

Impactes de Projectos da Engenharia Civil na Hidrologia de Bacias de Drenagem. Como Gerir o Excesso do Escoamento?

Herlander Mata-Lima^{1, #}

*CMRP - Instituto Superior Técnico (IST). Av. Rovisco Pais, 1. 1049-001 Lisboa
Departamento de Matemática e Engenharias, Universidade da Madeira. 9000-390 Funchal*

Evaristo Silva²

GLOBALVIA – Consultores de Engenharia, S.A. Rua José Afonso, 11. 2810-237 Almada

Cristina Raminhos³

Engenheira de Recursos Hídricos (Universidade de Évora)

RESUMO

O presente trabalho analisa diferentes métodos para gestão do excesso do escoamento, salientando a multifuncionalidade dos sistemas de retenção do escoamento produzido na bacia de drenagem; os principais factores que contribuem para o incremento do escoamento na bacia e o seu efeito; e apresenta os critérios de dimensionamento hidrológico-hidráulico e estrutural da bacia de retenção do escoamento.

Para o pré-dimensionamento do sistema de retenção consideram-se os métodos empíricos expeditos. Os resultados obtidos pelos métodos empíricos, para os períodos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos, são apresentados de modo comparativo fazendo-se referência as vantagens de aplicação de cada um dos métodos.

Finalmente, evidencia-se a vantagem da aplicação de um modelo numérico para a validação dos resultados obtidos pelos métodos expeditos.

Palavras Chave: Gestão do Escoamento; Sistema de Retenção; Estabilidade dos Taludes; Dimensionamento Hidrológico-Hidráulico.

¹ Investigador no CMRP-IST e Professor Auxiliar do Departamento de Matemática e Engenharias da Universidade da Madeira

² Director de Produção da GLOBALVIA – Consultores de Engenharia, S.A.

³ Investigadora Júnior e Engenheira Consultora

[#] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (helima@ist.utl.pt)

Impacts of Civil Engineering Projects in Drainage Basins. How to Manage Runoff Excess?

ABSTRACT

Civil Engineering projects can affect watershed hydrologic characteristics increasing impervious area and can also reduce the time of concentration. The referenced impacts lead the rise of runoff volume and peak discharge. The magnitude of the impact should be assessed in order to adopt sceneries that minimize the negative effects in natural and man made systems.

This work stresses the multifunctionality of the detention basins, the main factors that contribute to increase runoff, and presents the hydrologic-hydraulic and structural design criteria for detention systems.

Empirical and numerical methods are considered to design detention systems for different return periods (10, 20, 50, and 100 years) and the results are analysed in a comparative manner.

Finally, one shows the advantage of the application of the numerical method instead of the empirical ones, especially in detailed design phase of the projects.

Key Words: Runoff Management; Detention Systems; Hydrologic-Hydraulic Design; Slope Stability.

1. INTRODUÇÃO

Os projectos de Engenharia Civil podem afectar as características hidrológicas das bacias hidrográficas pelo aumento da percentagem de área impermeável na bacia e podem, por consequência, também provocar a diminuição do tempo de concentração da bacia. Os dois impactes referidos conduzem ao aumento do volume e caudal de ponta do escoamento. A magnitude do aumento depende da razão entre a área intervencionada e a área total da bacia hidrográfica. O grau de impacte hidrológico das intervenções de engenharia deve ser avaliado de modo a adoptar-se cenários que minimizem as alterações ao sistema natural e construído.

Os sistemas de gestão do escoamento (e.g. bacias de retenção) são multifuncionais visto que além de permitirem reduzir o pico do escoamento evitando perturbações a jusante (e.g. inundação e degradação de terrenos e habitações, etc.), podem ainda permitir a redução da carga poluente (e.g. SST) do escoamento (SCHUELER, 1992 e WSDOEWQP, 1999), o controlo da erosão, o melhoramento da paisagem e uso recreativo, o armazenamento de água para combate a incêndios, o recarga de aquíferos, o fornecimento de água para rega de pequenas parcelas de terrenos agrícolas e para outras actividades agropecuárias (nesta situação, deve ser devidamente impermeabilizada), entre outras aplicações. Saliente-se que, face à crescente necessidade de água, as pequenas unidades de armazenamento têm um papel que é particularmente importante em zonas não servidas por sistemas de rega.

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

temporária para gerir o escoamento com o intuito de: i) reduzir o pico do escoamento causado pelas alterações nas condições de ocupação da bacia; ii) reduzir a erosão no meio receptor de jusante; iii) atenuar ou debelar os problemas de drenagem a jusante através da restituição de caudais compatíveis com o sistema existente; iv) promover a recarga de aquíferos; v) manter o escoamento histórico através do controlo de caudal de saída da bacia.

Se se pretender armazenar a água para suprir as necessidades de rega ou agropecuárias o volume da bacia é função da cultura a ser regada, eficiência do método de rega, perdas (infiltração e evaporação), afluência prevista, consumo por parte de animais, etc.. O armazenamento permanente exige um estudo mais profundo acerca das características do solo visto que se pretende evitar perdas por infiltração (e.g. argila e silte são os materiais mais adequados para este fim). Segundo USDA (1997), solos com índices de plasticidade superior a 10 % e espessura não inferior a 920 mm não conduzem a perdas significativas de água desde que a profundidade de armazenamento seja inferior a 3.0 metros.

As bacias de retenção podem ser secas 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 acontecimentos de precipitação.

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.

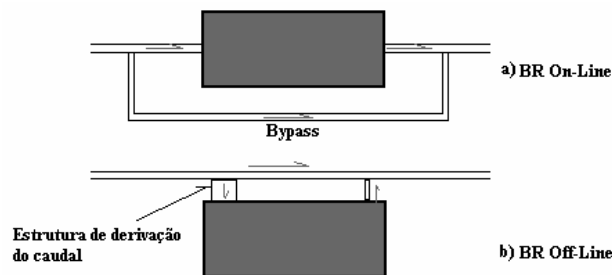


Figura 1 – Bacia de Retenção: a) “On-line” e b) “Off-line”.

O dimensionamento e 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, sistema de drenagem existente, plano de desenvolvimento (este aspecto reveste-se de grande importância por permitir definir com maior rigor as condições de pós-desenvolvimento) e condições de jusante. Deve-se tirar partido das condições geomorfológicas naturais evitando grandes movimentações de terra e impermeabilização, i.e. sempre que possível deve-se aproveitar as depressões de terreno para implantação de bacias de retenção com características naturais. Estas medidas permitem não só reduzir os custos da obra como também aumentar a taxa de infiltração.

As bacias de retenção podem ser dimensionadas com o objectivo de controlo da qualidade (e.g. deposição de sedimentos e outros poluentes incorporados no escoamento, filtração da água) e quantidade do escoamento.

O trabalho aborda a problemática da gestão do escoamento nas bacias de drenagem apresentando vários métodos (empíricos expeditos e fisicamente baseados) para gestão do excesso do escoamento através de um algoritmo de dimensionamento de sistemas de retenção que integra os factores hidrológicos, hidráulicos e ambientais.

2. METODOLOGIA

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; e v) método de regressão proposto por WYCOFF e SINGH (1976). Após a aplicação destes métodos, conhecidos como métodos expeditos, as condições de funcionamento hidrológico-hidráulicas da bacia devem ser verificadas através da aplicação de um método numérico (geralmente recorre-se ao método de *Puls*).

Neste trabalho, o volume da bacia é estimado através de três dos métodos supracitados: i) método de hidrograma triangular simplificado (HTS); ii) método de regressão de Wycoff & Singh (RWS); e iii) método de regressão de Pagan (RP). Estes 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 conhece a localização e forma da bacia bem como o respectivo dispositivo de descarga. O modelo numérico utilizado neste trabalho baseia-se no princípio da continuidade do escoamento e é o designado por *level pool routing* ou método de *Puls*.

2.1 Métodos expeditos

No âmbito deste trabalho considerou-se o método empírico do Soil Conservation Service (SCS) para o cálculo dos caudais de ponta correspondentes ao período de pré e pós-desenvolvimento.

O caudal de ponta Q_p [m^3/s] é obtido através da seguinte equação (ver, por exemplo, CORREIA, 1984a e IEP, 2001):

$$Q_p = 0.278 \frac{RA}{3.6t_c} \quad (1a)$$

onde: A é a área da bacia de drenagem [km^2], R o escoamento acumulado ou precipitação efectiva [mm] e t_c o tempo de concentração da bacia [h].

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

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

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]. 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 e HAWKINS, 1996).

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

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

onde: CN é o número do escoamento [-], que varia em função do tipo de solo e da ocupação e uso da bacia. SCS (1972, 1986) e CORREIA (1984a) apresentam tabelas com valores indicativos de CN para bacias 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. Visto que a condição de aplicação da equação (1b) é $P > I_a$, a duração da precipitação a considerar, para o autor, deve ser superior ao tempo de concentração de maneira que a duração da precipitação efectiva (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 conduz a diminuição do caudal de ponta de cheia por diminuição da intensidade média da precipitação (PORTELA et al., 2000). Por esta razão, é amplamente sugerido em diversos trabalhos (e.g. PONCE, 1989; PILGRIN e CORDERY, 1992; VIESSMAN e LEWIS, 1996 e VDOT, 2001) que se considere que a precipitação de projecto (também designada por precipitação crítica) possui uma duração igual ao tempo de concentração da bacia.

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

$$P = D_p \left(\frac{I_p}{60} \right), \text{ com } I_p = a(t_c)^b \text{ e } D_p = t_c \quad (1d)$$

onde: D_p é a duração da precipitação [min], I_p 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 e 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 atraso da bacia (*basin lag time*) [h], i o declive médio da bacia [%], e L o comprimento da bacia [m]. Para além da determinação do L através da informação topográfica disponível, na ausência de informação, pode recorrer-se a seguinte expressão (USDA, 1997):

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

onde: A é a área da bacia [ha].

O cálculo de t_c por este método é particularmente recomendado para bacias homogéneas não-urbanas de dimensão até 810 ha (USDA, 1973) e reflecte essencialmente o escoamento concentrado. Porém, este método é apontado como aquele que se pode considerar mais fisicamente baseado visto que o número do escoamento (CN) permite reflectir de certa forma os processos que ocorrem na bacia (USACE, 1994), daí a possibilidade de se obter valores de t_c diferentes para o período pré e pós-desenvolvimento.

Existem indicações respeitantes aos valores mínimos de t_c que devem ser considerados para diferentes tipos de bacias de pequena dimensão (MOTH, 1998): i) urbana – 5 minutos; ii) residencial – 10 minutos; e iii) rural – 15 minutos.

2.1.1 Método do hidrograma triangular simplificado (HTS)

A aplicação deste método exige o conhecimento de dados relativos às condições biofísicas da bacia de drenagem a ser controlada, sendo o hidrograma de saída da bacia estabelecido em função da capacidade de vazão, Q_o , do sistema a jusante.

É prática comum considerar-se que o hidrograma de saída da bacia 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 [m^3], t_b a duração da afluência do escoamento a bacia ou tempo de base do hidrograma [s], e Q_o e Q_i são, respectivamente, o caudal de ponta correspondente à condição de pré e pós-desenvolvimento [m^3/s].

O tempo de ascensão do hidrograma ou tempo para atingir o caudal máximo (t_p) e a duração da afluência do escoamento à bacia (t_b), podem ser obtidos pelas seguintes expressões (ver, por exemplo, WALES, 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 possuem o mesmo significado referido anteriormente.

CORREIA (1984b) também refere a possibilidade de se adoptar 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), adoptaram-se as equações (4) e (5b) para o cálculo do t_p e t_b , respectivamente.

2.1.2 Método de regressão de Pagan

O método de Pagan (*Pagan volume estimation method*) é de aplicação limitada a pequenas bacias (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 dos Estados Unidos da América (EUA), e que se resume a 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 parâmetros de armazenamento, SP [s] para uma dada bacia de retenção desde que se conheçam os caudais Q_i e Q_o já referidos anteriormente.

Síntese do procedimento de cálculo: i) determinar o caudal de ponta para as situações de pré e pós-desenvolvimento (i.e. Q_o e Q_i); ii) determinar o parâmetro de armazenamento SP; e iii) determinar o máximo volume de armazenamento V_{\max} [m^3] pela seguinte equação:

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

2.1.3 Método de regressão de Wycoff e Singh (1976)

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

$$\frac{V}{V_E} = \frac{1.291 \left(1 - \frac{Q_o}{Q_i}\right)^{0.753}}{\left(\frac{t_b}{t_p}\right)^{0.411}} \quad (7a)$$

$$V_E = \frac{1}{2} t_{b0} Q_o \quad (7b)$$

onde: V é o volume de armazenamento da bacia [m^3], V_E o volume total do escoamento [m^3], Q_i o caudal de ponta correspondente ao hidrograma de entrada (i.e. caudal de ponta referente à condição de pós-desenvolvimento) [m^3/s], Q_o o caudal de ponta correspondente ao hidrograma de saída (i.e. caudal de ponta do pré-desenvolvimento) [m^3/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 (obtido pela equação 7b) pela razão V/V_E , calculada através da equação (7a) 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:

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

onde: Q_{oe} é a descarga máxima admissível para a bacia 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.

2.2 Método numérico

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

Nos parágrafos seguintes apresentam-se os procedimentos para determinação das dimensões da bacia com base em diferentes métodos e o balanço de entrada e saída do escoamento na bacia é aproximado pelo método de *level pool routing*.

2.2.1 Determinação da dimensão preliminar da bacia

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 (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, se se tiver que optar por um h mais elevado é necessário recorrer a medidas de segurança que podem passar, por exemplo, pela vedação completa do perímetro da bacia. Existe ainda a possibilidade de se adoptar uma bacia enterrada (situação pouco conveniente).

A razão comprimento/largura da bacia 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 tidos 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); 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) no caso da bacia de retenção possuir um volume permanente de água, a sua profundidade é determinada pelas condições locais, constrangimentos do dimensionamento e necessidades ambientais. É necessário assegurar uma profundidade que não dê azo ao desenvolvimento de condições anaeróbias (CGSD, 2000); iv) no caso de bacias secas, o declive de fundo deve situar-se entre 0.5 e 2% (VDOT, 2001).

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; e i) aspectos estéticos relativos à integração na paisagem.

2.2.2 Volume de armazenamento com base na topografia

Conforme se referiu anteriormente, na implantação da bacia de retenção deve privilegiar-se o recurso às 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) ou manualmente através dos seguintes métodos: i) método da média das áreas, ii) método da

pirâmide, iii) fórmula da secção prismática, e iv) fórmula da secção cónica circular. Estes métodos estão devidamente tratados em GDOE (2001) e USDA (1997). Neste trabalho apenas se apresentam as expressões de cálculo de dois dos métodos supramencionados:

i) Método da média das áreas

O volume (V) [m³] através da fórmula da média das área é dado pela equação (VDOT, 2001):

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

onde: A₁ é área da superfície na elevação 1 [m²], A₂ a área da superfície na elevação 2 [m²] e d a distância na vertical medida entre os dois planos de elevação [m].

ii) Fórmula da secção prismática

O volume [m³] é determinado pela equação (VDOT, 2001):

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

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

Existem vários métodos numéricos, baseados no princípio da continuidade, que podem ser usados para a definição do volume da bacia de retenção. Neste trabalho, apresenta-se o método de *level pool routing* também designado por método de *Puls* (CHOW et al., 1988 e PONCE, 1989).

2.2.3 Método de *Puls*

A equação que define este 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 (USACE, 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) 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 objectivo é estudar a relação O vs $\frac{2V}{\Delta t} + O$ que, por sua vez, permite obter o hidrograma de saída da bacia. 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 garantir-se 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 projectista já definiu a forma da bacia de retenção (e.g. trapezoidal), de modo a aplicar a fórmula correspondente, bem como o dispositivo de descarga (de modo a poder aplicar a respectiva lei de vazão) – ver figura 2.

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:

Descarregador de soleira espessa (BRATER e KING, 1976)

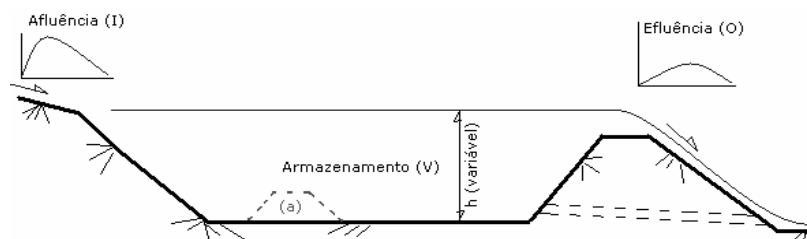
$$Q = C_w L_d H^{1.5} \quad (13)$$

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

Orifício com saída livre (QUINTELA, 1981)

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

onde: A é a área do orifício [m^2], g a aceleração da gravidade [m/s^2], C_d é o coeficiente de vazão do orifício, e H 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).



(a) – barreira transversal para limitar a deposição de sedimentos à uma área restrita (uso facultativo)

Figura 2 – Exemplo ilustrativo da lógica de aplicação do método de level pool routing.

Existe ainda a possibilidade do caudal ser estimado 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 o caudal descarregado [m^3/s], A a área da secção transversal do tubo [m^2], H a carga hidráulica [m], k_m o coeficiente de perda de carga localizada (e.g. considera-se $k_m = 1.0$), k_p o coeficiente de atrito do material que constitui a tubagem

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

L_t o comprimento do tubo [m], D o diâmetro do orifício [m] e n o coeficiente de rugosidade de Manning [$m^{-1/3}s$]. O $K_s = \frac{1}{n}$, onde K_s [$m^{1/3}s^{-1}$] corresponde a outro modo de se apresentar o coeficiente de rugosidade de Manning.

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 destes dois dispositivos deve possuir

capacidade para dar vazão às afluições 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. CASO DE ESTUDO SINTÉTICO

Recorre-se a um caso de estudo sintético de modo a ilustrar as metodologias anteriormente descritas. Considera-se uma subbacia da 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 expeditos 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.

Tabela 1 – Características fisiográficas da bacia.

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

A bacia considerada está limitada a jusante pela secção correspondente à entrada de uma passagem hidráulica (PH) e um descarregador de soleira espessa, conforme ilustra a figura 2.

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, o número de escoamento CN irá elevar-se para 84.

Os tempos de concentração da bacia (t_c), obtidos através da equação (2a), correspondentes às condições de pré e pós-desenvolvimento são os seguintes: i) pré-desenvolvimento (CN=80) e $t_{c0} = 22.97$ minutos; e 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, 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 & Singh.

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, 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.

Tabela 5 – Resultados da aplicação do método de Pagan.

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
Porcentagem de Q_0/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 de armazenamento, V_{max} [m ³]	5474.63	7302.08	9745.31	11604.44

O método de Pagan (ver VDOT, 2001) geralmente sobreavalia 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 3). Este facto evidencia a razão pela qual método de Pagan não é recomendado para período de retorno superior a 10 anos e bacias de área superior a 81 ha (situação que acontece com a bacia em apreço, área igual a 200 ha).

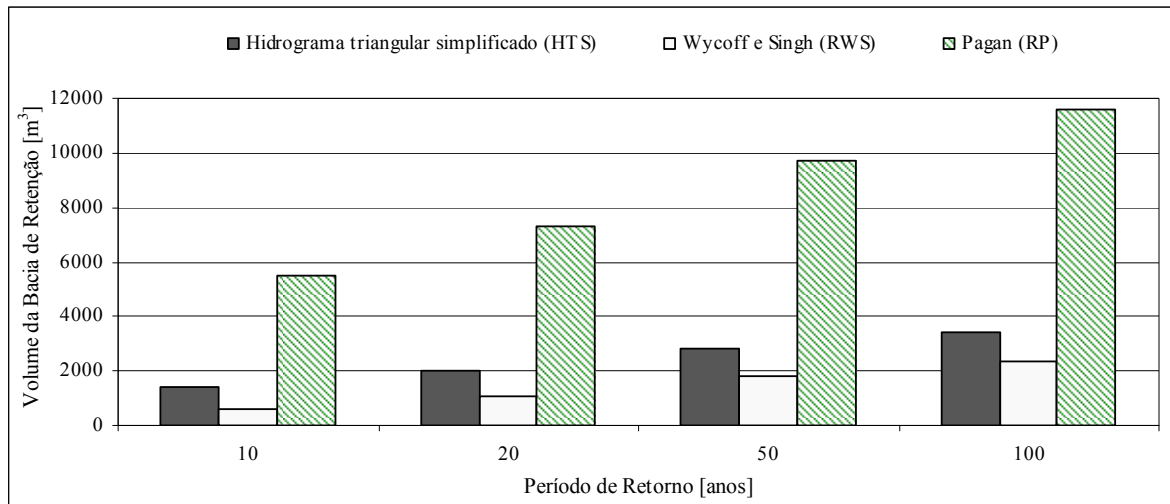


Figura 3 – Comparação entre os volumes obtidos pelos três métodos considerados.

Verifica-se uma maior proximidade entre os resultados obtidos pelo método do hidrograma triangular simplificado e o proposto por Wycoff e Singh (1976) (ver Figura 3).

Estes resultados mostram que a aplicação de métodos expeditos, principalmente os de regressão, podem conduzir a resultados totalmente discrepantes entre si. Esta é uma das razões que justificam o facto da aplicação de um modelo numérico ser considerada de maior fiabilidade no que concerne à avaliação da capacidade de resposta da bacia de retenção (as Figuras 4 e 5 ilustram os resultados da aplicação do modelo numérico).

Saliente-se que o cálculo de caudal a ser usado no dimensionamento da bacia de retenção não se deve basear no método racional visto que este não reproduz 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. Por outro lado, o uso do método racional não é recomendado em bacias hidrográficas de área superior a 10.12 ha (ver, por exemplo, GDOE, 2001). Contudo, o mesmo autor refere que é comum aplicar-se a bacias de área igual ou inferior a 122 ha. Saliente-se, porém, que a metodologia de cálculo de bacias de retenção do escoamento proposta por Debo e Reese (1995) baseia-se no método racional modificado e a sua aplicação está limitada a bacias hidrográficas de área não superior a 13 ha. Existem outros autores (e.g. TUCCI, 1998) que propõem métodos simplificados, baseados no método racional modificado, aplicáveis a pequenas bacias urbanas (< 2 km²). VDOT (2001) utiliza o caudal obtido pelo método racional para estimar o volume da bacia de retenção através dos métodos expeditos.

3.1.2. Aplicação do modelo numérico

Os resultados obtidos pelos métodos expeditos mais recomendados (método do hidrograma triangular simplificado e o de Wycoff e Singh (1976)), sintetizados na Figura 3, revelam que é necessário 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.

Optou-se por uma bacia 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).

A aplicação do método numérico considera o seguinte procedimento:

- i. definição do hidrograma de entrada, $I(t)$ através do método de SCS. Neste trabalho considerou-se $\Delta t = 4$ minutos;
- ii. definição da lei de armazenamento em função da forma da bacia (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:

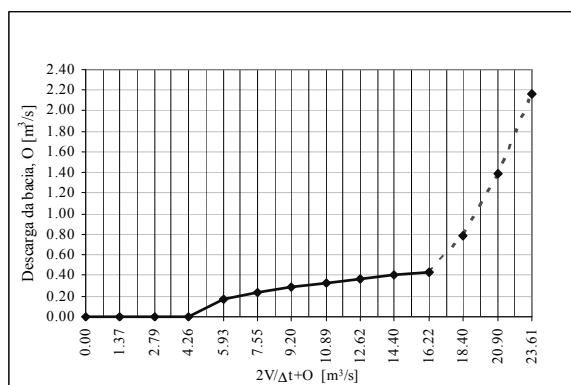
$$O = Q_{\text{orifício}} + Q_{\text{desc.}} = C_d A \sqrt{2g(z_s - z_0)} + C_w L(z_s - z_c)^{3/2} \quad (16)$$

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 a que se encontra o centro do orifício, z_s é a cota da superfície livre da água na bacia, C_w é o coeficiente de vazão do descarregador de soleira espessa (e.g. $C_w = 3.33$), L_d é a largura efectiva do descarregador e z_c é a cota da crista do descarregador;

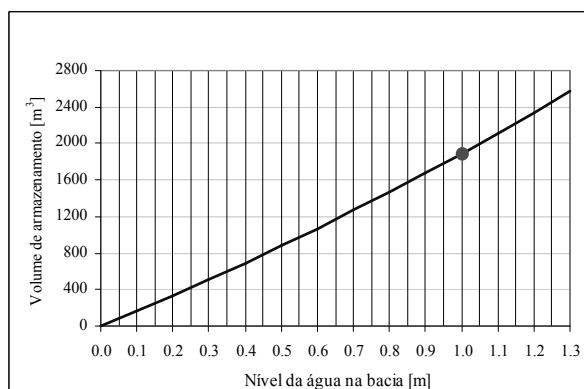
- iv. finalmente, determinam-se as variáveis desconhecidas: a) hidrograma de saída; e b) a evolução de armazenamento ao longo do tempo.

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) e 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 2 para melhor compreensão. A bacia possui as seguintes características 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).

As Figuras 4 e 5 sintetizam os resultados do modelo numérico para uma bacia com as características acima referidas.



a) Curva de armazenamento vs Descarga



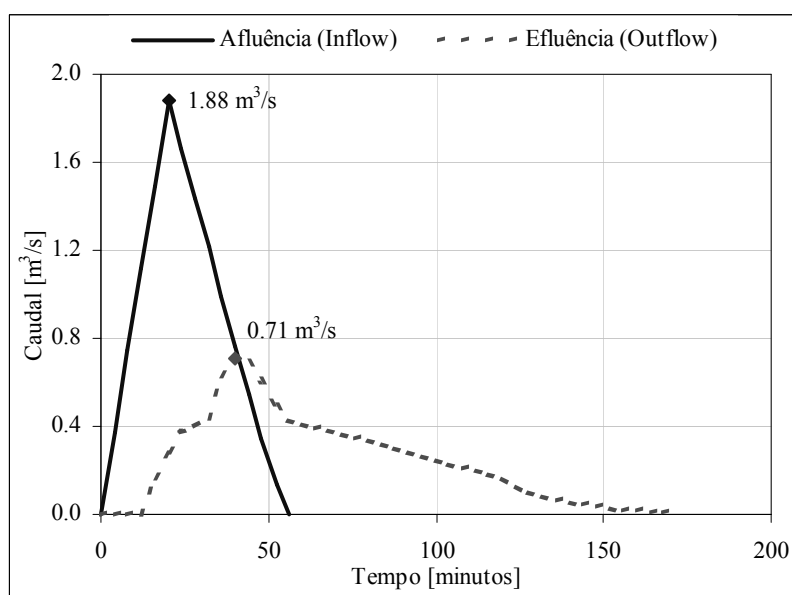
b) Volume armazenado vs Nível da água na bacia

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

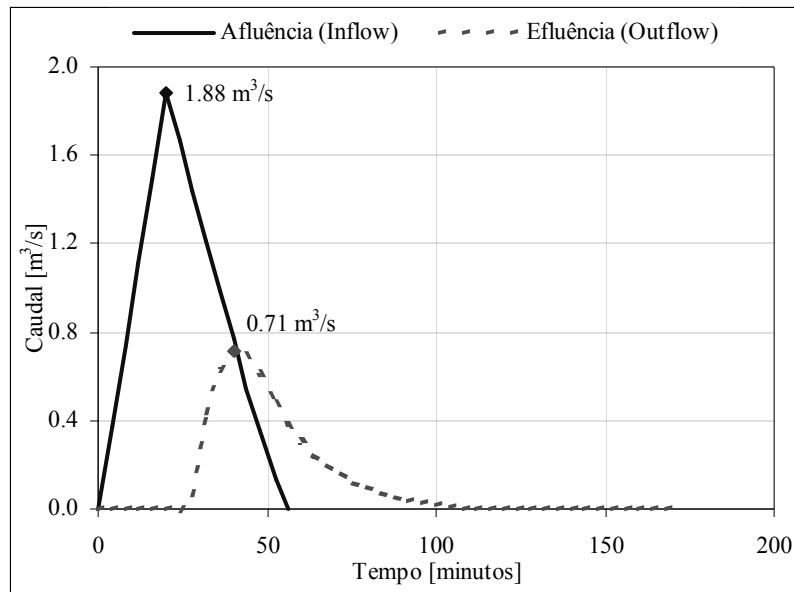
Na Figura 4a o trecho a tracejado da curva corresponde à descarga conjunta do orifício e do descarregador de soleira espessa, sendo o restante trecho (descarga $\leq 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$) correspondente ao funcionamento exclusivo do orifício – isto acontece quando o nível da água na bacia é inferior ou igual à altura da crista do descarregador (1.0 m).

O círculo sobre a recta, representado na Figura 4b, corresponde ao ponto onde o nível da água na bacia atinge a crista do descarregador (1.0 m). Este 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 obtido pelo método de regressão de Pagan (ver Figura 3).

A Figura 5a mostra que a dimensão geométrica e os dois dispositivos hidráulicos adoptados para a bacia conduzem a uma descarga máxima ($0.71 \text{ m}^3/\text{s}$) que satisfaz a condição de pré-desenvolvimento.



(a) Hidrogramas para bacia de retenção com dois descarregadores (orifício + superfície) – ver Figura 2.



(b) Hidrogramas para bacia de retenção com um descarregador de superfície.

Figura 5 – Hidrogramas de entrada e saída da bacia de retenção.

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 efectiva do descarregador (L_d) teria de ser igual a 2.0 metros para que a descarga máxima não exceda os $0.71 \text{ m}^3/\text{s}$. Nesta situação, o hidrograma de saída seria conforme se apresenta na Figura 5b.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram que a aplicação de métodos empíricos expeditos podem conduzir a resultados discrepantes relativamente aos obtidos através do modelo físico. O método de Pagan conduziu a volumes de bacia de retenção muito superiores aos dos restantes métodos, situação que poderá estar relacionada com o facto de ter sido aplicado numa bacia de drenagem cuja a área (200 ha) excede o limite de aplicação recomendado (81 ha).

Com o modelo numérico é possível validar os resultados obtidos pelos métodos expeditos, testando a capacidade de resposta da bacia face a diferentes caudais afluentes e diferentes dispositivos de descarga. Os resultados do modelo numérico (ver Figura 5) evidenciam a sua importância no que respeita à análise das condições de funcionamento hidráulico da bacia, em função da dimensão e dispositivos de descarga adoptados.

É comum considerar-se que 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). Porém, esta situação deve ser analisada em função do risco associado ao projecto, i.e. do grau de exigência de protecção face à sensibilidade do meio de jusante. A erodibilidade da área em que se enquadra a bacia de retenção é também outro factor que se deve ter em consideração, visto que uma afluência excessiva de sedimentos pode comprometer a capacidade de armazenamento da bacia.

É importante garantir que a bacia tenha um comprimento correspondente, no mínimo, ao dobro da sua largura para permitir maior tempo de residência do escoamento.

Deve-se também garantir, sempre que possível, descarregadores com crista de grande largura e baixa altura, de modo a reduzir a velocidade do escoamento à saída da bacia de retenção, evitando-se assim problemas de erosão e degradação do meio receptor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT) e da GLOBALVIA – Consultores de Engenharia, SA. Cumpre ainda agradecer a atenção dos revisores anónimos.

5. REFERÊNCIAS

BRATER, E.F. e KING, H.W., *Handbook of Hydraulics*, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, (1976).

CGSD, *Stormwater Design Manual*, City of Griffin Stormwater Department (CGSD), Prepared by Integrated Science & Engineering, Griffin (2000).

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. e MAYS, L.W., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York (1988).

CORREIA, F.N., *Proposta de um Método para a Determinação de Caudais de Cheia em Pequenas Bacias Naturais e Urbanas*, ITH n.º 6, LNEC, Lisboa (1984a).

CORREIA, F.N., *Alguns Procedimentos Adoptados pelo Soil Conservation Service para o Estudo do Impacto da Urbanização nos Caudais de Cheia*, ITH n.º 7, LNEC, Lisboa (1984b).

DEBO, T.N. e REESE, A.J., *Municipal Storm Water Management*, Lewis Publishers: CRC Press, Boca Raton, Florida (1995).

DMR, *Road Drainage Design Manual*, Chapter 4: Design, Department of Main Roads (DMR), Queensland Government, Queensland (2002).

FHWA, *Hydrain – Integrated Drainage Design Computer System*, Volume II, HYDRO – Hydrology, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC (1999).

GDOE, *Georgia Stormwater Management Manual*, Volume 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 Department of the Environment (GDOE), Georgia (2001).

IEP, *Manual de Drenagem Superficial em Vias de Comunicação*, Instituto de Estradas de Portugal (IEP), Lisboa (2001).

MATOS, M.R. *Métodos de Análise e de Cálculo de Caudais Pluviais em Sistemas de Drenagem Urbana*. Tese de Especialista do LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa (1987).

MGONDC, *Stormwater Management Manual*, Volume 2: Procedures. Metropolitan Government of Nashville and Davidson County (MGONDC), The Edge Group & CH2M Hill (1988).

MOTH, *Hydraulics Manual*. Ministry of Transportation and Highways (MOTH), Engineering Branch, Province of British Columbia, Canada (1998).

NRCS, *Engineering Field Manual for Conservation Practices*, National Research Conservation Service (NRCS), Soil Conservation Service, Engineering Division, Whashington, DC (1984).

NRCS, *Water and Sediment Control Basin*, Conservation Practice Standard, Code 638, Natural Resources Conservation Service (NRCS), Kentucky (1999).

OLIVERA, F., *Course of Hydraulic Engineering Design*, Center for Research in Water Resources (CRWR), University of Texas at Austin, 2000.

PILGRIN, D.H. e CORDERY, I., Flood Runoff, em: *Handbook of Hydrology*, Edit. D.R. Maidment, McGraw-Hill, USA, 9.1-9.42 (1992).

PORTELA, M., MARQUES, P. e CARVALHO, F.F., Hietogramas de Projecto para a Análise de Cheias Baseada no Modelo do Hidrograma Unitário do Soil Conservation Service (SCS), em: *Actas do 5º Congresso da Água*, Lisboa, Portugal, 25 a 29 de Setembro (2000).

PONCE, V.M., *Engineering Hydrology. Principles and Practices*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1989).

PONCE, V. M. e HAWKINS, R. H., Runoff Curve Number: Has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, **1(1)**, 11-19 (1996).

QUINTELA, A., *Hidráulica Geral*, 4ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1981).

RAMÍREZ, J.A., Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics, Chapter 11, em: *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities*. Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press (2000).

SANDVIK, G.B. e SOWERS, G.F., *Introductory Soil Mechanics and Foundations*, 3rd Edition, MacMillan Publishing Company, New York (1970).

SCHUELER, T., *Design of Storm-Water Wetland Systems: Guidelines for Creating Diverse and Effective Stormwater Wetland System in the Mid-Atlantic Region*, Anacostia Restoration Team, Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC (1992).

SCS, *National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), Washington, DC (1972).

SCS, *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release 55, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), Washington, DC (1986).

SPANGLER, M.G. e HANDY, R.L., *Soil Engineering*, 4th Edition, Harper & Row, New York (1982)

TUCCI, C.M., Estimativa do Volume para Controle da Drenagem no Lote, em: *Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle*. Porto Alegre: Edição da Universidade, Associação Brasileira dos Recursos Hídricos. pp. 155-163 (1998).

USACE, *Flood-Runoff Analysis*. Department of the Army, U.S. Army Corps of the Engineers (USACE), Washington, DC (1994).

USDA, *A Method for Estimating Volume and Rate Runoff in Small Watersheds*, U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service, Washington, DC (1973).

USDA-SCS, *National Engineering Handbook*, Section 4 – Hydrology, US Department of Agriculture. Soil Conservation Service, Washington, DC (1985).

USDA., *Ponds – Planning Design and Construction*, U. S. Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Service (NRCS), Washington, DC (1997).

VDOT., *Drainage Manual*, Virginia Department of Transportation (VDOT), Virginia (2001).

VISSMAN, W. e LEWIS, G. L., *Introduction to Hydrology*, 4th Edition, HarperCollins College Publishers, New York (1996).

WALESH, S. G., *Urban Surface Water Management*, John Wiley & Sons, New York (1989).

WSDOEWQP, *Stormwater Management in Washington State, Volume V: Runoff Treatment BMPs*. Washington State Department of Ecology Water Quality Program (WSDOEWQP). Olympia, Washington, DC (1999).

WYCOFF, R.L. e SINGH, U.P., Preliminary Hydrologic Design of Small Flood Detention Reservoirs, *Water Resources Bulletin*, **12(2)**, 337-349 (1976).

