS
Porto Alegre - RS – andre@iph.ufrgs.br

RESUMO

Neste nota técnica propõe-se uma solução explícita de pré-dimensionamento hidrológico para grande parte dos dispositivos de controle na fonte que possuem alguma capacidade de armazenamento, incluindo pavimentos permeáveis, dispositivos de infiltração (trincheiras, poços e valas) e bacias de detenção e retenção. 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 ou lançamento na rede pluvial, obedecem a taxas máximas constantes. Com estas simplificações, as equações de balanço são construídas para dar explicitamente dimensões de projeto das estruturas de controle pluvial na fonte.

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 diversos dispositivos ou medidas de controle na fonte (pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, bacias de detenção, entre outros, doravante chamadas de MCs). Uma importante componente destes métodos é o pré-dimensionamento hidrológico, entendido aqui como a etapa que associa uma chuva de projeto a um balanço hídrico simplificado, com vistas ao cálculo de volumes de armazenamento necessários e, em consequência, das dimensões mínimas dos dispositivos de controle na fonte.

O objetivo desta nota técnica é, então, propor fórmulas explícitas e gerais para o pré-dimensionamento hidrológico de MCs, 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 e outros dispositivos.

Assim as equações obtidas não devem ser utilizadas para dimensionamentos definitivos sem um julgamento adequado por parte do projetista.

MÉTODO DA CURVA ENVELOPE

O método da curva envelope" ou "método das chuvas" é um método clássico muito utilizado 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 para qualquer MC com algum volume de armazenamento.

Para efeito de cálculo, os volumes podem ser 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 normalmente é uma reta, pois admite-se, por simplicidade, uma vazão de saída constante do dispositivo.

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

H_E = lâmina d'água de entrada acumulada medida sobre a área em planta da MC;

H_S = lâmina d'água de saída acumulada, também medida 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) :

$$i = \frac{aT^b}{t+c} \qquad (1)$$

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

A expressão de Talbot permite solução explícita do volume máximo, conforme mostrado adiante.

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

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

onde :

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

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

$$H_S = \gamma H q_s \frac{t}{60} \qquad (3)$$

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 = profundidade média, em mm, do volume de acumulação do dispositivo;
t = duração em minutos

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 :

$$i = \frac{kT^m}{(t+d)^n} \qquad (4)$$

A partir de simulações numéricas as seguintes expressões de conversão puderam ser estabelecidas :

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

$$b = m$$

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

Elas valem como uma primeira aproximação para um caso específico, sendo provavelmente necessário ainda aplicar um coeficiente de ajuste adicional ao coeficiente “a”.

Por exemplo, uma IDF recentemente estabelecida (Bemfica et al, 2000) para Porto Alegre foi a seguinte :

$$i = \frac{1297{,}9T^{0{,}171}}{(t+11{,}6)^{0{,}85}} \qquad (5)$$

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 passa a ser então :

$$i = \frac{2611T^{0{,}171}}{t+16{,}9} \qquad (6)$$

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

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, isto é :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial(H_E - H_S)}{\partial t} = 0 \qquad (7)$$

Utilizando-se as expressões anteriores, obtém-se :

$$\beta \frac{aT^b}{(t+c)}\left[1-\frac{t}{t+c}\right]-\gamma H q_S = 0 \qquad (8)$$

Desenvolvendo-se , fica :

$$\beta \frac{caT^b}{(t+c)^2}-\gamma H q_S = 0 \qquad (9)$$

Portanto, o tempo pode ser explicitado e tem a seguinte expressão :

$$t=\sqrt{\frac{\beta caT^b}{\gamma H q_S}}-c \qquad (10)$$

Este é o tempo da máxima diferença de volumes, ou seja, o tempo através do qual pode-se calcular o volume de dimensionamento ou volume máximo.

Chamando esse volume de V_{max}, sua expressão fica sendo a seguinte :

$$V_{\max}=\left(\sqrt{\frac{a}{60}}\sqrt{\beta}T^{b/2}-\sqrt{\frac{c}{60}}\sqrt{\gamma}\sqrt{H}\sqrt{q_S}\right)^2 \qquad (11)$$

Através desta expressão diversos parâmetros de dimensionamento serão deduzidos para diferentes MCs.

PRINCÍPIOS DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Considera-se somente o aspecto quantitativo de retenção e/ou redução do escoamento superficial, sem abordar controle de poluição. Não serão analisados também aspectos relevantes de localização, incluindo condições de solo suporte

Admite-se que as MCs de infiltração (pavimentos porosos, micro-reservatórios infiltrantes, e trincheiras, valas, poços e bacias de infiltração) promovem infiltração no solo de todo o excesso pluvial a elas destinado (portanto, as áreas por elas controladas terão escoamento superficial nulo, para o período de retorno de projeto).

As MCs de armazenamento sem infiltração no solo (incluindo bacias de detenção e retenção com leitos considerados impermeáveis) serão dimensionadas, por sua vez para liberar o escoamento máximo equivalente a uma *vazão de restrição em l/s por hectare,* (portanto, as áreas por ela controladas, terão escoamento superficial de projeto igual a essa vazão de restrição, para o período de retorno de projeto).

Por fim, as MCs de armazenamento com infiltração no solo (bacias de detenção e retenção com leitos considerados permeáveis) serão dimensionadas para liberar o escoamento máximo equivalente à referida vazão de restrição, sendo a infiltração no solo usada para diminuir as dimensões da MC (portanto, mesmo com esta infiltração, as áreas por ela controladas, terão escoamento superficial de projeto igual à vazão de restrição, para o período de retorno de projeto).

Em resumo, na análise do escoamento gerado por um empreendimento onde há áreas controladas por MCs 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 pelas MCs.

PAVIMENTO PERMEÁVEL

O pavimento permeável é admitido aqui como tendo uma camada suporte porosa (geralmente brita) abaixo do pavimento (revestimento) propriamente dito. 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 :

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

Logo :

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

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

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

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

Exemplo : 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 :

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

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 6, 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 é de :

$$Q = 0{,}278.0{,}50.92{,}1.0{,}012 = 0{,}154\, m^3/s$$

Esta vazão equivale a 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 equivale 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 :

$$Q = 0{,}278.0{,}05.92{,}1.0{,}012 = 0{,}015\, m^3/s$$

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 é feito com a equação de β que exige o cálculo dos parâmetros abaixo :

$$\beta = \frac{A_{pav} + CA}{A_{pav}} \qquad (15)$$

A_{pav} = 2000 m^2 (área do pavimento permeável ou 50% da área de estacionamento) ;

A = 4000 m^2 (área de edificação, 2000 m^2, mais 50% do estacionamento, outros 2000 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 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 na equação 12 é :

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

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 deságue para um exutório (um córrego ou uma rede pluvial do bairro, por exemplo).

TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

É uma MC linear de infiltração com volume de reservação em material poroso (geralmente de brita). Uma trincheira de infiltração é um dispositivo de controle de escoamento gerado em pequenas áreas contribuintes. É um dispositivo linear que coloca-se bem na borda ou num canteiro interno da área contribuinte. A trincheira é dimensionada para infiltrar toda a água de escoamento superficial da área contribuinte, com determinado período de retorno.

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 é o cálculo da profundidade da trincheira, ou seja, o valor de H.

Admite-se que já estão definidos o comprimento L e a largura B da trincheira. Portanto, a área de captação do dispositivo é BL. Assim é possível calcular β, que é adimensional, como :

$$\beta = \frac{CA}{BL} \qquad (17)$$

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:

$$\gamma = \frac{2L}{LB} = \frac{2}{B} \qquad (18)$$

sendo B em mm.

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

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

onde :

$$\eta H = V_{\max} \qquad (20)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}}\sqrt{\beta}T^{b/2}$$
$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}}\sqrt{\gamma}\sqrt{q_S} \qquad (21)$$

η = porosidade do material de enchimento da trincheira.

A solução, para a profundidade H da trincheira, em cm, é :

$$H = \frac{1}{10}\left[\frac{k_1\left(k_2 - \sqrt{\eta}\right)}{\eta - k_2^2}\right]^2 \qquad (22)$$

Exemplo : imagine-se uma trincheira de infiltração para drenar um trecho de rua, com pavimento impermeável com 100 m de comprimento com 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. No presente exemplo, 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 :

β = 11,875

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

γ = 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 α = 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:

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

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

Portanto, substituindo-se as variáveis pelos seus valores no problema, obtém-se :

$$k_1 = 6{,}60.\sqrt{11{,}875}.2^{0{,}086} = 24{,}14$$

$$k_2 = 0{,}53\sqrt{0{,}0025}\sqrt{18} = 0{,}1124$$

A brita selecionada para execução da trincheira tem porosidade η = 0,38, desta forma o cálculo da espessura H da camada reservatório, em cm, pode finalmente completar-se, através

da equação de H, e o resultado fornecido é :

$$H = \frac{1}{10}\left[\frac{24{,}14\left(0{,}1124 - \sqrt{0{,}38}\right)}{0{,}38 - 0{,}1124^2}\right]^2$$

$$H \cong 110cm$$

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.

VALA DE INFILTRAÇÃO

É também uma MC linear de infiltração mas seu volume de armazenamento temporário, antes da infiltração, ocorre a céu aberto. A vala de infiltração também é dimensionada para eliminar, por infiltração, todo o escoamento superficial da sua área contribuinte, para o período de retorno adotado.

O pré-dimensionamento de uma vala de infiltração pode ser simplesmente volumétrico, por metro linear de comprimento de vala. Esse volume é redistribuído transversalmente em função da geometria da seção adotada.

O pré-dimensionamento pode, então, basear-se no cálculo da profundidade média de armazenamento máximo na vala de infiltração. Considera-se como superfície de infiltração a superfície em planta (largura multiplicada pelo comprimento). Admite-se conhecidos, o comprimento L e a largura B do espelho d'água.

Como a área do dispositivo é igual à superfície de infiltração, tem-se :

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

Logo, usa-se a mesma equação de V_{max} apresentada o para o pavimento permeável (equação 12).

A expressão de β é, por sua vez, análoga à da trincheira (equação 17), apenas considerando:

B = largura da vala
L = comprimento da vala.

Após o cálculo de V_{max} pela expressão dada e faz-se :

$$H = \frac{V_{max}}{10} \qquad (23)$$

Onde H é a profundidade média, em cm, do volume máximo acumulado na vala. Esta profundidade H deve ser compatibilizada com a forma da seção transversal da vala.

Exemplo : considere-se a mesma situação colocada no exemplo anterior para o pré-dimensionamento da trincheira de infiltração. Trata-se da drenagem de um trecho de rua, com pavimento impermeável e 100 m de comprimento com 10 m de largura. A vala de infiltração é colocada na lateral da rua e portanto seu comprimento também será de 100 m. Em função da disponibilidade de espaço que se avalia localmente a largura poderia ser de 3,0 m. O período de retorno foi estabelecido em 2 anos.

O pré-dimensionamento começa com o cálculo de β, que depende dos valores de :

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

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

B = 3,0 m (largura da vala);

L = 100 m (comprimento da vala)

Calculando-se obtém-se :

β = 3,17

No exemplo anterior q_s já havia sido definido em 18 mm/h (é a mesma situação).

A equação de V_{max} calcula, em mm, a lâmina média acumulada sobre a vala :

$$V_{\max} = \left(6{,}60.\sqrt{3{,}17}.2^{0{,}086} - 0{,}53\sqrt{18}\right)^2$$

$$V_{\max} = 104{,}5mm$$

Em termos de altura H em cm, teríamos, portanto :

H $\cong$ 10,5 cm

Em fundo horizontal, esta lâmina d'água média acomoda-se em uma seção triangular de 3,0 m de largura no topo (largura da vala) e profundidade máxima de :

H_{max} = 2·H = 21 cm

Logo a inclinação dos taludes será de 14%.

Para chuvas maiores que a chuva de projeto (períodos de retorno maiores), deve-se prever o redirecionamento do excesso que não infiltra na vala para um exutório (córrego próximo, rede pluvial ou outro dispositivo de controle).

POÇO DE INFILTRAÇÃO

É uma MC de infiltração pontual que usa as superfícies laterais do cilindro escavado para eliminar, por infiltração, todo o escoamento superficial da sua área contribuinte, para o período de retorno adotado. Um poço de infiltração é uma medida de controle de escoamento superficial de pequenas áreas contribuintes.

Uma alternativa de dimensionamento é fixar o diâmetro D do poço e determinar sua profundidade H. A vazão de saída de projeto, por metro linear de poço, é dada pela capacidade de absorção do solo multiplicada pela área interna do poço.

O valor de γ, para o poço, é dado por :

$$\gamma = \frac{4\pi D}{\pi D^2} = \frac{4}{D} \qquad (24)$$

sendo D em mm.

O valor de β é dado por :

$$\beta = \frac{4CA}{\pi D^2} \qquad (25)$$

onde :

A = área contribuinte ao poço;

C = coeficiente de escoamento ponderado da área contribuinte;
D = diâmetro do poço.

A expressão de γ, independente de H, introduzida na de V_{max}, estabelece o mesmo equacionamento da trincheira de infiltração para H (equações 19 a 22), só que com H significando a profundidade do poço.

A profundidade H refere-se apenas ao horizonte permeável. A profundidade real do poço pode ser maior pela presença de camada superficial impermeável.

Exemplo : considere-se um poço de infiltração em Porto Alegre para absorver o escoamento com dois anos de período de retorno gerado em uma praça com 500 m^2 e parcela impermeabilizada de 40%.

O pré-dimensionamento é feito com a pré-fixação do diâmetro D do poço e o cálculo subsequente de sua profundidade H de infiltração (a infiltração pelo fundo é desconsiderada, pela rápida colmatação). A escolha do valor de D é arbitrária, mas deve-se evitar poços muito profundos por questões de custo de escavação. Se o poço resultante for raso, ou seja com H pequeno em relação a D, pode-se diminuir D e refazer os cálculos.

Para o cálculo de H, a exemplo de outros casos, estima-se β em primeiro lugar, com base no seguinte :

Para A (área contribuinte ao poço) tem-se o valor de 500 m^2;

Para o coeficiente C de escoamento ponderado da área A acima, considerou-se o valor de 0,95 para a parcela impermeabilizada da praça (40% da área, ou seja 200 m^2) e 0,20 para a parcela com grama (60% da área ou seja 300 m^2).

$$C = \frac{0{,}95 \cdot 200 + 0{,}20 \cdot 300}{500} = 0{,}50$$

E para D inicia-se com 3,0 m.

Com os valores acima, obtém-se o parâmetro β = 35,36.

No cálculo de γ o diâmetro D deve estar com a unidade de mm, assim :

γ = 4/3000 = 0,00133 mm^{-1}

A seguir, define-se q_s que é o produto da permeabilidade K_{sat} do solo suporte e de um fator redutor α devido à colmatação. Admita-se que um ensaio de campo indicou uma permeabilidade de 30 mm/h e uma análise das condições locais permitiu usar α = 0,25. Assim q_s fica igual a 7,5 mm/h.

Pode-se calcular agora os fatores k_1 e k_2 :

$$k_1 = 6{,}60.\sqrt{35{,}36}.2^{0{,}086} = 41{,}66$$

$$k_2 = 0{,}53\sqrt{0{,}00133}\sqrt{7{,}5} = 0{,}0529$$

Preenchendo-se o poço de infiltração com brita de porosidade η = 0,30, o valor da altura H, em cm, é dado por :

$$H = \frac{1}{10}\left[\frac{41{,}66\left(0{,}0529 - \sqrt{0{,}30}\right)}{0{,}30 - 0{,}0529^2}\right]^2$$

O resultado fornecido é :

$$H \cong 481cm$$

Talvez esta profundidade seja excessiva, assim seria conveniente utilizar um diâmetro D = 4,0 m e refazer os cálculos. Abaixo, estão os resultados dos parâmetros intermediários que se modificam e o novo valor de H.

β = 19,89.

γ = 0,001 mm^{-1}

$$k_1 = 6{,}60.\sqrt{19{,}89}.2^{0{,}086} = 31{,}24$$

$$k_2 = 0{,}53\sqrt{0{,}001}\sqrt{7{,}5} = 0{,}0459$$

Deles resulta :

$$H = \frac{1}{10}\left[\frac{31{,}24\left(0{,}0459 - \sqrt{0{,}30}\right)}{0{,}30 - 0{,}0459^2}\right]^2$$

$$H \cong 277cm$$

Este valor é mais razoável pois o poço não fica nem muito raso nem muito profundo. O importante é que a camada de solo na profundidade toda H tenha a permeabilidade.

Note-se que o poço com D = 4,0 m ocuparia uma área de 12,57 m^2, ou seja apenas 2,5% da área da praça, com a vantagem de poder incorporar-se paisagisticamente, sem o sentimento de perda de espaço.

MICRO-RESERVATÓRIO

O pré-dimensionamento de um microrreservatório depende se ele é estanque ou poroso (de infiltração).

No caso do micro-reservatório estanque o pré-dimensionamento estima o volume de reservação necessário. Usa-se a fórmula geral de V_{max} dada pela equação 12.

Evidentemente, os dispositivos de saída (orifícios ou condutos) devem ser dimensionados hidráulicamente para esgotar o equivalente à vazão de restrição.

No caso de micro-reservatório poroso, ele pode ser dimensionado fixando-se primeiramente seu comprimento e largura em planta, com base no espaço disponível no lote. A localização deve ser feita a cerca de 3 m de qualquer edificação importante no lote. O que se procura é calcular a profundidade do dispositivo, o que equivale ao dimensionamento da profundidade de brita.

Neste caso, as fórmulas de dimensionamento são análogas às da trincheira de infiltração. O que muda é a consideração da infiltração pelas quatro paredes verticais do microrreservatório, desprezando-se apenas o fundo como área de infiltração. Assim, em relação à trincheira de infiltração, a expressão de β não muda (equação 17), considerando :

B = largura do microrreservatório;
L = comprimento do microrreservatório;

Entretanto, a expressão de γ é peculiar ao micro-reservatório infiltrante :

$$\gamma = \frac{2(L+B)}{LB} \qquad (26)$$

sendo L e B expressos na unidade de mm.

A capacidade de infiltração, como em outrasa MCs, é elemento básico de projeto. É preciso calcular q_s, a vazão que percola pelas paredes do microrreservatório. Esta vazão é dada pelo produto da condutividade hidráulica saturada K_{sat} do solo por um coeficiente redutor α devido à colmatação.

Para microrreservatórios, valores recomendados de α situam-se entre 0,1 e 0,5. É recomendável que o solo tenha K_{sat} da ordem de 15 a 60 mm/h.

O pré-dimensionamento propriamente dito é então realizado pela mesmo equacionamento da trincheira de infiltração, sendo que H é a profundidade requerida pelo microrreservatório infiltrante.

A profundidade total do dispositivo é a profunfidade H somada às das camadas de fundo (filtro de areia, se houver) e de superfície (recobrimento). A estrutura, com membrana geotêxtil permeável isolando a brita do solo, é semelhante à da trincheira de infiltração.

Exemplo : o micro-reservatório é essencialmente uma MC para lotes individuais. Supondo um exemplo de um lote de 500 m^2, com 40% de área impermeável qual seriam as dimensões convenientes de um micro-reservatório estanque ? Observe-se que a área contribuinte e a taxa de impermeabilização são iguais às da praça do exemplo do poço de infiltração apresentado anteriormente, o que vai servir de comparação.

Para um micro-reservatório estanque , admite-se que tenha um dispositivo de saídaque controla o escoamento da área contribuinte até o limite permitido l/(s.ha), para o período de retorno desejado. O exemplo será feito com período de retorno T = 2 anos.

Para Porto Alegre, a equação 12 torna-se:

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

Considerando uma vazão limite de 20,8 l/(s.ha), por exemplo, tem-se, por transformação de unidades, que :

q_s = 7,5 mm/h

Assim a equação acima simplifica-se para :

$$V_{\max} = \left(6{,}60\sqrt{\beta}T^{0{,}086} - 1{,}451\right)^2$$

Como β é o produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo.

Para o cálculo de β usa-se a equação 17, devendo-se fixar antes :

B = largura do micro-reservatório

L = comprimento do micro-reservatório

C = coeficiente de escoamento.

A = área contribuinte.

Pode-se fazer $C \cong A_{imp}$, sendo A_{imp} a fração de área impermeável da área contribuinte.

No exemplo A_{imp}=0,4 assim pode-se ter β = 33,33, pré-fixando-se um comprimento L = 3 m e uma largura B = 2 m:

$$V_{\max} = \left(6{,}60.\sqrt{33{,}33}.2^{0{,}086} - 1{,}451\right)^2$$

$$V_{\max} = 1520{,}4mm$$

Ou seja, uma profundidade de 1,52 m.

Uma segunda opção é pré-dimensionar o micro-reservatório na variante infiltrante, com as mesmas dimensões L e B.

Neste caso o pré-dimensionamento é feito com a equação 22. O valor de β = 33,33, é o mesmo.

Por outro lado γ é calculado com a equação 26, com a largura B e o comprimento L em mm, assim :

γ = 2(3000+2000)/(3000.2000)= 0,00167 mm^{-1}

O passo seguinte é a definição de q_s, sabendo-se que K_{sat} = 36 mm/h por ensaio de campo. O projetista, avaliando as condições locais, achou razoável considerar um fator redutor de α = 0,5, assim q_s fica :

q_s = 18 mm/h

Pode-se calcular agora os fatores k_1 e k_2. Para a IDF considerada de Porto Alegre, os fatores k_1 e k_2 são:

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

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

Substituindo β e γ resulta :

$$k_1 = 6{,}60.\sqrt{33{,}33}.2^{0{,}086} = 40{,}44$$

$$k_2 = 0{,}53\sqrt{0{,}00167}\sqrt{18} = 0{,}0919$$

A brita selecionada para execução do micro-reservatório infiltrante tem porosidade η = 0,30, desta forma o cálculo da espessura H da camada reservatório, em cm, pode finalmente completar-se, através da equação 22.

O resultado fornecido é :

H $\cong$ 400 cm = 4,0 m

Isto equivale a uma profundidade efetiva V_{max} de 1,2 m.

BACIA DE DETENÇÃO

A bacia de detenção, também conhecida como bacia seca, tem aplicação em espaços abertos de condomínios privados ou espaços públicos (parques e praças). Isto corresponde a um uso que pode ser chamado de aplicação em loteamento ou off-line (Tucci e Genz, 1995).

Outra aplicação corresponde à sua implantação diretamente no leito de arroios da macrodrenagem da cidade, o que implica em um porte maior (Silveira et al, 2001).

No âmbito dos loteamentos a bacia de detenção visa resolver ou prevenir problemas de

geração de escoamento superficial restritos a estes, mesmo que alivie a macrodrenagem a jusante.

Bacias de detenção no leito dos arroios visam normalmente resolver problemas globais da bacia dentro de um planejamento da bacia como um todo. Portanto, podem exigir estudos de simulação hidráulico-hidrológica mais amplos, mesmo em nível de pré-dimensionamento, em relação a uma bacia de detenção em loteamento.

O pré-dimensionamento da bacia de detenção pode ser feito por uma variante da equação 12 onde β = C, significando nesse caso que V_{max} é o volume a reservar em equivalente de lâmina sobre toda bacia contribuinte :

$$V_{\max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{C} T^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_S} \right)^2 \quad (27)$$

onde :

V = volume de acumulação, em mm;
C = coeficiente de escoamento;
T = período de retorno em anos;
q_s = vazão de saída em mm/h

O resultado de V_{max} é em mm, mas basta multiplicar por 10 para se obter o equivalente em m^3/ha.

Obtido o volume por unidade de área de bacia hidrográfica, pode-se estimar com as informações topográficas e de área da bacia hidrográfica, a área inundada e o volume absoluto necessário.

Há basicamente três possibilidades de pré-dimensionamento :

- Bacia de detenção com leito impermeável (esgotamento por tubulação)
- Bacia de detenção com leito permeável e esgotamento por infiltração (bacia de infiltração)
- Bacia de detenção com leito permeável e esgotamento simultâneo por infiltração no solo e por tubulação (bacia de detenção/infiltração).

Para a bacia de detenção com leito impermeável, ou com leito considerado impermeável, é conveniente dimensionar o tubo de saída com a vazão de saída q_s igual à vazão de restrição ou de pré-desenvolvimento.

$$q_S = q_{pre}$$

Para uma bacia (preferencialmente) de infiltração, a capacidade de infiltração do solo comanda o esgotamento da água. Assim, a vazão de saída q_s é, a exemplo das MCs de infiltração vistas antes, dada pelo produto de da condutividade hidráulica saturada K_{sat} (mm/h) do solo com um coeficiente redutor α devido à colmatação.

$$q_S = \alpha K_{sat}$$

A condutividade hidráulica saturada deve ser determinada através de ensaios de infiltração. Para bacias de infiltração, valores recomendados de α situam-se próximos a 0,5.

Para a bacia de detenção com ajuda por infiltração (bacia de detenção/infiltração) o valor de q_s deve ser a soma da vazão de restrição ou pré-desenvolvimento com a vazão de infiltração :

$$q_S = q_{pre} + \alpha K_{sat}$$

É importante ressaltar que :

A bacia de detenção com leito considerado impermeável tem seu volume pré-dimensionado para liberar o escoamento máximo equivalente à vazão de pré-desenvolvimento, portanto a área por ela controlada terá seu escoamento superficial limitado a esta vazão, para o período de retorno considerado.

A bacia de infiltração tem seu volume pré-dimensionado para infiltrar no solo todo o excesso pluvial a elas destinado, portanto a área por ela controlada terá, para o período de retorno considerado, escoamento superficial nulo.

A bacia de detenção/infiltração tem seu volume pré-dimensionado para liberar o escoamento máximo equivalente à vazão de pré-desenvolvimento, portanto a área por ela controlada terá seu escoamento superficial limitado a esta vazão, mas ao favorecer também a infiltração, o volume armazenado será menor, para o período de retorno considerado.

Em qualquer das alternativas acima é preciso prever um descarregador de cheias com períodos de retorno maiores que o de projeto.

Exemplo : em uma área de 40 ha em Porto Alegre existe um núcleo urbano que abrange 25 ha e o restante é área coberta com vegetação. Esta área é uma microbacia em cujo talvegue pretende-se construir uma bacia de detenção de modo que toda área não produza uma vazão específica maior que 20,8 l/(s.ha), ou seja um total de 0,83 m^3/s. A municipalidade exige que se avalie a situação, considerando um período de retorno de 2 (dois) anos.

O primeiro passo é calcular a vazão máxima (T = 2 anos) sem a bacia de detenção, com o método racional :

Q_{max} = 0,278 C I A

onde:

Q_{max} = vazão máxima (em m^3/s);
C = coeficiente de escoamento médio superficial ponderado;
I = intensidade da precipitação IDF (em mm/h);
A = área da bacia contribuinte (em km^2).

O tempo de concentração da área foi avaliado em 30 minutos, assim a intensidade de chuva correspondente pela equação 6, para T=2 anos é :

I = 62,7 mm/h

O coeficiente de escoamento médio superficial é ponderado entre as áreas de urbanização e área verde. Para a área urbanizada, que é uma mescla de superfícies impermeáveis (edificações, ruas pavimentadas) e permeáveis (jardins, canteiros gramados), uma avaliação criteriosa chegou a um coeficiente de escoamento urbano de C_{urb} = 0,85, devido à predominância das áreas impermeáveis. Para a área verde estimou-se C_{ver} = 0,15 como adequado. Assim o coeficiente de escoamento médio superficial ponderado calcula-se como :

C = (0,85.25+0,15.15)/40 = 0,59

Sabendo-se que a área total do empreendimento é de 40 ha ou 0,4 km^2, o valor da vazão máxima é de :

Q_{max}= 0,278.0,59.62,7.0,4 = 4,11 m^3/s

Esta vazão é maior que a vazão máxima permitida de 0,83 m^3/s, acima calculada, portanto

a bacia de detenção é realmente necessária.

Este valor de vazão de restrição equivale a 7,5 mm/h que corresponde aos 20,8 l/(s.ha).

Para Porto Alegre a equação 27 torna-se :

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

No caso de uma bacia de detenção com leito impermeável, tem-se q_s = 7,5 mm/h, logo V_{max} = 15,44 mm, ou seja, 154,4 m^3/ha, ou um total de 6.176 m^3.

Uma avaliação local concluiu que o solo possui K_{sat} = 36 mm/h, assim uma alternativa seria a bacia de infiltração. Considerando um fator redutor por colmatação fixado em α = 0,5 , teríamos q_s = 18,0 mm/h, portanto superior à restrição. Pela equação acima, chegar-se-ia a V_{max} = 9,81 mm, ou seja, 98,1 m^3/ha, ou um total de 3.925 m^3.

Uma alternativa que poderia ser avaliada, é propor uma bacia mista de detenção e infiltração para reduzir ainda mais a necessidade de reservação, pois escoaria para o sistema pluvial a vazão de restrição mas haveria outra saída somada por infiltração.

Neste caso, o valor de q_s é dado por :

$$q_S = 7{,}5 + 18{,}0 = 25{,}5 mm/h$$

Com a equação 27 e os parâmetros de Porto Alegre chega-se a V_{max} = 7,31 mm, ou seja, 73,1 m^3/ha, ou um total de 2.926 m^3.

Com os dados do presente exemplo, pré-dimensionar uma bacia de detenção/infiltração necessitaria menos da metade do volume avaliado para uma bacia de detenção estanque.

BACIA DE RETENÇÃO

A bacia de retenção é um lago com volume de espera para contenção de excessos pluviais. A exemplo da bacia seca, tem aplicação em espaços abertos de condomínios privados ou espaços públicos.

O pré-dimensionamento da bacia de retenção pode ser realizada com a mesma formulação da bacia seca estanque, pois não se admite saída por infiltração, apenas por vertimento.

O volume calculado é adicionado ao volume correspondente ao nível d'água mínimo perene projetado para a bacia de retenção.

CONCLUSÃO

Adaptando-se a IDF de uma localidade para o formato da 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 estão 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.

Os equacionamentos obtidos abrangeram seguintes dispositivos de controle pluvial na fonte : pavimento permeável, trincheira de infiltração, vala de infiltração, poço de infiltração, micro-reservatório estanque, micro-reservatório infiltrante, bacia de detenção, bacia de infiltração e ba-

cia de retenção.

Foram apresentados exemplos numéricos com os quais pode-se verificar o grau de facilidade dos cálculos.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece apoio do projetosREHIDRO e CT-HIDRO da FINEP e do PRONEX (MCT/MEC), desenvolvidos no IPH/UFRGS.

REFERÊNCIAS

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E., 1994, Techniques Alternatives en Assainissement Pluvial : Choix, Conception, Réalisation et Entretien, LCPC, INSA Lyon, Certu, Agences de l'Eau, Lavoisier Technique et Documentation, Paris.

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

CRUZ, M.S.; TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.L.L, 1998, Controle do Escoamento com detenção em lotes urbanos, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, N.4, out/dez, pp 19-31.

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

TUCCI, C. E. M., GENZ, F., 1995, Controle do Impacto da Urbanização, In : Tucci, C.E.M., Porto, R.L., Barros, M.T. (org.), 1995, Drenagem Urbana, Editora da Universidade, ABRH.

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.