

POÇOS DE INFILTRAÇÃO E BACIAS DE RETENÇÃO: potenciais benefícios na reabilitação e expansão de sistemas

Luís Mesquita DAVID⁽¹⁾; Pedro SOUSA⁽²⁾

RESUMO

O principal objectivo deste artigo é avaliar o potencial benefício de algumas soluções de controlo na origem na reabilitação ou expansão de um sistema de drenagem urbana. O estudo baseou-se nas características de uma bacia urbana seleccionada e na sua modelação contínua com uma série histórica de precipitações, com 19 anos. Os poços de infiltração e as bacias de retenção apresentaram-se como as soluções mais viáveis para a beneficiação do sistema analisado, pelo que foram seleccionados para estudo detalhado de modelação.

Para o regime de precipitações de Lisboa, os poços de infiltração revelaram ser soluções bastante eficientes na recarga de águas subterrâneas, nos locais com solos relativamente permeáveis. A título de exemplo, para solos com taxas médias de infiltração da ordem de 5 mm/h, um poço com 1,0 m de diâmetro e 1,5 m de profundidade infiltraria 63% do escoamento superficial gerado em 100 m² de telhado, ou 40% do escoamento superficial gerado em 200 m² de telhado. Para uma área recentemente urbanizada, com cerca de 20 ha, estudaram-se as necessidades de retenção tendo em vista limitar o caudal que passa para jusante ao valor do caudal gerado pela bacia natural (antes de ser urbanizada), para diferentes períodos de retorno. Para o período de retorno de 10 anos, seria necessário construir uma bacia com 1 300 m³. Dado que a construção de uma bacia de retenção no local com mais de 1 300 m³ provavelmente exigia intervenções bastante complexas e caras, recorreu-se à simulação contínua com uma série histórica de precipitações para avaliar os benefícios dessa estrutura a servir uma área significativamente superior.

PALAVRAS-CHAVE

Poços de infiltração, bacias de retenção, controlo na origem, sustentabilidade, modelação contínua

⁽¹⁾ Investigador Auxiliar, LNEC (DHA/NES), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, ldavid@lnec.pt

⁽²⁾ Engenheiro do Ambiente, Estagiário no LNEC (DHA/NES)



1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem de novas urbanizações são geralmente ligados às redes existentes a jusante, provocando frequentemente o subdimensionamento destas, com consequentes inundações, e antecipando a necessidade de reabilitação da globalidade das infra-estruturas de drenagem. A sustentabilidade destas práticas tradicionais há muito que é posta em causa, levando ao surgimento de propostas alternativas que, contudo, não têm conhecido uma implementação generalizada, tanto em Portugal como em diversos países desenvolvidos. Só nos últimos anos é que os designados sistemas sustentáveis de drenagem urbana (SSDU) têm-se afirmado como uma tendência incontornável, em que se procura a sustentabilidade a prazo através da gestão do escoamento tão a montante quanto possível e da aproximação dos processos hidrológicos aos dos regimes de escoamento natural (U.S. EPA, 2004a, b; Kennedy & Lewis, 2007; Marsalek *et al.*, 2007; Woods-Ballard *et al.*, 2007). Em diversos casos, no dimensionamento de novas urbanizações tem-se procurado que a bacia urbanizada não gere mais escoamento pluvial do que o anterior à urbanização (“the greenfield runoff”, em inglês).

O planeamento destes sistemas passa geralmente pelo estudo da aplicabilidade de um conjunto diversificado de intervenções e estruturas de pequena dimensão, tais como pavimentos permeáveis, telhados verdes, trincheiras de infiltração e bacias de retenção e de infiltração. Estas soluções promovem geralmente a retenção e a infiltração, embora algumas delas possam também contribuir para a melhoria da qualidade da água do efluente, por sedimentação, filtração, e adsorção. Não obstante, a decisão de promover a infiltração em áreas urbanas deve ser cuidadosamente avaliada com base em estudos hidrogeológicos, devido aos riscos de contaminação das águas subterrâneas (Pitt *et al.*, 1999; Fischer *et al.*, 2003; Powell, 2003).

O principal objectivo deste artigo é avaliar o potencial benefício de algumas medidas de SSDU, em particular as relacionadas com a retenção e a infiltração do escoamento superficial, na reabilitação e expansão de um sistema de drenagem real, tendo em conta o regime de precipitações de Lisboa. O estudo baseou-se nas características de uma bacia urbana seleccionada e na sua modelação contínua com uma série histórica de precipitações, com 19 anos. Após uma análise da aplicabilidade de diferentes medidas, os poços de infiltração e as bacias de retenção foram as medidas seleccionadas para a modelação.

Os poços de infiltração consistem em escavações simples, que podem conter um material de enchimento ou ser suportadas por um paramento rígido e permeável e que estão envolvidas por uma camada granular, que têm por objectivo promover a infiltração do escoamento pluvial (Kent County Council, 2000; Greater Vancouver Regional District, 2005). Como para qualquer medida que promova a infiltração, a eficácia dos poços de infiltração deve ser cuidadosamente avaliada com base na determinação do nível freático e da permeabilidade do solo. Geralmente, os poços de infiltração recebem o escoamento de coberturas de edifícios sem qualquer tratamento prévio. No entanto, a existência de metais pesados nos materiais constituintes de telhados pode justificar o pré-tratamento das afluições (Boller e

Steiner, 2002; Bäckström *et al.*, 2002). Se houver outro tipo de contribuições, para além de coberturas, deve ser avaliada a necessidade de pré-tratamento, para evitar tanto a colmatção do meio filtrante como a contaminação das águas subterrâneas. Os poços de infiltração devem estar afastados alguns metros dos edifícios para prevenir danos nas fundações devido à “lavagem” dos solos. Acerca das bacias de retenção consulte-se, por exemplo, Abreu (1983, 1988) e David e Carvalho (2008).

2 - METODOLOGIA

2.1 - Descrição da bacia

A área de estudo localiza-se em Lisboa, junto ao limite com o Município de Loures, tem 120 ha e é drenada para o colector principal da Calçada de Carriche. A maior parte da área corresponde à bacia natural de uma linha de água bastante cavada e inclinada. A linha de água tem início a jusante da sub-bacia das Galinheiras e termina na Calçada de Carriche, onde é encaminhada para o colector principal. A Figura 1 apresenta uma imagem do Google Earth, com indicação do curso de água e dos limites da área de estudo e da sub-bacia das Galinheiras.



Figura 1 – Delimitação e ocupação do solo da área estudada

Parte da margem direita da linha de água não está urbanizada, devido à elevada inclinação do terreno. A área a jusante da bacia foi urbanizada nos anos setenta, mas as áreas centrais e de montante apresentam uma ocupação caótica, constituída por edifícios clandestinos com diferentes números de pisos, parte dos quais foi recentemente demolida. Nos terrenos não urbanizados ou deixados livres pelas demolições têm-se construído edifícios recentes, embora ainda haja espaço para novos empreendimentos. A urbanização progressiva da bacia contribui para o aumento dos caudais e para as inundações na Calçada de Carriche. O desenvolvimento urbano também contribui para a redução dos níveis freáticos, com o conseqüente agravamento dos períodos secos das ribeiras a jusante, as quais apresentam regime torrencial e efémero.



Os elevados declives dos terrenos desocupados confinam as soluções para fomentar a retenção e a infiltração do escoamento. Por outro lado, as características de subúrbio da área a montante e o perfil da população também restringem soluções mais exigentes em manutenção e limpeza, tais como valas e bacias revestidas com coberto vegetal. O deficiente comportamento separativo do sistema de drenagem, devido a ligações indevidas, também exclui a retenção superficial em diversos locais.

Assim, os poços de infiltração e eventualmente as trincheiras de infiltração e os pavimentos permeáveis constituem as soluções mais adequadas para reter e infiltrar o escoamento pluvial proveniente de novas urbanizações, caso os locais tenham potencial para infiltração.

Tendo em vista avaliar genericamente as potencialidades de infiltração da bacia, procedeu-se à análise das características geológicas, tendo-se identificado três classes principais de material do solo, tal como ilustrado na Figura 2. Apesar da incerteza associada a esta análise, parece haver condições para promover a infiltração em algumas áreas da bacia, caso o nível freático não seja elevado.

Obviamente que esta análise não dispensa a realização de ensaios de campo para uma melhor caracterização da geologia e da condutividade hidráulica, particularmente nos locais de potencial construção de dispositivos de infiltração.

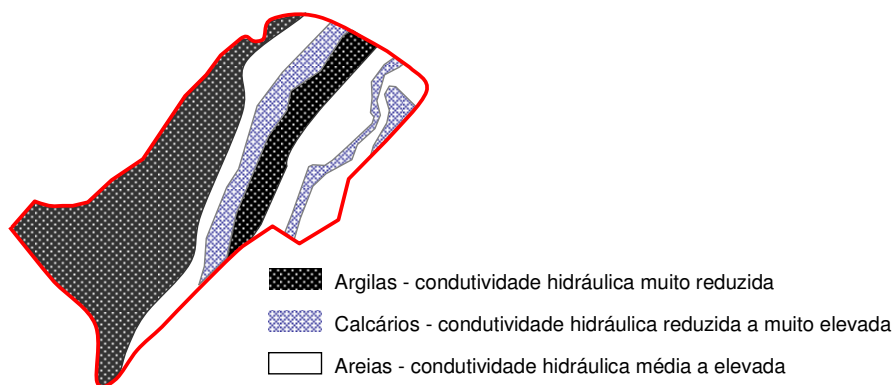


Figura 2 – Principais classes de materiais do solo e condutividade hidráulica

Após a análise do cadastro e da realização de visitas de campo, concluiu-se que as margens na zona a montante da linha de água constituem o único local disponível para promover a retenção superficial com algum significado, apesar do declive do terreno condicionar as soluções. Esta área localiza-se a jusante da sub-bacia das Galinheiras, com cerca de 40 ha, onde aproximadamente 20 ha foram recentemente reurbanizados, reduzindo os riscos da existência de colectores pseudo-separativos e de ligações indevidas entre os sistemas separativos pluviais e domésticos e vice-versa. A Figura 3 mostra uma fotografia e uma carta topográfica do local.

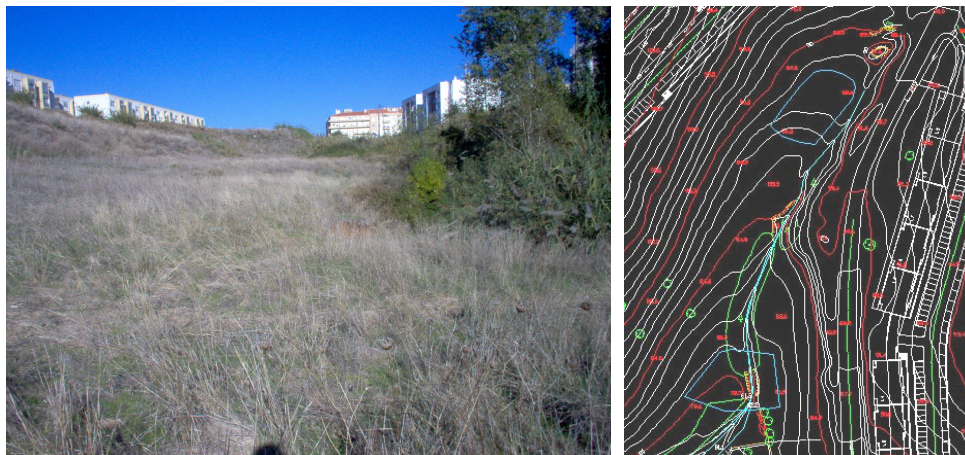


Figura 3 – Localização possível para uma bacia de retenção

2.2 - Dados de precipitação

O regime de precipitações em Lisboa, tal como na maioria do território nacional, apresenta uma elevada variação anual e é mais torrencial do que o de outros países da Europa onde a aplicação deste tipo de soluções tem tido maior expressão.

Para a modelação matemática com uma série histórica de precipitações, utilizou-se a série digitalizada pelo INAG da estação climatológica do Instituto Geofísico Infante Dom Luiz (IGIDL), com 19 anos de dados (1973-1991, inclusive). A precipitação média anual nos 19 anos é de 690 mm, dos quais apenas 150 mm ocorrem no semestre seco e 55 mm durante os 4 meses da época balnear. Os valores médios da precipitação máxima anual para durações de 6, 12 e 24 horas são respectivamente, 38, 45 e 54 mm. Os desvios padrão são 13, 16 e 17 mm, respectivamente).

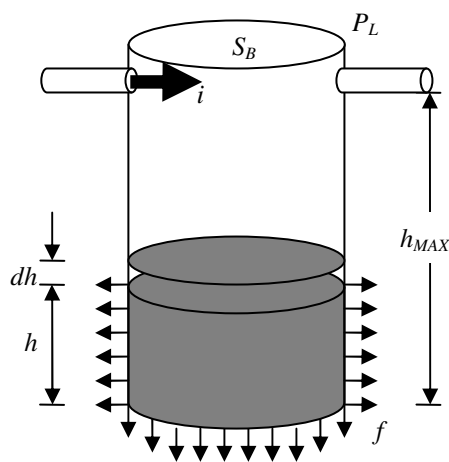
2.3 - Modelação matemática dos poços de infiltração

Pretende-se avaliar o potencial de infiltração das escorrências de telhados por poços de infiltração através da modelação contínua com a série histórica de precipitações.

O cálculo do escoamento pluvial dos telhados foi efectuado com base na área útil contribuinte dos telhados, na consideração de 1 mm de perdas iniciais em cada evento independente e na aplicação do método da curva tempo-área, para uma relação linear e um tempo de concentração de 5 minutos.

A capacidade de infiltração durante uma chuvada é influenciada por diversos factores, que dependem das propriedades do solo e do teor de humidade deste. De entre as funções mais vulgarmente utilizadas para a modelação da infiltração, destacam-se a lei empírica de Horton, de 1933, e as leis fisicamente baseadas de Green e Ampt, de 1911, e de Philip, de 1954. No entanto, estes métodos dificultam e tornam pesada a simulação contínua com séries históricas e utilizam parâmetros com elevada variabilidade e incerteza, sendo a sua utilização de pouca utilidade

para os objectivos do presente trabalho. Acresce que é escassa a informação bibliográfica relativamente à recuperação da capacidade de infiltração do solo, aspecto de grande importância na modelação contínua com séries temporais. Assim, optou-se por construir um modelo que considere uma taxa de infiltração constante em cada simulação, mas que seja suficientemente rápido para permitir a comparação de resultados para uma gama alargada de taxas de infiltração, fornecendo uma análise de sensibilidade para valores médios deste parâmetro. A Figura 4 representa esquematicamente o caudal afluyente, o caudal infiltrado e a variação da altura de água num poço de infiltração, durante um período elementar de tempo dt .



Legenda:

- i afluência pluvial [L^3T^{-1}];
- f capacidade de infiltração do solo [LT^{-1}];
- S_B secção a soleira [L^2] = secção transversal [L^2];
- P_L perímetro lateral;
- h altura de água no poço [L];
- h_{MAX} altura de água máxima no poço [L];
- dh variação elementar da altura de água no poço [L], durante o período de tempo elementar dt ;
- α factor de redução do volume de água devido ao material de enchimento ($\alpha = 1$ para poços sem material de enchimento) [-].

Figura 4 – Balanço de massa no poço de infiltração

Para um intervalo de tempo elementar dt , a variação elementar da altura de água no poço, dh , é dada por:

$$dh = \frac{i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h}{\alpha \cdot S_B} \cdot dt \Leftrightarrow \frac{1}{i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h} \cdot dh = \frac{1}{\alpha \cdot S_B} \cdot dt$$

Integrando entre t_1 e t_2 e entre h_1 e h_2 , tem-se:

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h} \cdot dh = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\alpha \cdot S_B} \cdot dt$$

Se $(i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h_1) > 0$, i.e., se a afluência de escoamento pluvial for superior ao caudal infiltrado, a solução do integral, resolvido em ordem a h_2 , vem:

$$h_2 = \frac{\left\{ i - f \cdot S_B - \exp \left[\ln (i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h_1) + \frac{- f \cdot P_L \cdot (t_2 - t_1)}{\alpha \cdot S_B} \right] \right\}}{f \cdot P_L}$$



Se h_2 aumentar até atingir h_{MAX} , o poço passa a estar completamente cheio e o excesso é descarregado para o sistema de drenagem a jusante. O instante em que $h_2 = h_{MAX}$ é dado por:

$$t_{MAX} = t_1 - \frac{\alpha \cdot S_B}{f \cdot P} \left[\ln (i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h_{MAX}) - \ln (i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h_1) \right]$$

A duração da descarga para o sistema de drenagem a jusante é $t_2 - t_{MAX}$. O volume de água descarregado para o sistema de drenagem a jusante é:

$$H_{excesso} = i \cdot (t_2 - t_{MAX}) - f \cdot (S_B + P_L \cdot h_{MAX}) \cdot (t_2 - t_{MAX})$$

A equação geral para o volume de infiltração pode ser expressa por:

$$F = i \cdot (t_{MAX} - t_1) - \alpha \cdot S_B \cdot (h_{MAX} - h_1) + f \cdot (S_B + P_L \cdot h_{MAX}) \cdot (t_2 - t_{MAX})$$

As equações apresentadas não têm solução se $(i - f \cdot S_B - f \cdot P_L \cdot h_1) < 0$, i.e., se a afluência de escoamento pluvial for inferior ao caudal infiltrado. Para este caso, a equação integral tem de ser alterada para:

$$\int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{-i + f \cdot S_B + f \cdot P_L \cdot h} \cdot dh = \int_{t_1}^{t_2} \frac{-1}{\alpha \cdot S_B} \cdot dt$$

que resolvida em ordem a h_2 resulta:

$$h_2 = \frac{\left\{ i - f \cdot S_B + \exp \left[\ln (-i + f \cdot S_B + f \cdot P_L \cdot h_1) + \frac{-f \cdot P_L \cdot (t_2 - t_1)}{\alpha \cdot S_B} \right] \right\}}{f \cdot P_L}$$

Caso o poço esteja vazio e se tenha $i < f \cdot S_B$, i.e., a afluência de escoamento pluvial seja inferior à capacidade de infiltração pela base do poço, tem de se garantir a condição de $h_2 > 0$. Para este caso, a equação geral para o cálculo do volume de infiltração mantém-se válida assumindo-se que $t_{MAX} = t_2$.

2.4 - Pré-dimensionamento e modelação matemática de bacias de retenção

As curvas IDF podem ser utilizadas no pré-dimensionamento de bacias de retenção, através do designado método holandês (Abreu, 1983). As curvas IDF de Lisboa são do tipo: $i = a \cdot t^b$, sendo i a intensidade de precipitação em mm/h; t a duração da precipitação em minutos; e a e b coeficientes empíricos.

Se se limitar que passe para jusante da bacia um caudal máximo q_s (em mm/h), o



volume de água armazenado pela bacia de retenção no instante de tempo t (em minutos) pode ser estimado por:

$$V = (a \cdot t^{b+1} - q_s \cdot t) / 60$$

Anulando a derivada em ordem ao tempo, obtém-se o instante que maximiza a expressão: $t_{MAX} = \{q_s / [a \cdot (b + 1)]\}^{1/b}$. Assim, volume máximo resulta (em mm):

$$V_{MAX} = -b \cdot q_s / [60 \cdot (b + 1)] \cdot \{q_s / [a \cdot (b + 1)]\}^{1/b}$$

O volume máximo expresso em m^3 é dado por:

$$V_{MAX} = -10 \cdot C \cdot A \cdot b \cdot q_s / [60 \cdot (b + 1)] \cdot \{q_s / [a \cdot (b + 1)]\}^{1/b}$$

Em que A é a área da bacia (em hectares) e C é o coeficiente de escoamento.

O valor de q_s , em mm/h, pode ser obtido em função do caudal máximo admissível para jusante, Q_s , expresso em m^3/s , por: $q_s = 360 \cdot Q_s / (C \cdot A)$

O dimensionamento final deve entrar em consideração com a influência das principais características da bacia de drenagem no hidrograma afluente (contribuindo para a eventual redução do volume de retenção) e com a influência da estrutura de descarga e com a geometria da estrutura de retenção no hidrograma de descarga para jusante. Se a lei de descarga poder ser aproximada à do escoamento por um orifício localizado junto ao fundo de um reservatório de grandes dimensões, demonstra-se que o volume obtido pelo método descrito deverá ser majorado em aproximadamente 40% (David e Carvalho, 2008). O dimensionamento final deverá ser efectuado com recurso a um modelo matemático que entre em consideração com os factores referidos.

Nos casos em que se pretenda avaliar os benefícios de uma estrutura de retenção já existente, ou cuja capacidade máxima esteja limitada por condicionalismos locais (tal como acontece neste estudo), uma alternativa à utilização de curvas IDF ou de hietogramas de projecto consiste na simulação contínua com uma série histórica de precipitações. Este tipo de simulações permite avaliar a frequência com que a estrutura de retenção deixa de ter capacidade para amortecer o caudal para um valor pré-definido. Neste estudo, utilizou-se um modelo simplificado de simulação contínua para simular o escoamento gerado na sub-bacia das Galinheiras e o balanço de água numa estrutura de retenção a jusante, considerando a descarga para jusante constante (David e Matos, 2005). A bacia de drenagem é caracterizada pela sua área, pelas perdas iniciais, por um coeficiente de redução hidrológica e pelo tempo de concentração. A propagação do escoamento na bacia de drenagem é simulada pela relação tempo-área linear.



3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Resultados da modelação matemática dos poços de infiltração

O modelo descrito em 2.3 foi utilizado para simular o funcionamento de um poço de infiltração de secção circular, com 1,0 m de diâmetro, ao longo dos 19 anos da série de precipitações de Lisboa, para a combinação dos seguintes cenários:

- área contribuinte de telhados (A) de 100 m² e de 200 m²;
- profundidade máxima do poço de infiltração (h_{max}) de 1,0 m e de 1,5 m;
- poço de infiltração sem material de enchimento ($\alpha=1$) e redução de 30% do volume de água do poço de infiltração devido ao material de enchimento ($\alpha=0,3$);
- diferentes valores da taxa de infiltração no solo, desde 0,1 mm/h (um valor bastante reduzido) até 10 mm/h.

A Figura 5 apresenta os rácios entre o volume total de água infiltrada e o volume total de escoamento superficial dos telhados, para os diversos cenários simulados.

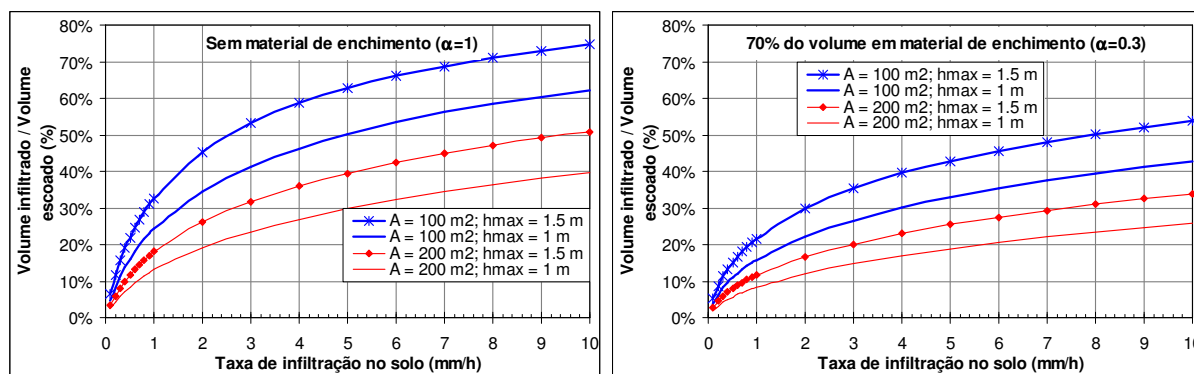


Figura 5 – Rácios entre o volume total de água infiltrada e o volume total de escoamento superficial dos telhados, para diversos cenários simulados

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que, por exemplo, para taxas de infiltração no solo de aproximadamente 5 mm/h, um poço de infiltração com 1,0 m de diâmetro, sem material de enchimento e com 1,5 m de profundidade infiltraria cerca de 63% do escoamento superficial gerado num telhado com 100 m², ou 40% do escoamento superficial gerado num telhado com 200 m². Se o poço de infiltração sem material de enchimento tivesse apenas 1,0 m de profundidade, ainda seria infiltrado cerca de 50% do escoamento superficial gerado num telhado com 100 m², ou 30% do escoamento superficial gerado num telhado com 200 m². Para um poço de infiltração com ocupação de 70% do volume com material de enchimento, i.e., dispondo de apenas 30% do volume para armazenamento de água, o volume de água infiltrada decresce significativamente.

Tal como esperado, os resultados da Figura 5 mostram que o volume de água infiltrada aumenta significativamente com o aumento da taxa de infiltração do solo, para as taxas de infiltração mais reduzidas. À medida que a taxa de infiltração do solo aumenta, os benefícios, em termos de volume infiltrado, tornam-se



progressivamente menos pronunciados. Para taxas de infiltração do solo superiores a cerca de 2 mm/h, as curvas em cada um dos gráficos da Figura 5 tornam-se aproximadamente paralelas, significando que os benefícios de uma solução para a outra permanecem relativamente constantes, em termos de volume infiltrado (por exemplo, para taxas de infiltração do solo superiores a 2 mm/h, um poço de infiltração sem material de enchimento, com 1,5 m de profundidade e a servir 100 m² de telhado infiltra cerca de 12% a 13% mais do que um poço de infiltração sem material de enchimento, com apenas 1,0 m de profundidade).

Para taxas de infiltração do solo superiores a 2 mm/h, os volumes infiltrados por poços que dispõem de apenas 30% do volume para armazenamento de água, devido ao material de enchimento (gráfico do lado direito da Figura 5), são aproximadamente 65% a 70% dos volumes infiltrados por poços sem material de enchimento (gráfico do lado esquerdo da Figura 5).

Na Figura 6 apresentam-se os resultados do número médio anual de eventos de precipitação para os quais o escoamento superficial excede a capacidade de infiltração dos poços de infiltração (gráfico do lado esquerdo) e da duração média anual dos períodos acumulados que descarregam para o sistema de drenagem a jusante (gráfico do lado direito). Estes resultados foram obtidos para o caso de poços de infiltração sem material de enchimento.

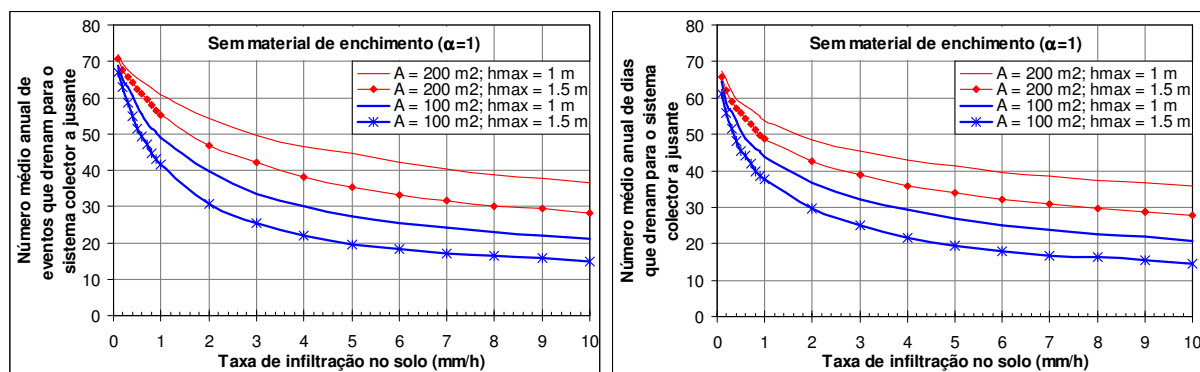


Figura 6 – Número médio anual de eventos de precipitação que excedem a capacidade de infiltração dos poços e duração média anual dos períodos que descarregam para o sistema de drenagem a jusante (lado direito)

Os resultados da Figura 6 mostram que a duração média anual dos períodos acumulados que descarregam para o sistema de drenagem a jusante decresce significativamente à medida que as taxas de infiltração do solo aumentam, para os valores reduzidos da taxa de infiltração do solo e para todos os cenários. No entanto, o número médio anual de eventos em que o escoamento superficial excede a capacidade de infiltração dos poços não sofre uma redução tão significativa com o aumento das taxas de infiltração do solo, em particular para os casos com uma área contribuinte superior ($A = 200 \text{ m}^2$).

Para taxas de infiltração no solo de aproximadamente 5 mm/h, a capacidade de infiltração de um poço com 1,0 m de diâmetro, 1,5 m de profundidade e sem

material de enchimento, que recebe o escoamento superficial de um telhado com 100 m², apenas será excedida 20 eventos por ano, em média, correspondendo a perto de 20% do número de eventos anual. Para este cenário, a duração média anual dos períodos que descarregam para o sistema de drenagem a jusante será reduzida para aproximadamente 2,6 dias, i.e., 62 horas.

3.2 - Pré-dimensionamento de bacias de retenção para uma área reurbanizada com 20 ha

Tal como referido anteriormente, a área a montante das margens do curso de água constitui o único local adequado para promover alguma retenção superficial, apesar de ser inclinada. Esta área localiza-se a jusante da sub-bacia das Galinheiras, com cerca de 40 ha, onde aproximadamente 20 ha foram recentemente reurbanizados, reduzindo os riscos da existência de ligações indevidas entre o sistema separativo doméstico e o pluvial e vice-versa.

Procedeu-se então ao pré-dimensionamento de bacias de retenção para amortecerem o caudal gerado nos 20 ha recentemente reurbanizados na sub-bacia das Galinheiras. Os volumes foram estimados com base no método descrito em 2.4, para diferentes períodos de retorno. Admitiram-se valores constantes do caudal admissível para jusante (Q_s) correspondentes ao escoamento da bacia natural para diferentes períodos de retorno. Para a bacia natural, admitiu-se o tempo de concentração de 20 minutos e o coeficiente da fórmula racional de 0,35. Para a bacia urbanizada, admitiu-se que o tempo de concentração foi reduzido para 10 minutos e que o coeficiente de redução hidrológica é de 0,70. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Volumes das bacias de retenção, para diferentes períodos de retorno e para diferentes caudais de regularização para jusante, para uma área com 20 ha

Caudal regularizado para jusante (período de retorno do caudal de ocup. natural)	$Q_s = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (T=10 anos)		$Q_s = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (T=20 anos)		$Q_s = 1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (T=50 anos)		$Q_s = 1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (T=100 anos)	
	t_{MAX} (min)	V_{MAX} (m ³)	t_{MAX} (min)	V_{MAX} (m ³)	t_{MAX} (min)	V_{MAX} (m ³)	t_{MAX} (min)	V_{MAX} (m ³)
10	16	1 310	14	1 220	11	1 080	8	*
20	21	1 640	18	1 520	14	1 330	11	1 190
50	29	2 140	25	1 970	19	1 720	14	1 520
100	38	2 600	32	2 390	24	2 060	18	1 810

* t_{MAX} é inferior ao tempo de concentração da bacia

Os resultados do Quadro 1 indicam que, por exemplo, para amortecer o caudal da bacia para o caudal natural com período de retorno de 10 anos ($Q_s = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$), a capacidade de retenção terá de ser de 1 310 m³, para uma afluência também com período de retorno de 10 anos. Aproximadamente a mesma capacidade de retenção



(1 330 m³) permite o amortecimento da afluência com período de retorno de 50 anos para um valor correspondente ao caudal natural com período de retorno de 20 anos ($Q_s = 1,4 \text{ m}^3/\text{s}$).

A partir de uma análise das possibilidades de criação de bacias de retenção no local, constatou-se que a obtenção de volumes de armazenamento superiores a 1 000 a 1 400 m³ obrigava a intervenções bastante mais complexas e caras, devido ao declive do terreno e às limitações de espaço.

3.2 - Modelação matemática da bacia de retenção com 1 300 m³ para um acréscimo significativo da área contribuinte

O Quadro 2 apresenta valores de referência dos caudais de cheia da sub-bacia das Galinheiras, com 40 ha, para diferentes períodos de retorno e para as condições de escoamento na bacia natural e na bacia urbanizada. Os caudais foram estimados através da fórmula racional, admitindo que para a bacia natural o tempo de concentração era de 24 minutos e o coeficiente da fórmula racional de 0,35 e que, para a bacia urbanizada, o tempo de concentração foi reduzido para 10 minutos e o coeficiente passou para 0,70.

Quadro 2 – Caudais de projecto da bacia com 40 ha para a ocupação natural e para a ocupação urbanizada

Período de retorno (anos)	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Caudais para a ocupação natural (m ³ /s)	1,3	1,7	2,0	2,2	2,6	2,8
Caudais para a ocupação urbana (m ³ /s)	4,2	5,5	6,4	7,2	8,1	8,8

Admita-se que foi construída uma bacia de retenção com 1 300 m³ de capacidade (o valor obtido para as condições descritas na secção anterior) e que, no futuro, a totalidade da bacia das Galinheiras é reurbanizada, garantindo-se o correcto funcionamento separativo do seu sistema de drenagem. Neste cenário, a totalidade da área da bacia, 40 ha, passa a poder ser drenada para a bacia de retenção, aumentando, contudo, a frequência de situações em que a capacidade de armazenamento não é suficiente para garantir a limitação do caudal que segue para jusante para um determinado valor limite (Q_s). A frequência de excedências desse caudal pré-estabelecido pode ser estimada através da modelação contínua, utilizando a série de precipitações disponível, com 19 anos de dados.

A Figura 7 compara a frequência de vezes com que diferentes valores de Q_s são excedidos, para a situação actual (urbanizada e sem bacia de retenção, $V=0$) e para o cenário em que existe uma bacia de retenção com 1 300 m³. Admitiu-se uma área de 40 ha, perdas iniciais de 1,5 mm, um coeficiente de redução hidrológica de 0,7 e o tempo de concentração da curva tempo-área de 10 minutos. Na Figura 7 estão também indicados os caudais de projecto calculados pela fórmula racional para a



situação actual, que, conforme se pode observar, são próximos dos obtidos pelas simulações.

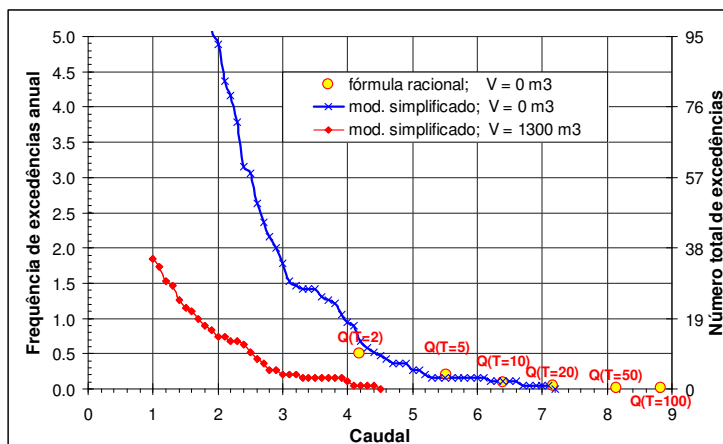


Figura 7 – Distribuições da frequência de excedência de caudais para a situação actual ($V=0$) e para o cenário com uma bacia de retenção com $V=1\,300\text{ m}^3$ localizada a jusante da bacia com 40 ha

A Figura 7 mostra que, em média, o valor do escoamento na bacia natural com período de retorno de 100 anos, $Q_s = 2,8\text{ m}^3/\text{s}$, é excedido mais do que duas vezes por ano, na situação actual. No entanto, com uma estrutura de retenção com $1\,300\text{ m}^3$, passaria a ser excedido apenas 0,26 eventos por ano, o que corresponde a um período de retorno de 4 anos. Analogamente, verifica-se que, para a situação actual, o caudal correspondente ao período de retorno de 1 ano é de aproximadamente $Q_s = 4,0\text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que, para o cenário com uma bacia de retenção com $1\,300\text{ m}^3$, esse valor de Q_s apenas seria excedido duas vezes ao longo dos 19 anos da série (correspondendo a um período de retorno da ordem dos 10 anos). Ainda para o cenário com a bacia de retenção, verifica-se que o valor de $Q_s = 4,1\text{ m}^3/\text{s}$ apenas é excedido uma vez ao longo dos 19 anos.

4 - CONCLUSÕES

As soluções para promover a retenção e a infiltração na bacia de drenagem seleccionada estão limitadas pelo declive acentuado dos terrenos desocupados, por um lado, e pelo comportamento pseudo-separativo do sistema de colectores, por outro. Também as medidas mais exigentes em manutenção e limpeza, tais como valas e bacias revestidas com coberto vegetal, podem estar condicionadas pelas características de subúrbio da área e pelo perfil da população. Assim, os poços de infiltração e eventualmente as trincheiras de infiltração e os pavimentos permeáveis constituem as soluções mais adequadas para reter e infiltrar o escoamento pluvial proveniente de novas urbanizações, caso os locais tenham potencial para infiltração.

O regime de precipitações em Lisboa, tal como na maioria do território nacional, apresenta uma elevada variação anual e é mais torrencial do que o de outros países da Europa onde a adopção de soluções não convencionais tem tido maior



expressão. O estudo da eficácia dos poços de infiltração para o regime de precipitações de Lisboa foi efectuado com base na modelação contínua, utilizando uma série udrográfica digitalizada com 19 anos. Efectuaram-se várias simulações para diferentes cenários de capacidade de infiltração do solo, dimensões do poço e área de telhados contribuinte. Os resultados obtidos mostram que, no caso de se ter solos permeáveis, os poços podem infiltrar uma fracção significativa do escoamento anual. Por exemplo, para taxas de infiltração no solo da ordem de 5 mm/h, um poço com 1,0 m de diâmetro e 1,5 m de profundidade, sem material de enchimento, infiltra 63% do volume de água gerado num telhado com 100 m², ou 40% do volume de água de um telhado com 200 m². No entanto, os resultados indicam que os poços de infiltração podem ter um efeito diminuto no amortecimento dos caudais de ponta dos eventos de precipitação intensa, embora esta conclusão deva ser reforçada com estudos mais aprofundados.

Fez-se a análise preliminar das necessidades de retenção a jusante de uma área recentemente reurbanizada, com 20 ha, para diferentes cenários de controlo do caudal para jusante e para vários períodos de retorno. Para o período de retorno de 10 anos, seria necessário construir uma bacia de retenção com cerca de 1 300 m³ para limitar o caudal que passa para jusante ao valor do caudal que seria escoado pela bacia natural, para o mesmo período de retorno. Dado que a construção de uma bacia de retenção com mais de 1 300 m³ provavelmente exigia intervenções bastante complexas e caras, recorreu-se à simulação contínua com uma série histórica de precipitações para avaliar os benefícios dessa estrutura (com 1 300 m³) a servir uma área significativamente superior (com o dobro da área, i.e. 40 ha).

Os resultados obtidos evidenciam o potencial da adopção de medidas não convencionais no projecto e na reabilitação de sistemas de drenagem urbana. Em Lisboa, esta abordagem assume particular relevância no quadro da implementação, nos próximos anos, do Plano de Drenagem da cidade.

AGRADECIMENTOS

Parte do trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito do projecto co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia POCI/AMB/56349/2004, co-financiado pelo programa FEDER.

Os autores expressam o seu agradecimento ao INAG, pela disponibilização da série digital de precipitações da estação climatológica do Instituto Geofísico Infante Dom Luiz, e à Câmara Municipal de Lisboa, pelo apoio no caso de estudo.

REFERÊNCIAS

Abreu M. R. (1983). Metodologias para a redução de caudais de ponta e volumes de escoamento em sistemas de drenagem - principais aspectos relativos à utilização de bacias de retenção. In Contribuição para o Estudo da Drenagem de Águas Pluviais em Zonas Urbanas, LNEC, ICT - S290, V2, pp. 253-284.



- Abreu M.R. (1988). Soluções não tradicionais em sistemas de drenagem de águas Pluviais. In *Águas e Esgotos em Loteamentos Urbanos*, LNEC, pp. 423-452.
- Boller M. A., Steiner M. (2002). Diffuse emission and control of copper in urban surface runoff. *Wat. Sci. Tech.*, **46**(6-7), 173-181.
- Bäckström M., Malmqvist P. -A., Viklander M. (2002). Stormwater management in a catchbasin perspective - best practices or sustainable strategies?. *Wat. Sci. Tech.*, **46**(6-7), 159-166.
- David L. M., Matos J. S. (2005). Wet-weather urban discharges: implications from adopting the revised European Directive concerning the quality of bathing water. *Wat. Sci. Tech.*, **52**(3), 9-17.
- David L. M., Carvalho R. F. (2008). Bacias de retenção para controlo de cheias: Reflexão sobre métodos de dimensionamento. In XIII ENaSB, Covilhã.
- Fischer D., Charles E. G., and Baehr A. L. (2003). Effects of stormwater infiltration on quality of groundwater beneath retention and detention basins. *Journal of Environmental Engineering*, **129**(5), 464-471.
- Greater Vancouver Regional District (2005). Stormwater Source Control Design Guidelines. Greater Vancouver Sewerage & Drainage District.
- Kennedy S., Lewis L. (2007). Attaining the most sustainable solution in stormwater control in England and Wales. LESAM 2007 - 2nd Leading Edge Conference on Strategic Asset Management, Lisbon.
- Kent County Council (2000). The Soakaway Design Guide (May 2000).
- Marsalek J., Ashley R., Chocat B., Matos M.R., Rauch W., Schilling W. and Urbonas B. (2007). Urban drainage at cross-roads: Four future scenarios ranging from business-as-usual to sustainability. *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. Ed. V. Novotny and P. Brown. IWA Publishing.
- Pitt R., Clark S., Field R. (1999). Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices. *Urban Water*, **1**(3), 217-236.
- Powell K. L., Taylor R. G., Cronin A. A., Barrett M. H., Pedley S., Sellwood J., Trowsdale S. A. (2003). Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK. *Water Research*, **37**(2), 339-352.
- U.S. Environmental Protection Agency (2004). Stormwater Best Management Practice Design Guide.
- U.S. Environmental Protection Agency (2004). The Use of Best Management Practices in Urban Watersheds.
- Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R. and Shaffer P. (2007). The SUDS Manual, CIRIA C697, London.