

## **CONTROLO DOS CAUDAIS PLUVIAIS DE NOVAS URBANIZAÇÕES COM BACIAS DE RETENÇÃO – Dimensionamento e modelação do sistema da Penalva**

Luís Mesquita DAVID<sup>(1)</sup>; Rita Fernandes de CARVALHO<sup>(2)</sup>; Rita ISIDRO<sup>(3)</sup>;  
Manuela SOBRAL<sup>(3)</sup>

### **RESUMO**

A Câmara Municipal do Barreiro pretende viabilizar o desenvolvimento urbano de uma zona com cerca de 100 ha, localizada a montante de uma vala com limitações de vazão, tendo solicitado ao LNEC e à Universidade de Coimbra estudos para a integração e o pré-dimensionamento de bacias de retenção. As bacias de retenção deverão garantir que o caudal descarregado na vala, após completado o processo de urbanização, não exceda o caudal correspondente à ocupação actual, para o período de retorno de 100 anos.

Neste artigo descreve-se o trabalho desenvolvido, que compreendeu o estudo hidrológico da bacia hidrográfica actual, a concepção do sistema de drenagem tendo em conta o desenvolvimento urbano esperado, a localização das bacias de retenção, a definição da metodologia e dos critérios de dimensionamento, o dimensionamento conjunto da rede de colectores, das bacias e de outras obras hidráulicas relevantes e a avaliação do funcionamento do sistema para cenários extremos, incluindo alterações climáticas.

O estudo hidráulico foi efectuado com recurso à modelação matemática, através da construção de um modelo no programa SWMM, e da simulação do funcionamento do sistema para diferentes cenários de concepção e de solicitação. Estudou-se a viabilidade da construção de oito bacias de retenção, tendo-se optado por cinco bacias apenas na solução final.

---

<sup>(1)</sup> Investigador Auxiliar, LNEC (DHA/NES), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [ldavid@lnec.pt](mailto:ldavid@lnec.pt)

<sup>(2)</sup> Professora Auxiliar, IMAR, Universidade de Coimbra, Dep. Eng. Civil - Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal, +351 239 79 71 50, [ritalmfc@dec.uc.pt](mailto:ritalmfc@dec.uc.pt)

<sup>(3)</sup> Eng.<sup>a</sup> Civil, Divisão de Projectos e Obras, Departamento de Águas e Saneamento, Câmara Municipal do Barreiro, [risidro@cm-barreiro.pt](mailto:risidro@cm-barreiro.pt), [msobral@cm-barreiro.pt](mailto:msobral@cm-barreiro.pt)

## **PALAVRAS-CHAVE**

Águas pluviais, drenagem urbana, SUDS, bacias de retenção, modelação, SWMM

## **1 - INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, diversos países têm condicionado o licenciamento de novas urbanizações à adopção de medidas que laminem o caudal de cheia ao do escoamento natural anterior à urbanização (“the Greenfield runoff”). As bacias de retenção podem constituir uma importante medida de controlo na origem, promovendo o amortecimento dos caudais de cheia e a gestão mais sustentável dos sistemas de drenagem urbana.

Tal como é proposto pelo Regulamento Geral de Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, publicado pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto (doravante designado por Regulamento Geral), o pré-dimensionamento de bacias de retenção é frequentemente efectuado pelo método simplificado, também conhecido por método holandês (Abreu, 1983). No entanto, o dimensionamento final deve ser efectuado com base num modelo numérico que tenha em consideração as características da bacia de drenagem, a geometria da estrutura de retenção, a lei de vazão dos órgãos de descarga e a variabilidade da precipitação.

Na sequência de uma reflexão sobre o método holandês, e face às ferramentas de cálculo automático actualmente disponíveis, David e Carvalho (2009) propuseram um modelo numérico mais sofisticado para o dimensionamento expedito de estruturas de retenção. O modelo foi desenvolvido em Excel e utiliza rotinas construídas em VBA, efectuando automaticamente o cálculo iterativo das necessidades de armazenamento e da chuvada crítica de projecto, para diferentes opções de dimensionamento da estrutura de retenção e dos órgãos de descarga.

No entanto, em situações de maior complexidade, designadamente com entradas em carga e extravasamentos nos colectores, o dimensionamento das bacias de retenção deve resultar de estudos mais pormenorizados, com recurso a modelos distribuídos e hidrodinâmicos, tais como os construídos no INFOWORKS, no MOUSE ou no SWMM. Não obstante as crescentes potencialidades deste tipo de modelação, persiste a necessidade de recorrer a simplificações e hipóteses de base, cuja importância deve ser minorada logo na fase de concepção do sistema e deve ser criteriosamente tida em consideração na análise dos resultados e no dimensionamento final das bacias.

Neste artigo descrevem-se os critérios e a metodologia de dimensionamento de um conjunto de bacias de retenção a implantar numa área a urbanizar, em que o sistema de drenagem foi modelado com o programa SWMM (Storm Water Management Model, da US EPA) para cenários e hipóteses de base pouco habituais em estudos de hidrologia urbana.

Este trabalho surgiu na sequência de estudos solicitados pela Câmara Municipal do Barreiro (CMB) ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P. (LNEC) e à Universidade de Coimbra (UC), com o objectivo de permitir a curto prazo viabilizar o desenvolvimento urbano previsto para a área da Penalva, naquele Concelho, através da construção de bacias de retenção. De acordo com o estabelecido pela Administração da Região Hidrográfica do Tejo I.P. (ARH do Tejo), o caudal afluente à vala real de Palmela, após completado o processo

de urbanização de cerca de 100 ha, não deverá exceder o caudal correspondente à ocupação actual, para o período de retorno de 100 anos (Carvalho e David, 2010; David e Carvalho, 2010).

## **2 - OBJECTIVOS, ESPECIFICIDADES E METODOLOGIA GERAL DO ESTUDO**

Os objectivos do trabalho consistiram na realização das três seguintes actividades principais:

- Diagnóstico do funcionamento do sistema de drenagem actual, com cerca de 160 ha, identificação das principais deficiências e estabelecimento dos caudais de referência a utilizar no dimensionamento das bacias de retenção (caudais de laminagem de cheia).
- Estudo de alternativas de localização das bacias de retenção e de concepção do sistema de drenagem, pré-dimensionamento do sistema tendo em conta o desenvolvimento urbano esperado na Penalva (com cerca de 100 ha), comparação dos resultados e selecção da solução a pormenorizar.
- Pormenorização da solução e dimensionamento dos colectores, das bacias de retenção e de outras estruturas relevantes, incluindo a análise de solicitações extremas, tais como as resultantes de falhas de órgãos ou de alterações climáticas.

A localização, a concepção e o dimensionamento das bacias de retenção teve em consideração os seguintes critérios e recomendações estabelecidas pela ARH do Tejo, com a qual foram realizadas quatro reuniões ao longo do desenvolvimento do trabalho:

- o estabelecimento de um planeamento apurado de toda a área a urbanizar, com uma solução conducente a uma intervenção única e integrada;
- o enquadramento do estudo num âmbito intermunicipal, com soluções de ordenamento, planeamento e controlo integrado de cheias.
- a integração das bacias de retenção, acessíveis ao público, num corredor verde;
- o dimensionamento das bacias de retenção e das valas a jusante para o período de retorno de 100 anos, considerando 70% de área impermeável, para a situação pós urbanizada, e 40% de área impermeável, para a ocupação actual.

O estudo compreendeu a análise dos benefícios de vários cenários de construção de bacias de retenção, com algumas dispostas em série, conferindo ao trabalho um grau de complexidade não compatível com a utilização de metodologias de cálculo simplificadas. Assim, conforme referido, o estudo hidráulico foi efectuado com recurso à modelação matemática, através da construção de um modelo no programa SWMM, e da simulação do funcionamento do sistema para diferentes cenários de concepção e de solicitação.

O facto da rede de colectores ser dimensionada para precipitações com período de retorno de 5 anos e as bacias de retenção para precipitações com período de retorno de 100 anos aumentou significativamente a complexidade do estudo e do modelo matemático. Este teve de simular não só o escoamento nos colectores como também o escoamento superficial de inundações, ocorridas durante as precipitações com períodos de retorno elevados (T = 100 anos), o qual foi considerado ao longo dos arruamentos.

A necessidade de encaminhar o escoamento superficial de inundações para as bacias de retenção, bem como a conveniência em evitar a acumulação de água em pontos baixos do terreno (com cotas inferiores à da linha de energia do escoamento), levaram a um diálogo regular com os urbanistas, em várias fases do estudo, por forma a avaliar as possibilidades e restrições de alteração da topografia em alguns locais.

### **3 - METODOLOGIA E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO**

#### **3.1 - Metodologia**

O diagnóstico do sistema de drenagem actual foi efectuado com base na construção de um modelo do sistema actual de valas e respectivas sub-bacias, no SMMM, e na simulação do seu funcionamento, utilizando diferentes modelos hidrológicos e valores limites, por defeito e por excesso, para as principais variáveis, tais como perdas iniciais, intensidades de infiltração no solo e coeficientes de rugosidade.

A concretização do segundo objectivo compreendeu a realização das seguintes tarefas:

- Estudo de locais para implantação das bacias de retenção, análise das suas potencialidades e limitações e concepção do funcionamento do sistema para configurações alternativas possíveis.
- Para cada cenário, execução do traçado da rede de colectores tão coincidente quanto possível com o andamento do escoamento superficial (incluindo a identificação das possibilidades de remodelação do terreno que promovam a concordância entre a bacia de drenagem da rede enterrada e a bacia de drenagem do escoamento superficial).
- Pré-dimensionamento da rede de colectores, de montante para jusante, para o período de retorno de 5 anos, admitindo escoamento uniforme e permanente e utilizando uma folha de cálculo em Excel.
- Definição da geometria das bacias de retenção, incluindo o estabelecimento das cotas do fundo e dos órgãos de descarga e a determinação da relação entre a altura de água e o volume armazenado.
- Construção do modelo hidrodinâmico em SWMM e pré-dimensionamento dos orifícios de descarga de fundo das bacias de retenção para o período de retorno de 100 anos, incluindo a determinação dos caudais evacuados para jusante.
- Redimensionamento dos colectores a jusante das bacias de retenção, por forma a assegurarem o escoamento em superfície livre dos caudais laminados para o período de retorno de 100 anos.
- Redimensionamento dos orifícios de descarga de fundo, para as novas condições de descarga a jusante.
- Comparação do caudal máximo descarregado na bacia de retenção mais a jusante com o caudal máximo afluente a esse local nas condições de ocupação actual e redimensionamento da geometria das bacias de retenção.
- Repetição do procedimento anterior para cada solução preconizada, comparação dos resultados obtidos e selecção da solução final.

Para a solução seleccionada, procedeu-se à realização das seguintes tarefas:

- Pormenorização da rede de colectores e da localização, altimetria e geometria das bacias de retenção e redimensionamento dos orifícios de descarga de fundo das bacias.
- Dimensionamento dos descarregadores de emergência e estudo das possibilidades de evacuação dos caudais descarregados para colectores alternativos a jusante (por forma a aumentar a capacidade de resposta do sistema, em caso de obstrução do colector).
- Simulação com o SWMM do funcionamento do sistema face à obstrução do orifício de descarga de cada uma das bacias de retenção e eventual redimensionamento dos colectores de jusante ou dos descarregadores de emergência.
- Análise do funcionamento do sistema para outro tipo de solicitações extremas, tais como as decorrentes de alterações climáticas, e redimensionamento de alguns colectores, bacias ou órgãos de descarga.
- Dimensionamento dos dispositivos de entrada nas bacias de retenção e de eventuais dispositivos de dissipação de energia e de retenção de sedimentos.

### **3.2 - Critérios de dimensionamento dos colectores**

O traçado e o pré-dimensionamento dos colectores foram efectuados em conformidade com o estabelecido no Regulamento Geral, considerando o escoamento uniforme e permanente, a lei de resistência de Manning-Strickler, o período de retorno de 5 anos e o coeficiente de escoamento de 0.7.

Os resultados do SWMM têm em consideração as equações completas de Saint-Venant e a lei de resistência de Manning, tanto para os escoamentos com superfície livre como para os escoamentos sob pressão.

### **3.3 - Critérios de concepção e dimensionamento das bacias de retenção**

A concepção e o traçado da geometria das bacias de retenção foram efectuados com base nos seguintes critérios (David e Carvalho, 2010):

- A área máxima contribuinte para uma única bacia de retenção não deve exceder cerca de 30 ha.
- As bacias são preferencialmente escavadas no terreno, aproveitando sempre que possível depressões naturais, evitando-se assim os factores de risco associados à rotura ou galgamento de aterros.
- A inclinação mínima do fundo da bacia é de 1%, por forma a assegurar o esvaziamento completo entre eventos de precipitação. As bacias estão implantadas em locais com alguma permeabilidade do solo, favorecendo o esvaziamento da bacia e a secagem do solo nas depressões. Caso contrário, seria conveniente aumentar a inclinação do fundo para cerca de 5%.
- Consideração de uma depressão em canal que escoe os caudais reduzidos, desde a entrada até à saída da bacia, propiciando o esvaziamento da bacia e a manutenção de

condições secas no fundo. Este canal deve ter uma inclinação mínima de 0.5% e ser revestido com colchão Reno ou outro enrocamento adequado, por forma a resistir à erosão.

- Os taludes das bermas devem ter inclinações mínimas de 1:6 (relação entre a diferença de cotas e o comprimento), nos locais acessíveis ao público, e de 1:2 ou preferencialmente 1:3 nos restantes casos. Os taludes revestidos com vegetação não devem exceder 6 m de altura nem terem inclinação superior a 1:3, sendo recomendável proteger com enrocamento taludes com inclinação superior a 1:3. Os taludes com altura superior a 3 m ou declive superior a 1:2 devem ter em conta a eventual análise de estabilidade geotécnica.
- Sempre que necessário, devem prever-se valetas de crista para evitar a erosão ravinosa dos taludes.
- A altura de água máxima, em relação ao ponto de menor cota da bacia (não ao fundo do canal) não deve exceder 1.80 m, nas bacias acessíveis ao público. Em bacias em que seja fundamental aproveitar a capacidade de armazenamento, admite-se uma altura de água até cerca de 3 m, desde que os acessos aos locais de maior profundidade sejam convenientemente vedados ao público.
- Deve prever-se, junto do órgão de entrada da bacia de retenção, protecção com enrocamento e mesmo estruturas de dissipação de energia no caso de velocidades elevadas. A velocidade pode ser atenuada no sistema a montante, com quedas em caixas de visita, e/ou através de estruturas de degraus na entrada da bacia de retenção.
- É conveniente prever bacias de sedimentação à entrada das bacias de retenção de maior dimensão, com altura de água entre 1.2 e 1.8 m e volume de 26 m<sup>3</sup> por hectare de área impermeável contribuinte, ou, no mínimo, de um décimo do volume da bacia de retenção.
- As estruturas de entrada e de saída de colectores nas bacias de retenção devem ser acessíveis a pessoal técnico, viaturas e equipamentos de manutenção, mas convenientemente protegidas do acesso da população e animais. Num perímetro de alguns metros das estruturas de saída, pode ser conveniente colocar uma série de pilares junto ao solo, que impeçam a passagem de troncos de árvores ou objectos de grandes dimensões, e uma vedação larga que evite a passagem de ramos maiores, cães e, eventualmente, outros animais. As vedações devem ser convenientemente enquadradas em termos paisagísticos.
- Nas bacias acessíveis ao público, devem garantir-se condições para a retirada segura das pessoas durante o enchimento, sendo fundamental assegurar acessos junto aos locais com menor cota do fundo, que corresponderão aos últimos a ficar inundados.

#### **4 - ÁREA DE ESTUDO E INFORMAÇÃO DE BASE**

##### **4.1 - Localização e ocupação da bacia e dados de cadastro**

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica que drena para a vala real de Palmela, a jusante da Penalva. Tem 159 ha, dos quais 128 ha (81%) pertencem ao Concelho do

Barreiro e 31 ha (19%) ao Concelho de Palmela. É limitada a nordeste pelo Concelho da Moita e a sul pelo Concelho de Palmela (CMB, 2008).

A área pertencente ao Concelho de Palmela está urbanizada, enquanto que a do Concelho do Barreiro apresenta uma ocupação rural e semi-urbana, com pequenas quintas e alguns bairros de moradias. A área a urbanizar tem cerca de 100 ha e localiza-se na Penalva, no Concelho do Barreiro.

Conforme referido anteriormente, a ARH do Tejo recomendou a consideração de 70% de área impermeável, para a situação pós urbanizada, e 40% de área impermeável, para a ocupação actual.

Toda a informação relativa ao sistema de drenagem actual e à topografia do terreno actual e pós-urbanização foi obtida pela CMB.

#### **4.2 - Disponibilidade de espaço para as bacias de retenção e condicionalismos locais**

Na sequência das primeiras reuniões de trabalho, para análise dos planos de urbanização, das inclinações do terreno e das oportunidades de integração das bacias de retenção, identificaram-se sete possíveis locais para a implantação das bacias. Competiu à CMB fazer o desenho da integração urbanística das bacias e definir a área máxima de terreno ocupada por cada. Um estudo preliminar, baseado na metodologia e no modelo descritos em David e Carvalho (2009), apontou para a necessidade de se dispor de maiores volumes de armazenamento, tendo a CMB proposto a construção de mais uma bacia de retenção a jusante, na área da Reserva Agrícola Nacional (RAN).

O local de implantação das bacias de retenção e as características da área envolvente podem interferir significativamente com aspectos de concepção, de construção e de exploração das bacias de retenção. Durante esta fase de trabalhos, identificaram-se dificuldades relacionadas com a construção e exploração de algumas bacias, que levaram a equacionar desde logo as vantagens e os inconvenientes da sua construção. Três bacias estavam implantadas em locais demasiado inclinados, obrigando a terraplanagens na área envolvente, à construção de taludes bastante inclinados e à vedação das bacias ao público, em duas delas, e à opção por uma estrutura enterrada, para a terceira. Numa fase mais avançada do trabalho, no final da época chuvosa, surgiram outras dificuldades, relacionadas com a incerteza do nível freático no local de uma bacia, que se descrevem em 4.4.

#### **4.3 - Geologia e permeabilidade do solo**

A permeabilidade dos solos desempenha um papel fundamental na relação precipitação-escoamento (directamente relacionada com os caudais de ponta a amortecer e com os volumes a armazenar), no dimensionamento das bacias de retenção/infiltração e na definição de potenciais medidas de controlo na origem a promover.

De acordo com a Folha 34D – Lisboa da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000, na área de estudo ocorrem duas unidades litoestratigráficas: a Formação de Marco Furado

(QMF), pertencente ao Plistocénico; e a Formação de Santa Marta (PSM), pertencente ao Pliocénico.

Foi realizado um estudo da permeabilidade dos solos nestas duas formações, que consistiu na realização de dez ensaios pontuais *in situ* na zona não saturada e no estudo da composição granulométrica das amostras remexidas recolhidas em todos os furos. Os resultados obtidos indicaram que o período de formação dos solos não contribuiu para os diferenciar na sua composição e que não tem influência no coeficiente de permeabilidade. Admitindo que não houve influência do nível freático nos resultados, a gama de valores da permeabilidade do solo com a água à temperatura de 20° C foi de  $12 \text{ mm/h} \leq k \leq 131 \text{ mm/h}$ , com média e mediana de, respectivamente, 68 e 71 mm/h (Roque, 2009).

#### **4.4 - Nível freático**

Procedeu-se à observação da altura de água nos poços acessíveis na área de estudo, tendo-se constatado que estava vários metros abaixo da cota do terreno, nos locais das bacias de retenção.

No entanto, em Fevereiro de 2010, na sequência de uma série de dias chuvosos e de um inverno particularmente chuvoso, observou-se que o nível de água num poço junto a uma bacia de retenção (BR-C) estava próximo da superfície. Dado que a escavação desta bacia poderá provocar a drenagem indesejável de águas subterrâneas e um rebaixamento do nível freático, estudou-se um cenário adicional sem a sua construção. Este assunto terá de ser esclarecido com a realização de um estudo das condições hidrogeológicas do local.

#### **4.5 - Grupo hidrológico dos solos e número de escoamento do método do SCS**

De acordo com a classificação do Natural Resources Conservation Service (NRCS, 2007), a entidade que sucedeu o antigo e conhecido Soil Conservation Service (SCS), e considerando que o nível freático mais elevado está a mais de 100 cm de profundidade, as amostras de solos analisadas apresentam a seguinte distribuição pelos grupos hidrológicos do solo do método do SCS: 6 do Grupo A; 3 do Grupo B; e 1 do Grupo C.

A inspecção das alturas de água nos poços efectuada em Fevereiro de 2010 deixou em evidência solos bem drenados e níveis freáticos vários metros abaixo da superfície do terreno na Formação de Santa Marta, reforçando a classificação destes terrenos no Grupo A. No entanto, em alguns locais houve evidências do nível freático poder ser elevado, o que alteraria a classificação do solo naqueles locais do Grupo A para o D.

Actualmente, a bacia da Penalva está maioritariamente ocupada por quintas, moradias com logradouros, pequenas hortas (algumas cultivadas, outras ao abandono), terrenos baldios com vegetação rasteira local ou com o solo a descoberto e, em particular na zona de jusante, por espaços amplos com algumas árvores, mas sem cultivo. Os valores de CN devem estar compreendidos entre 68 e 77 para solos do Grupo A e entre 79 e 86 para solos do Grupo B, a que corresponde um valor médio da ordem de 70 a 80. Os valores de CN para solos eventualmente classificados no Grupo D, devido ao nível freático elevado, estão compreendidos entre 89 e 94.

#### 4.6 - Precipitação

Tal como em diversos estudos de modelação de sistemas de drenagem urbana em Portugal, foi utilizado o hietograma de projecto proposto por Matos (1987) e descrito na **Figura 1**.

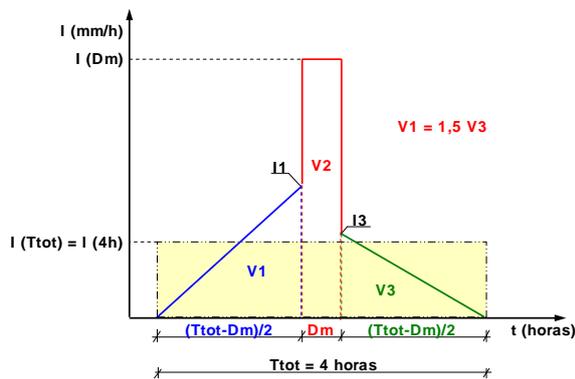
Em Brandão *et al.* (2001) não constam curvas IDF para o Barreiro nem para o posto mais próximo da rede udográfica do INAG (Setúbal). Verificou-se que, para o período de retorno de 100 anos e para durações inferiores a 60 minutos, a curva IDF da Região A definida por Matos e Silva (1986) ajusta-se bem e é conservativa relativamente às curvas de três postos vizinhos, pelo que as bacias de retenção foram dimensionadas com base nessa curva IDF.

#### 5 - DETERMINAÇÃO DOS CAUDAIS DE REFERÊNCIA PARA A SITUAÇÃO ACTUAL

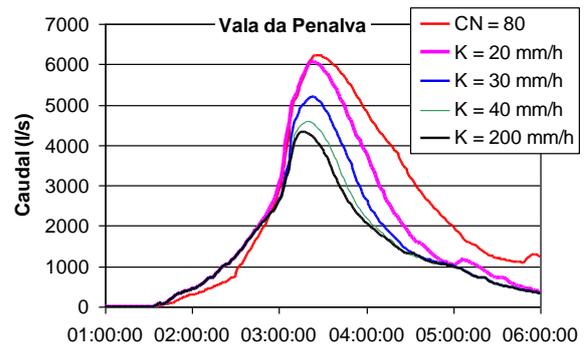
O estudo dos caudais gerados na bacia para a ocupação actual foi efectuado considerando uma percentagem de área impermeável de 40%. O SWMM modela a fracção impermeável de cada bacia de drenagem considerando apenas uma perda hidrológica fixa (intercepção e retenção superficial). A fracção permeável é modelada por uma perda fixa e por uma perda contínua, a qual pode ser calculada por um dos seguintes três métodos: Horton, Green-Ampt, ou SCS.

Neste estudo, procedeu-se à avaliação dos caudais gerados através de dois métodos: o do SCS; e o de Horton, considerando valores constantes para a intensidade de infiltração (que corresponderá às condições de saturação). Na **Figura 2** apresentam-se os hidrogramas para o período de retorno de 100 anos obtidos por diferentes métodos na vala da Penalva, no local da “Barra Cheia”, onde se prevê construir a bacia de retenção mais a jusante (bacia BR-H). Os resultados apresentados dizem respeito à aplicação dos três seguintes métodos:

- método do SCS, para  $CN = 80$ ;
- consideração de intensidades de infiltração constantes de  $K = 20$  mm/h,  $K = 30$  mm/h e  $K = 40$  mm/h;
- consideração de uma intensidade de infiltração muito elevada ( $K = 200$  mm/h, superior à intensidade de precipitação), que corresponde a admitir que as áreas permeáveis não contribuem para o escoamento.



**Figura 1.** Hietograma de projecto de Matos (1987)



**Figura 2.** Caudais obtidos por diferentes métodos e parâmetros, para as condições actuais

Da análise da **Figura 2** observa-se que os caudais de ponta gerados pelo método do SCS, para  $CN = 80$ , correspondem aproximadamente aos obtidos pelo método de Horton para uma taxa de infiltração constante de  $20 \text{ mm/h}$ . Tendo em consideração que os ensaios de infiltração realizados no local revelaram taxas da infiltração no solo saturado bastante superiores a  $20 \text{ mm/h}$  (com média e mediana de  $70 \text{ mm/h}$ ), os resultados apresentados na **Figura 2** sugerem que a aplicação do método do SCS no SWMM fornece resultados relativamente conservativos.

No entanto, os hidrogramas obtidos admitindo uma taxa de infiltração constante superior a  $40 \text{ mm/h}$  são praticamente iguais aos gerados para uma taxa de infiltração muito elevada, correspondente à situação extrema das áreas permeáveis não contribuírem para o escoamento. Esta constatação sugere que a aplicação do método de Horton pode fornecer caudais inferiores aos esperados.

Foram também efectuadas análises de sensibilidade à variação de outros parâmetros, designadamente das perdas por interceptação nas fracções permeável e impermeável, da inclinação do terreno, e dos coeficientes de Manning no escoamento superficial e nas valas, os quais revelaram uma influência pouco significativa nos caudais de ponta.

Concluiu-se que, para as condições actuais de drenagem e o período de retorno de 100 anos, o caudal afluente à vala da Penalva está compreendido entre  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ . O modelo matemático confirmou a ocorrência de inundações nos pontos baixos do Concelho de Palmela, tendo-se decidido fazer o desvio da drenagem de uma área de  $20 \text{ ha}$  para a Vala da Penalva, por forma a reduzir as inundações. Caso esse desvio já existisse actualmente, o caudal afluente à vala da Penalva estaria entre  $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A jusante da vala da Penalva e a montante da entrega na vala real de Palmela, o sistema ainda recebe contribuições da rede de drenagem de Palmela e apresenta outros problemas, cuja descrição está fora do âmbito do presente artigo.

## 6 - ESTUDO DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS

Identificaram-se três cenários alternativos de funcionamento do sistema após a urbanização: um que compreende a construção das oito bacias de retenção, com várias bacias dispostas em série, e dois cenários que passam pela construção de apenas cinco bacias de retenção, com diferenças na ligação do escoamento entre elas.

O pré-dimensionamento das bacias de retenção foi efectuado de acordo com a metodologia descrita. Os resultados mostraram que o caudal descarregado pela bacia localizada a jusante (BR-H) é próximo de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  para o cenário com oito bacias de retenção e é superior em  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$  para os outros dois cenários, concluindo-se que qualquer um dos três cenários assegura a laminagem do escoamento a jusante da área intervencionada para valores de caudal inferiores aos da ocupação actual.

As soluções que prevêem apenas cinco bacias de retenção são preferíveis relativamente à que dispõe das oito bacias, por dispensarem a construção de bacias de retenção que, devido à sua localização, são de mais difícil construção e exploração. Entre as duas soluções com apenas cinco bacias de retenção, optou-se pela que apresentava menos bacias dispostas em série, por conduzir a menores riscos de segurança associados à ocorrência de uma cheia excepcional ou a uma eventual falha do funcionamento dos órgãos de descarga das bacias de retenção.

## 7 - PORMENORIZAÇÃO DA PROPOSTA DE SOLUÇÃO FINAL

### 7.1 - Considerações gerais de dimensionamento

O dimensionamento final das bacias de retenção e do sistema de colectores foi pormenorizado para o cenário seleccionado seguindo a metodologia descrita anteriormente.

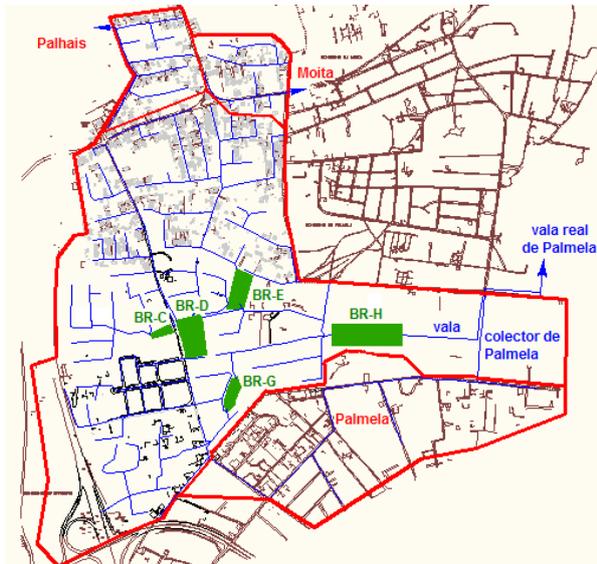
As bacias de retenção foram dimensionadas para o hietograma de projecto com duração da ponta de 20 minutos, por ser a duração que exige maiores volumes de armazenamento.

No cálculo da relação precipitação-escoamento superficial, consideraram-se os seguintes parâmetros de referência:  $CN = 80$ , ou permeabilidade de  $20 \text{ mm/h}$ , perdas iniciais de  $1.5 \text{ mm}$  nas áreas impermeáveis e de  $5 \text{ mm}$  nas permeáveis, e coeficientes de Manning  $N = 0.017 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  ( $K_s = 59 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ ) para as áreas impermeáveis e  $N = 0.070 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  ( $K_s = 14 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ ) para as permeáveis.

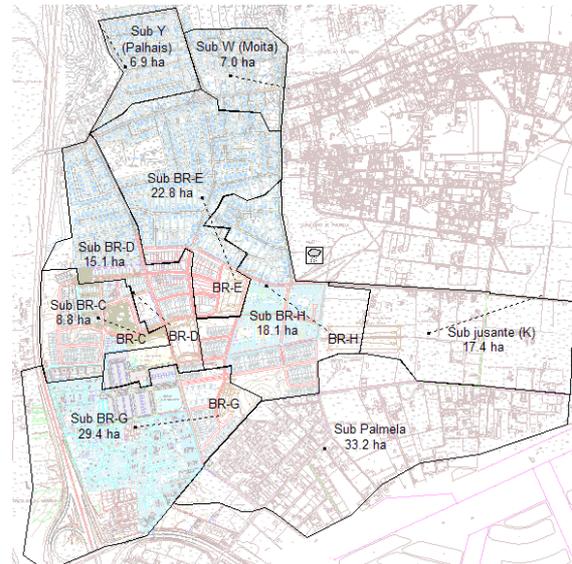
Quando ocorre extravasamento nos colectores, o escoamento superficial foi simulado admitindo que se dá ao longo dos arruamentos, os quais foram representados por canais rectangulares com largura constante de  $6.0 \text{ m}$  e coeficiente de Manning-Strickler de  $40 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  (inclui perdas de carga singulares). A altura de água nos arruamentos não excedeu  $0.20 \text{ m}$ , atingindo  $0.30 \text{ m}$  em trechos pontuais, considerando-se que os caudais estimados pelo modelo têm um razoável grau de aproximação.

A **Figura 3** representa o traçado da rede de colectores e a localização das bacias de retenção. A **Figura 4** apresenta a delimitação e as áreas das principais bacias de drenagem do sistema. O **Quadro 1** sintetiza as principais características das bacias de retenção e dos órgãos de descarga consideradas nas simulações finais. As alturas máximas de água à cota de descarga e de galgamento estão referidas à cota de jusante do fundo da bacia (a

menor cota do fundo da bacia), mas acima do canal para encaminhamento de caudais reduzidos. O canal no fundo bem como a base do orifício de descarga foram implantados 1.0 m abaixo do fundo da bacia (excepto na bacia BR-C, em que o canal tem apenas 0.60 m de altura).



**Figura 3.** Localização das bacias de retenção



**Figura 4.** Delimitação e áreas das principais bacias de drenagem do sistema

**Quadro 1.** Características das bacias de retenção

Bacia de retenção	Área superficial (Asup) (m <sup>2</sup> )	Diâmetro do orifício (m)	Altura máxima à cota de descarga (Hdesc) (m)	Altura máxima à cota de galgamento (Hmax) (m)	Largura do descarregador de emergência (m)	Volume à cota de descarga (Vdesc) (m <sup>3</sup> )
BR-C	1706	0.550	1.80	2.20	4.5	1243
BR-D	9944	0.550	1.80	2.50	9.0	7433
BR-E	6629	0.780	1.80	2.20	10.5	3907
BR-G	3383	0.780	2.60	3.30	12.0	5743
BR-H	14869*	1.500	2.00	2.50	21.0	10959*

(n.a.) bacia não acessível ao público

\* área superficial e volume da BR-H, incluindo o volume da bacia de sedimentação

O órgão de saída das bacias de retenção é constituído por um orifício vertical, com o ponto inferior à cota do canal para drenagem de caudais reduzidos. O colector a jusante do orifício parte 0.1 m abaixo da cota deste e está dimensionado para escoar em superfície livre o caudal descarregado pelo orifício. Os orifícios de descarga foram dimensionados utilizando um coeficiente de vazão de 0.65 (contorno em aresta fina e contracção incompleta junto ao fundo), mas também se fez a avaliação do funcionamento do sistema considerando coeficientes de vazão de 0.75.

Os descarregadores de emergência de cada bacia de retenção foram pré-dimensionados com base no valor do caudal afluente à bacia para o período de retorno de 100 anos, dado que, no caso de uma chuvada excepcional, a entrada em carga e a consequente elevação da linha de energia no colector a jusante pode levar a uma redução significativa da descarga pelo orifício do fundo. Admitiram-se descarregadores com soleira delgada e horizontal, com coeficiente de vazão de 0.40.

Para cada bacia de retenção, procurou-se estudar ligações do descarregador de emergência a colectores diferentes daquele a que está ligado o orifício da descarga de fundo, por forma a aumentar a capacidade de resposta do sistema, no caso de obstrução desse colector. No entanto, dado que o descarregador de emergência deve estar ligado a colectores de arruamentos com cota inferior, por forma a não promover a entrada de caudais indesejáveis, apenas para a bacia BR-D foi possível arranjar uma hipótese de ligação a um sub-sistema alternativo, designadamente a uma caixa de visita localizada a jusante da bacia BR-G, em vez de a uma caixa de visita localizada a jusante da bacia BR-E.

À entrada da bacia de retenção localizada mais a jusante (BR-H “Barra Cheia”) previu-se a construção de uma bacia de sedimentação com cerca de 1200 m<sup>3</sup> e altura de água da ordem de 1.2 m, para reduzir o assoreamento nas valas e no aqueduto a jusante. A bacia de sedimentação foi dimensionada para um volume de 26 m<sup>3</sup> por hectare de área impermeável contribuinte e admitindo uma percentagem de área impermeável de 50% nos 92 ha da bacia de drenagem a montante.

Dado que a bacia de sedimentação poderá estar cheia durante a ocorrência de chuvadas intensas, as simulações com o SWMM foram efectuadas considerando valores da relação entre o volume e a altura de armazenamento nesta bacia de apenas 80% dos calculados inicialmente. No entanto, fez-se a análise do efeito do restante 20% do volume estar disponível para amortecimento dos caudais.

## **7.2 - Resultados das simulações para chuvadas com período de retorno de 100 anos**

O dimensionamento dos orifícios das bacias de retenção foi efectuado admitindo coeficientes de vazão de 0.65, volume de BR-H de 80% do calculado (i.e., sem incluir o volume da bacia de sedimentação) e chuvada com uma duração da ponta de 20 minutos. Os resultados da simulação para este caso revelam que o caudal máximo descarregado pela bacia BR-H é de 5.6 m<sup>3</sup>/s.

No caso da totalidade do volume da bacia BR-H estar disponível para amortecer o caudal (incluindo o volume da bacia de sedimentação), a altura de água na bacia BR-H atinge 1.9 m (fica 10 cm abaixo da cota de descarga) e o caudal descarregado é de 5.4 m<sup>3</sup>/s, valor inferior em apenas 0.2 m<sup>3</sup>/s (4%) ao da condição de dimensionamento.

Se os orifícios descarregarem com um coeficiente de 0.75, a altura de água atinge cotas menos elevadas nas bacias de montante, mas na bacia BR-H mantêm-se praticamente a atingir os 2.0 m. O caudal máximo descarregado em BR-H aumenta para 6.2 m<sup>3</sup>/s.

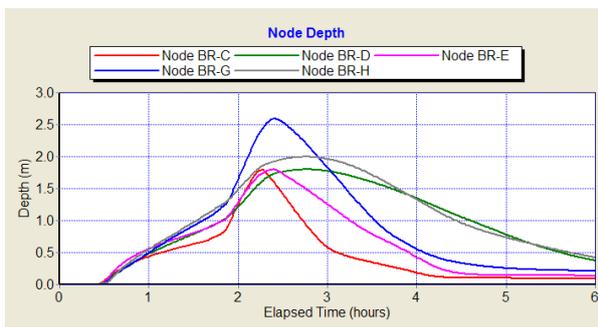
A duração da intensidade máxima do hietograma (para durações de 10, 15, 20 e 30 minutos) leva a alguma alteração dos caudais máximos afluentes às bacias de retenção, em particular nas três bacias de cabeceira (BR-C, BR-E e B-G), mas praticamente não altera os

valores máximos das alturas de água e dos caudais descarregados pelas bacias de retenção.

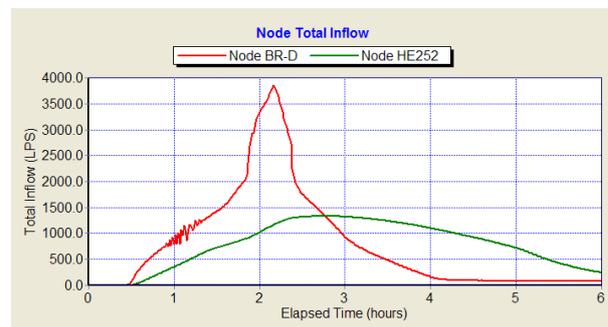
Uma condutividade hidráulica média do solo de 30 mm/h (ou um valor de CN = 70 no método do SCS), em vez dos 20 mm/h (ou CN = 80) do cenário de dimensionamento, levaria a menores alturas de água nas bacias de retenção, mas ainda à descarga de 5.4 m<sup>3</sup>/s na bacia BR-H.

Conclui-se que o caudal máximo evacuado pela bacia de retenção BR-H deverá estar compreendido entre 5.4 m<sup>3</sup>/s e 6.2 m<sup>3</sup>/s. O valor médio é próximo do máximo esperado para as condições actuais de ocupação e drenagem da Penalva (estimado entre 4.5 m<sup>3</sup>/s e 6.0 m<sup>3</sup>/s). É igualmente próximo do mínimo esperado para o caso de, com a ocupação actual, já existisse o desvio da drenagem de uma área de 20 ha para a Vala da Penalva, efectuado para reduzir as inundações nos pontos baixos do Concelho de Palmela (estimado entre 6.5 m<sup>3</sup>/s e 9.0 m<sup>3</sup>/s).

Na **Figura 5** apresenta-se um gráfico com a evolução da altura de água nas cinco bacias de retenção. A título de exemplo, a **Figura 6** ilustra os hidrogramas afluente e efluente da bacia BR-D. Observe-se que o instante em que o hidrograma efluente intercepta o hidrograma afluente corresponde ao de máximo armazenamento na bacia de retenção.



**Figura 5.** Alturas de água nas cinco bacias de retenção, para o período de retorno de 100 anos



**Figura 6.** Hidrogramas afluente e efluente na bacia de retenção BR-D, para o período de retorno de 100 anos

### **7.3 - Resultados das simulações para cenários extremos - falha do funcionamento de bacias de retenção ou precipitação excepcional**

Conforme indicado anteriormente, efectuaram-se simulações para avaliar o comportamento do sistema face à obstrução do orifício de descarga de cada uma das bacias de retenção e também face à ocorrência de uma precipitação 20% superior à de projecto.

Os resultados obtidos mostraram que, no caso de falha de uma única bacia de retenção, praticamente não há extravasamentos no sistema de colectores a jusante das bacias de retenção, apesar da linha de energia poder ficar próxima da cota do terreno em alguns casos, conforme ilustrado na **Figura 7**. No que respeita à comparação dos resultados para as duas diferentes localizações do descarregador de emergência da bacia BR-D, nenhuma das soluções se revelou claramente vantajosa face à outra, concluindo-se que a solução



dentro da gama estimada para as condições actuais de ocupação da Penalva, para o mesmo período de retorno, e é inferior à estimada para o sistema urbanizado sem bacias de retenção, para o período de retorno de 5 anos.

O modelo também foi utilizado para dimensionar os descarregadores de emergência e avaliar o comportamento do sistema face à ocorrência de cenários extremos, tais como a obstrução do orifício de descarga de cada uma das bacias de retenção ou a ocorrência de uma precipitação 20% superior à de projecto. Os resultados mostraram que praticamente não há extravasamentos nos colectores a jusante das bacias de retenção, apesar da linha de energia ficar próxima da cota do terreno em alguns casos. Assim, o sistema dispõe de alguma capacidade de encaixe adicional, para fazer frente a situações de obstrução dos colectores ou de aumento das precipitações devido a alterações climáticas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio no desenvolvimento do Projecto PTDC/ECM/66484/2006, cuja investigação serviu de base a este estudo.

## **REFERÊNCIAS**

- Brandão C., Rodrigues R., Costa J. P. (2001). Análise de Fenómenos Extremos. Precipitações Intensas em Portugal Continental. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos. [http://snirh.inag.pt/snirh/download/relatorios/relatorio\\_prec\\_intensa.pdf](http://snirh.inag.pt/snirh/download/relatorios/relatorio_prec_intensa.pdf).
- Carvalho R. F., David L. M. (2010). Relatório de diagnóstico da situação actual do sistema de drenagem pluvial da Penalva. ACIV – Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Câmara Municipal do Barreiro (2008). Modelo de Simulação do Sistema de Drenagem Pluvial Existente na Zona da Penalva, Departamento de Águas e Saneamento (DAS) da Divisão de Projectos e Obras (DPO) da Câmara Municipal do Barreiro (CMB).
- David L. M., Carvalho R.F. (2009). Dimensionamento de estruturas de retenção para controlo de cheias. Águas & Resíduos III(10), 40-51.
- David L. M., Carvalho R.F. (2010). Estudo das bacias de retenção do sistema de drenagem da Penalva. Relatório 131/2010-NES, LNEC, Lisboa.
- Lencastre A., Franco F. M. (1992). Lições de Hidrologia. 2ª edição revista. Universidade Nova de Lisboa, pp. 44 67.
- Matos R. S., Silva M. (1986). Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluviais. Curvas de Intensidade-Duração-Frequência da Precipitação em Portugal. Lisboa, ITH 24. LNEC.
- Natural Resources Conservation Service (1986). Technical Release 55 (TR-55) Urban hydrology for small watersheds. Revision of Soil Conservation Service TR-55, U. S. Department of Agriculture.

Natural Resources Conservation Service (2007). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 7 Hydrologic Soil Groups. New NRCS Directive No. 210-VI-NEH-4, Chapter 7, ver. Amended and reprinted, 05/15/2007. U. S. Department of Agriculture.

Regulamento Geral de Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais. Dec. Reg. n.º 23/95 de 23 de Agosto.

Roque A. J. (2009). Estudo da permeabilidade dos solos em Penalva (Barreiro) através de ensaios pontuais in situ na zona não saturada. Rel. 260/2009-NGEA, LNEC, Lisboa.