

Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação

Herlander Mata Lima

*Instituto Superior Técnico, CMRP/IST, Av. Rovisco Pais, 1. 1049-001 Lisboa. Portugal
E-mail: helima@ist.utl.ptt*

Evaristo Santos Silva

*GLOBALVIA - Consultores de Engenharia, SA
E-mail: geral@globalvia.pt*

Cristina Raminhos

*Engenheira de Recursos Hídricos (Univ. Évora)
E-mail: c_raminhos@hotmail.com*

Resumo

Esse trabalho apresenta uma metodologia integrada para gerir o excesso do escoamento através de bacias de retenção. Partindo de modelos hidrológicos de estimação de caudais de escoamento, nas bacias de drenagem, combinam-se os métodos expeditos (empíricos) e numérico, num procedimento integrado para o dimensionamento de bacias de retenção, incluindo as estruturas hidráulicas associadas (e.g. descarregador de orifício, descarregador de soleira espessa).

A abordagem que se apresenta engloba, também, as recomendações relacionadas aos critérios de implantação da bacia de retenção, tais como, o declive dos taludes e a profundidade.

A metodologia é aplicada a um estudo de caso sintético, tendo-se realçado a importância da aplicação dos métodos expeditos para obtenção de resultados preliminares, bem como a necessidade de aplicação do método numérico de *Level Pool Routing*, para o dimensionamento final da bacia de retenção e simulação do comportamento dinâmico.

Palavras-chave: bacias de retenção, métodos expeditos, método numérico, dimensionamento.

Abstract

This work presents an integrated methodology to manage runoff excess using a detention basin. Starting with hydrologic models to estimate runoff flow in the drainage basin, one combines empirical and numerical methods (process-based) in an integrated procedure to design the detention basin entailing associated hydraulic structures (e.g. submerged orifice, broad crest spillway).

The approach presented also includes recommendations respecting the criteria for detention basin installation such as slope and allowed water depth.

The methodology is applied to a synthetic case study, stressing the relevance of empirical methods to obtain preliminary results and the need to apply the numerical method for detailed detention basin design and dynamic-response simulation.

Keywords: *detention basin, empirical methods, numerical method, metailed mesign.*

1. Introdução

As bacias de retenção têm sido muito usadas comumente, em zonas rurais, como meio de armazenamento de água para fins agro-pecuários, e, em projectos de drenagem (e.g. drenagem de vias de comunicação, drenagem urbana), para reduzir o pico do escoamento para um nível compatível com a capacidade do meio receptor.

A inclusão de bacias de retenção, em projectos de drenagem, tem a vantagem de permitir, devido a sua multifuncionalidade, reduzir o pico do escoamento, evitando perturbações a jusante (e.g. inundação e degradação de terrenos e habitações, etc.), reduzir a carga de contaminante (e.g. SST) do escoamento (Schueler, 1992 e WSDOEWP, 1999), controlar a erosão, melhorar a paisagem, criando espaço recreativo e de lazer, recarregar os aquíferos, entre outras aplicações.

Não obstante a multifuncionalidade das bacias de retenção (temporária ou permanente), nesse trabalho a atenção é dirigida ao dimensionamento de bacias de retenção temporária para:

- i) Gerir o escoamento, reduzindo o pico causado pelas alterações (e.g. impermeabilização) nas condições de ocupação da bacia de drenagem.
- ii) Evitar a degradação (e.g. inundação e erosão) do meio receptor de jusante.

A bacia de retenção pode ser temporária ou possuir um volume de água permanente. O volume permanente tem a vantagem de permitir uma deposição adicional e um tratamento biológico nos intervalos entre os eventos de precipitação. Mas, nessa situação, o volume permanente de água deve ter uma profundidade determinada pelas condições locais, pelo tipo de solo utilizado (ver USDA, 1997) e pelos requisitos ambientais como, por exemplo, a necessidade de assegurar uma profundidade que não suscite o desenvolvimento de condições anaeróbias (CGSD, 2000).

Quanto ao posicionamento, no sistema de drenagem, a bacia de retenção

(BR) pode classificar-se como BR “*on-line*” ou BR “*off-line*”, conforme se apresenta na Figura 1.

O dimensionamento e a implantação da bacia de retenção requerem o conhecimento da topografia e rede hidrográfica, clima (regime de precipitação), tipo do solo, tipo de ocupação da bacia de drenagem, sistema de drenagem existente, plano de desenvolvimento (esse aspecto reveste-se de grande importância por permitir definir, com maior rigor, as condições de pós-desenvolvimento) e condições do meio receptor de jusante (e.g. capacidade do sistema de drenagem, tipo de ocupação do espaço).

A escolha do local de implantação da bacia de retenção deve basear-se nas condições geomorfológicas naturais do local, para evitar grandes perturbações no meio (e.g. movimentações de terra, impermeabilização) e reduzir custos económicos.

Tendo por base os aspectos supracitados, o presente trabalho apresenta uma metodologia, para a gestão do escoamento, através de bacias de retenção, em que se integram os aspectos hidrológicos, hidráulicos, ambientais (e.g. redução de contaminantes) e geotécnicos (e.g. estabilidade de taludes da bacia de retenção).

2. Metodologia integrada para gestão do escoamento por bacias de retenção

O dimensionamento de bacias de retenção, para a gestão do escoamento requer o cálculo do hidrograma do escoamento da bacia de drenagem, para os períodos de pré e pós-desenvolvimento. Por essa razão, o caudal do escoamento deve ser obtido através de um método capaz de reproduzir o escoamento acumulado (volume) (USACE, 1994; FHWA, 1999 e VDOT, 2001). O método de Soil Conservation Service (SCS) é, especialmente, indicado para o dimensionamento de bacias de retenção, porque

permite definir o hidrograma do escoamento, enquanto que o método racional é, particularmente, indicado, quando se pretende calcular o caudal de ponta instantâneo para o dimensionamento de estruturas de drenagem urbana. Porém o método racional modificado (Chow et alii, 1988, VDOT, 2001) pode ser utilizado para se obter o hidrograma do escoamento, no processo de dimensionamento de bacias de retenção.

Existem vários métodos hidrológicos simplificados que permitem estimar o volume da bacia de retenção, dos quais se destacam os seguintes:

- i) Método de hidrograma triangular simplificado (FHWA, 1999; CGSD, 2000 e GDOE, 2001).
- ii) Método de regressão de Pagan (VDOT, 2001).
- iii) Método da duração crítica do acontecimento de precipitação (MGONDC, 1988).
- iv) Método proposto por Debo e Reese, (1995), baseado no método racional modificado.
- v) Método de regressão proposto por Wycoff & Singh (1976).

Tucci (1998) também propõe um método expedito, baseado no método racional modificado, aplicável a pequenas bacias de drenagem urbanas (< 2km²).

Após a aplicação dos métodos expeditos, as condições de funcionamento da bacia de retenção são verificadas através da modelação numérica.

Entre os métodos expeditos supracitados, o presente trabalho considera os seguintes:

- i) Método de Hidrograma Triangular Simplificado (HTS).
- ii) Método de Regressão de Wycoff e Singh (RWS).
- iii) Método de Regressão de Pagan (RP).

Esses métodos são recomendados para a fase do estudo prévio dos projectos e devem ser validados com o modelo numérico, cuja aplicação pressupõe que

já se conhecem a localização e a forma da bacia, bem como o respectivo dispositivo de descarga. O modelo numérico utilizado, nesse trabalho, baseia-se no princípio da continuidade do escoamento e corresponde ao método de *Level Pool Routing* (também designado por método de *Puls*).

A Figura 2 sintetiza o fluxograma do algoritmo de dimensionamento da bacia de retenção.

2.1 Cálculo da vazão

No âmbito desse trabalho, considerou-se o método empírico do “*Soil Conservation Service (SCS)*”, para o cálculo da vazão (ou caudal) de ponta, correspondente ao período de pré e pós-desenvolvimento.

A vazão de ponta Q_p [m³/s] é obtida através da seguinte equação (ver, por exemplo, Correia, 1984a e IEP, 2001):

$$Q_p = \frac{RA}{3.6t_c} \tag{1a}$$

onde:

A é a área da bacia de drenagem [km²].

R é o escoamento acumulado ou precipitação efectiva [mm]

t_c é o tempo de concentração da bacia [h].

O escoamento acumulado ou precipitação efectiva (R), em mm, é estimado através da seguinte equação de SCS:

$$R = \frac{(p - I_a)^2}{(p - I_a) + S}, \text{ se } p > I_a \tag{1b}$$

onde:

p é a precipitação acumulada (escoamento potencial máximo) [mm].

S é a capacidade máxima de armazenamento no solo [mm].

I_a são perdas iniciais (de precipitação) devido à interceptação pelo coberto vegetal, infiltração e retenção em depressões de terreno [mm].

A USDA-SCS (1985) estabelece que $I_a = 0.2S$ (condição adoptada neste trabalho). Saliente-se, porém, que o I_a pode variar de 0.0S a 0.3S (Ponce & Hawkins, 1996).

A capacidade máxima de armazenamento no solo (S), em mm, vem expressa por:

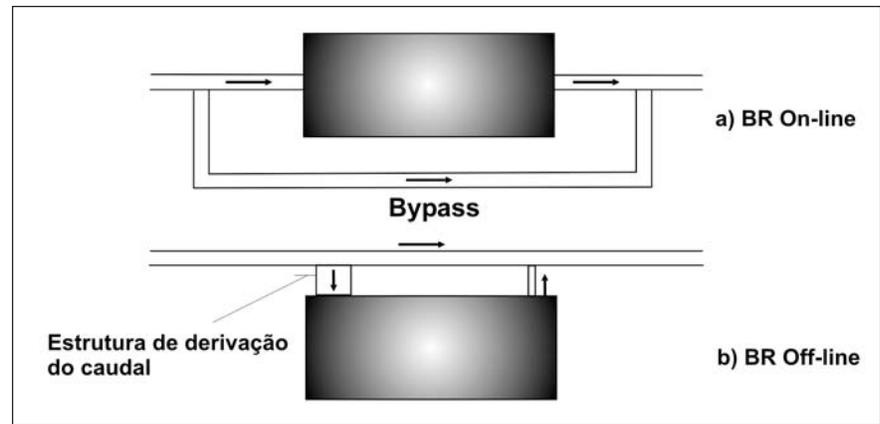


Figura 1 - Bacia de Retenção: a) “On-line” e b) “Off-line”

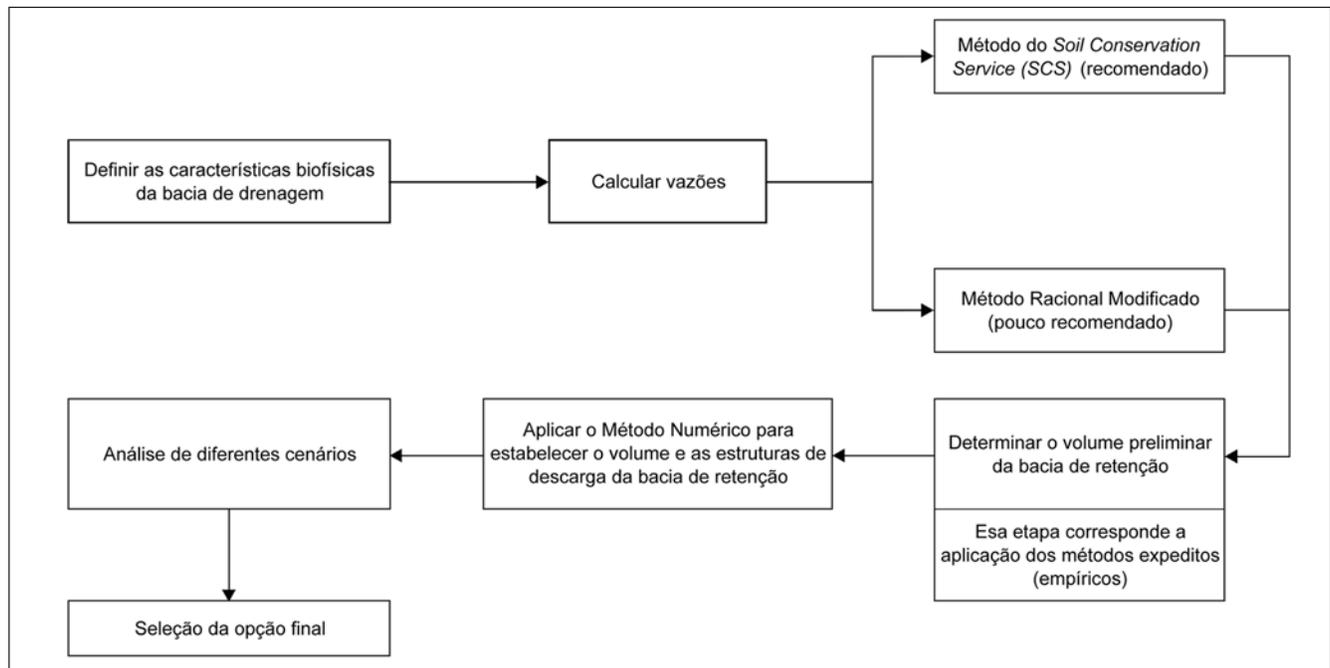


Figura 2 - Algoritmo de dimensionamento de bacias de retenção para gestão do escoamento.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1c)$$

onde: CN é o número do escoamento [-], que varia em função do tipo de solo e da ocupação e uso da bacia de drenagem. SCS (1972, 1986) e Correia (1984a) apresentam tabelas com valores indicativos de CN para bacias de drenagem urbanas e rurais.

De acordo com Correia (1984a), para se atingir a situação de equilíbrio, a duração da precipitação deve ser igual ou superior ao tempo de concentração da bacia de drenagem. Visto que a condição de aplicação da equação (1b) é $p > I_p$, a duração da precipitação a considerar, para o autor, deve ser superior ao tempo de concentração, de maneira que a duração da precipitação efetiva (também designada de precipitação útil) seja igual a esse tempo. Porém a assunção de precipitações com intensidade constante e duração superior ao tempo de concentração da bacia de drenagem conduz à diminuição da vazão de ponta, devido à diminuição da intensidade média da precipitação (Portela et alli., 2000). Por essa razão, é amplamente sugerido, em diversos trabalhos (e.g. Ponce, 1989; Pilgrin & Cordery, 1992; Viessman & Lewis, 1996 e VDOT, 2001), que se considere que a precipitação de projecto (também designada por precipitação crítica) possua uma duração igual ao tempo de concentração da bacia de drenagem.

Assim, optou-se por considerar que a duração da precipitação (D_p) é igual ao tempo de concentração, sendo a precipitação acumulada (p) expressa pela equação:

$$p = D_p \left(\frac{I_p}{60} \right) \quad (1d)$$

$$\text{com } I_p = a(t_c)^b \text{ e } D_p = t_c$$

onde:

I_p é a intensidade de precipitação [mm/h].
 t_c o tempo de concentração [min].

a e b são parâmetros de regressão da curva Intensidade-Duração-Frequência da Precipitação, I-D-F (ver, por exemplo, Matos, 1987).

Os tempos de concentração t_c , para o período de pré e pós-desenvolvimento, são estimados pela equação desenvolvida pela Soil Conservation Service: “Soil Conservation Service Lag Formula” (SCS, 1986; USDA, 1997).

$$t_{lag} = \frac{2.587 L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1900 i^{0.5}}, \text{ com } t_c = t_{lag} / 0.6 \quad (2a)$$

onde: t_{lag} é o tempo de retardamento da bacia de drenagem (*basin lag time*) [h], i é o declive médio da bacia de drenagem [%] e L é o comprimento da bacia de drenagem [m]. Para além da determinação do L , através da informação topográfica disponível, na ausência de informação, pode recorrer-se à seguinte expressão (USDA, 1997):

$$L = 110 A^{0.6} \quad (2b)$$

onde: A é a área da bacia de drenagem [ha].

O cálculo de t_c , por esse método, é, particularmente, recomendado, para bacias de drenagem homogêneas não-urbanas, de dimensão até 810 ha (USDA, 1973), e reflete, essencialmente, o escoamento concentrado. Porém esse método é apontado como aquele que se pode considerar mais «físicamente baseado» (*process-based*), visto que o número do escoamento (CN) permite refletir de certa forma, os processos que ocorrem na bacia de drenagem (USACE, 1994), daí a possibilidade de se obterem valores de t_c diferentes para o período pré e pós-desenvolvimento.

Existem indicações relacionadas aos valores mínimos de t_c , que devem ser consideradas para diferentes tipos de bacias de drenagem de pequena dimensão (Moth, 1998): urbana - 5 minutos; residencial - 10 minutos; e rural - 15 minutos.

2.2 Método expedito para o cálculo do volume da bacia de retenção

2.2.1 Método do Hidrograma Triangular Simplificado (HTS)

A aplicação desse método exige o conhecimento de dados relativos às condições biofísicas da bacia de drenagem a ser gerida, sendo o hidrograma de saída da bacia estabelecido em função da capacidade de vazão, Q_o , e da estrutura de drenagem a jusante.

É prática comum considerar-se que o hidrograma de saída da bacia de drenagem é definido com base nas condições reinantes antes das alterações previstas, i.e., condições de pré-desenvolvimento.

O volume de armazenamento é obtido através da equação seguinte:

$$V = \frac{1}{2} t_b (Q_i - Q_o) \quad (3)$$

onde: V é o volume de armazenamento da bacia de retenção [m^3], t_b é a duração da afluência do escoamento na bacia ou tempo de base do hidrograma [s], e Q_o e Q_i são, respectivamente, a vazão de ponta correspondente à condição de pré e pós-desenvolvimento [m^3/s].

O tempo de ascensão do hidrograma ou tempo para atingir a vazão máxima (t_p) e a duração da afluência do escoamento à bacia (t_b) podem ser obtidos pelas seguintes expressões (ver, por exemplo, Walesh, 1989; VDOT, 2001 e DMR, 2002):

$$t_p = t_c \quad (4)$$

$$t_b = 1.5 t_c \quad (5a)$$

$$t_b = 2 t_c \quad (5b)$$

$$t_b = 3 t_c \quad (5c)$$

onde os termos das equações possuem o mesmo significado descrito anteriormente.

Correia (1984b) também se refere à possibilidade de se adotar um tempo de ascensão (t_p) igual ao tempo de concentração da bacia (t_c), quando a duração da chuva é igual ou superior a este último. Por fim, saliente-se que DMR (2002) recomenda que, na ausência de informação rigorosa, se considere:

$$t_b = 2.67 t_c \quad (5d)$$

Assim, e de acordo com a equação (1a), adotaram-se as equações (4) e (5b) para o cálculo do t_p e t_b , respectivamente.

2.2.2 Método de Regressão de Pagan (RP)

O método de Pagan (*Pagan volume estimation method*) é de aplicação limitada a pequenas bacias de drenagem (até 200 acres = 81 ha), sendo recomendado para períodos de retorno não superior a 10 anos (VDOT, 2001). Trata-se de um método de regressão, que resultou do tratamento e compilação de dados de pequenas bacias de drenagem dos Estados Unidos da América (EUA) e que se resume na seguinte equação de regressão:

$$SP = -2883.1 \ln \left(\frac{Q_o}{Q_i} \right) + 13408 \quad (6a)$$

Através da equação (6a), é possível determinar o parâmetro de armazenamento, SP [s], para uma dada bacia de retenção, desde que se conheçam as vazões Q_i e Q_o já referidas anteriormente.

Síntese do procedimento de cálculo:

- i) Determinar a vazão de ponta para as situações de pré e pós-desenvolvimento (i.e. Q_o e Q_i).
- ii) Determinar o parâmetro de armazenamento SP através da equação (6a).

iii) Determinar o máximo volume de armazenamento V_{max} [m³] pela seguinte equação:

$$V_{max} = \eta SP Q_p, \text{ com } \eta = 35.3107 \quad (6b)$$

2.2.3 Método de Regressão de Wycoff e Singh (RWS)

O volume de água, que é necessário armazenar, para reduzir o pico do escoamento, pode ser obtido através da seguinte equação de regressão (Wycoff & Singh, 1976):

$$\frac{V}{V_E} = \frac{1.291 \left(1 - \frac{Q_o}{Q_i} \right)^{0.753}}{\left(\frac{t_b}{t_p} \right)^{0.411}}, \text{ com } V_E = \frac{1}{2} t_{b0} Q_o \quad (7)$$

onde: V é o volume de armazenamento da bacia de retenção [m³], V_E é o volume total do escoamento [m³], Q_i é a vazão de ponta correspondente ao hidrograma de entrada (i.e. vazão de ponta referente à condição de pós-desenvolvimento) [m³/s], Q_o é a vazão de ponta correspondente ao hidrograma de saída (i.e. vazão de ponta do pré-desenvolvimento) [m³/s], t_b e t_p correspondem à condição de pós-desenvolvimento e têm o mesmo significado referido anteriormente e t_{b0} é o tempo de base do hidrograma correspondente à condição de pré-desenvolvimento [s].

Multiplicando o volume total do escoamento V_E pela razão V/V_E , calculada através da equação (7), obtém-se o volume de armazenamento necessário (V) para compensar o excesso do escoamento.

Uma estimativa da redução do pico do escoamento pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\frac{Q_{oc}}{Q_i} = 1 - 0.712 \left(\frac{V}{V_E} \right)^{1.328} \left(\frac{t_b}{t_p} \right)^{0.546} \quad (8)$$

onde: Q_{oc} é a descarga máxima admissível para a bacia de retenção e os restantes termos têm o significado já referido na equação anterior.

A utilização dos métodos expeditos supracitados é um procedimento aconselhável numa fase preliminar do estudo ou para posterior comparação com os resultados dos modelos numéricos. Mas os resultados da aplicação de modelos numéricos devem prevalecer sobre os métodos expeditos acima descritos, porque estes nem sempre conduzem a resultados aceitáveis, no que concerne ao funcionamento da bacia de retenção.

2.3 Método numérico: Level Pool Routing

A aplicação do método numérico pressupõe que já se definiu o local de implantação da bacia de retenção bem como as suas características morfológicas.

Nos parágrafos seguintes, apresentam-se os procedimentos para determinação das dimensões da bacia de retenção, com base em diferentes métodos e o balanço de entrada e saída do escoamento na bacia é feito através do método de *Level Pool Routing*.

2.3.1 Determinação da dimensão preliminar da bacia de retenção

Após a determinação do volume de armazenamento, pelos métodos anteriormente apresentados, é necessário definir as dimensões (comprimento, largura e profundidade) da bacia de retenção.

O método consiste em dividir o(s) volume(s) obtido(s) por uma profundidade que se considera adequada, de acordo com o enquadramento biofísico e social do local de implantação da bacia de retenção (e.g. tipo de solo, proximidade à área residencial, etc.). Deve-se, sempre que possível, evitar profundidades (h) elevadas (e.g. admite-se um $h = 1.0$ m). Porém, quando se opta por um h mais elevado, é necessário recorrer a medidas de segurança que podem passar, por exemplo, pela vedação completa do perímetro da bacia de retenção. Existe, ainda, a possibilidade de se optar por uma bacia de retenção enterrada (situação pouco conveniente).

A razão comprimento/largura da bacia de retenção não deve ser inferior a 2/1 e os taludes devem possuir um declive igual ou superior a 3H (horizontal):1V (vertical).

Em síntese, salientam-se os seguintes aspectos, que devem ser levados em consideração, no dimensionamento da bacia de retenção:

- i) Os taludes protegidos com vegetação devem ter um declive $\leq 33\%$ (3H:1V) e uma altura não superior a 6 metros. Caso os taludes tenham uma protecção de enrocamento, o declive pode ir até 50% (2H:1V). A avaliação da estabilidade geotécnica do talude deve ser considerada para a situação de talude com altura superior a 3 metros, como apresentado em Sandvik e Sowers (1970) e Spangler e Handy (1982).
- ii) Situações que requerem elevado grau de segurança, onde não é viável a colocação de barreiras laterais de protecção, deve atribuir-se aos taludes laterais um declive não superior a 4H:1V (VDOT, 2001). Ainda de acordo com a mesma referência, o declive de fundo das bacias de retenção seca deve situar-se entre 0.5 e 2%.

iii) Deve considerar-se uma folga que é, geralmente, de 0.30 metros acima do nível obtido para o período de retorno de 100 anos.

iv) Quando a bacia de retenção possui um volume permanente de água, a sua profundidade é determinada pelas condições locais, constrangimentos de dimensionamento e necessidades ambientais. É necessário assegurar uma profundidade que não provoque o desenvolvimento de condições anaeróbias (CGSD, 2000);

v) A bacia de retenção deve ser dimensionada com capacidade para armazenar, no mínimo, o escoamento referente ao período de retorno de 10 anos (NRCS, 1999 e VDOT, 2001). Contudo essa situação deve ser analisada em função do risco associado ao projecto, i.e., o grau de exigência de protecção face à sensibilidade do meio receptor de jusante. A erodibilidade da área em que se enquadra a bacia de retenção é também outro fator que se deve ter em consideração, visto que uma afluência excessiva de sedimentos pode comprometer a capacidade de armazenamento da bacia.

vi) Devem-se adoptar descarregadores de superfície com largura da crista superior à profundidade, de modo a reduzir a velocidade do escoamento, na secção de saída da bacia de retenção, evitando-se problemas de erosão e degradação do meio receptor.

Outros aspectos que devem ser considerados antes da instalação e definição da profundidade da bacia de retenção, são, designadamente:

- a) A avaliação do nível de cheia.
- b) Segurança pública.
- c) Disponibilidade de espaço físico.
- d) Valor da terra.
- e) Ocupação e uso presente e futuro dos terrenos.
- f) Flutuações do nível freático.
- g) Características do solo.

h) Necessidades e facilidades de manutenção.

i) Aspectos estéticos relativos à integração na paisagem.

2.3.2 Volume de armazenamento com base na topografia

Conforme se referiu anteriormente, na implantação da bacia de retenção, deve privilegiar-se o recurso natural e as condições geomorfológicas naturais, evitando-se grandes movimentações de terra e o conseqüente encarecimento da obra.

O volume de armazenamento pode ser calculado através de expressões geométricas expressas em função da profundidade. Pode, por conseguinte, ser calculado através de mapas topográficos em formato digital introduzidos num software próprio (e.g. ArcGIS, etc.) ou manualmente através dos seguintes métodos:

- i) Método da média das áreas.
- ii) Método da pirâmide.
- iii) Fórmula da secção prismática.
- iv) Fórmula da secção cônica circular.

Esses métodos estão, devidamente, tratados em GDOE (2001) e USDA (1997). Nesse trabalho, apenas se apresentam as expressões de cálculo de dois dos métodos supramencionados:

i) Método da média das áreas

O volume (V) [m^3] através da fórmula da média da área é dado pela equação (VDOT, 2001):

$$V_{1,2} = \frac{A_1 + A_2}{2} d \quad (9)$$

onde:

A_1 é a área da superfície na elevação 1 [m^2].
 A_2 é a área da superfície na elevação 2 [m^2].
 d é a distância na vertical medida entre os dois planos de elevação [m].

ii) Fórmula da secção prismática

O volume [m^3] é determinado pela equação (VDOT, 2001):

$$V = L_b b h + (L_b + b) z h^2 + \frac{1}{4} z^2 h^3 \quad (10)$$

onde: L_b e b são, respectivamente, o comprimento e a largura da base da bacia de retenção [m], h é a profundidade da bacia [m] e z é o factor do declive dos taludes (razão entre horizontal e vertical). Essa fórmula é indicada para o cálculo do volume de bacias de retenção de secção trapezoidal.

2.3.3 Método de Puls (Level Pool Routing)

Existem vários métodos numéricos, baseados no princípio da continuidade, que podem ser usados para a definição do volume da bacia de retenção. Nesse trabalho, apresenta-se o método de *Level Pool Routing* também designado por método de *Puls* (Chow et alii., 1988 e Ponce, 1989).

A equação que define esse método baseia-se no princípio de conservação da massa, que corresponde ao balanço de entrada (afluência) e saída (efluência) do escoamento, na bacia de retenção, e pode ser expressa da seguinte maneira (USA-CE, 1994, Olivera, 2000, e Ramírez, 2000):

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = I(t) - O(t) \quad (11)$$

onde: $V(t)$ é o volume de armazenamento; $I(t)$ é o hidrograma de entrada (*inflow hydrograph*); e $O(t)$ é o hidrograma de saída (*outflow hydrograph*). O hidrograma de saída é obtido através da lei de vazão do dispositivo de descarga, de acordo com as equações 13, 14 ou 15).

A equação é resolvida através de um esquema de diferenças finitas, que pode assumir a seguinte forma:

$$\frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1} = I_i + I_{i+1} + \frac{2V_i}{\Delta t} - O_i \quad (12)$$

O objetivo é estudar a relação O vs $\frac{2V}{\Delta t} + O$, que, por sua vez, permite obter o hidrograma de saída da bacia de retenção. O valor de Δt , na equação (12), deve ser pequeno (e.g. $\Delta t = \frac{t_{pi}}{\alpha}$, com $2 \leq \alpha \leq 5$), de modo a se garantir, maior rigor nos cálculos

(i.e. $\frac{\partial V(t)}{\partial t} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$).

A aplicação desse método implica que o projetista já definiu a forma da bacia de retenção (e.g. trapezoidal), de modo a aplicar a fórmula correspondente, bem como o dispositivo de descarga (para poder aplicar a respectiva lei de vazão) - ver Figura 3.

Os dois tipos de dispositivo de descarga considerados são o descarregador de soleira espessa e orifício circular, cujas leis de vazão correspondem às seguintes equações:

a) Descarregador de soleira espessa (Brater & King, 1976)

$$Q = C_w L_d H^{1.5} \quad (13)$$

onde: Q é a vazão [m^3/s], C_w é o coeficiente do vazão do descarregador [-], L_d é a largura da crista do descarregador [m] e H é a altura da água acima da crista do descarregador [m].

b) Orifício com saída livre (Quintela, 1981)

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (14)$$

onde: A é a área do orifício [m^2], g é a aceleração da gravidade [m/s^2], C_d é o coeficiente de vazão do orifício e H é a carga hidráulica efectiva [m] - medida desde o centro do orifício ($1/2 D$) até a superfície livre. O diâmetro do orifício não deve ser inferior a 100 mm (NRCS, 1999).

Existe, ainda, a possibilidade de a vazão ser estimada através da seguinte equação, baseada nos princípios da continuidade e de Bernoulli, geralmente utilizada para o cálculo do caudal, na passagem hidráulica (aqueduto) (NRCS, 1984):

$$Q = \frac{1}{2} A \frac{2gH}{1 + k_m + k_p L_t} \quad (15a)$$

onde: Q é a vazão descarregada [m^3/s], A é a área da secção transversal do tubo [m^2], H é a carga hidráulica [m], k_m é o coeficiente de perda de carga localizada (e.g. considera-se $k_m = 1.0$), k_p é o coeficiente de atrito do material que constitui a tubo.

$$k_p = \frac{5087 n^2}{D^{4/3}} \quad (15b)$$

L_t é o comprimento do tubo [m], D é o diâmetro do orifício [m] e n é o coeficiente de rugosidade de Manning [$m^{-1/3}s$].

Deve ter-se em atenção que, quando se opta por colocar apenas um dispositivo de descarga, este deve ser dimensionado para o período de retorno de 100 anos. Por outro lado, quando a descarga é composta por um tubo inferior e um descarregador de superfície (e.g. para funcionar em situações extremas), a combinação desses dois dispositivos deve possuir capacidade para dar vazão às afluências correspondentes a acontecimentos com período de retorno de 100 anos - podendo o dispositivo de descarga inferior ser dimensionado para um período de retorno muito inferior a 100 anos (e.g. 10 a 20 anos).

3. Estudo de caso sintético

Recorre-se a um estudo de caso sintético, de modo a aplicar a metodologia anteriormente descrita. Considera-se uma pequena bacia de drenagem integrada na bacia hidrográfica da ribeira da Pena (região de Vila Real no norte de Portugal), cujas características fisiográficas constam das Tabelas 1 e 2.

3.1 Resultados obtidos

Apresentam-se, em seguida, os resultados da aplicação dos métodos ex-

pedidos analisados, de modo comparativo, para evidenciar as discrepâncias entre os mesmos. Complementarmente, aplica-se o modelo numérico para analisar as condições de funcionamento hidráulico da bacia de retenção.

A bacia considerada está limitada a jusante pela secção correspondente à entrada de uma passagem hidráulica (PH) e um descarregador de soleira espessa (DSE), conforme ilustra a Figura 3.

Pretende-se aplicar a metodologia descrita ao longo do trabalho para estimar o volume do escoamento que é necessário reter para garantir que o caudal

de ponta não seja superior àquele correspondente à capacidade de vazão da PH preexistente (referente ao período de pré-desenvolvimento), de modo a evitar a inundação, a erosão e a degradação dos terrenos a jusante. Estima-se que, após a realização do projecto, que se pretende implementar na bacia de drenagem, o número de escoamento CN irá elevar-se para 84.

Os tempos de concentração da bacia de drenagem (t_c), obtidos através da equação (2a), correspondentes às condições de pré e pós-desenvolvimento são os seguintes:

Tabela 1 - Características da bacia de drenagem.

Área A		Comprimento da Bacia L (m)	Altitudes		Declive Médio i (m/m)	Curve Number*	
(ha)	(Km ²)		Máxima (m)	Mínima (m)		CNo [-]	CNi [-]
200	2.0	980	380	246	0.124	80	84

*CNo e CNi representam o número do escoamento (curve number) do período pré e pós-desenvolvimento, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros a e b da curva I-D-F (Matos, 1987) para o cálculo de I_p em mm/h.

Período de Retorno, T (anos)	10	20	50	100
a [-]	353.25	416.59	495.54	553.04
b [-]	-0.634	-0.644	-0.653	-0.658

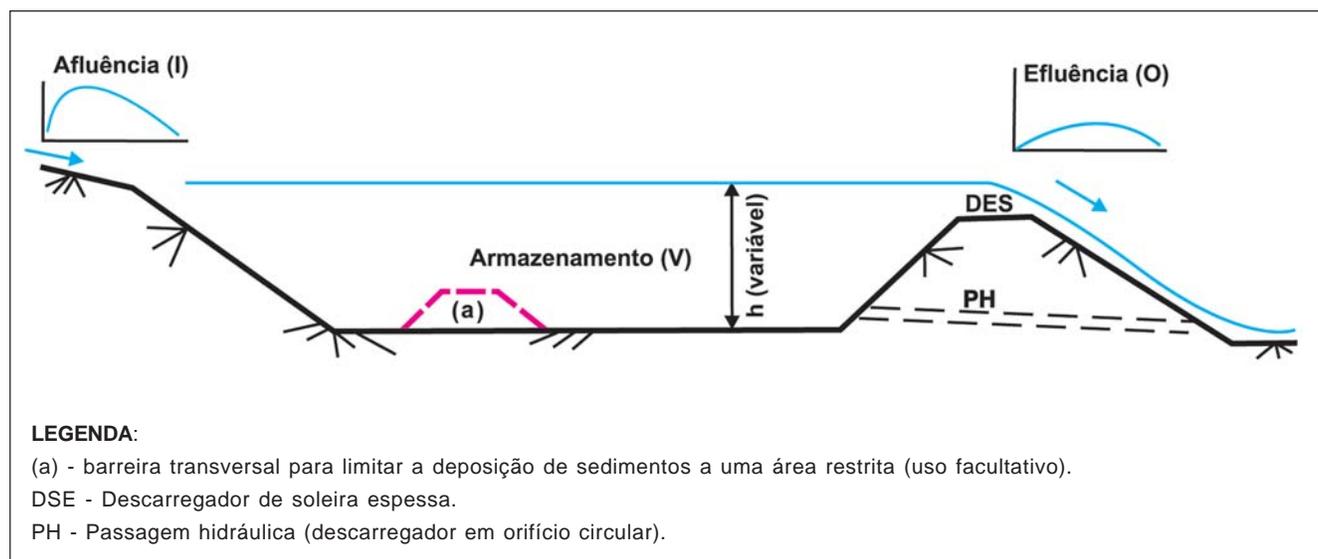


Figura 3 - Exemplo ilustrativo da lógica de aplicação do método de level pool routing.

- i) Pré-desenvolvimento (CN=80) e $t_{c0} = 22.97$ minutos.
- ii) Pós-desenvolvimento (CN=84) e $t_{ci} = 20.16$ minutos.

Estes foram os valores de t_c considerados, para o cálculo de caudais e volumes de armazenamento, ao longo de todo o trabalho.

3.1.1 Métodos expeditos

Os quadros seguintes (Tabelas 3, 4 e 5) sintetizam os resultados dos três métodos considerados.

Tabela 3 - Resultados do método do Hidrograma Triangular Simplificado (HTS).

Períodos de Retorno, T [anos]	10	20	50	100
Intensidade de precipitação, I_0 [mm/h]	48.43	55.35	64.01	70.33
Intensidade de precipitação, I_i [mm/h]	52.61	60.20	69.70	76.63
Duração da precipitação, D_{p0} [min]	22.97	22.97	22.97	22.97
Duração da precipitação, D_{pi} [min]	20.16	20.16	20.16	20.16
Precipitação acumulada, P_0 [mm]	18.54	21.19	24.50	26.92
Precipitação acumulada, P_i [mm]	17.68	20.23	23.42	25.75
Escoamento acumulado, R_0 [mm]	0.49	1.00	1.85	2.60
Escoamento acumulado, R_i [mm]	1.13	1.89	3.04	4.01
Tempo para atingir a o caudal máximo, t_{p0} [h]	0.38	0.38	0.38	0.38
Tempo para atingir a o caudal máximo, t_{pi} [h]	0.34	0.34	0.34	0.34
Duração da afluência do escoamento à bacia, t_{b0} [h]	0.76	0.76	0.76	0.76
Duração da afluência do escoamento à bacia, t_{bi} [h]	0.68	0.68	0.68	0.68
Caudal de ponta, Q_0 [m ³ /s]	0.71	1.45	2.69	3.78
Caudal de ponta, Q_i [m ³ /s]	1.88	3.12	5.03	6.63
Volume de armazenamento da bacia de retenção, V [m ³]	1406.51	2021.14	2832.75	3446.48

Nota: os índices **0** e **i** referem-se às condições de pré e pós-desenvolvimento, respectivamente.

Tabela 4 - Resultados do método de Wycoff e Singh (RWS).

Períodos de Retorno, T [anos]	10	20	50	100
Caudal de ponta, Q_0 [m ³ /s]	0.71	1.45	2.69	3.78
Caudal de ponta, Q_i [m ³ /s]	1.88	3.12	5.03	6.63
Tempo para atingir o caudal máximo, t_{pi} [h]	0.34	0.34	0.34	0.34
Duração da afluência do escoamento à bacia, t_{bi} [h]	0.68	0.68	0.68	0.68
Volume do escoamento na bacia, V_E [m ³]	983.80	2002.50	3701.01	5205.45
Razão entre o V e V_E , V/V_E [-]	0.60	0.54	0.49	0.46
Volume de armazenamento da bacia de retenção, V [m ³]	789.17	1437.94	2394.92	3171.39
Redução do pico do escoamento, Q_0/Q_i [-]	0.38	0.47	0.53	0.57
Descarga máxima admissível para a bacia, Q_{oe} [m ³ /s]	0.88	1.70	3.03	4.19

Nota: os índices **0** e **i** referem-se às condições de pré e pós-desenvolvimento, respectivamente.

O método de Pagan, geralmente, superestima o volume da bacia de retenção. Os resultados obtidos mostram que o volume obtido pelo método de Pagan, para o período de retorno de 10 anos, é superior aos dos restantes métodos, seja qual for o período de retorno considerado (ver Figura 4). Esse fato evidencia a razão pela qual o método de Pagan não é recomendado para período de retorno superior a 10 anos e bacias de drenagem de área superior a 81 ha.

Verifica-se uma maior proximidade entre os resultados obtidos pelo método do hidrograma triangular simplificado e o proposto por Wycoff e Singh (ver Figura 4).

Esses resultados mostram que a aplicação de métodos expeditos, principalmente os de regressão, pode conduzir a resultados totalmente discrepantes entre si. Esta é uma das razões que justifica o fato de a aplicação de um modelo numérico ser considerado de maior confiabilidade, no que concerne à avaliação da capacidade de resposta da bacia de retenção (as Figuras 5, 6 e 7 ilustram os resultados da aplicação do modelo numérico).

Os resultados obtidos pelos métodos expeditos mais recomendados (método do hidrograma triangular simplificado e o de Wycoff & Singh), sintetizados na Figura 4, revelam que é necessá-

rio reter um volume entre 800 e 1407 m³, considerando o período de retorno de 10 anos, para reduzir o pico do escoamento ao nível desejado.

3.1.2 Aplicação do modelo numérico

Para aplicar o modelo numérico optou-se, de acordo com os resultados obtidos, através de métodos expeditos (Figura 4), por uma bacia de retenção de secção trapezoidal (ver equação 10), com as seguintes dimensões: 28 m de largura da base, 58 m de comprimento da base, profundidade de 1.00 m e taludes laterais de declive igual a 33% (i.e. 3H:1V).

Tabela 5 - Resultados da aplicação do método de Pagan.

Períodos de retorno, T [anos]	10	20	50	100
Caudal de ponta, Q_o [m ³ /s]	0.71	1.45	2.69	3.78
Caudal de ponta, Q_i [m ³ /s]	1.88	3.12	5.03	6.63
Percentagem de Q_o/Q_i [%]	38.04	46.51	53.42	57.00
Parâmetro de armazenamento, SP [segundos]	2917.59	2337.74	1938.69	1751.46
Máximo volume armazenamento, V_{max} [m ³]	5474.63	7302.08	9745.31	11604.44

Nota: os índices 0 e i referem-se às condições de pré e pós-desenvolvimento, respectivamente.

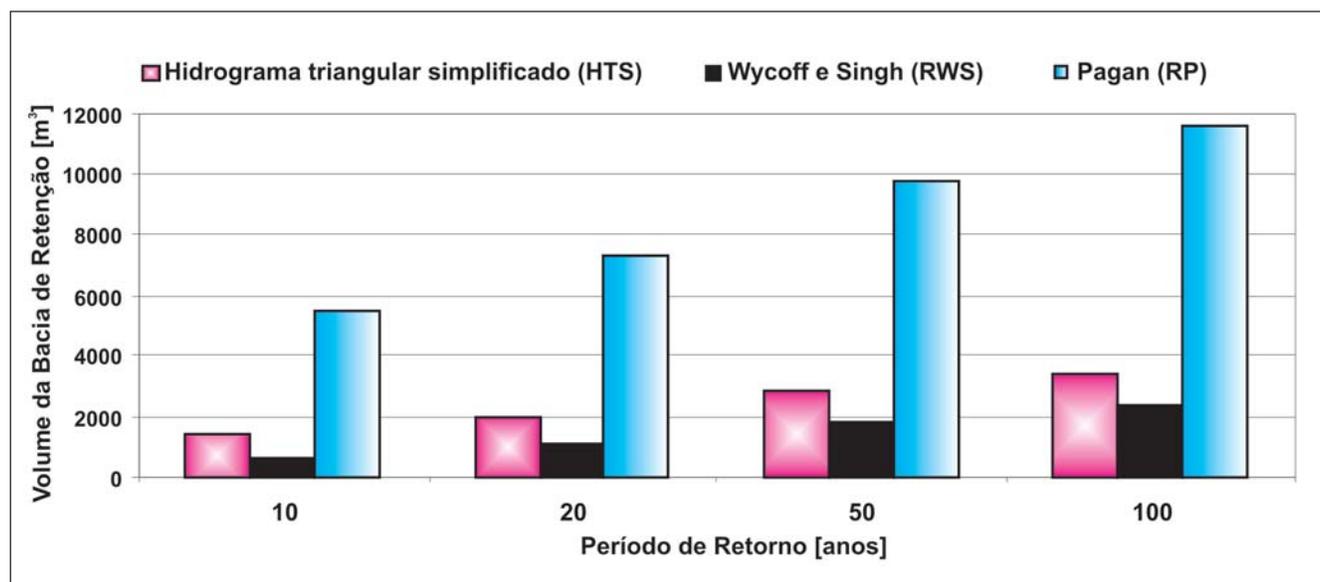


Figura 4 - Comparação entre os volumes obtidos pelos três métodos considerados.

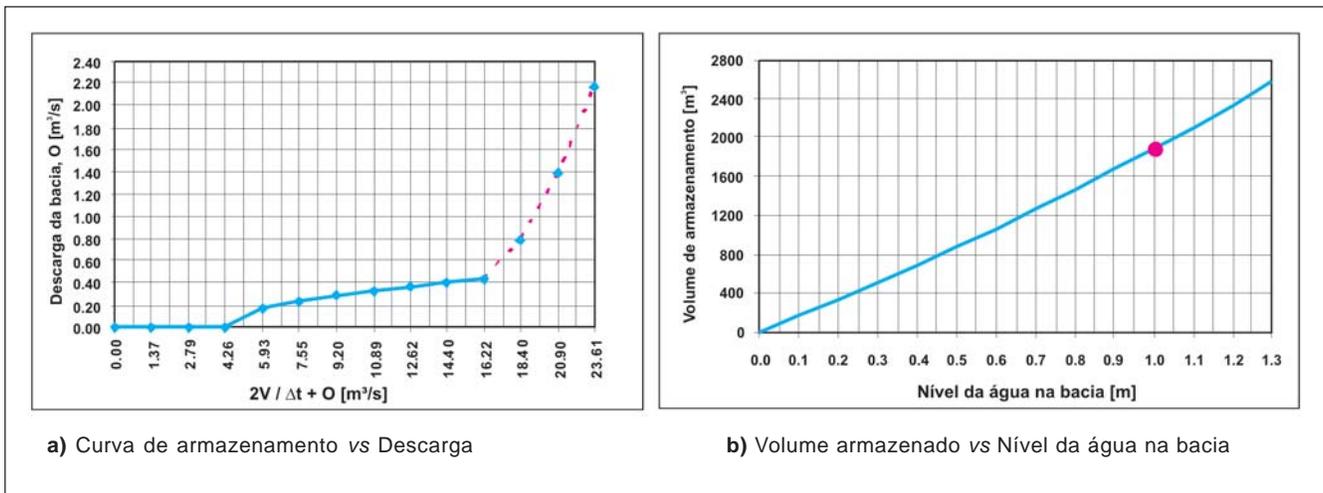


Figura 5 - Caracterização do comportamento hidráulico da bacia de retenção ($\Delta t = 4$ minutos).

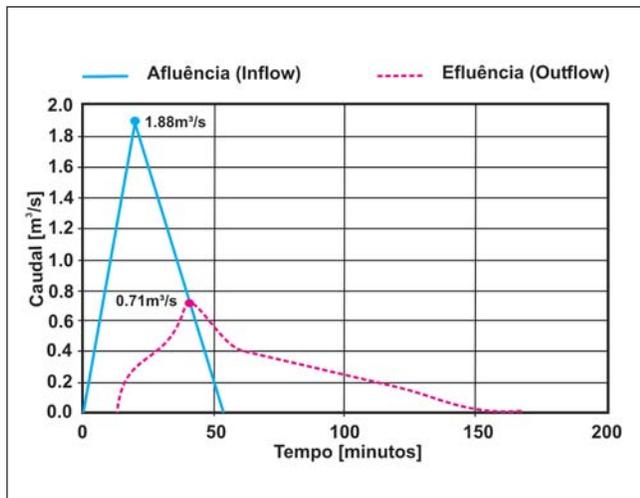


Figura 6 - Hidrograma de entrada e saída da bacia de retenção com dois descarregadores (PH + DSE, conforme ilustra a Figura 3).

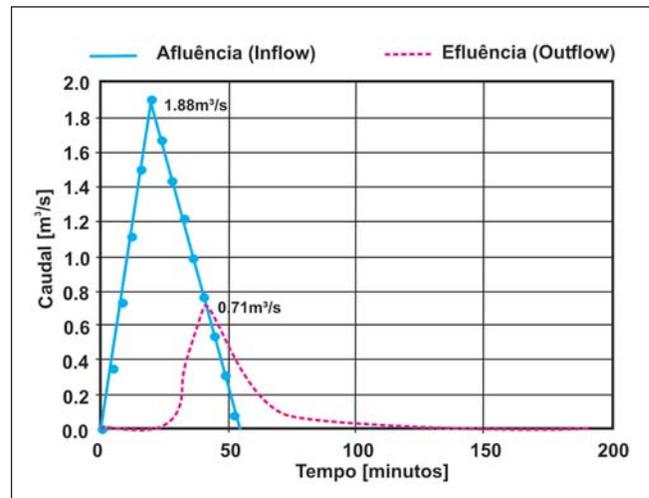


Figura 7 - Hidrograma de entrada e saída da bacia de retenção considerando apenas o descarregador de soleira espessa (DSE).

A aplicação do método numérico considera o seguinte procedimento:

- i. Definição do hidrograma de entrada, $I(t)$, através do método de SCS. Nesse trabalho, considerou-se $\Delta t = 4$ minutos.
- ii. Definição da lei de armazenamento em função da forma da bacia de retenção (e.g. $V(h)$ pode ser calculado pelos métodos da média das áreas ou pelo método da pirâmide). Calculou-se o $V(h)$ através da fórmula da secção prismática (equação 10).
- iii. A lei de vazão da estrutura de descarga, $O(h)$, corresponde à conjugação dos caudais referentes às equações do orifício (equação 14) e do descarregador de soleira espessa (equação 13). Portanto a efluência (*outflow*, O) vem expressa por:

$$O = Q_{\text{orifício}} + Q_{\text{desc.}} = C_d A \sqrt{2g(z_s - z_0)} + C_w L (z_s - z_c)^{3/2} \quad (16)$$

onde: C_d é o coeficiente de vazão do orifício (e.g. $C_d = 0.6$), A é a área do orifício, z_0 é a cota na qual se encontra o centro do orifício, z_s é a cota da superfície livre da água na bacia de retenção, C_w é o coeficiente de vazão do descarregador de soleira espessa-

sa (e.g. $C_w = 3.33$), L_d é a largura efetiva do descarregador e z_c é a cota da crista do descarregador.

- iv. Finalmente, determinam-se as variáveis desconhecidas: a) hidrograma de saída; e b) a evolução de armazenamento ao longo do tempo.

Considera-se que o dispositivo de descarga é constituído por um orifício circular (de $D = 500$ mm e extremidade inferior situada a 0.3 m do fundo da bacia de retenção) e por um descarregador de soleira espessa (de largura $L_d = 3.0$ m e crista situada a 1.0 m do fundo da bacia) - ver Figura 3 para melhor compreensão. A bacia possui as seguintes caracte-

terísticas geométricas: 28 m de largura da base (b), 58 m de comprimento da base (L_b), 1.0 m de profundidade da crista do descarregador de soleira espessa e taludes de declive igual a 33% (i.e. 3H:1V).

Na Figura 5a o trecho *a* tracejado da curva corresponde à descarga conjunta do orifício e do descarregador de soleira espessa, sendo o restante trecho (descarga $\leq 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$) correspondente ao funcionamento exclusivo do orifício - isto acontece quando o nível da água, na bacia de retenção, é inferior ou igual à altura da crista do descarregador (1.0 m).

O círculo sobre a reta, representado na Figura 5b, corresponde ao ponto onde o nível da água, na bacia de retenção, atinge a crista do descarregador (1.0m). Esse nível corresponde a uma capacidade de armazenamento (1894 m^3) superior aos valores obtidos pelos métodos de Wycoff e Singh (1976) e de hidrograma triangular simplificado. No entanto, é inferior ao volume obtido pelo método de regressão de Pagan, conforme se apresenta na Figura 4.

As Figuras 5, 6 e 7 sintetizam os resultados do modelo numérico, baseado na equação (12), para a bacia de retenção com as dimensões anteriormente referidas.

A Figura 6 mostra que a dimensão geométrica da bacia e os dois dispositivos hidráulicos adoptados conduzem a uma descarga máxima ($0.71 \text{ m}^3/\text{s}$) que satisfaz a condição de pré-desenvolvimento.

No caso de se considerar apenas um descarregador de soleira espessa, para a descarga da bacia, eliminando a descarga de fundo, através de orifício, a largura efetiva do descarregador (L_d) teria de ser igual a 2.0 metros, para que a descarga máxima não excedesse os $0.71 \text{ m}^3/\text{s}$. Nessa situação, o hidrograma de saída seria conforme se apresenta na Figura 7.

4. Considerações finais

Os resultados da aplicação da metodologia evidenciam que os métodos

expeditos analisados conduzem a resultados discrepantes entre si. No entanto, o método de Hidrograma Triangular Simplificado (HTS) e o de Wycoff e Singh (RWS) fornecem boa indicação, no que se refere à definição das dimensões da bacia de retenção, como condição de partida, para aplicação do modelo numérico. Pois, no que concerne ao volume da bacia, verifica-se que o resultado obtido pelo método de *Level Pool Routing* é coerente com os obtidos pelos métodos de HTS e RWS, em termos da ordem de grandeza.

A aplicação do modelo numérico permite avaliar as condições de funcionamento da bacia de retenção, testando vários cenários (e.g. dimensão da bacia de retenção e estruturas de descarga associadas). Nesse contexto, em situações de projeto, os métodos expeditos devem ser de aplicação limitada à fase de estudo prévio, sendo imperativa a aplicação do modelo numérico na fase do projeto de execução.

5. Agradecimento

Os autores agradecem as sugestões dos dois *referees* anônimos que contribuíram para melhorar a apresentação do trabalho.

6. Referências bibliográficas

- BRATER, E.F., KING, H.W. *Handbook of hydraulics*, 6th ed., New York: McGraw-Hill, 1976.
- CGSD. *Stormwater design manual*. City of Griffin Stormwater Department (CGSD). Prepared by Integrated Science & Engineering. 2000.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- CORREIA, F.N. *Proposta de um método para a determinação de caudais de cheia em pequenas bacias naturais e urbanas*. Lisboa: ITH n. 6, LNEC, 1984a.
- CORREIA, F.N. *Alguns procedimentos adaptados pelo Soil Conservation Service para o estudo do impacto da urbanização nos caudais de cheia*. Lisboa: ITH n. 7, LNEC, 1984b.

- DEBO, T.N., REESE, A.J. *Municipal storm water management*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers: CRC Press, Inc., 1995.
- DMR. *Road drainage design manual*. Queensland: Department of Main Roads (DMR), Queensland Government, 2002. Chapter 4. Design.
- FHWA. *Hydrain - integrated drainage design computer system*. Washington, DC: HYDRO - Hydrology. Federal Highway Administration (FHWA), 1999. v. 2.
- GDOE. *Georgia stormwater management manual*. v. 2, Technical Handbook, 1th Edition, Prepared by AMEC Earth & Environmental (formerly the Edge Group), Center for Watershed Protection, Debo & Associates, Jordan Jones & Goulding and Atlanta Regional Commission. Georgia: Georgia Department of the Environment (GDOE), 2001.
- IEP. *Manual de drenagem superficial em vias de comunicação*. Lisboa: Instituto de Estradas de Portugal (IEP), 2001.
- MATOS, M.R. *Métodos de análise e de cálculo de caudais pluviais em sistemas de drenagem urbana*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1987. (Tese de Especialista do LNEC).
- MGONDC. *Stormwater management manual*. Procedures. Metropolitan Government of Nashville and Davidson County (MGONDC). The Edge Group, Inc. & CH2M Hill. 1988. v. 2.
- MOTH. *Hydraulics manual*. Ministry of Transportation and Highways (MOTH), Engineering Branch. Canada: Province of British Columbia, 1998.
- NRCS. *Engineering field manual for conservation practices*. Washington, DC: National Research Conservation Service (NRCS), Soil Conservation Service, Engineering Division, 1984.
- NRCS. *Water and Sediment Control Basin*. Kentucky, KY: Conservation Practice Standard, Code 638. Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1999.
- OLIVERA, F. *Course of hydraulic engineering design*. Center for Research in Water Resources (CRWR), University of Texas at Austin, 2000.
- PILGRIN, D.H., CORDERY, I. "Flood Runoff", in *Handbook of Hydrology*. In: MAIDMENT, D. R. USA: McGraw-Hill, Inc., 1992. p. 9.1-9.42.
- PONCE, V.M. *Engineering hydrology. Principles and practices*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1989.
- PONCE, V. M., HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, v.1, n.1, p.11-19, 1996.
- PORTELA, M., MARQUES, P., CARVALHO, F.F. *Hietogramas de projecto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS)*. In: ACTAS DO CONGRESSO DA ÁGUA, 5. Lisboa, Portugal, 25 a 29 de Setembro, 2000.

- QUINTELA, A. *Hidráulica geral*. 4. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981.
- RAMÍREZ, J.A. Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics. In: WOHL, Ellen. *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities*. Ed. ; Cambridge University Press, 2000. Chapter 11.
- SANDVIK, G.B., SOWERS, G.F. *Introductory soil mechanics and foundations*. 3rd. New York: MacMillan Publishing Company, 1970.
- SCHUELER, T. *Design of storm-water Wetland systems: guidelines for creating diverse and effective stormwater wetland system in the mid-atlantic region*. Washington, DC: Anacostia Restoration Team, Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, 1992.
- SCS. *National engineering handbook*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1972.
- SCS. *Urban hydrology for small watersheds*. Washington, DC: Technical Release 55. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1986.
- SPANGLER, M.G., HANDY, R.L. *Soil engineering*. 4th Edition. New York: Harper & Row, 1982.
- TUCCI, C.M. *Estimativa do volume para controle da drenagem no lote*. In: Drenagem urbana - gerenciamento, simulação e controle. Porto Alegre: Universidade, Associação Brasileira dos Recursos Hídricos, 1998. p. 155-163.
- USACE. *Flood-Runoff Analysis*. Washington, DC: Department of the Army. U.S. Army Corps of the Engineers (USACE), 1994.
- USDA. *A method for estimating volume and rate runoff in small watersheds*. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 1973.
- USDA-SCS. *National engineering handbook*, Washington, DC: Hydrology. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 1985. Section 4.
- USDA. *Ponds - planning design and construction*. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. Natural Resource Conservation Service (NRCS), 1997.
- VDOT. *Drainage Manual*. Virginia: Virginia Department of Transportation (VDOT), 2001.
- VISSMAN, W., LEWIS, G. L. *Introduction to hydrology*. 4th edition. New York: HarperCollins College Publishers, 1996.
- WALESH, S. G. *Urban surface water management*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- WSDOEWP. *Stormwater management in Washington State*. Olympia, Washington, DC.: Runoff Treatment BMPs. Washington State Department of Ecology Water Quality Program (WSDOEWP). 1999. v. 5.
- WYCOFF, R.L., SINGH, U.P. Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs. *Water Resources Bulletin*, v. 12, n. 2, p.337-349, 1976.

Artigo recebido em 12/10/2005 e aprovado em 30/01/2006.

REM - Revista Escola de Minas 70 anos divulgando CIÊNCIA.

REM: a mais antiga revista técnico-científica do setor mineiro-metalúrgico.

www.rem.com.br
