



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Modelação Hidráulica de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

**Filipe Miguel Coelho Machado**

Orientador

**José Alfeu Almeida de Sá Marques**

**Nuno Eduardo da Cruz Simões**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, 31 de Julho de 2013**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar aqui os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho.

Aos meus orientadores, o Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e o Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões, pela orientação, conhecimento transmitido e tempo despendido para que fossem atingidos os objetivos a que me propus.

Aos meus pais pelo apoio incondicional, pelas condições providenciadas, trabalho e esforço dedicado durante a minha formação, conselhos ao longo do curso e sobretudo pela paciência ao longo de todos estes anos. Aos meus irmãos, Alexandre e Maria Francisca, pela companhia, diversão, apoio e incentivos diários.

À Rita pela cumplicidade, apoio, motivação, paciência, ajuda e carinho ao longo dos últimos anos.

Ao resto da minha família, colegas e amigos agradeço o companheirismo, lealdade, confiança e pelos momentos únicos passados, não só durante a realização da dissertação, mas durante toda a vida, sem os quais tornariam este percurso muito mais difícil.

## RESUMO

A nível mundial tem-se verificado um crescimento exponencial de áreas urbanizadas, principalmente durante o último século. Um dos principais fatores está relacionado com a mudança no estilo de vida de grande parte da população. Como se sabe existiu, e ainda existe, um grande fluxo de pessoas a mudar-se de zonas rurais para as cidades, esta mudança levou a um aumento e crescimento das áreas urbanas.

Esse aumento está diretamente relacionado com o aumento da área de solo impermeável, porque a construção de edifícios, infraestruturas e vias de comunicação numa cidade leva à impermeabilização do solo, que aliado às constantes alterações climáticas poderá levar a um aumento da ocorrência de inundações nas cidades.

No sentido de contrariar a ocorrência de inundações têm surgido novos conceitos que visam fugir aos métodos adotados até ao passado recente, que contemplavam essencialmente o aumento dos elementos das redes de drenagem. Deste modo surgem os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS), medidas que têm como objetivo tornar o escoamento de águas pluviais nas cidades o mais parecido possível com o escoamento em meio natural.

Este trabalho teve como objetivo modelar um sistema de drenagem dual 1D/1D da bacia da zona central da cidade de Coimbra, recorrendo ao *software* SWMM. O modelo serviu para que fosse possível serem efetuados estudos onde fossem implementados SUDS, mais precisamente bacias de retenção, com o objetivo de avaliar os vários cenários propostos para resolução do problema existente. O problema prende-se com a ocorrência de inundações na Praça 8 de Maio, sem que a rede de coletores entre em carga, havendo por isso, grandes quantidades de água à superfície.

Apresenta-se neste trabalho uma metodologia que permite modelar sistemas de drenagem dual no SWMM, controlando, o caudal entre caminhos superficiais e a rede de coletores.

Foram também avaliados diversos cenários, variando a localização, número e volume das bacias de retenção, onde se mostra que a implementação de bacias de retenção pode minimizar o problema das inundações, mas a escolha da sua localização e volume de armazenamento têm um papel fundamental.

## ABSTRACT

All over the world there has been an enormous growth of urban areas. One of the main factors is related to changes in the lifestyle of the population. A large flux of people moving from rural areas to cities, led to a growth of urban areas.

This change make the soil more impervious soil, because the construction of building, infrastructures and roads. The growth of impervious areas together with climate changes could lead to an increased occurrence of floods in cities.

In order to decrease the occurrence of floods new concepts have emerged. Traditional methods mainly focused in construction of greater elements of drainage networks. New strategies are emerging: The Urban Systems Sustainable Drainage (SUDS) aim to make the runoff in cities as close as possible to the flow in the natural environment.

The goal of this work is to model a urban catchment with a 1D1D dual drainage system dual 1D/1D; model the flow between the sewer system and the overland system; implement retention basins and analyze its locations, volume and costs, all this using SWMM software.

This work presents a methodology to model a urban catchment with a 1D1D dual drainage system, controlling the interaction between the sewer system and the overland system. Retention basin where implemented and several scenarios were also evaluated. It was shown that the retention basins may solve the existing flood problem, but its location and volume have an important role.

---

## ÍNDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução.....  | 1  |
| 1.1   | Enquadramento.....   | 1  |
| 1.2   | Objetivos .....  | 1  |
| 1.3   | Estrutura da tese .....  | 2  |
| 2     | Revisão Bibliográfica .....                                    | 4  |
| 2.1   | Introdução.....  | 4  |
| 2.2   | Drenagem Urbana .....  | 4  |
| 2.3   | Impactos da Urbanização .....                                  | 7  |
| 2.4   | Inundações urbanas .....                                       | 10 |
| 2.5   | Modelação hidráulica/hidrológica .....                         | 12 |
| 2.5.1 | Enquadramento.....   | 12 |
| 2.5.2 | Modelos fisicamente baseados.....                              | 14 |
| 2.5.3 | Precipitação.....  | 15 |
| 2.5.4 | Modelos Hidrológicos.....                                      | 16 |
| 2.5.5 | Modelos Hidráulicos.....                                       | 19 |
| 2.6   | SWMM.....  | 25 |
| 2.7   | Drenagem urbana e Sistemas de Informação Geográfica (SIG)..... | 26 |
| 2.7.1 | Introdução .....   | 26 |
| 2.7.2 | Modelos digitais do terreno .....                              | 27 |
| 2.7.3 | Geração de redes de escoamento superficiais .....              | 27 |
| 2.8   | SUDS.....  | 30 |
| 2.8.1 | Enquadramento.....   | 30 |
| 2.8.2 | Tipos de SUDS mais comuns.....                                 | 31 |
| 2.8.3 | Bacias de Retenção.....  | 33 |
| 2.9   | Tendência para as cidades futuras.....                         | 35 |
| 3     | Caso de estudo / Metodologia .....                             | 37 |
| 3.1   | Caso de Estudo .....   | 37 |
| 3.2   | Metodologia .....  | 39 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.1 | Introdução .....   | 39 |
| 3.2.2 | Precipitação .....   | 39 |
| 3.2.3 | Rede de drenagem dual .....  | 40 |
| 3.2.4 | Quantificação de custos das bacias.....  | 41 |
| 4     | Exemplos de Aplicação .....  | 44 |
| 4.1   | Preparação do Modelo de Drenagem Dual.....   | 44 |
| 4.2   | Modelo utilizado .....   | 45 |
| 4.3   | Caso de estudo – Bacia da zona central de Coimbra .....                                | 52 |
| 4.3.1 | Introdução .....   | 52 |
| 4.3.2 | Implementação da bacia num modelo de drenagem dual .....                               | 54 |
| 4.3.3 | Soluções implementadas .....   | 55 |
| 4.3.4 | Resultados .....   | 56 |
| 4.3.5 | Análise de resultados .....  | 64 |
| 4.3.6 | Observações sobre simulações de sistemas de drenagem dual e bacias de retenção no SWMM | 65 |
| 5     | Conclusões e Trabalhos Futuros.....  | 69 |
| 5.1   | Conclusões.....  | 69 |
| 5.2   | Trabalhos Futuros.....   | 70 |
|       | Referências Bibliográficas .....   | 72 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Galeria do sistema de esgotos romano (thehistoryblog@ 2013) .....   | 5  |
| Figura 2.2 - a) Drenagem Natural, b) Drenagem Urbana (Lima et al. 2013) .....  | 7  |
| Figura 2.3 – Evolução percentual do destino das águas pluviais com o aumento da urbanização de um determinado local (Shaw et al. 2011) ..... | 8  |
| Figura 2.4 - Hidrograma: natural, após a construção da urbanização e após as medidas corretivas (Lima et al. 2013).....                      | 9  |
| Figura 2.5 – Cheia fluvial no Rio Mondego, Coimbra (bela@ 2013) .....  | 10 |
| Figura 2.6 – Cheias causadas pelo mau tempo em Sorriso, Brasil (camarasorriso@ 2013) .....   | 11 |
| Figura 2.7 – Inundação costeira em Scituate, Estados Unidos da América (gazettenet@ 2013) .....  | 11 |
| Figura 2.8 – Relação entre várias fases no modelamento hidrológico e hidráulico (adaptado de Mark et al. (2004)) .....                       | 14 |
| Figura 2.9 – Curvas tempo-área para três tipos de geometria de bacia (Leitão et al. 2008).....   | 17 |
| Figura 2.10 – Princípio da sobreposição aplicado a hidrogramas unitários (Leitão et al. 2008) .....  | 18 |
| Figura 2.11 – Método hidrológico utilizado pelo SWMM (adaptado do manual SWMM (2013)).....   | 18 |
| Figura 2.12 – Modelo de sub-bacia utilizada no SWMM (adaptado de SWMM (2013)) .....  | 19 |
| Figura 2.13 – Campo de aplicação das equações de Saint-Venant e respetivas simplificações (adaptado de Maksimovic (1996)) .....              | 22 |
| Figura 2.14 - Fenda de Preissmann (Butler e Davis 2011).....   | 23 |
| Figura 2.15 - Drenagem dual (Lima et al. 2013) .....   | 24 |
| Figura 2.16 – Rede superficial 1D e rede superficial 1D-1D com o caminho superficial gerado pelo AOFD .....                                  | 28 |
| Figura 2.17 - Canais e zonas de acumulação de água (Leitão et al. 2008) .....  | 29 |
| Figura 2.18 – Esquema simplificado dos passos para obtenção de uma rede de drenagem dual (adaptado de Adeyemo (2007)) .....                  | 30 |
| Figura 2.19 - Objetivos dos SUDS (Balmforth et al. 2006).....  | 31 |
| Figura 2.20 – Bacia de retenção a céu aberto de Melun-Sénart, França (STU 1994) .....  | 33 |
| Figura 2.21 – Bacia de retenção subterrânea em Porto Alegre, Brasil (foto de Simões, N.) .....   | 34 |
| Figura 2.22 - Transformação das cidades em WSC (adaptado de Brown et al. (2009)).....  | 36 |
| Figura 3.1 – Localização da cidade de Coimbra, Portugal (fonte: Google Earth).....   | 37 |
| Figura 3.2 - Modelo digital da zona de estudo com pormenor da zona onde ocorrem cheias com maior frequência (Simões et al. 2010) .....       | 38 |
| Figura 3.3 - Vista área sobre a bacia em estudo (coimbraantiga@ 2013) .....  | 39 |
| Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para $T_r = 100$ anos.....   | 40 |
| Figura 3.5 – Relação Largura-Volume de betão necessário para diferentes alturas das bacias.....  | 42 |
| Figura 3.6 – Relação Volume de betão necessário-Custo da bacia.....  | 42 |
| Figura 4.1 – Praça 8 de Maio – 09/06/2006 (Simões et al. 2010) .....   | 44 |
| Figura 4.2 – Praça 8 de Maio – 21/09/2008 (Simões et al. 2010) .....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.3 – Modelo criado inicialmente no SWMM .....  | 46 |
| Figura 4.4 – Resultados obtidos para o modelo inicial .....  | 46 |
| Figura 4.5 – Separação por meio de “outlets” do sistema superficial e de coletores .....   | 47 |
| Figura 4.6 - Gráfico representativo dos pontos utilizados da curva de entrada de caudal .....  | 48 |
| Figura 4.7 – Resultados para o modelo simplificado após introdução da curva de controlo nos “outlets” .....  | 48 |
| Figura 4.8 – Verificação da subida de caudal através da inserção de <i>outlets</i> para esse efeito .....  | 49 |
| Figura 4.9 – Resultados após introdução de “outlet” de saída com sistema em carga .....  | 49 |
| Figura 4.10 – Modelo simplificado final .....  | 50 |
| Figura 4.11 – Vista em planta de uma parcela de rede com as alterações finais .....  | 50 |
| Figura 4.12 – Caudal à superfície, junto à Praça 8 de Maio com Tr = 5, 20 e 100 anos .....   | 51 |
| Figura 4.13 - Caudal à superfície, junto à Praça da República com Tr = 5 anos .....  | 52 |
| Figura 4.14 – Vista área dos locais onde as bacias serão implementadas: A – Praça da República; B – Estacionamento em frente ao Mercado Municipal e locais onde foram implementadas sondas numéricas para leituras de resultados ..... | 53 |
| Figura 4.15 – Caudal registado nos coletores (214.1 + 213.1) da Rua Lourenço de Azevedo .....  | 57 |
| Figura 4.16 - Caudal registado nos coletores (124.1) da Rua Almeida Garrett .....  | 57 |
| Figura 4.17 - Caudal registado nos coletores (129.1) da Rua Alexandre Herculano .....  | 58 |
| Figura 4.18 - Caudal registado à superfície (212.A) da Rua Lourenço de Azevedo .....   | 58 |
| Figura 4.19 - Caudal registado à superfície (129.A) na Rua Alexandre Herculano .....   | 59 |
| Figura 4.20 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1_536.1) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República .....   | 59 |
| Figura 4.21 - Caudal registado à superfície (138.A + PON_2047.A) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República .....   | 60 |
| Figura 4.22 - Caudal registado nos coletores (308.1) da Av. Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado .....  | 61 |
| Figura 4.23 - Caudal registado à superfície (340.A) na Av. Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado .....   | 61 |
| Figura 4.24 - Caudal registado nos coletores (516.1) da Av. Sá da Bandeira, pós Estacionamento do Mercado .....  | 62 |
| Figura 4.25 - Caudal registado à superfície (588.A) na Av. Sá da Bandeira, pós Estacionamento do Mercado .....   | 62 |
| Figura 4.26 - Caudal registado nos coletores (517.1 + 588.1) da Praça 8 de Maio .....  | 63 |
| Figura 4.27 - Caudal registado à superfície (1_677.A) na Praça 8 de Maio .....   | 63 |
| Figura 4.28 – Esquema representativo das simulações efetuadas .....  | 66 |
| Figura 4.29 – Altura de água à superfície a montante da bacia de retenção no modelo simplificado .....   | 67 |
| Figura 4.30 – Caudal registado à superfície a montante da bacia de retenção no modelo simplificado .....   | 67 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 2.1 – SUDS mais comuns (adaptado de Woods-Ballard et al. (2006)) .....                     | 32 |
| Quadro 4.1 – Quadro-resumo das características das bacias de retenção aplicadas a cada solução .. | 56 |
| Quadro 4.2 – Áreas drenantes para cada uma das bacias .....                                       | 56 |
| Quadro 4.3 – Estimativa do custo para cada solução .....  | 65 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Desde o final do século XVIII tem-se registado um aumento exponencial da população mundial, que aliada à tendência para a procura de estabilidade nas grandes cidades tem levado a um grande crescimento dos centros urbanos (Crossette e Kollodge 2011).

Em paralelo com o crescimento urbano, está também o aumento de problemas inerentes à ocupação do território de forma pouco ordenada. O aumento de áreas impermeáveis está intimamente relacionado com o aumento de escoamento superficial resultante de uma chuvada e, conseqüentemente, leva a um aumento do caudal de ponta de cheia comparativamente a zonas com áreas permeáveis (Lima et al. 2013).

Estes problemas levaram ao estudo de novas soluções.

Durante vários anos optou-se pelo aumento das dimensões dos elementos de drenagem do escoamento gerado durante uma precipitação. Mas, com o constante crescimento das cidades, esta solução poderá não ser a melhor opção, como explica Balmforth et al. (2006). Verificou-se que não era de todo sustentável aumentar a capacidade de escoamento de uma determinada rede indefinidamente. Por essa razão, começou a abordar-se o problema de forma diferente. Nasce então o conceito de sistemas urbanos de drenagem sustentável, esta ideia consiste em aplicar às cidades alterações que permitam o escoamento com comportamento semelhante ao ocorrido no meio natural.

No sentido de testar e avaliar intervenções que possibilitem uma melhor *performance* dos sistemas de drenagem de um determinado local é necessário recorrer a modelos hidráulicos/hidrológicos. E, desse modo, obter resultados que permitam uma correta avaliação.

## 1.2 Objetivos

O aumento do número de inundações registadas em todo o mundo mostra a vulnerabilidade dos ambientes urbanos às condições hidrológicas extremas. Este incremento do número de cheias resulta de uma conjugação de fatores onde são parte ativa as alterações climáticas e o crescimento dos meios urbanos.

Como foi dito anteriormente, o aumento dos elementos das redes existentes deixa de ser eficiente e viável a partir de determinada dimensão.

Os sistemas urbanos de drenagem sustentável cujo princípio de funcionamento consiste na mimetização do ciclo hidrológico natural, permitem resolver as limitações das redes de drenagem. Este conceito, relativamente recente, utiliza técnicas inovadoras como a construção de pavimentos permeáveis, canais abertos com vegetação, bacias de retenção, entre outros elementos. Todas estas alterações têm como objetivo atenuar os picos de cheia, diminuir o risco de cheias e reduzir a concentração de poluentes das águas da chuva nas áreas urbanas.

O principal objetivo deste trabalho foi estudar o impacto da construção de bacias de retenção na bacia central da Cidade de Coimbra, nomeadamente a localização, número de bacias e custo. De modo a atingir este objetivo, outros tiveram de ser concretizados: Modelar a bacia com um sistema de drenagem dual 1D-1D com o SWMM a controlar a interação entre o sistema superficial e o sistema de coletores.

Como se irá verificar posteriormente, o estudo irá incidir sobre a avaliação de vários cenários, tendo em conta aspetos, tais como a previsão dos custos das operações a realizar e danos evitáveis, o comportamento hidráulico para cada solução e a sua possível utilidade para além da prevenção de inundações.

### **1.3 Estrutura da tese**

No primeiro capítulo apresenta-se o enquadramento da dissertação, os objetivos e a estrutura da tese.

No segundo capítulo da dissertação faz-se a apresentação do tema geral, onde é elaborado um breve resumo histórico acerca dos meios de drenagem, bem como a evolução registada até aos dias de hoje. Posto isto, serão abordados os principais problemas da drenagem urbana e os efeitos desta no escoamento das águas pluviais. De seguida são abordados os modelos hidrológicos e hidráulicos existentes, assim como os tipos de comportamento admitidos pelos modelos para sistemas em carga e drenagem dual. É feita também uma breve introdução ao *software* que se vai utilizar. O passo seguinte consistiu em dar a conhecer algumas das soluções sustentáveis existentes, com especial ênfase a bacias de retenção, pois serão os elementos a utilizar no desenvolvimento da presente dissertação.

No terceiro capítulo aborda-se o local onde serão feitos os estudos e os métodos utilizados para obtenção do modelo.

No quarto capítulo apresenta-se os desenvolvimentos para a obtenção do modelo final utilizado, cenários avaliados e respetivos resultados, foi também feita uma análise a instabilidades do *software*.

Para finalizar, no quinto capítulo, serão apresentadas conclusões e observações sobre o trabalho realizado e será feita uma abordagem acerca das potencialidades do mesmo em aplicações futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

Os problemas associados a inundações já existem há milhares de anos. No entanto, graças ao aumento da urbanização tem aumentado o risco de ocorrência destas.

Serão abordados conceitos base para uma melhor compreensão e contextualização dos temas estudados na presente dissertação. A clarificação de conceitos relativos à drenagem urbana, impactos da urbanização, modelos hidrológicos e hidráulicos existentes, sistemas em carga, drenagem dual, o *software* utilizado, sistemas urbanos de drenagem sustentável e tendências futuras para as cidades, servirá para obtermos uma melhor percepção do estudo desenvolvido nesta dissertação.

### 2.2 Drenagem Urbana

A água esteve, está e estará sempre presente no quotidiano das populações. Historicamente a necessidade de controlar o seu curso surge quando começam a aparecer as primeiras civilizações durante o segundo milénio antes de Cristo. Segundo Burian e Edwards (2002) foi nesta época que se começou a olhar para a água como um bem vital e pela primeira vez foi posta a possibilidade da existência de inundações bem como as preocupações relativamente à qualidade da água. Os registos arqueológicos mostram que os primeiros sinais de drenagem existentes foram encontrados nas civilizações da Mesopotâmia, Minóica e Grega.

Os primeiros elementos relacionados com a drenagem quer de água residual, quer de água pluvial construídos por estas populações foram sistemas simples de esgotos a céu aberto. É nesta época que começa a existir uma preocupação relativa ao aproveitamento da água pluvial como recurso de água potável e foi também nesta altura que apareceu a ideia de utilizar a água como meio de transporte para matéria residual (Burian e Edwards 2002).

A grande evolução tecnológica da drenagem urbana deu-se durante a época da civilização Romana. Os romanos foram a única civilização em toda a Europa e Ásia ocidental a construir uma rede de estradas cuidadosamente planeada e com um sistema de drenagem adequado, desde a antiguidade até ao século XVIII (Hill 1984). Nesta época foram construídas as primeiras redes de drenagem, tanto a céu aberto como cobertas. Foi explorada em maior escala a utilização de água pluvial já armazenada com vista a uso local, foram criados aquedutos para transporte de água para as ruas da cidade e banhos públicos, segundo Hodge (1992), foi também construída uma rede de esgotos com escoamento permanente que permitia

à população livrar-se dos resíduos para longe das zonas habitacionais (Figura 2.1). Concluindo, foram os Romanos os primeiros a estabelecer um ciclo de água urbano ligando o abastecimento e a drenagem da água (Burian e Edwards 2002).



**Figura 2.1 – Galeria do sistema de esgotos romano (thehistoryblog@ 2013)**

No que diz respeito ao desenvolvimento tecnológico, após um longo período de estagnação, foi no início do século XVIII que se começaram a registar novos desenvolvimentos na construção de redes de drenagem urbana. Na América do Norte foram construídos sistemas de drenagem de grande escala, redes de esgotos subterrâneas, e houve uma preocupação na drenagem das vias de comunicação terrestres. Nesta época, os materiais usados foram a madeira, o tijolo e a pedra. Começa assim o esboço elementar das redes de drenagem urbana que viriam a ser padronizadas no futuro (Burian e Edwards 2002).

As práticas utilizadas na América do Norte eram similares às existentes na Europa. No entanto, foi no início do século seguinte que se iniciou a drenagem urbana com base em muitos parâmetros que se mantêm nos dias de hoje. Os principais desenvolvimentos registados na drenagem urbana nos Estados Unidos durante os séculos XIX e XX foram sintetizados por Burian et al. (1999) em nove categorias:

- Aperfeiçoamento dos materiais das condutas, métodos de construção e nas práticas de manutenção;
- Utilização da água no sistema de transporte e remoção de resíduos;
- Sistema de esgotos bem projetado e completo;
- Sistemas separativos versus sistemas unitários;

- Identificação de doenças transmitidas pela água;
- Introdução de tratamentos a águas residuais;
- Avanços no estudo em hidrologia urbana;
- Avanços computacionais;
- Preocupação ambiental.

Uma vez apresentadas as diretrizes sobre as quais a drenagem urbana evoluiu, é sabido que essa transformação se deu devido a fatores como: as constantes inovações tecnológicas, mudança de mentalidade em relação à importância do saneamento, avanços nas ferramentas de cálculo, evolução computacional, motorização da quantidade e qualidade das águas drenadas, preocupações ambientais, de saúde pública e de risco de inundação e a novas técnicas de construção e planeamento. Em jeito de conclusão, a drenagem urbana acompanhou e continua a acompanhar a rápida evolução da época onde está inserida (Burian e Edwards 2002).

Atualmente a drenagem é responsável por garantir em condições apropriadas a recolha, transporte e rejeição nos meios recetores das águas residuais domésticas, comerciais, industriais e águas pluviais (Lima et al. 2013). A presente dissertação irá focar-se na drenagem de águas pluviais.

As águas pluviais necessitam de drenagem quando a precipitação se dá sobre áreas urbanizadas, o que torna extremamente importante garantir um bom sistema de drenagem. Um mau planeamento poderá levar a consequências graves para as populações, tornando mais frequente o aparecimento de cheias e com isto sujeitar a população a problemas sanitários e a perda de bens materiais. Estes inconvenientes levam a prejuízos económicos elevados e, em casos mais graves, pode mesmo existir a perda de vidas humanas, como indicam os autores Butler e Davis (2011) e Lima et al. (2013).

A atividade humana em qualquer região leva a uma alteração profunda da morfologia do terreno e é de esperar que tenha grande influência na drenagem local. O percurso da água em meio natural ou urbanizado é completamente diferente, como é possível observar na Figura 2.2.

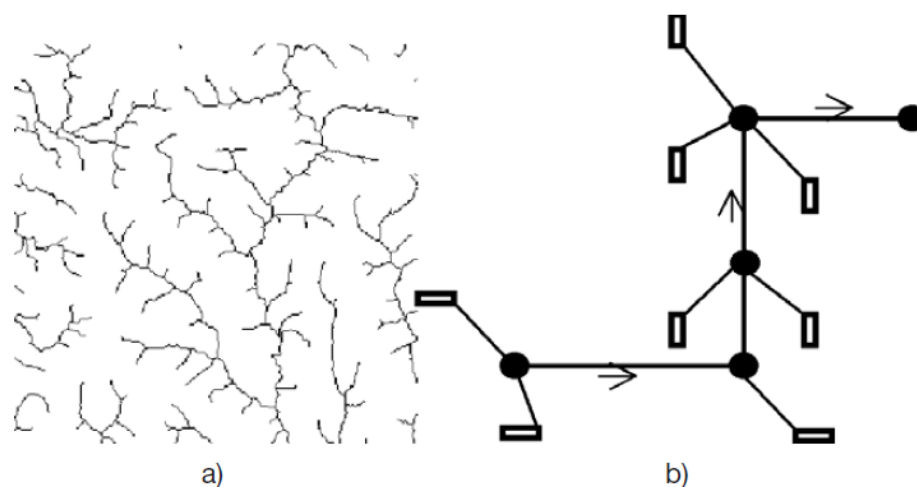


Figura 2.2 - a) Drenagem Natural, b) Drenagem Urbana (Lima et al. 2013)

Com o aumento dos consumos de água por parte da população e com o crescimento dos grandes centros urbanos procura-se, atualmente, que as soluções sejam vantajosas quer em termos económicos quer a nível ambiental.

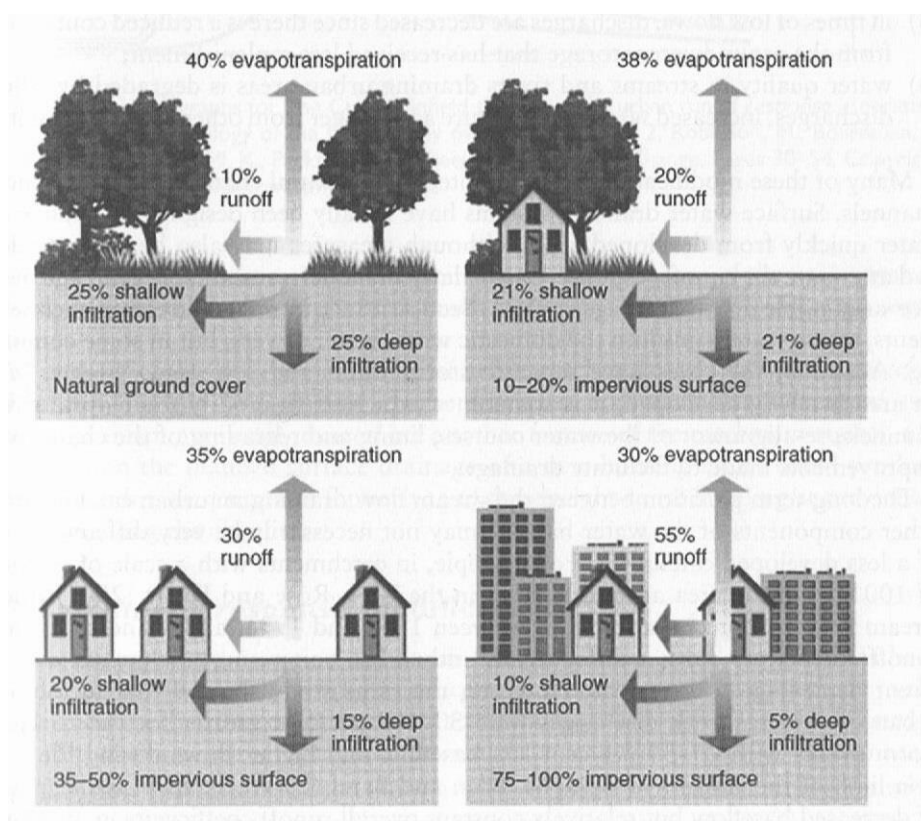
Resumindo e seguindo a linha de pensamento de Lima et al. (2013), atualmente a drenagem urbana tem como objetivos: A redução de áreas inundadas, a proteção do tráfego rodoviário e pedestre, a redução de gastos com manutenção das vias públicas e áreas adjacentes permeáveis e impermeáveis, o escoamento das águas superficiais, a eliminação de águas estagnadas, o abaixamento do nível freático, a redução da erosão hídrica do solo, permitir o reaproveitamento da água pluvial e o aumento da resistência do solo em zonas verdes.

### 2.3 Impactos da Urbanização

Na natureza a água pluvial segue vários rumos: Parte infiltra-se no solo, parte é escoada à superfície e uma percentagem regressa à atmosfera, quer por evaporação, quer por transpiração. Como é de esperar, a urbanização tem grande influência em todos os mecanismos naturais de recolha de águas da chuva, como sugerem os autores Butler e Davis (2011) e Shaw et al. (2011).

A urbanização leva a um aumento considerável da área impermeável, originando um aumento do caudal de água superficial. Com o aumento dos grandes centros urbanos, tanto a nível de área, como a nível de população, torna-se imperioso possuir uma rede de drenagem eficaz e com as devidas ferramentas de apoio ao escoamento feito pela rede com o intuito de reduzir a frequência e a grandeza das inundações. A Figura 2.3 quantifica a evolução do destino das águas pluviais durante o crescimento urbano de um dado local.





**Figura 2.3 – Evolução percentual do destino das águas pluviais com o aumento da urbanização de um determinado local (Shaw et al. 2011)**

A alteração da superfície irá levar a uma diminuição do caudal infiltrado e, conseqüentemente, a um aumento do caudal à superfície. Isto leva a um aumento considerável da rapidez com que a mesma quantidade de água escoada chega ao destino final para locais urbanizados. Este facto, aliado a falhas no funcionamento da rede, como por exemplo o subdimensionamento dos órgãos de entrada de caudal ou a entrada em carga dos sistemas de escoamento subterrâneo, leva ao aumento do caudal de ponta de cheia e à diminuição do tempo que esse caudal demora a ser atingido, percebendo-se assim o aumento do risco de inundações. Na Figura 2.3 é notória a evolução do caudal gerado à superfície num local com drenagem natural e em locais com drenagem urbana.

Outro problema, proveniente da urbanização é o aumento da poluição e sedimentos, que pode provocar um deficiente funcionamento nos elementos que compõem a rede de drenagem e conseqüentemente levar à descida da qualidade das águas dos rios e das linhas de água.

Os problemas que acompanham o aumento da urbanização levaram a uma mudança de atitude por parte de quem gere e projeta as redes de drenagem urbana. Até há bem pouco tempo, a prioridade era “esconder” a água o mais rápido possível, isto é, encaminhar a água para as redes de drenagem. O aumento dos caudais fez com que se tivesse de repensar em novas

abordagens. Nascem assim vários conceitos relacionados com um plano geral que trata a criação ou adaptação de sistemas, tornando-os em sistemas urbanos de drenagem sustentáveis, SUDS.

Os principais objetivos dos SUDS, segundo Butler e Parkinson (1997), são:

- Manutenção eficaz da saúde pública;
- Prevenção de inundações;
- Prevenção da degradação/poluição da água, solo e ar;
- A minimização da utilização de recursos naturais;
- A garantia de adaptação a cenários ainda não conhecidos;
- As medidas a tomar têm de ter viabilidade económica e aceitação social.

Caso se cumpram estes objetivos na sua totalidade ou parte deles, a *performance* das redes de drenagem nos grandes centros urbanos pode melhorar significativamente. Quando a implementação destes conceitos for feita corretamente, pode mesmo ser possível transformar o hidrograma do comportamento da água pós-urbanização num hidrograma com aspeto natural como é possível observar na Figura 2.4.

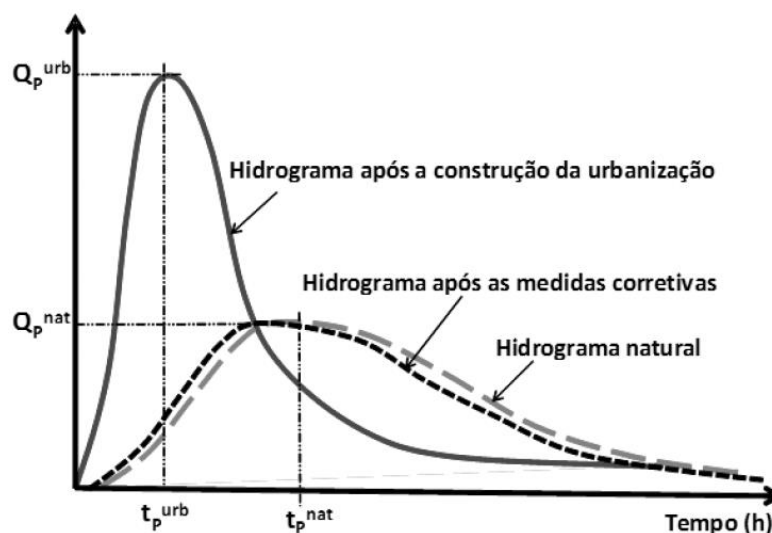


Figura 2.4 – Hidrograma: Natural, após a construção da urbanização e após as medidas corretivas (Lima et al. 2013)

Fica claro que o impacto da urbanização altera o curso natural da água, sujeita a população a problemas com prejuízos a vários níveis e que é necessário, um correto dimensionamento do sistema de drenagem e um comportamento responsável de todos os intervenientes, para que a

resolução, ainda que parcial, dos problemas causados pela urbanização na drenagem de águas pluviais seja cada vez mais eficiente.

## 2.4 Inundações urbanas

As inundações urbanas acontecem quando num dado intervalo de tempo existe uma quantidade de água à superfície fora do normal e que por qualquer razão, esta água não entra na rede de drenagem, causando problemas para as populações locais. A água pode surgir à superfície por diversos motivos: Acontecimentos climatéricos fora do comum, a rede de coletores entrar em carga, obstrução dos órgãos de entrada de água na rede de drenagem, eventos naturais não previstos, entre outros. O aparecimento de inundações em áreas urbanizadas pode ser assim qualificado consoante a sua origem, como explica Estellés (2010):

- Inundação fluvial: Este tipo de inundação acontece quando as margens do rio são galgadas pela água que corre no mesmo, sendo que a água tem tendência para permanecer em zonas planas perto do leito do rio. Pode visualizar-se um exemplo de inundação fluvial na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Cheia fluvial no Rio Mondego, Coimbra (bela@ 2013)

- Inundação pluvial: De causa pluvial, pode acontecer após chuvadas extremas onde a rede de drenagem, por razões de incapacidade ou deficiência na entrada de água no sistema, não permite um escoamento eficaz, levando dessa maneira à existência

de água à superfície. Na Figura 2.6 pode ver-se um dos muitos problemas causados por este tipo de cheias.



Figura 2.6 – Cheias causadas pelo mau tempo em Sorriso, Brasil (camarasorriso@ 2013)

- Inundações costeiras: Este tipo de inundações acontece quando o nível do mar sobe de tal maneira que tem capacidade para atingir áreas urbanizadas, na Figura 2.7 é possível observar um caso onde o mar chega a atingir habitações.



Figura 2.7 – Inundação costeira em Scituate, Estados Unidos da América (gazettenet@ 2013)

O tipo de inundações que irá ser estudado neste trabalho é o de origem pluvial. Este tipo de inundações causa inúmeros problemas às populações, que podem ir desde danos à integridade física e psicológica das populações, danos nas infraestruturas e bens da comunidade, transtornos no tráfego, bem como danos indiretos, como por exemplo a impossibilidade de assistência médica urgente. Todos estes problemas têm um custo a contabilizar quando se quantificam os danos causados por uma inundação. Segundo Konig et al. (2002), podem ser considerados três tipos de danos causados pelas inundações:

- Dano direto: Geralmente danos materiais;
- Dano indireto: Perturbações no tráfego, custos adicionais a nível administrativo ou de trabalho, perdas de produção, entre outros;
- Danos sociais: Danos psicológicos de longo termo para a população, como a perda de valor das propriedades em zonas mais frequentemente afetadas pelas inundações ou atrasos no desenvolvimento económico dessas zonas.

Apesar de estarem bem definidos os tipos de danos existentes e de cada vez mais se conseguirem fazer previsões sobre os mesmos, ainda é difícil ou mesmo impossível estimar os custos reais de uma determinada cheia.

## **2.5 Modelação hidráulica/hidrológica**

### **2.5.1 Enquadramento**

Os modelos são usados com o intuito de simular situações reais e o seu uso facilita o entendimento humano sobre determinados tópicos de estudo, oferecendo a hipótese de teste sobre vários cenários, o que permite obter explicações e tomar decisões sobre os resultados obtidos. Um bom modelo deve ser o mais simples e coerente possível, deve possibilitar a previsão de vários cenários e a informação deve surgir de uma forma clara e intuitiva, para permitir uma fácil leitura e interpretação dos dados obtidos, como indicam Tucci (1998) e Sá Marques et al. (2013).

Relativamente à área de drenagem urbana, podem ser encontrados dois tipos de modelos: os que servem para testar o comportamento hidráulico e hidrológico dos sistemas de drenagem de águas pluviais e os modelos de qualidade da água nos sistemas. No presente trabalho serão abordados aqueles que permitem simular os comportamentos da rede a nível hidrológico e hidráulico. Atualmente, a principal funcionalidade dos modelos utilizados é a de simular comportamentos de redes já existentes ou analisar projetos futuros, avaliar o correto ou incorreto dimensionamento das redes, possíveis respostas do sistema a várias alterações e formas de melhorar o sistema/projeto.

Segundo Tucci (1998) os modelos podem ser classificados consoante a abordagem utilizada como:

- Contínuos ou discretos: Nos contínuos, os fenómenos como o próprio nome indica, são contínuos no tempo, já nos discretos as mudanças de estado dão-se em intervalos não contínuos;
- Conceituais ou empíricos: Nos conceituais as funções utilizadas na elaboração do modelo têm em consideração processos físicos, no caso de se usarem modelos empíricos os valores calculados são ajustados aos valores observados sem que exista influência dos processos físicos envolvidos;
- Concentrados ou distribuídos: Sendo que para os concentrados a variabilidade espacial não é levada em conta e nos distribuídos as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo;
- Estocásticos ou determinísticos: Nos modelos estocásticos, para diversas simulações, o programa gera diferentes outputs para o mesmo *input*. No caso dos determinísticos, o resultado gerado é constante para o mesmo *input*, independente do número de simulações.

A abordagem mais utilizada nos modelos hidráulicos é, regra geral, do tipo determinístico. Este tipo de modelo é utilizado pela sua simplificação no tratamento da informação imposta pelo utilizador. Outra característica deste modelo é que não tem em consideração fatores de aleatoriedade, permitindo assim a obtenção de um único resultado ao invés de uma gama de resultados. O uso deste tipo de modelo implica um profundo conhecimento do seu funcionamento, leis em se baseia e as simplificações por ele realizadas, de modo a que se consiga ter um espírito crítico em relação aos resultados obtidos.

Na elaboração de modelos duais de redes drenagem urbana, como ilustra a Figura 2.8, são necessários inúmeros dados para que se possa fazer um modelo minimamente real. Nestes modelos existe uma componente referente a aspetos hidrológicos e outra a componentes hidráulicos. O modelo hidrológico é responsável pela simplificação do ciclo hidrológico ou de qualquer uma das suas componentes, com o objetivo de estimar a quantidade de água gerada para um determinado acontecimento. O modelo hidrológico, como se pode ver na Figura 2.8, trata da obtenção do hidrograma de escoamento. Para que isso seja possível cruza informação relativa à chuvada que se pretende simular, área de captação, isto é, o local onde ocorrerá a chuvada e tem em consideração informação relativa à ocupação do terreno, áreas permeáveis e impermeáveis. O modelo hidráulico corresponde à forma como a água gerada pelo modelo hidrológico escoar ao longo da rede através dos elementos que a compõem. Como é possível observar no esquema da Figura 2.8, o modelo hidráulico pode ser dividido em duas áreas: Superficial e rede de coletores, o superficial é responsável por simular como a água se

---

propaga à superfície e, com isso, tem em consideração caminhos superficiais, zonas de acumulação de água e os níveis de água nesses elementos. Relativamente à rede de coletores, o modelo tem elementos que simulam as caixas de visita, sumidouros e sarjetas que servem para encaminhar a água superficial para elementos correspondentes às condutas da rede.

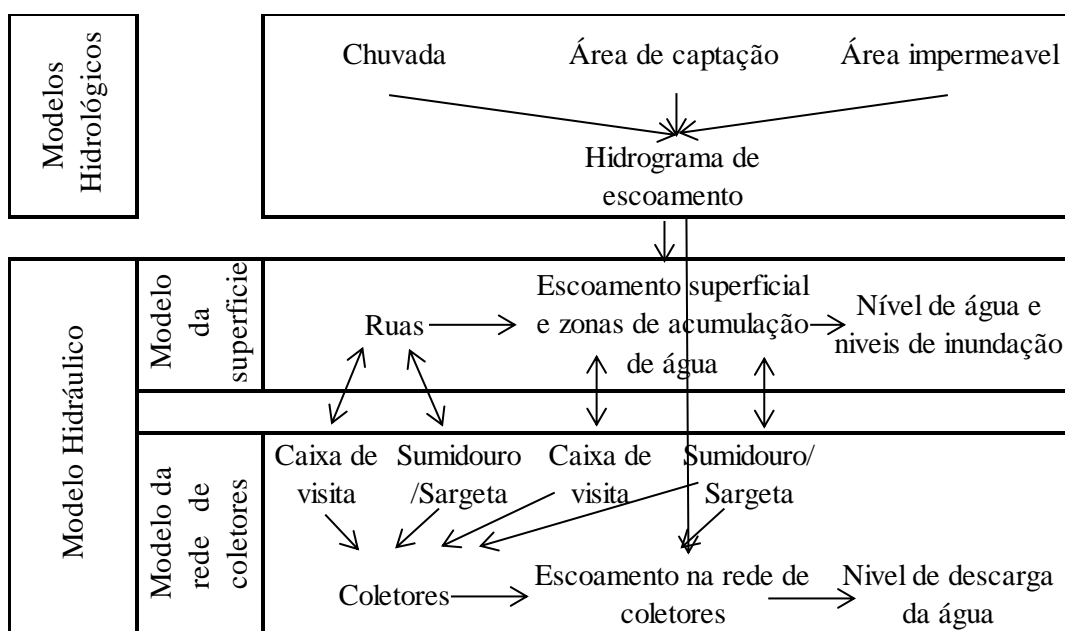


Figura 2.8 – Relação entre várias fases no modelamento hidrológico e hidráulico (adaptado de Mark et al. (2004))

Nos subcapítulos seguintes será feita abordagem mais extensa para cada um dos modelos apresentados.

## 2.5.2 Modelos fisicamente baseados

Como já foi referido anteriormente, os modelos hidrológicos/hidráulicos são, regra geral, do tipo determinístico, e segundo Estellés (2010), estes podem ser:

- Modelos empíricos: Já apresentados no subcapítulo 2.5.1;
- Modelos fisicamente baseados: Podem existir um ou mais processos descritos, que envolvem leis físicas, onde os parâmetros têm um significado físico e são mensuráveis.

Os modelos fisicamente baseados são os mais utilizados para simulações de sistemas de drenagem de águas pluviais, como explica Adeyemo (2007), estes simulam as transformações que ocorrem ao longo da bacia, com base nas suas características, leis físicas e tendo em conta todo o tipo de elementos existentes.

Em modelos fisicamente baseado existem fases, que são consideradas essenciais, para a sua correta elaboração. Segundo Adeyemo (2007), após o conhecimento dos dados relativos à chuvada a aplicar ao modelo deve-se proceder à:

- Modelação do terreno. Na modelação do terreno é elaborado um modelo digital do terreno onde são aplicados métodos para calcular as zonas de armazenamento de água, interceções e infiltração. Esta análise é feita com base na ocupação, topografia, tipo de solo, entre outras características do terreno;
- Divisão da bacia, ou seja, dividir a bacia principal em várias sub-bacias. Com isto é possível saber o detalhe com que se trabalha a bacia em estudo. Uma maior divisão leva a um maior detalhe e, conseqüentemente, a resultados mais próximos da realidade;
- escoamento nas sub-bacias. Nesta fase é utilizado um método que transforme a chuva em escoamento superficial. Uma grande diferença entre os modelos fisicamente baseados e os modelos conceptuais reside no facto de para os modelos fisicamente baseados, para além das equações de continuidade, são também utilizadas equações dinâmicas no escoamento;
- escoamento nas condutas. Uma percentagem do escoamento superficial entra na rede de coletores através de nós, que ligam os caminhos superficiais à rede subterrânea. É necessário existir um cadastro da rede, características das condutas como o comprimento, diâmetro, secção, material, cotas dos nós, para uma correta modelação da rede de coletores. Para o escoamento nestes elementos, inúmeras técnicas podem ser utilizadas.

Apesar de teoricamente se conhecer o funcionamento destes modelos, a verdade é que os resultados obtidos por eles dependem de inúmeros fatores, desde simplificações feitas por cada um dos *softwares* até aos erros no trajeto do escoamento.

### **2.5.3 Precipitação**

Este trabalho retrata cenários onde a água surge à superfície através de acontecimentos meteorológicos sob a forma de precipitação, especificamente chuva. Por essa razão é importante conhecer as diversas características da mesma.

A duração de uma certa chuvada é o tempo que ocorre entre o início e o fim de precipitação e como indica Dunkerley (2008) para estudos que englobem modelos hidrológicos é necessário informação precisa e clara acerca dos eventos que se pretendem analisar.

Outro dado importante numa chuvada é o seu volume. A intensidade de uma chuvada é o volume de água precipitada por unidade de tempo.

---



É importante referir que a intensidade de uma chuvada varia durante a mesma. Por essa razão constroem-se histogramas que representam a intensidade da chuvada num determinado intervalo de tempo. A intensidade também não pode ser considerada constante espacialmente, isto é, varia consoante fatores como a topografia e centro da chuvada.

A obtenção de dados sobre as chuvadas é de extrema importância quando se trabalha com modelos cujo objetivo é estudar o comportamento de sistemas de drenagem num determinado local. No *software* utilizado, o Storm Water Management Model, SWMM, a introdução da precipitação é feita introduzindo dados relativos à intensidade da chuvada registada em determinados espaços temporais.

#### 2.5.4 Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos são utilizados como instrumentos cuja função trata da compreensão do funcionamento de uma bacia hidrográfica (Tucci 1998). O escoamento produzido pela precipitação depende de fatores hidrológicos como: a duração da chuvada, a sua intensidade, perdas e infiltrações.

Segundo Leitão et al. (2008) os modelos hidrológicos mais utilizados são os seguintes:

- Método Racional;
- Método Curva-Tempo;
- Hidrograma Unitário;
- Modelos de Reservatório.

O método racional é o mais utilizado pela comunidade hidráulica para a estimativa do caudal de ponta de cheia para bacias hidrográficas de pequena dimensão (Sá Marques e Sousa 2009). As bacias para a aplicação deste método devem ter no máximo 25 km<sup>2</sup>.

Neste método a precipitação é transformada em caudal quando a chuvada tem intensidade constante e é considerada sobre toda a área da bacia. Esta situação é verificada quando a duração da chuvada é superior ao tempo de concentração, podendo o caudal resultante ser obtido pela seguinte equação (2.1):

$$Q_s = C \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

Em que:

$Q_s$  – Caudal escoado superficialmente

$C$  – Coeficiente de escoamento

$i$  – Intensidade da chuvada

## A – Área de Drenagem

As limitações na utilização deste método estão relacionadas com as simplificações feitas nos diferentes fatores que influenciam o caudal resultante. Por exemplo: Aceitar que a precipitação não varia a longo do tempo e do espaço, considerar a relação linear na transformação da precipitação em escoamento e admitir que o caudal de ponta de cheia só ocorre quando toda a bacia está a contribuir para o escoamento são algumas das simplificações apontadas por Sá Marques e Sousa (2009) para possíveis erros aquando a utilização do método racional.

O método da curva tempo-área considera que o volume do escoamento superficial é influenciado por três fatores: Perdas iniciais, área da bacia e perda hidrológica contínua. O tempo de concentração da bacia e a curva tempo-área controlam o hidrograma do escoamento, sendo que a curva tempo-área traduz a forma da bacia. Os três formatos mais comuns para a geometria das bacias, como sugerem Leitão et al. (2008), são os apresentados na Figura 2.9.

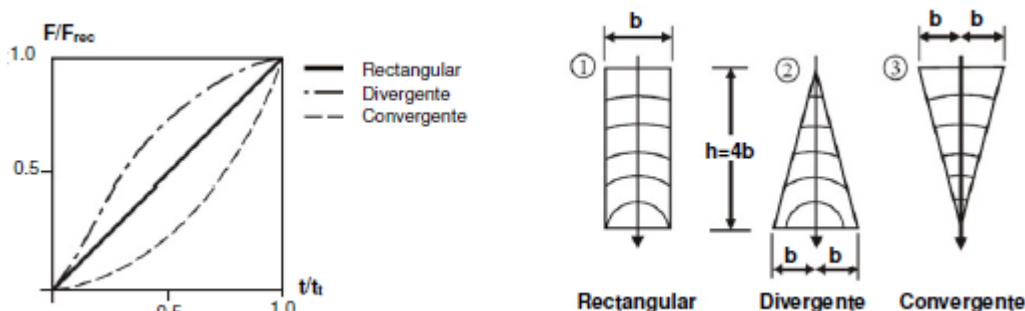
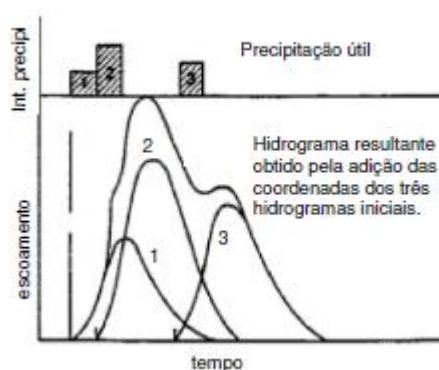


Figura 2.9 – Curvas tempo-área para três tipos de geometria de bacia (Leitão et al. 2008)

Leitão et al. (2008) explica que nas diferentes fases de cálculo o volume de escoamento acumulado numa determinada parcela da rede é movido para a parcela seguinte a jusante, dessa forma o volume total existente em cada parcela é obtido com recurso a um equilíbrio entre o volume que chega, o gerado e o de saída dessa parcela. O volume que sai da última parcela da bacia representa o hidrograma do escoamento superficial da bacia.

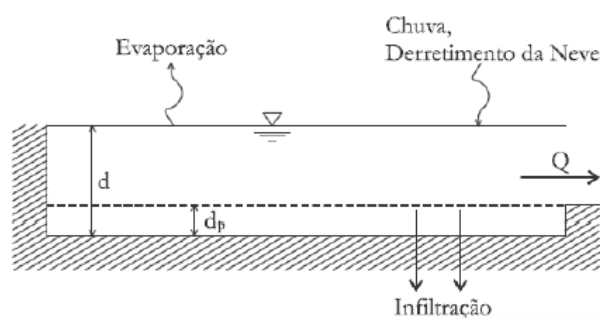
O método de hidrograma unitário define um hidrograma resultante do escoamento gerado por uma precipitação útil sobre uma bacia, em que para eventos com duração igual é usado o hidrograma unitário com variação linear para diferentes intensidades, este modelo utiliza simplificações como intensidades constantes, a precipitação é distribuída de forma uniforme na bacia, é considerada a sobreposição de hidrogramas resultantes de períodos de precipitação útil contínuos e/ou isolados, ver Figura 2.10, e para uma determinada bacia o hidrograma resultante traduz as condições constantes da bacia.



**Figura 2.10 – Princípio da sobreposição aplicado a hidrogramas unitários (Leitão et al. 2008)**

Nos modelos de reservatório apenas é considerada a lei de conservação da massa e como não é tida em conta a equação da conservação da quantidade de movimento a resposta da bacia é considerada instantânea. Neste modelo a bacia tem um comportamento de um reservatório, como o próprio nome indica e é também importante referir que para este modelo o caudal que sai está relacionado linearmente com o volume de armazenamento (Leitão et al. 2008).

No SWMM o modelo hidrológico utilizado admite as sub-bacias como elementos de reserva de água não lineares. O caudal resultante de cada sub-bacia é calculado através de um balanço hídrico e hidráulico, onde a água que entra provém da precipitação e sub-bacias a montante e a saída de água inclui infiltrações, evaporação e escoamento superficial, como ilustra a Figura 2.11. A capacidade de armazenamento da sub-bacia está relacionada com a sua configuração, onde se incluem zonas de acumulação de água e capacidade de escoamento superficial.



**Figura 2.11 – Método hidrológico utilizado pelo SWMM (adaptado do manual SWMM (2013))**

No SWMM as bacias são representadas com uma largura e comprimentos definidos, sendo que a área da bacia está dividida em zona impermeável e permeável como é possível visualizar na Figura 2.12.

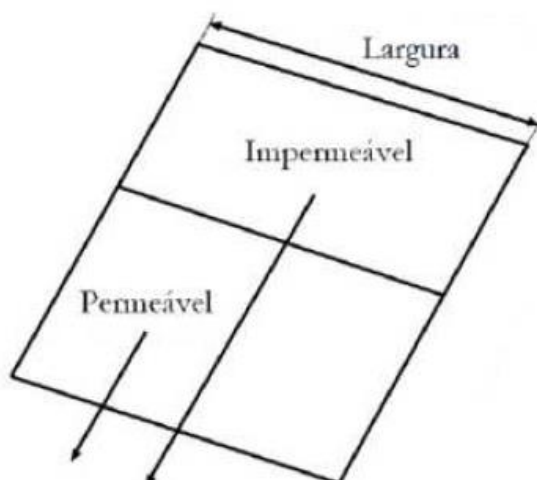


Figura 2.12 – Modelo de sub-bacia utilizada no SWMM (adaptado de SWMM (2013))

### 2.5.5 Modelos Hidráulicos

Os modelos hidráulicos simulam o comportamento da água proveniente da precipitação na bacia e na rede, compreende os processos hidráulicos da água e as interações físicas com o local.

As leis matemáticas que servem de suporte a estes modelos têm origem na integração vertical das equações de *Navier-Stokes*. Na integração das equações de *Navier-Stokes* considera-se:

- A componente da velocidade e aceleração do eixo vertical desprezável;
- A pressão hidrostática;
- O fundo com baixa inclinação;
- Admite-se que a velocidade horizontal é constante na vertical;
- Considera-se de uma forma conjunta os resultados dos efeitos da turbulência e das tensões tangenciais.

Aplicando estas condições resultam as equações de *Saint-Venant*, como explica Sá Marques et al. (2013).

Consoante o tipo de escoamento que se pretende simular é necessário avaliar a necessidade de se usar modelos unidimensionais ou bidimensionais. Os modelos unidimensionais, 1D, são usados quando se pretende avaliar o escoamento em coletores, canais ou em secções com uma direção predominante e dimensão bem definidas. As equações de *Saint-Venant* para o modelo 1D, (2.2) e (2.3), permitem determinar a altura e caudal médio do escoamento numa dada secção, e são descritas da seguinte forma (Lima et al. 2013):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (2.3)$$

Onde:

A – área molhada;

Q – caudal;

t – tempo;

h – altura do escoamento;

x – direção do escoamento;

g – aceleração gravítica;

S<sub>0</sub> – declive do canal;

S<sub>f</sub> – função do atrito.

Quando por outro lado, se tem a necessidade de avaliar comportamentos onde existe a possibilidade de escoamento superficial multidirecional, têm de ser utilizadas as equações de *Saint-Venant* para modelos 2D ((2.4), (2.5) e (2.6)):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) = gh (S_{0x} - S_{fx}) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = gh (S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.6)$$

Onde:

u – velocidade na direção x;

v – velocidade na direção y;

x – direção principal do escoamento;

y – direção do escoamento perpendicular a x;

S<sub>0x</sub> – declive do canal na direção x;

S<sub>0y</sub> – declive do canal na direção y;

$S_{fx}$  – função do atrito na direção x;

$S_{fy}$  – função do atrito na direção y.

As equações gerais de *Saint-Venant*, para os modelos 1D e 2D nem sempre são utilizadas de forma integral. Existem simplificações passíveis de serem feitas, mediante o tipo de simulação/aplicação pretendida. As equações simplificadas resultam para regimes permanentes, modelos de onda difusa, de onda cinemática e de onda dinâmica.

Para regimes permanentes as variações ao longo do tempo não são tidas em conta, resultando assim as equações simplificadas ((2.7) e (2.8)):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (2.8)$$

Nos restantes modelos mencionadas são consideradas variações ao longo do tempo mas a conservação da massa é mantida, logo a equação (2.9) é comum a todos os modelos:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

O que difere entre os vários modelos é a equação da conservação da quantidade de movimento. Como é possível observar na equação (2.10) para o modelo de onda cinemática são desprezados os termos de aceleração e inércia e apenas se considera o declive e atrito, na onda difusa (2.11) é desprezada a aceleração local e convectiva, e para a onda dinâmica (2.12) é considerada a equação completa.

$$g (S_0 - S_f) = 0 \quad (2.10)$$

$$g \frac{\partial h}{\partial x} - g (S_0 - S_f) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g (S_0 - S_f) = 0 \quad (2.12)$$

O campo de aplicação das equações de Saint-Venant e respetivas simplificações pode ser observado na Figura 2.13 (Maksimovic 1996). O gráfico da Figura 2.13 apresenta os resultados em função do número geométrico ( $G^*$ ) (2.13) e número de Froude ( $F^*$ ) (2.14), sendo que estes parâmetros são adimensionais, como indica Leitão (2009):

$$G^* = \frac{h}{\frac{q}{i_e}} \quad (2.13)$$

$$F^* = \frac{q}{h\sqrt{gh}} \quad (2.14)$$

Em que:

$q$  – caudal afluente de percurso;

$i_e$  – intensidade de precipitação útil;

$h$  – altura de água;

$g$  – aceleração da gravidade;

$S_o$  – declive do canal.

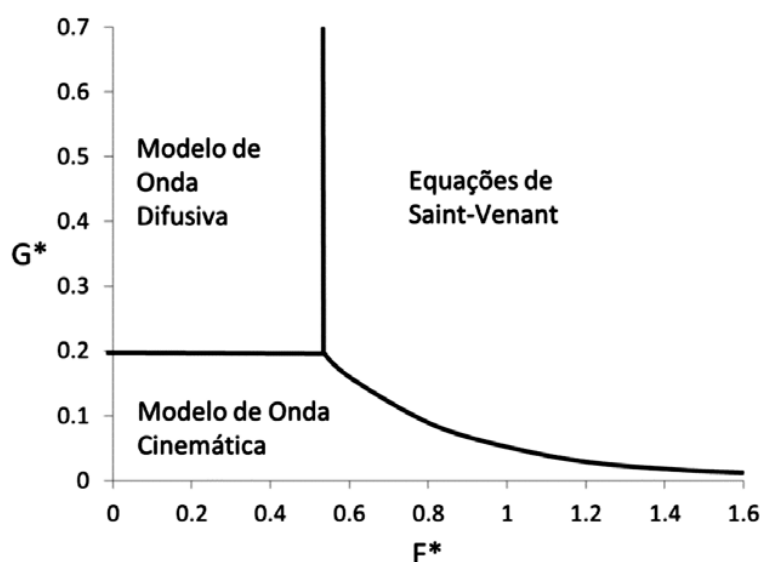


Figura 2.13 – Campo de aplicação das equações de Saint-Venant e respetivas simplificações (adaptado de Maksimovic (1996))

### 2.5.5.1 Sistemas em Carga

Por vezes, devido à excessiva precipitação, um dado sistema pode atingir a capacidade máxima dos coletores, tornando-o num sistema sob pressão. Para este caso é necessário aplicar o conceito de fenda de *Preissmann* (Butler e Davis 2011). Isto acontece porque as equações de *Saint-Venant* são aplicadas para escoamentos em superfície livre e em situações onde os coletores entrem em carga o escoamento é sob pressão.

Este conceito admite que quando é atingida a capacidade máxima de um coletor é considerada uma abertura imaginária na sua parte superior, fenda de *Preissmann* (Figura 2.14), permitindo o escoamento em superfície livre na conduta e desse modo simular o escoamento sob pressão.

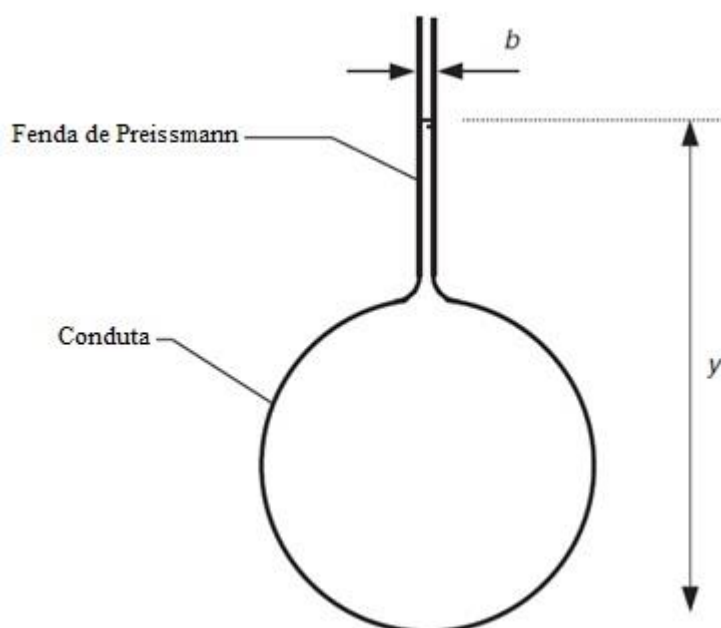


Figura 2.14 - Fenda de Preissmann (Butler e Davis 2011)

Uma vez registado este fenómeno é sinonimo que o coletor está em carga, logo existe a possibilidade de o aparecimento de água à superfície.

A água à superfície leva a problemas relacionados com inundações e para um estudo quantitativo do impacto das mesmas foi necessário recorrer a novas ferramentas na modelação de redes de drenagem. Nos anos 90 começou então o cruzamento de dados geográficos com os modelos de drenagem, que levaram ao desenvolvimento da drenagem dual (Butler e Davis 2011).

### 2.5.5.2 Drenagem dual

A drenagem dual representa os dois tipos de sistemas existentes num sistema urbano de drenagem pluvial, o “*major*” e o “*minor*” (Sá Marques et al. 2013). O sistema “*major*” representa os caminhos superficiais do terreno, desde ruas, zonas baixas, canais naturais ou artificiais, entre outros elementos. O sistema “*minor*” representa a rede de coletores. Na Figura 2.15 é possível observar, num esquema representativo, a distinção feita entre o sistema “*major*” e “*minor*”.



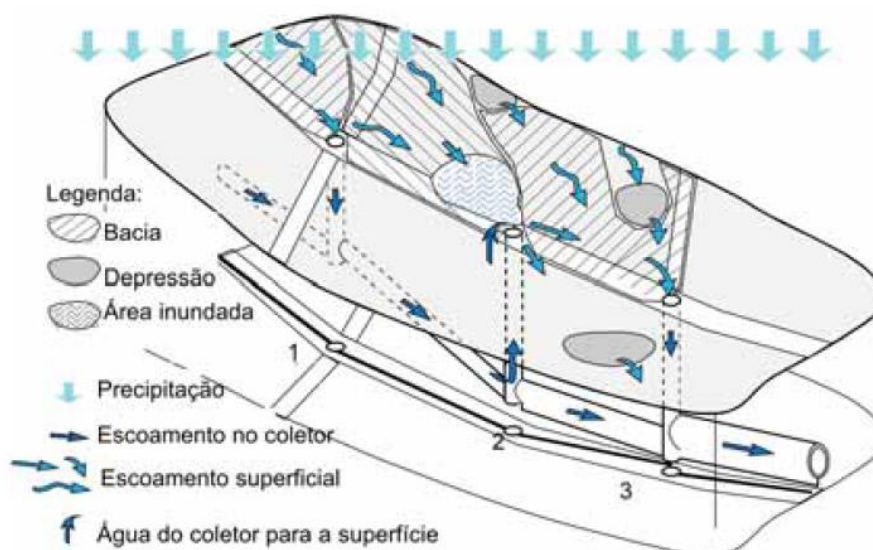


Figura 2.15 - Drenagem dual (Lima et al. 2013)

Conforme sintetizam Sá Marques et al. (2013) a drenagem dual pode ter dois tipos de abordagens distintas, a 1D-1D e a 1D-2D. As duas abordagens seguem o mesmo modelo unidimensional para representar o escoamento na rede de coletores, sendo que a diferença reside no facto de uma assumir o escoamento superficial como unidimensional, 1D-1D, e a outra representar a superfície do terreno como bidimensional, tornando-o assim num modelo 1D-2D.

No modelo 1D-1D a superfície do terreno irá ser representada por canais e zonas de acumulação de água (sistema “*major*”) que, por sua vez, está ligado ao sistema de coletores (sistema “*minor*”). Os dois sistemas interagem por orifícios que representam os elementos de entrada e saída de água dos coletores existentes na rede (Maksimovic et al. 2009). A diferença na abordagem 1D-2D reside no tratamento dado ao modelo do terreno que, como já foi referido anteriormente, é considerado um modelo bidimensional. Leitão et al. (2012) dizem-nos que o modelo do terreno é caracterizado por malhas onde todos os pontos estão definidos num sistema de coordenadas (X, Y e Z).

Ambos os modelos têm vantagens e desvantagens, a opção por um ou por outro tem em conta vários fatores:

No caso do modelo 1D-1D os modelos são mais leves para os *softwares* e em situações onde é necessário correr inúmeras simulações levam grande vantagem sobre os modelos 1D-2D explicam Allitt et al. (2009). Contudo apenas devem ser aplicados a casos onde a topografia do terreno seja favorável à simulação 1D-1D, isto é, locais onde existam linhas de escoamento bem definidas.

O modelo 1D-2D é considerado mais realista pois as superfícies de escoamento não são limitadas como nos modelos 1D-1D. Isto permite uma visualização mais clara dos resultados e estes podem ser demonstrados num mapa o que não acontece num modelo unidimensional, onde os resultados estão sujeitos a tratamento, tornando a elaboração de mapas de risco e inundação mais fácil. Estes modelos são mais utilizados quando a superfície não delimita de uma forma exata o percurso da água pluvial, por exemplo, em áreas planas. São também muito requeridos quando se pretende simular eventos extremos onde grande parte da superfície está coberta por água (Allitt et al. 2009).

## 2.6 SWMM

No desenvolvimento desta dissertação, o *software* utilizado foi o EPA *Storm Water Management Model*, SWMM. Este *software* existe desde 1971 e desde então tem sofrido inúmeras atualizações no sentido de ser melhorado, a versão 5.0.022 foi a última a ser disponibilizada e data do ano 2011. O SWMM é um modelo dinâmico usado para eventos singulares ou de longo termo em áreas urbanas. O programa é composto pelos dois tipos de modelos necessários à simulação para o presente caso de estudo, modelo hidrológico e hidráulico.

O escoamento é gerado através da chuvada criada sob várias sub-bacias e simula o escoamento da água através de um sistema de canais, dispositivos de tratamento ou armazenamento, redes de coletores, bombas e elementos reguladores na rede até ao destino final. É possível obter no SWMM dados relativos ao volume gerado em cada sub-bacia, caudais, altura do escoamento e qualidade da água em cada coletor ou canal.

Uma das ferramentas mais úteis do SWMM, para o presente trabalho, é a possibilidade de simular o comportamento hidráulico das redes de drenagem, com a introdução de elementos criando, desse modo, diferentes cenários para a rede em estudo.

O SWMM enuncia uma série de aplicações bastante comuns na sua utilização, como por exemplo:

- Dimensionar bacias de retenção para o controlo de cheias e qualidade da água;
- Projetar e dimensionar componentes de um sistema de drenagem para controlo de cheias;
- Mapeamento dos sistemas de canais naturais de escoamento superficial;
- Avaliar o impacto da infiltração e de caudais nos coletores.

Das aplicações anteriores a que diz respeito ao dimensionamento de bacias de retenção é a que está mais próxima dos objetivos do presente trabalho.

O SWMM permite ao utilizador escolher entre três modelos para a simulação do escoamento: regime permanente, onda cinemática e onda dinâmica.

O modelo de regime permanente é bastante simples, para cada intervalo de tempo o escoamento é uniforme e permanente.

O modelo de onda cinemática simula a variação espacial e temporal do escoamento numa conduta. Este modelo não tem em consideração curvas de regolfo, logo apenas pode ser utilizado para condutas com inclinações positivas.

O modelo dinâmico é o único que tem em consideração as equações de *Saint-Venant* sem simplificações, fornece ao utilizador o nível da água no nós e no escoamento ao longo das condutas e pode ser utilizado em qualquer tipo de rede.

## **2.7 Drenagem urbana e Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**

### **2.7.1 Introdução**

A drenagem dual e os Sistemas de Informação Geográfica, SIG, são duas áreas de estudo que se podem complementar. Esta relação é de tal forma evidente que hoje em dia os SIG constituem uma ferramenta importantíssima na hidráulica e hidrologia. Os SIG são ferramentas que permitem armazenar, gerir e analisar informação georreferenciada relativa ao espaço e fenómenos que ocorram no mesmo. Segundo Leitão (2009) os SIG exploram três conceitos a nível científico:

- Simplificação no processo de criação de mapas;
- Ajudar a relacionar diferentes fenómenos no espaço, permitindo novos desenvolvimentos em inúmeras áreas;
- Serve como base a novos conceitos matemáticos.

A capacidade para analisar características complexas do terreno permitiu nos últimos anos elaborar inúmeros projetos e modelos com base nos SIG (Estellés 2010). Uma área muito explorada pela hidráulica é quando se conjugam SIG com ferramentas de análise da superfície do terreno, permitindo a criação de modelos digitais do terreno, redes superficiais de escoamento, informação acerca dos declives, orientações geográficas, elaboração de diferentes mapas para uma determinada zona, entre outros elementos muito uteis em modelos com caminhos superficiais.

### **2.7.2 Modelos digitais do terreno**

Na modelação 1D-1D é necessário um modelo digital do terreno. Este tipo de modelos pode ser obtido através da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), uma técnica que começou a ser utilizada nos anos 90 (Leitão 2009). Com recurso a um transporte aéreo é utilizado um laser para se medir a distância entre a aeronave e o solo, o que torna possível obter as diferentes alturas à superfície, e com isso, obter o modelo digital do terreno, DTM (Digital Terrain Model). O DTM resultante possui uma precisão vertical entre 10 e 15 cm e horizontal de 1 m por 1 m.

### **2.7.3 Geração de redes de escoamento superficiais**

Uma vez obtido o modelo digital do terreno, é necessário proceder-se ao estudo do mesmo para que possa ser utilizado em modelos. Nesse estudo pode ser utilizada a metodologia de Delineação Automática do Escoamento superficial, AOFD (*Automatic Overland Flow Delineation*). Uma ferramenta desenvolvida pelo *Urban Water Research Group* (UWRG) do *Imperial College of London* (Maksimovic et al. 2009). O *software* AOFD analisa automaticamente o terreno e a sua ocupação criando a rede respetiva, 1D ou 2D conforme o pretendido. Na Figura 2.16 é possível visualizar uma zona com caminhos superficiais 1D gerados pelo AOFD em comparação com uma rede apenas composta por coletores.



**Figura 2.16 – Rede superficial 1D e rede superficial 1D-1D com o caminho superficial gerado pelo AOFD**

Maksimovic et al. (2009) indicam que este método pode gerar diferentes tipos de caminhos superficiais, por exemplo:

- Entre duas zonas de acumulação de água;
- Zonas de acumulação de água e as caixas de visita a jusante;
- Zonas de acumulação de água para saídas de água da bacia;
- Duas zonas de acumulação unidas entre si.

E caso o sistema entre em carga o AOFD consegue representar os caminhos entre uma caixa de visita:

- E a caixa de visita a jusante;
- Uma zona de acumulação de água a jusante;
- E saídas de água da bacia.

Na Figura 2.17 é possível observar o esquema conceptual do modelo criado pelo AOFD. Este modelo tem de ser ligado à rede de coletores existentes de modo a criar a rede final a utilizar.

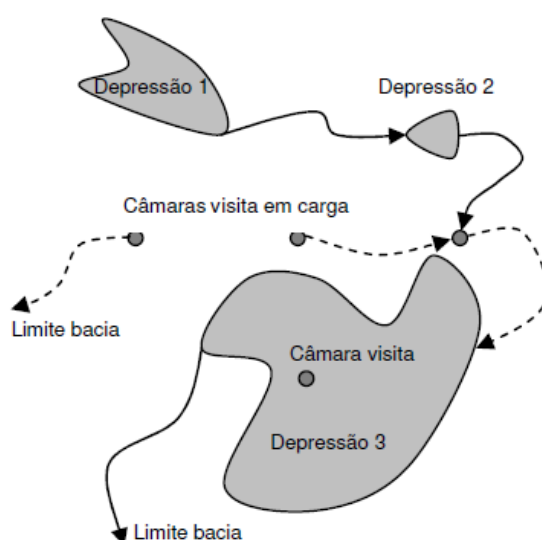


Figura 2.17 - Canais e zonas de acumulação de água (Leitão et al. 2008)

A rede superficial gerada pelo AOFD, juntamente com a rede de coletores existente, é exportada para o *Infoworks*, que a par do *software SIPSON* são os únicos programas para o qual o AOFD exporta resultados. Como o *software* utilizado foi o SWMM teve de se adaptar a rede de modo a que esta pudesse ser utilizada pelo mesmo. Os processos explicados anteriormente até a elaboração da rede final estão resumidos no esquema da Figura 2.18.

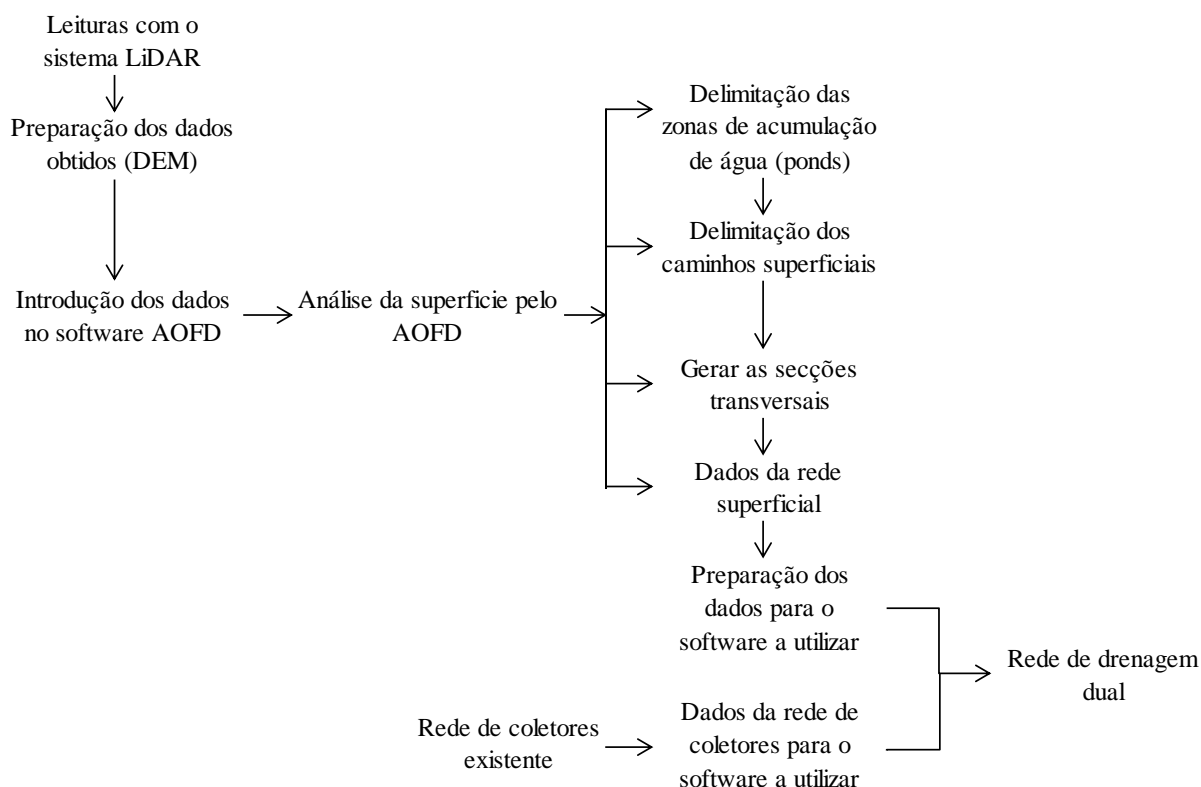


Figura 2.18 – Esquema simplificado dos passos para obtenção de uma rede de drenagem dual (adaptado de Adeyemo (2007))

## 2.8 SUDS

### 2.8.1 Enquadramento

Nos últimos anos, como já foi referido anteriormente, o aumento das cidades e da população levou a que se tivesse de pensar em soluções que não incluíssem o aumento dos elementos de recolha e escoamento de águas pluviais. Começou por se refletir como seria possível reverter a situação registada na Figura 2.3, e chegou-se à conclusão que teria de se reduzir o caudal de ponta de cheia máximo. Este facto, aliado à filosofia já existente de desenvolvimento sustentável, levou ao aparecimento dos Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, SUDS.

Os SUDS aparecem com o intuito de diminuir o escoamento superficial e ao mesmo tempo favorecer, sempre que possível, aspetos ambientais (Figura 2.19). O conceito dos SUDS tem como propósito estabelecer a ligação entre três áreas distintas, onde se pretende minimizar os efeitos do crescimento da quantidade e má qualidade da água e, sempre que possível, aumentar a comodidade e biodiversidade nas cidades (Balmforth et al. 2006).











Figura 2.19 - Objetivos dos SUDS (Balmforth et al. 2006)

### 2.8.2 Tipos de SUDS mais comuns

Existem várias abordagens possíveis para a instalação de SUDS nas cidades. O tipo de SUDS a aplicar numa determinada zona estão condicionados pelo objetivo a atingir, pelas características do local, tipo de construção existente, legislação em vigor, propriedades do solo, entre outras condicionantes. Os elementos mais utilizados, segundo Woods-Ballard et al. (2006), estão sintetizados no Quadro 2.1.



Quadro 2.1 – SUDS mais comuns (adaptado de Woods-Ballard et al. (2006))

|                             |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| Vala artificial             | São canais, relativamente, largos e não muito profundos, cobertos por vegetação. Estão desenhados para transporte e armazenamento de escoamento e, consoante o tipo de solo presente podem permitir infiltração de água no solo.   |    |
| Bacias de detenção          | As bacias de detenção são depressões com superfície permeável, onde é possível armazenar água proveniente da precipitação. Muitas vezes são parte integrante da estética e comodidade paisagística que um local tem para oferecer. |    |
| Bacias de detenção extensas | Bacias com maior área que as bacias de detenção comuns, retêm o escoamento durante um período de tempo que pode ir até 24 horas, levando a uma redução no pico de descarga.  |    |
| Bacias de retenção          | Estruturas de armazenamento de água pluvial. Estas podem ser a céu aberto ou cobertas e possuir, ou não, água de uma forma permanente.   |   |
| Pântanos Artificiais        | A construção de pântanos artificiais leva à criação de zonas inundáveis que constituem habitats para animais e plantas.  |  |
| Trincheiras de infiltração  | Geralmente são usadas ao longo de passeios ou caminhos impermeáveis. São compostas por materiais porosos que permitem a infiltração das águas provenientes das áreas impermeáveis adjacentes.                                      |  |
| Superfícies permeáveis      | Existem zonas onde pode ser favorável a adaptação da superfície alterando-a para permeável como certos parques de estacionamento ou passeios onde os solos sejam favoráveis à infiltração de água.                                 |  |
| Telhados verdes             | Consiste em cobrir o topo de um edifício com vegetação. Tem de existir um cuidado especial na construção deste tipo de aplicações pois é necessário garantir a proteção do edifício.   |  |

Como é possível verificar, existem diversas soluções passíveis de serem aplicadas no sentido de melhorar o comportamento das cidades quando sujeitas a condições hidrológicas extremas. No subcapítulo seguinte será feita uma abordagem mais pormenorizada acerca do método a utilizar no caso de estudo, bacias de retenção.

### 2.8.3 Bacias de Retenção

As bacias de retenção, de todos os SUDS apresentados, são os que têm maior relevância no presente trabalho.

A principal função da bacia de retenção, segundo Matias (2006), é a de armazenar água proveniente da chuva, atuando como reguladora de caudal a jusante da mesma, isto porque permite a restituição do caudal a jusante consoante os limites da rede existentes. Esta funcionalidade permite, para situações onde o caudal máximo admitido pela rede é ultrapassado, escoar caudais mais baixos durante um maior período de tempo, reduzindo assim o risco de inundações. As bacias podem ter outras funções como:

- A contribuição para o melhoramento da qualidade das águas pluviais;
- Caso se tratem de bacias com água de uma forma permanente podem ter interesse paisagístico, ambiental e também no desenvolvimento da biodiversidade do local onde estão inseridas, principalmente se forem integradas no meio urbano;
- Podem também constituir reservas para incêndios ou para fins de rega.

Existem dois tipos de bacias, a céu aberto, onde pode haver ou não água de uma forma permanente, ver Figura 2.20, ou bacias subterrâneas, ver Figura 2.21. Serão abordadas com mais atenção as bacias de retenção subterrâneas, pois serão as utilizadas no presente trabalho. As bacias subterrâneas são estruturas, geralmente, construídas em betão armado e o seu uso é mais frequente em locais com elevada densidade urbanística.



Figura 2.20 – Bacia de retenção a céu aberto de Melun-Sénart, França (STU 1994)



**Figura 2.21 – Bacia de retenção subterrânea em Porto Alegre, Brasil (cortesia de Simões, N.)**

Os elementos constituintes de uma bacia são os seguintes, segundo o Artigo 178º da Secção II Bacias de retenção do RGSPDADA:

- Corpo da bacia;
- Dispositivos de funcionamento normal destinados a assegurarem a regularização do caudal efluente e a manutenção de um nível a montante, caso sejam bacias com água de uma forma permanente;
- Dispositivos de segurança, entenda-se descarregadores de superfície e eventualmente diques fusíveis. Estes elementos têm a função de garantir o escoamento das águas em condições excepcionais;
- Descarga de fundo, com o objetivo de assegurar o esvaziamento completo das bacias para tarefas de limpeza e manutenção. Em certos casos pode também funcionar como sistema de segurança.

O dimensionamento hidráulico de uma bacia de retenção consiste no cálculo do volume necessário ao armazenamento do caudal afluente. Esse caudal corresponde à precipitação para um determinado período de retorno ou a um hidrograma de cheia conhecido, isto porque é necessário controlar o caudal efluente máximo. Na presente dissertação utilizou-se o método simplificado no cálculo do pré-dimensionamento das bacias. Este método baseia-se no conhecimento das curvas IDF para a bacia em estudo e permite fazer uma estimativa do volume necessário para armazenar o caudal afluente que resulte de uma chuvada com determinado período de retorno, de modo a que o escoamento à saída da bacia tenha o valor da capacidade máxima de vazão da rede a jusante. A expressão (2.15) utilizada para cálculo do volume de armazenamento foi retirada do Artigo 179º do RGSPDADA:

$$V_a = 10 \left( -\frac{bqs}{1+b} \right) \left[ \frac{60.qs}{a(1+b)} \right]^{\frac{1}{b}} C.A \quad (2.15)$$

Onde:

$$qs = \frac{6q}{CA} \quad (2.16)$$

Em que:

Va – Volume armazenamento, m<sup>3</sup>;

qs – caudal específico efluente, ou seja, o caudal por unidade de área ativa da bacia de drenagem, em milímetros/minuto;

C – coeficiente de escoamento;

a, b – parâmetros da curva intensidade-duração;

q – caudal máximo efluente, em metros cúbicos/segunda;

A – área da bacia de drenagem, em hectares.

É importante referir que a equação (2.15) sofreu uma pequena correção. No regulamento não existe a multiplicação do qs por 60, mas após revisões feitas noutros trabalhos e como apresenta Matias (2006) concluiu-se que essa correção teria de ser implementada.

## 2.9 Tendência para as cidades futuras

Water Sensitive Cities, WSC, e Blue-Green Dream, BGD, são conceitos recentes que têm como objetivos principais tornar as cidades sustentáveis a nível hídrico e não só. Uma cidade sensível aos recursos hídricos disponíveis pode beneficiar largamente com o seu bom aproveitamento. Algumas ideias gerais dos defensores das WSC são que se deve aumentar e proteger os cursos de água e zonas húmidas existentes nas cidades, minimizar o risco de inundações, e com isto criar espaços verdes que permitam uma limpeza e reciclagem natural da água. Estas medidas terão influência direta no microclima das cidades, permitindo que estas se tornem mais agradáveis para populações e sustentáveis a nível hídrico, pois têm mecanismos que lhes permitem ter um comportamento semelhante ao de uma bacia natural (CRC@ 2012). Na Figura 2.22 apresenta-se um esquema ilustrativo do caminho a seguir para se conseguir chegar até às WSC. O conceito BGD defende que se deva interligar a água superficial com espaços verdes previamente pensados no ordenamento do território de modo a diminuir o risco de cheias, basicamente defende a criação de uma rede de espaços verdes ao longo da cidade que escoe para rios ou ribeiras existentes no local, segundo Skilton (2010).

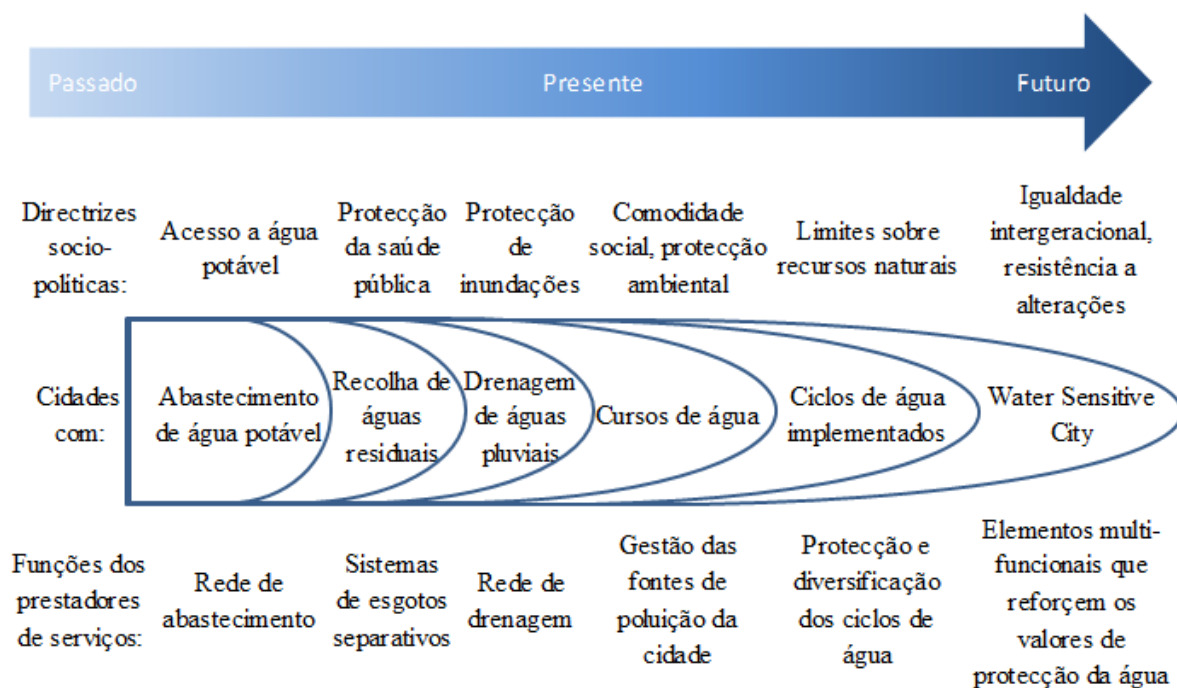


Figura 2.22 - Transformação das cidades em WSC (adaptado de Brown et al. (2009))

Os SUDS, como é de esperar, estão intimamente relacionadas com os conceitos abordados no presente subcapítulo, mas enquanto os SUDS são vistos como elementos singulares construídos com o intuito de reduzir o caudal de ponta de cheia de um local, os WSC/BGC são conceitos muito mais abrangentes e profundos para serem aplicados nas cidades. Estes conceitos defendem uma cidade onde se dê um ciclo hidrológico completo. Para isto ser possível são necessárias medidas para que a população esteja recetiva a mudar os seus hábitos de modo a se adaptar a um estilo de vida num local ecologicamente sustentável, a própria indústria terá de ser regulada e estar preparada para respeitar regras impostas e as políticas dos governos e os planeamentos das cidades terão de se direccionar para objetivos ecologicamente sustentáveis (Wong 2008).

### 3 CASO DE ESTUDO/METODOLOGIA

#### 3.1 Caso de Estudo

A zona de estudo do presente trabalho irá ser a bacia da zona central da cidade de Coimbra, cidade que se situa na zona centro de Portugal, como é possível verificar na Figura 3.1. Coimbra é capital do distrito e é considerada uma cidade universitária, onde dos perto de 150 mil habitantes cerca de 40 mil serão estudantes. A Universidade de Coimbra é uma universidade conhecida mundialmente pela sua tradição no ensino e pela sua história já longa, por essas razões entre tantas outras, esta universidade tornou-se recentemente Património Mundial.



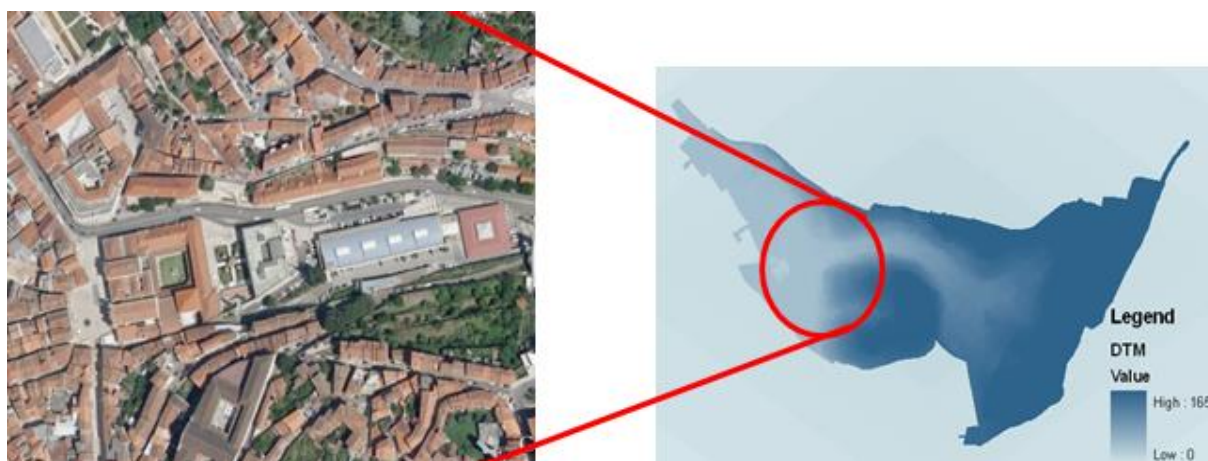
Figura 3.1 – Localização da cidade de Coimbra, Portugal (fonte: Google Earth)

A nível topográfico Coimbra possui características muito irregulares do terreno, por essa razão é recorrente o aparecimento de inundações na bacia central da cidade. A bacia tem uma

---



área aproximada de 1.5 km<sup>2</sup> e descarrega na ribeira de Coselhas, sendo que para o local onde é usual a ocorrência de inundações a área drenante é de 1.1 km<sup>2</sup> com um alto índice de urbanização. O sistema de coletores tem praticamente 35 km de comprimento e o tempo de concentração da zona crítica está estimado em 45 minutos.



**Figura 3.2 - Modelo digital da zona de estudo com pormenor da zona onde ocorrem cheias com maior frequência (Simões et al. 2010)**

Na Figura 3.2 é possível perceber como varia a altura na bacia. A figura à direita mostra como varia a altura da bacia, sendo os tons mais escuros representativos dos locais com maior altura e os mais claros das zonas mais baixa. A zona “baixa” da bacia corresponde à área dedicada ao comércio e serviços, tendo poucas zonas permeáveis, trata-se da zona crítica da cidade a nível de inundações. O local delimitado pelo círculo a vermelho na Figura 3.2 representa essa zona. Perto da zona baixa existe uma zona com um formato circular com elevada altitude e como é possível perceber trata-se de uma zona onde a variação de altura ocorre em distâncias muito curtas, tratando-se por isso de uma zona com grandes declives. A restante área da bacia estende-se até ao limite oposto da zona baixa e tem uma subida de altura relativamente gradual. Na Figura 3.3 é possível ter uma visão área sobre a bacia.



Figura 3.3 - Vista área sobre a bacia em estudo (coimbraantiga@ 2013)

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Introdução

Para o estudo dos cenários relativos à implementação de bacias de retenção na bacia da zona central de Coimbra é necessário simular o sistema de drenagem a avaliar, para que seja possível identificar-se os problemas e a partir desse ponto elaborar uma avaliação dos cenários a propor. Logo, para a realização de uma correta modelação hidrológica e hidráulica do sistema é necessário conhecerem-se as características da precipitação a estudar e a rede de drenagem dual.

### 3.2.2 Precipitação

Relativamente à precipitação foi necessário recorrer a chuvadas com tempos de recorrência de 5, 20 e 100 anos. Para o cálculo das intensidades de precipitação foi utilizado o método dos blocos alternados de acordo com Chow et al. (1988). Com base nas curvas IDF para a zona em estudo. Relativamente à duração da chuvada foi tido em conta o documento apresentado por Portela et al. (2000), neste documento é concluído que a utilização de uma chuvada com



duração de três vezes o tempo de concentração,  $t_c$ , da bacia poderá levar a um caudal de ponta de cheia superior ao caudal resultante de um evento com uma duração de apenas um  $t_c$ .

A bacia em estudo tem um tempo de concentração de, aproximadamente, 45 minutos. Este valor foi calculado com recurso a simulações feitas no SWMM, onde se utilizou uma chuvada constante com duração de algumas horas para que se conseguisse perceber a partir de que momento o caudal, no ponto de saída mais a jusante da bacia, começaria a ser constante ao longo do tempo. Posto isto, a duração utilizada para cada chuvada foi a de três vezes o  $t_c$  da bacia, ou seja, 135 minutos. Na Figura 3.4 é possível observar a curva de intensidade calculada para um tempo de retorno de 100 anos.

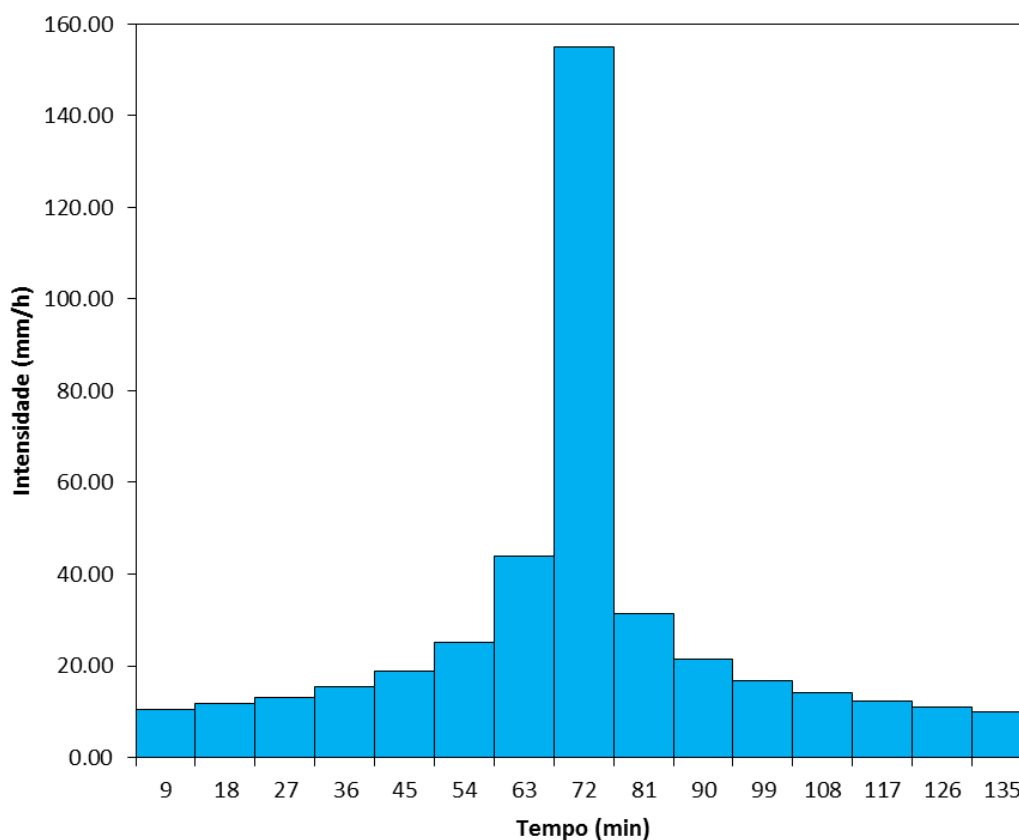


Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para  $Tr = 100$  anos

### 3.2.3 Rede de drenagem dual

Os métodos para obtenção tanto do modelo digital do terreno, como da rede de drenagem dual já foram previamente explicados no subcapítulo 2.7, por essa razão apenas será feito um breve resumo nos parágrafos seguintes.

Após obtenção do modelo digital do terreno e utilizando a tecnologia AOFD foi gerada a rede de escoamento superficial e importada para o *Infoworks*.

Finalmente foi cruzada a informação relativa à rede superficial e de coletores de modo a criar a rede de drenagem dual. A rede já tinha sido utilizada por Simões (2012) mas no *software* Infoworks, neste trabalho a rede foi exportada e utilizada no SWMM.

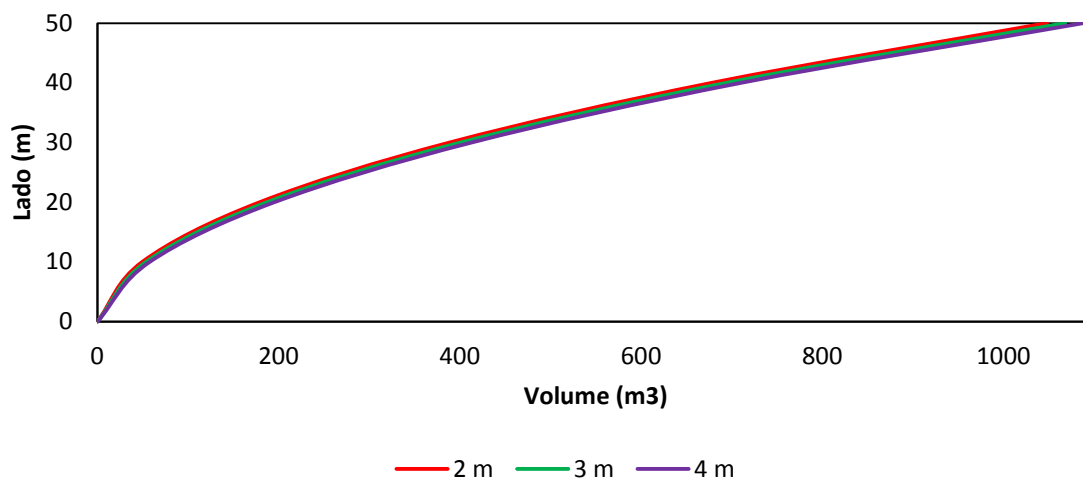
### 3.2.4 Quantificação de custos das bacias

Os custos das bacias são influenciados por diversos fatores como o local onde serão construídas, tipos de trabalhos necessários à sua implementação, mão-de-obra a utilizar, materiais a utilizar, volume da mesma, entre outros. Foi feita uma análise simplificada da avaliação de custos que teve por base quatro fatores:

- Volume da bacia;
- Preço do betão por  $m^3$ ;
- Preço da escavação por  $m^3$ ;
- Custos adicionais à construção.

Os volumes das bacias foram quantificados conforme a necessidade para cada cenário proposto, tema que irá ser abordado com maior cuidado num sub-capítulo posterior. O preço do betão por  $m^3$  foi obtido num catálogo de uma empresa da especialidade na zona de Coimbra, o preço foi estimado com recurso aos valores tabelados, 75 €/m<sup>3</sup>. O custo de escavação por  $m^3$  utilizado foi de 7.5 €/m<sup>3</sup>. Para tornar a quantificação dos custos minimamente realista foi necessário introduzir à previsão de custos totais uma parcela relativa à construção da bacia, mão-de-obra e todos os custos adicionais à sua construção, para isso estabeleceu-se um valor adicional que corresponde a 50% do custo total do betão necessário para a obra.

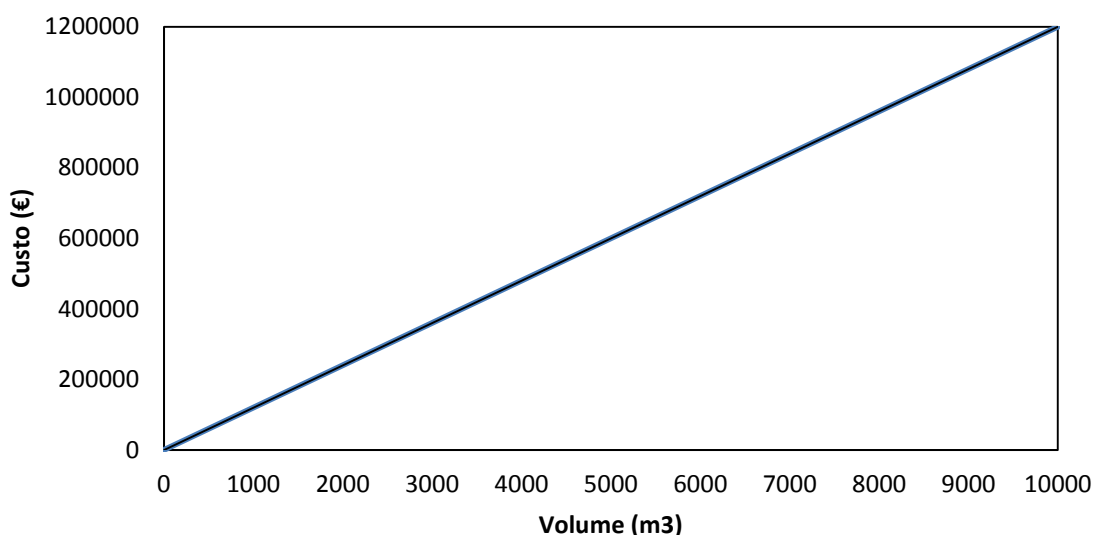
Por forma a obter um gráfico representativo do volume total de betão necessário para as bacias foi necessário criar um gráfico que relacionasse a largura da bacia, supondo que a base da mesma será quadrada, com o volume total de betão a utilizar dessa bacia para diferentes alturas, é possível verificar na Figura 3.5 as curvas dos volumes para alturas de 2, 3 e 4 metros em função do comprimento do lado da base em metros.



**Figura 3.5 – Relação Largura-Volume de betão necessário para diferentes alturas das bacias**

O cálculo do volume foi feito assumindo que as paredes da bacia teriam uma espessura de 20 cm de betão. Calculou-se o volume total da bacia incluindo a espessura das paredes, depois, para saber o volume total de betão necessário à sua construção subtraiu-se o volume da bacia correspondente ao espaço destinado para o armazenamento de água.

De seguida em elaborou-se um gráfico que permitiu estimar o custo da bacia em função do volume de betão necessário e dos custos adicionais admitidos, já explicados anteriormente. Na Figura 3.6 pode ver-se um gráfico representante dos valores obtidos na previsão de custos.



**Figura 3.6 – Relação Volume de betão necessário-Custo da bacia**

É importante referir que neste subcapítulo apenas foi apresentado o método para obtenção da previsão dos custos, posteriormente serão avançados valores para o custo de cada cenário proposto tendo em conta o volume de armazenamento necessário para cada solução.

## 4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 4.1 Preparação do Modelo de Drenagem Dual

O estudo realizado neste trabalho é referente à bacia da zona central da cidade de Coimbra e como em todos os estudos que envolvam modelos de redes existentes é muito importante ter a noção acerca do comportamento real da bacia a nível de escoamento de água pluvial. Situações como as registadas nas chuvadas de 9 de Junho de 2006, Figura 4.1, e 21 de Setembro de 2008, Figura 4.2, onde existiram a ocorrência de cheias na Praça 8 de Maio em Coimbra têm de ser estudadas para que se perceba a origem e causa das inundações.



Figura 4.1 – Praça 8 de Maio – 09/06/2006 (Simões et al. 2010)



Figura 4.2 – Praça 8 de Maio – 21/09/2008 (Simões et al. 2010)

Recorrendo ao estudo feito por Leandro (2008) é possível perceber a importância do controlo da quantidade de água que entra na rede de coletores e, desse modo, compreender a interação entre o sistema superficial e o sistema de coletores. Este controlo é importante pois define a quantidade de água que existe na superfície, tornando assim os modelos duais muito mais realistas.

Utilizando como referência o estudo desenvolvido por Simões et al. (2010), onde foi possível verificar que o sistema de coletores não entrou em carga para as chuvadas registadas nesse período, foi possível concluir que o problema residia no facto de grande parte da água existente na bacia não entrar totalmente na rede de coletores ficando, por essa razão, como excedente à superfície, resultando em cheias. Este argumento vem suportar, mais uma vez, a necessidade de controlar a água que entra na rede de coletores em sistemas de drenagem dual.

Após concluída a análise prévia, o passo seguinte consistiu em trabalhar no modelo 1D-1D a utilizar.

## **4.2 Modelo utilizado**

O modelo do qual se partiu para correr as simulações pretendidas foi importado do *software Infoworks*, aquando esta importação foram encontrados erros que necessitaram de ser corrigidos. Os erros existentes estavam relacionados com diferentes configurações, designações e capacidades utilizadas por um e outro *software*.

Um dos principais cuidados a ter foi o de perceber o funcionamento do escoamento entre a rede superficial e de coletores, esta fase de “exploração” foi bastante demorada. De forma a se conseguir obter respostas fundamentadas acerca do real comportamento do modelo para este tópico, a interação entre os dois sistemas, foi necessário recorrer a modelos simplificados no *software SWMM*. O modelo inicialmente criado foi construído com base no modelo da bacia obtido da importação do *Infoworks*, ver Figura 4.3.

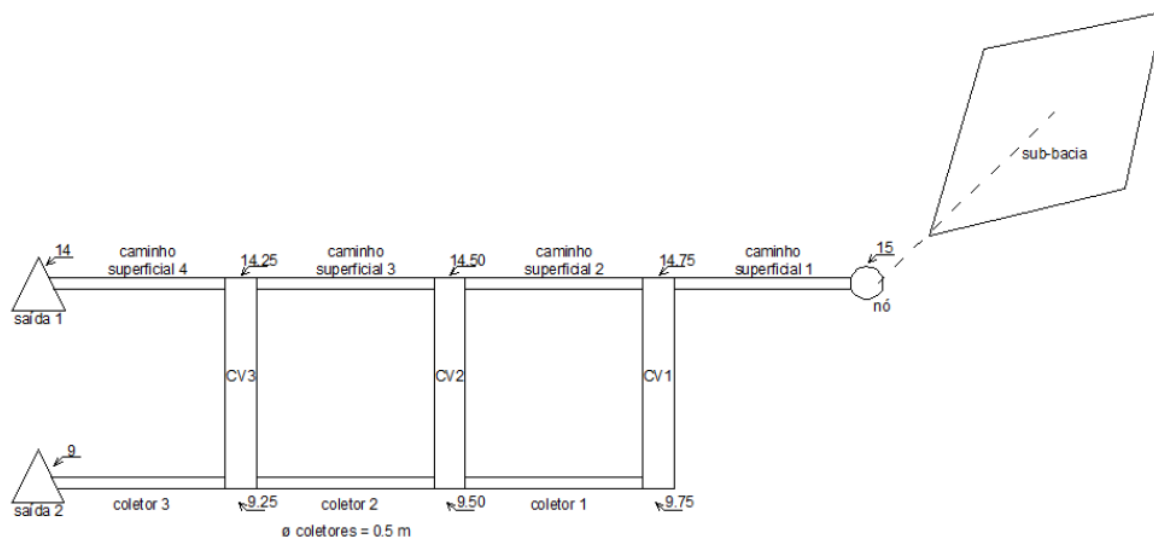


Figura 4.3 – Modelo criado inicialmente no SWMM

O modelo representado na Figura 4.3 possui uma bacia que descarrega para um caminho superficial, que por sua vez encaminha a água para um nó, caixa de visita, que distribui a água para o caminho superficial e rede de coletores. Após um par de simulações, onde foi utilizada uma chuvada constante com duração suficiente para que o sistema atingisse regime permanente, percebeu-se a resposta deste modelo em relação ao ocorrido na realidade. O resultado de uma das simulações feitas pode ser observado na Figura 4.4.

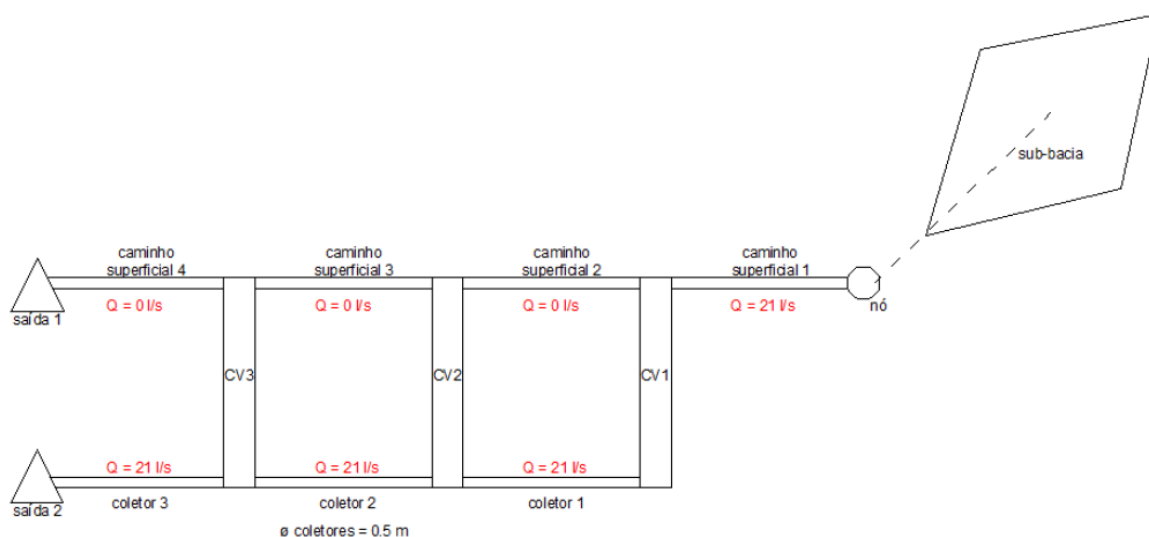


Figura 4.4 – Resultados obtidos para o modelo inicial

Analisando os resultados obtidos numa das simulações efetuadas, é possível concluir que o comportamento do modelo utilizado inicialmente não vai ao encontro do que se pretende obter no modelo 1D-1D para a bacia em estudo, isto porque o nó 1 recolhe todo o caudal existente à superfície. O caudal gerado é guiado para a única hipótese possível, o 1º caminho superficial e posteriormente é encaminhado para um nó que, teoricamente, o deveria distribuir pelo caminho superficial e coletor ligados a esse nó, como é possível observar na Figura 4.4 todo o caudal existente no sistema irá escoar para a rede de coletores. Apesar de se verificar um parâmetro importante, a continuidade, não é o tipo de escoamento pretendido, por essa razão o modelo teve de ser aperfeiçoado.

O modelo apresentado na Figura 4.5 foi a opção testada de seguida.

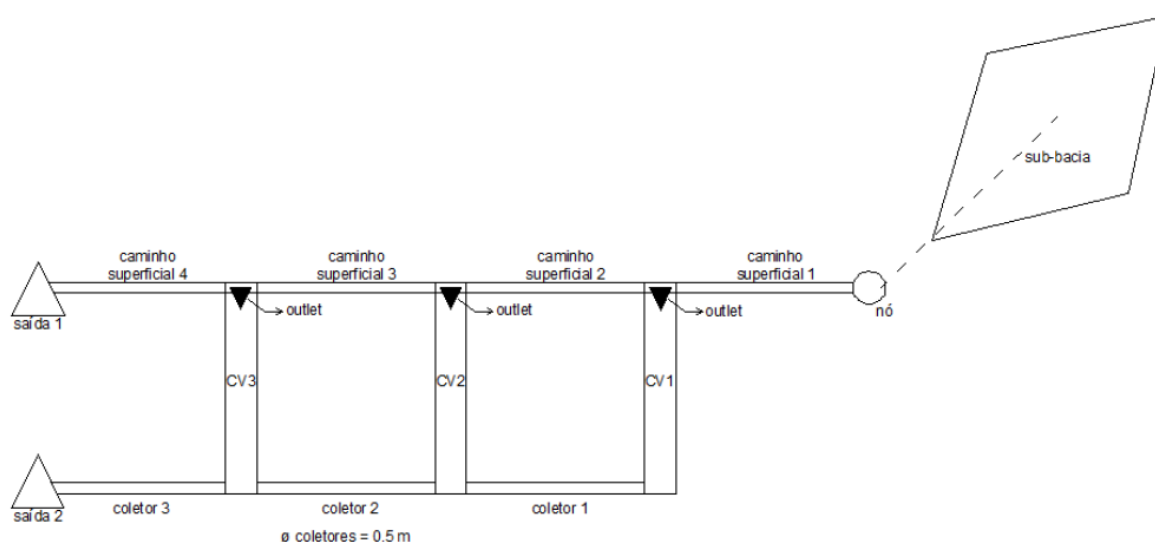


Figura 4.5 – Separação por meio de “outlets” do sistema superficial e de coletores

De modo a controlar a quantidade de água existente à superfície que entra para a rede de coletores foi necessário inserir elementos, *outlets*. Estes permitem, através da atribuição de uma curva altura/caudal, controlar a quantidade de água a desviar dependendo da altura de água imediatamente a montante do nó. Para ser possível a utilização destes elementos foi necessário duplicar os nós da rede, criando nós virtuais que permitissem a ligação entre os dois sistemas através dos *outlets*. Esses nós não passam de caixas de visita virtuais que acabam por não ter influência no comportamento da rede, isto é, não tornam o funcionamento da rede irreal.

A curva de controlo de entrada de água nos *outlets* está representada na Figura 4.6.



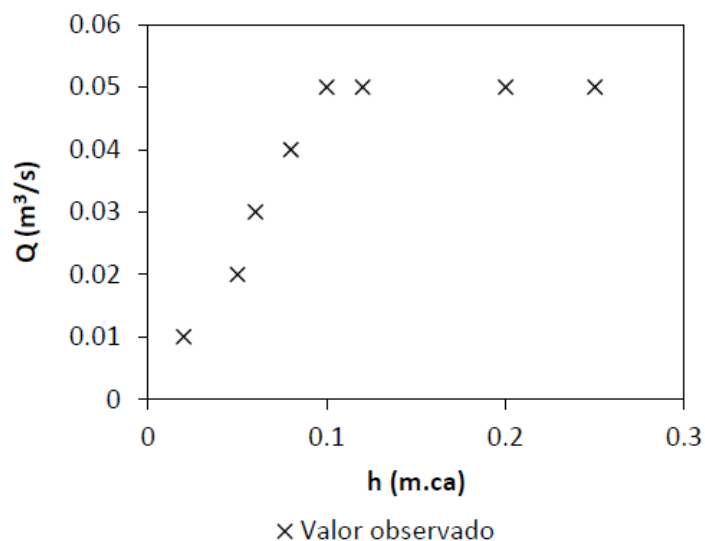


Figura 4.6 - Gráfico representativo dos pontos utilizados da curva de entrada de caudal

Os resultados após a introdução da curva de controlo podem ser verificados na Figura 4.7.

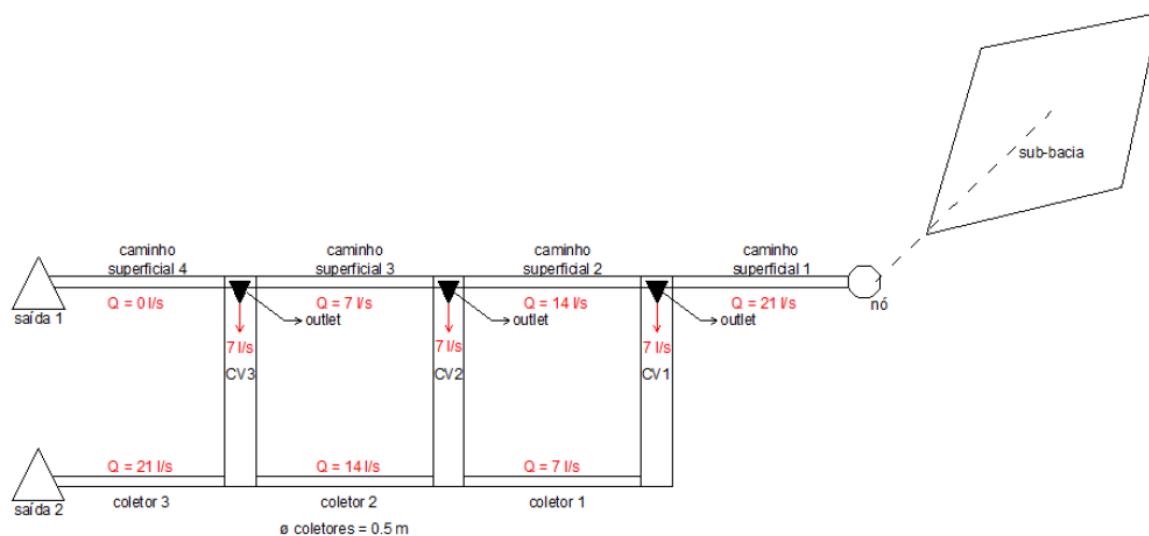


Figura 4.7 – Resultados para o modelo simplificado após introdução da curva de controlo nos “outlets”

Uma vez inserida a curva de controlo nos *outlets* foi necessário recorrer a diversas simulações para se continuar a perceber o funcionamento do modelo de uma forma exaustiva. Um ponto importante na avaliação do comportamento do modelo foi retirar a saída de água do sistema de coletores e analisar qual seria a resposta da água no sentido rede de coletores – rede superficial. Concluiu-se que era necessário implementar outro *outlet*, só que desta vez no sentido, rede de coletores – rede superficial, isto porque a água uma vez estando no sistema de

coletores não retornava aos caminhos superficiais pelo *outlet* já existente, ou pelo menos não o fazia de uma forma regular. Sendo assim foi necessário criar o sistema apresentado na Figura 4.8. É importante referir que não foi imposto nenhum tipo de controlo para o *outlet* que referente à subida de água dos coletores para a rede superficial, apenas se impossibilitou o escoamento no sentido contrário ao pretendido.

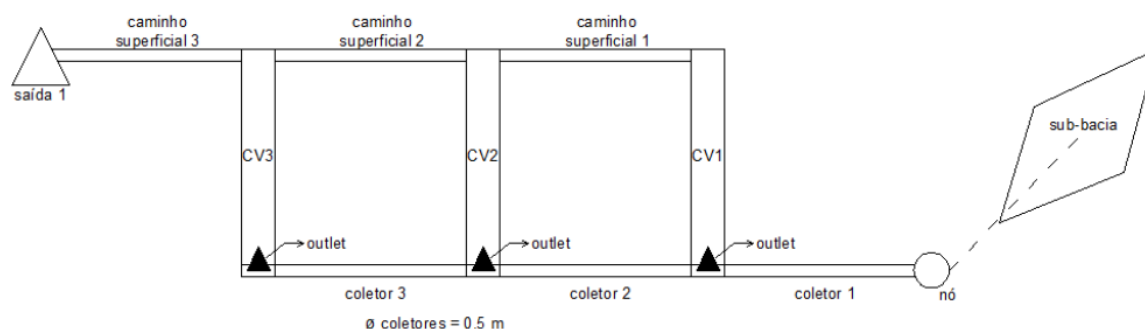


Figura 4.8 – Verificação da subida de caudal através da inserção de *outlets* para esse efeito

Verificou-se que com a alteração efetuada o sistema tinha uma boa resposta quando os coletores entravam em carga, como se pode verificar na Figura 4.9, onde se observa um aumento gradual da altura de água à superfície à medida que surge água proveniente da rede de coletores.

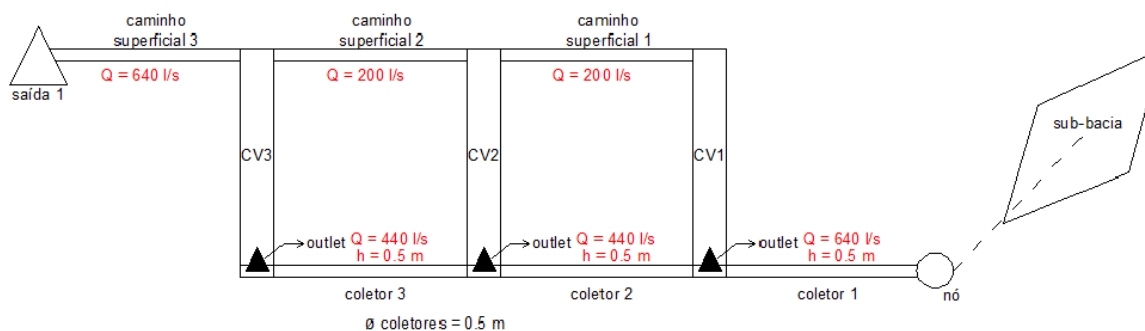


Figura 4.9 – Resultados após introdução de “outlet” de saída com sistema em carga

Uma vez executados todos os testes necessários para corroborar o bom funcionamento, pelo menos teórico, do modelo pretendido foi elaborado um modelo simplificado final, Figura 4.10. Para este modelo foram, também, realizados testes para verificar mais uma vez, as condições de continuidade e comportamentos da rede, condições que se vieram a verificar satisfatórias.

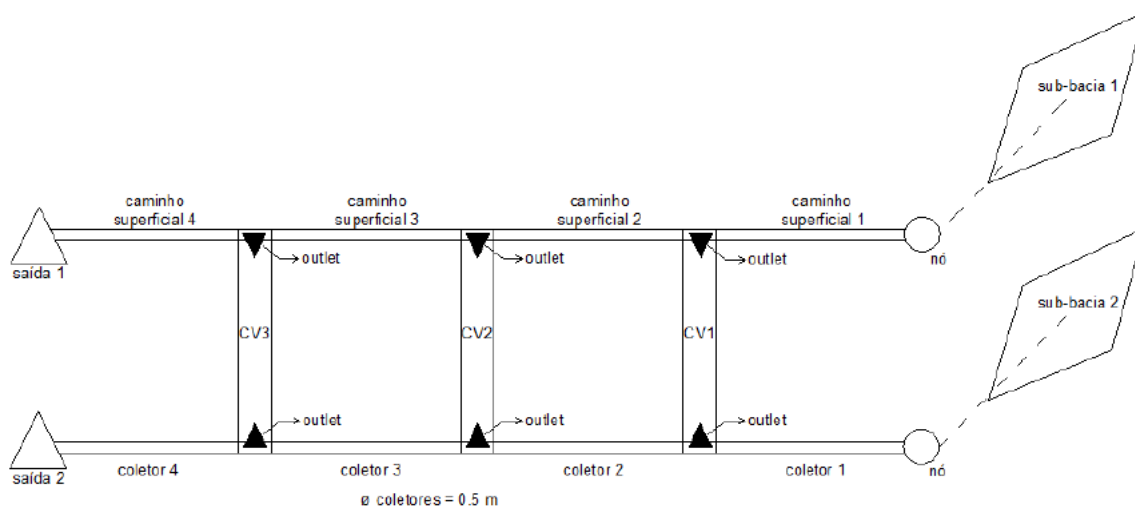


Figura 4.10 – Modelo simplificado final

O passo seguinte consistiu em transpor os conceitos aplicados no modelo simplificado final para o modelo da bacia da zona central de Coimbra. É possível observar na Figura 4.11 uma parcela da rede já com as alterações finais.

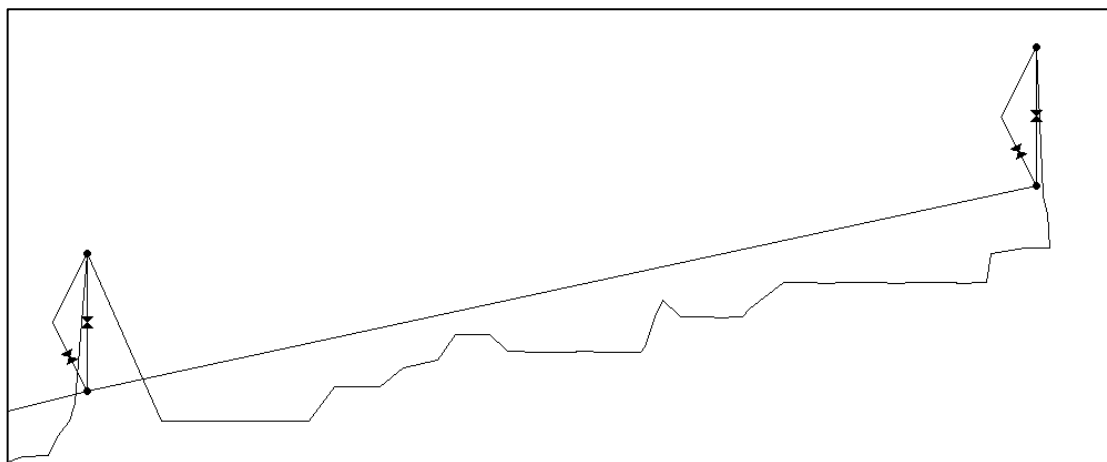


Figura 4.11 – Vista em planta de uma parcela de rede com as alterações finais

Obtida a rede com as alterações finais desejadas avançou-se para a avaliação do funcionamento da mesma, para isso foram utilizadas chuvadas com tempo de recorrência de 5, 20 e 100. Optou-se por simular o comportamento da bacia para estes tempos de recorrência pois era importante comparar o caudal para diferentes intensidades de chuvadas.

Após a simulação no modelo da bacia para os tempos de recorrência já apontados, verificou-se o caudal em dois pontos distintos, junto da Praça 8 de Maio e junto da Praça da Republica.

Para estes dois locais os resultados obtidos foram bastante satisfatórios quando comparados com os valores da chuvada de 9 de Junho de 2006 no modelo usado por Simões et al. (2010). Na Figura 4.12 é possível comparar os caudais para o mesmo local com tempos de recorrência diferentes.

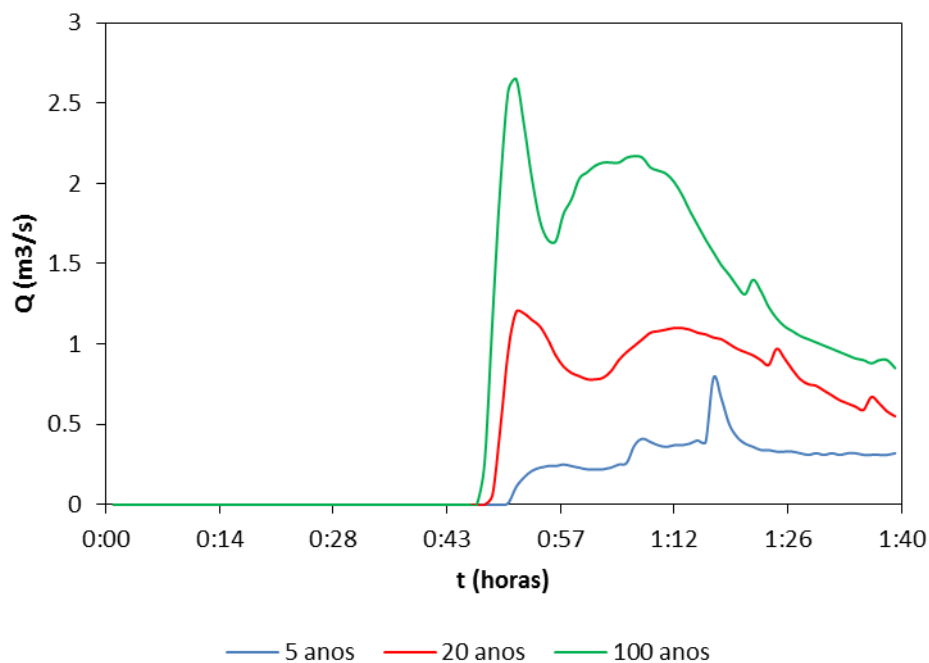


Figura 4.12 – Caudal à superfície, junto à Praça 8 de Maio com  $Tr = 5, 20$  e  $100$  anos

Como se verifica pelas Figura 4.12 o caudal difere, sendo mais elevado, como seria de esperar, para chuvadas com tempo de recorrência maior. Na Praça da República verificou-se uma coerência lógica dos resultados, ver Figura 4.13.

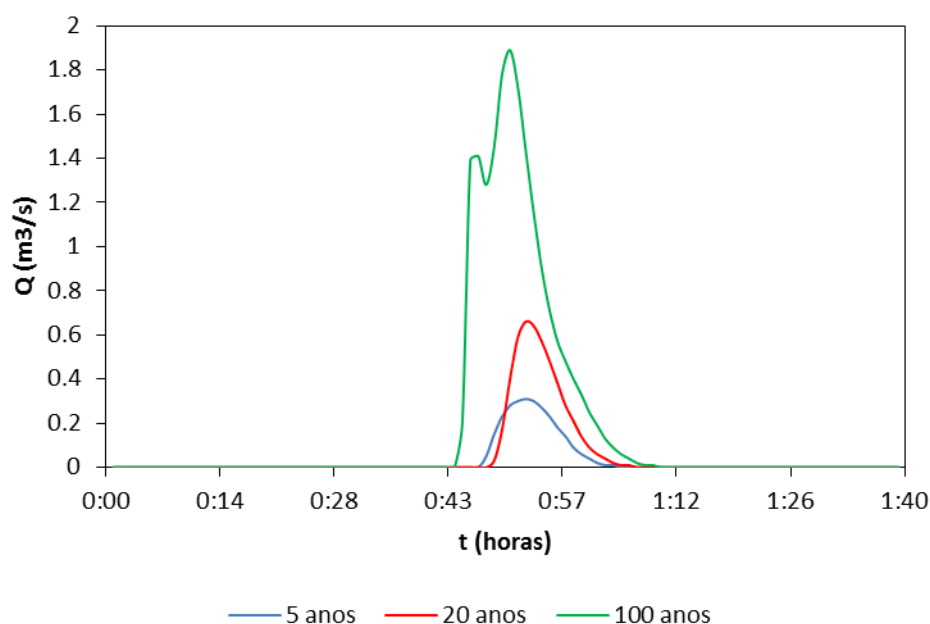


Figura 4.13 - Caudal à superfície, junto à Praça da República com  $Tr = 5$  anos

Uma vez verificado o bom comportamento da rede para diferentes chuvadas, o próximo passo constituirá na formulação de cenários para a implementação de bacias de retenção de modo a melhorar a *performance* da rede quando esta for sujeita a grandes chuvadas.

### 4.3 Caso de estudo – Bacia da zona central de Coimbra

#### 4.3.1 Introdução

A bacia da zona central de Coimbra, como já foi referido anteriormente no subcapítulo 4.1, tem problemas relativos ao aparecimento de água à superfície em situações onde a rede de coletores ainda não entrou em carga. Sabe-se que uma das razões é devido à grande inclinação das ruas, que leva a que uma quantidade de água considerável não entre na rede de coletores.

Para combater o problema admitiram-se cenários que incluíam a implementação das bacias de retenção. Durante a escolha dos locais das bacias levou-se em conta fatores como a área disponível para construção e locais onde a quantidade de água a drenar fosse significativa.

As soluções testadas para combater os problemas registados na bacia foram as seguintes:

- Solução 0: Rede sem implementação de bacias de retenção, situação atual;
- Solução 1: Rede com implementação de uma bacia de retenção na Praça da República;

- Solução 2: Rede com implementação de uma bacia de retenção na zona do estacionamento à frente do Mercado;
- Solução 3: Rede com implementação de duas bacias, uma na zona da Praça da República e outra na zona do estacionamento à frente do Mercado.

Os locais onde as bacias foram implementadas podem ser visualizados na Figura 4.14, numa imagem aérea real da bacia. Posto isto, o passo seguinte consistiu em identificar os locais onde iriam ser verificados caudais para comparação de resultados entre os diferentes cenários estabelecidos. Esses locais estão, também, identificados na Figura 4.14.



**Figura 4.14 – Vista aérea dos locais onde as bacias serão implementadas: A – Praça da República; B – Estacionamento em frente ao Mercado Municipal e locais onde foram implementadas sondas numéricas para leituras de resultados**

O controlo teve de ser feito em função dos locais onde iriam ser implementadas as bacias, isto porque, a sua implementação irá levar à alteração do caudal, quer superficial, quer nos coletores. Desse modo os pontos de controlo e as razões pelas quais se escolheram esses pontos são as seguintes:

- Local 1: Pré Praça da República, este local é importante para que se possa ter noção da quantidade de caudal a desviar para soluções onde esteja presente a bacia de retenção da Praça da República;

- Local 2: Pós Praça da Republica, neste local é suposto existir uma alteração significativa nos caudais registados quer a nível de coletores, quer a nível superficial após a implementação da bacia na Praça;
- Local 3: Pré Estacionamento do Mercado Municipal, ponto de referência para que se possam ter noções da quantidade de água a desviar para a bacia a implementar no estacionamento do Mercado e avaliar as quantidades de água existentes à superfície;
- Local 4: Pós Estacionamento do Mercado Municipal, no local 4 será possível avaliar o comportamento da rede em resposta à bacia implementada no estacionamento do Mercado e avaliar a quantidade de água quer nos coletores, quer à superfície;
- Local 5: Banco Central Caixa Geral de Depósitos – Praça 8 de Maio, este local é importante pois trata-se da zona crítica da bacia, é neste ponto que se encontram os maiores problemas. Apesar de este local não ser muito afastado do local 4, o que provavelmente levará a resultados semelhantes, optou-se pela sua avaliação devido à sua relevância.

Uma vez estabelecidos os pontos de controlo, prosseguiu-se para a introdução das bacias no SWMM.

#### 4.3.2 Implementação da bacia num modelo de drenagem dual

O SWMM não permite a criação de bacias de retenção de uma forma direta, por isso, optou-se por se adaptar elementos existentes no *software* para a sua construção. Os elementos necessários à bacia de retenção e respetivas ferramentas utilizadas no SWMM são as seguintes:

- Corpo da bacia: A modelação do corpo da bacia foi feita utilizando uma unidade de armazenamento de água, a sua área foi definida por uma curva altura-área;
- Dispositivos de entrada de água: Para desvio da água da rede superficial e da rede de coletores, foram utilizadas condutas que descarregavam na bacia de retenção. Essas condutas foram inseridas com as características das condutas a montante das mesmas e a sua ligação foi feita entre os nós superficiais e da rede de coletores, consoante a água que se optou por desviar;
- Descarregadores de fundo: De uma forma análoga aos dispositivos de entrada, também para estes foram utilizadas condutas no SWMM. Estas condutas têm a função de fazer a ligação entre o corpo da bacia e a rede de coletores, por isso, é importante salientar que o seu diâmetro foi ajustado de modo a que o caudal



máximo a ser encaminhado para a rede de coletores não ultrapassa-se, no mínimo, 50 % da capacidade máxima do coletor recetor;

- Dispositivos de segurança: Foram adicionados ao corpo da bacia orifícios que, caso fosse atingida a capacidade máxima de armazenamento da bacia, entrariam em funcionamento. Estes elementos escoam para a superfície de modo a prevenir um possível rebentamento do corpo da bacia ou das condutas subterrâneas.

É importante referir que no estudo realizado apenas foi tida em consideração a componente hidráulica das bacias de retenção, isto é, as bacias modeladas têm um comportamento hidráulico eficaz. Caso fosse elaborado um projeto real teria de ser feita uma pormenorização muito mais exaustiva a cada componente da bacia.

### **4.3.3 Soluções implementadas**

Resumidamente, a implementação das bacias foi feita seguindo estes passos:

- O primeiro passo foi identificar os caudais a desviar para cada solução, optou-se por redirecionar as condutas e caminhos superficiais com quantidades de água significativas. Outras condutas, consideradas residuais, não foram desviadas;
- O passo seguinte consistiu em pré-dimensionar as bacias de retenção, com recurso à equação (2.15) apresentada no subcapítulo 2.8.3. É importante salientar que os volumes calculados no pré-dimensionamento não foram os volumes de dimensionamento finais, esses foram obtidos através de processos iterativos no decorrer das várias simulações;
- A altura atribuída às das bacias foi de 2.6 metros, o valor foi o mesmo para todas as bacias;
- O estrangulamento do caudal foi feito através da diminuição da conduta que estabelecia a ligação entre a bacia e a rede de coletores a jusante, foi tido em consideração o caudal máximo que a conduta da rede poderia escoar e foi feito um dimensionamento em função do caudal máximo que se pretendeu escoar.

No Quadro 4.1 é referida informação acerca das áreas de cada bacia, volumes e percentagem de caudal estrangulado para cada solução.



**Quadro 4.1 – Quadro-resumo das características das bacias de retenção aplicadas a cada solução**

| Solução | Praça da República | Estacionamento Mercado | Area Bacia Praça (m <sup>2</sup> )* | Area Bacia Estacionamento (m <sup>2</sup> )* | Volume Bacia Praça (m <sup>3</sup> ) | Volume Bacia Estacionamento (m <sup>3</sup> ) | % de Caudal Estrangulado** |
|---------|--------------------|------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|---|----------------------------|
| 0       | -                  | -                      | -                                   | -  | -                                    | -   | -                          |
| 1       | Sim                | -                      | 1500                                | -  | 3900                                 | -   | 50                         |
| 2       | -                  | Sim                    | -                                   | 500  | -                                    | 1300  | 20                         |
| 3       | Sim                | Sim                    | 150                                 | 475  | 390                                  | 1235  | 20                         |

\*Áreas das secções das bacias de retenção, por motivos de simplificação optou-se pela mesma área ao longo de toda a altura (h = 2.6 m para todas as bacias)

\*\*Em relação à capacidade máxima do coletor receptor

Outro indicador importante é a área drenante para cada uma das bacias, no Quadro 4.2 pode ler-se os valores para cada uma das bacias:

**Quadro 4.2 – Áreas drenantes para cada uma das bacias**

| Bacia                  | Área Drenante (Km <sup>2</sup> ) |
|------------------------|----------------------------------|
| Praça da República     | 0.67                             |
| Estacionamento Mercado | 0.67 + 0.43 = 1.1                |

#### 4.3.4 Resultados

Os resultados são apresentados por local de forma a simplificar a comparação entre os mesmos para as diferentes soluções. Não irão ser apresentados os resultados obtidos em todas as condutas, apenas os mais representativos, por limitações de espaço no documento. Foram realizadas simulações para a chuvada com tempo de recorrência de 100 anos.

##### 4.3.4.1 Local 1

Os gráficos das Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17 são relativos ao escoamento na rede coletores para diversas ruas pré-Praça da República. Neste local seriam de esperar resultados iguais para todas as soluções, mas tal não acontece. Este acontecimento pode ser justificado com a instabilidade do *software* para modelos de grande dimensão, tópico será abordado posteriormente.

Independentemente dos resultados não serem iguais, podem observar-se semelhanças ao nível do comportamento da rede, sendo que são atingidos valores máximos muito próximos e por volta do mesmo minuto de simulação.

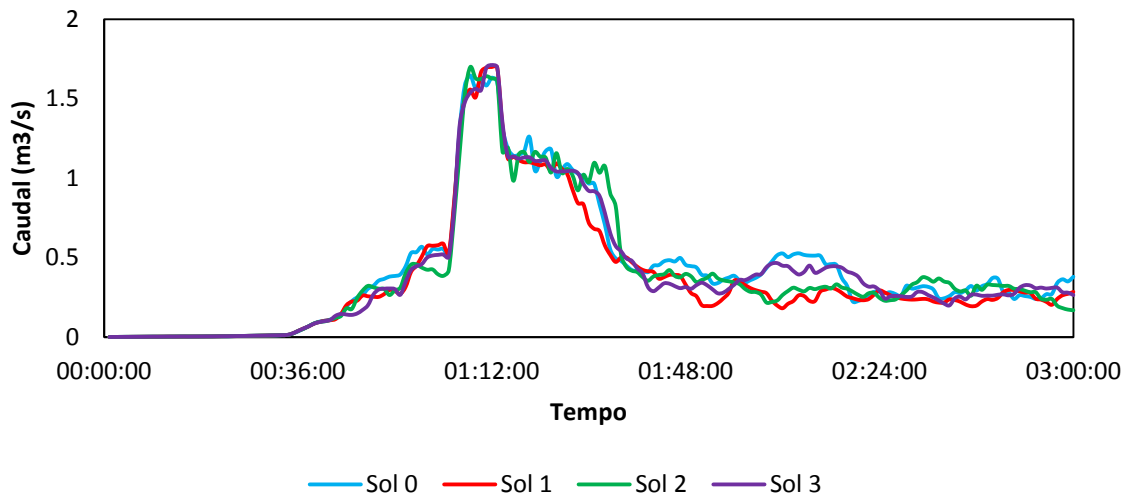


Figura 4.15 – Caudal registado nos coletores (214.1 + 213.1) da Rua Lourenço de Azevedo

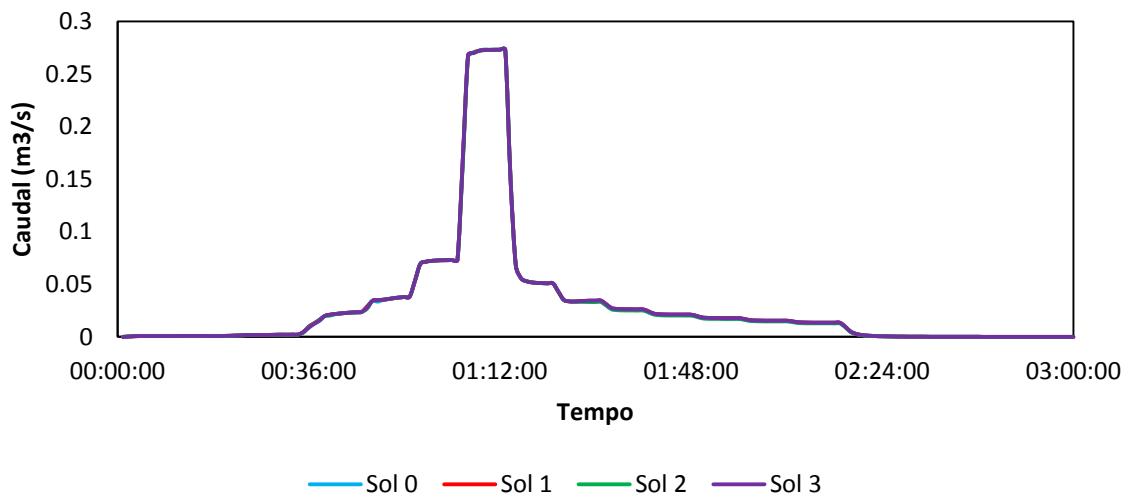


Figura 4.16 - Caudal registado nos coletores (124.1) da Rua Almeida Garrett

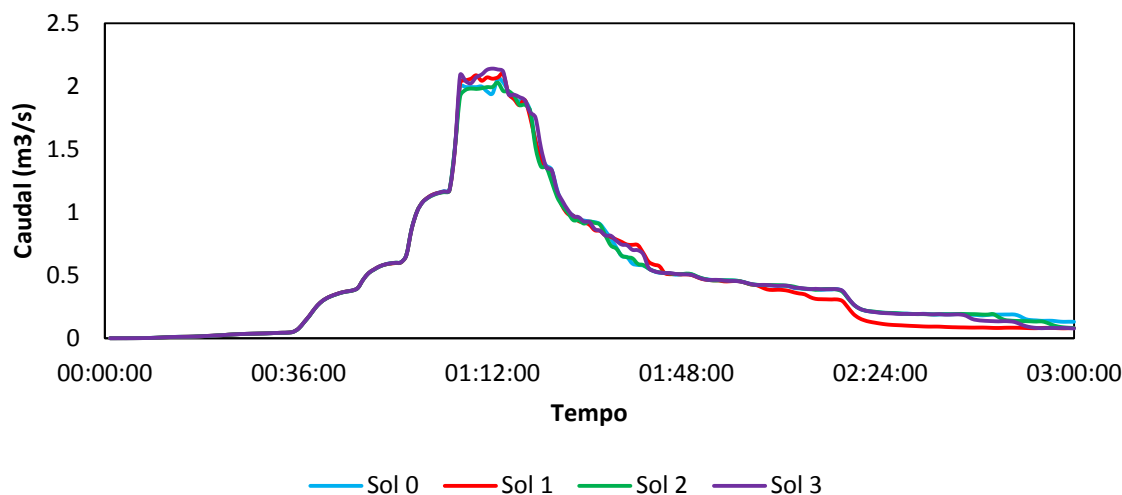


Figura 4.17 - Caudal registado nos coletores (129.1) da Rua Alexandre Herculano

Os gráficos apresentados nas Figura 4.18 e Figura 4.19 são referentes a duas leituras de caudal na rede superficial para ruas pré-Praça da República. Na rede superficial observa-se o mesmo acontecimento da rede de coletores, não sendo valores exatamente iguais para cada solução, são valores e comportamentos semelhantes. Na Figura 4.18 os valores obtidos para a solução 1, em comparação com as outras soluções, não foram os melhores.

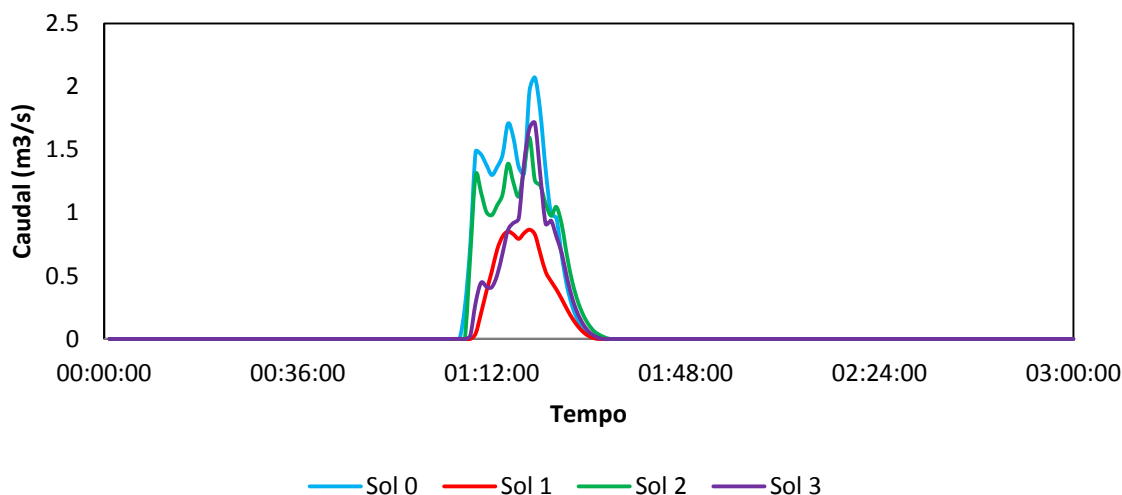


Figura 4.18 - Caudal registado à superfície (212.A) da Rua Lourenço de Azevedo

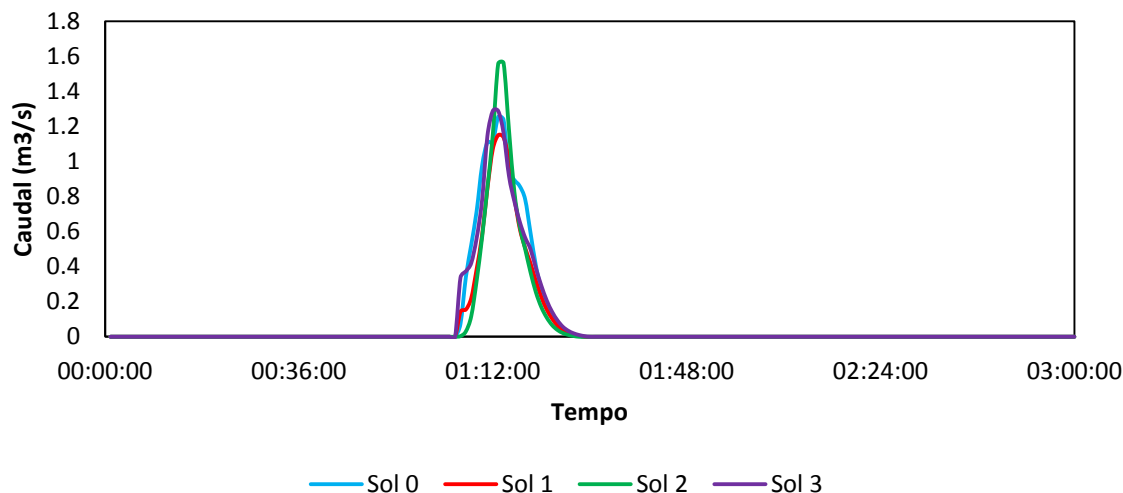


Figura 4.19 - Caudal registado à superfície (129.A) na Rua Alexandre Herculano

#### 4.3.4.2 Local 2

O gráfico apresentado na Figura 4.20 representa o caudal escoado nos coletores pós-praça.

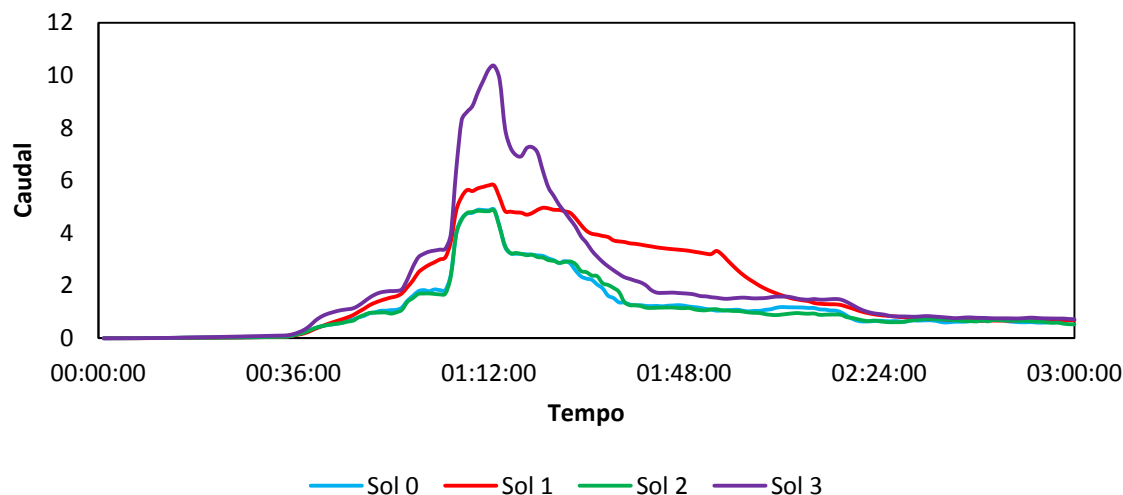


Figura 4.20 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1\_536.1) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República

Como era de esperar, para as soluções com bacia de retenção na Praça o caudal nos coletores aumentou. Este aumento resulta do encaminhamento de diversas condutas e captação da água da superfície para a bacia de retenção.

O gráfico apresentado na Figura 4.21 indica o caudal registado num caminho superficial a jusante da Praça da Republica. Os resultados obtidos mostram uma quantidade de água à superfície que vai ao encontro dos resultados registados na rede de coletores, para as soluções sem bacia de retenção na Praça existe uma maior quantidade de caudal à superfície.

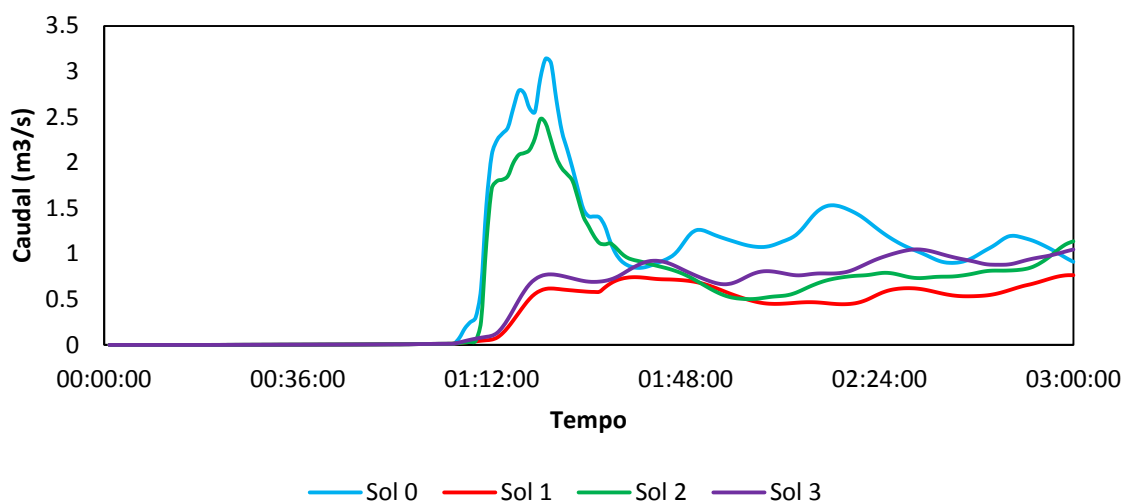


Figura 4.21 - Caudal registado à superfície (138.A + PON\_2047.A) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República

#### 4.3.4.3 Local 3

O caudal registado nos coletores para o local 3 é apresentado na Figura 4.22, o caudal registado à superfície é apresentado na Figura 4.23.

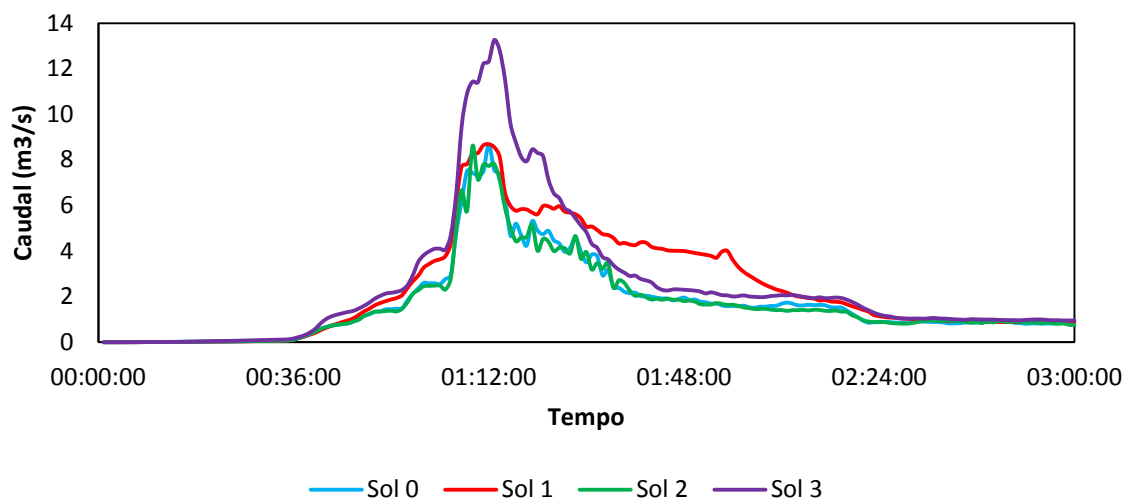


Figura 4.22 - Caudal registado nos coletores (308.1) da Av. Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado

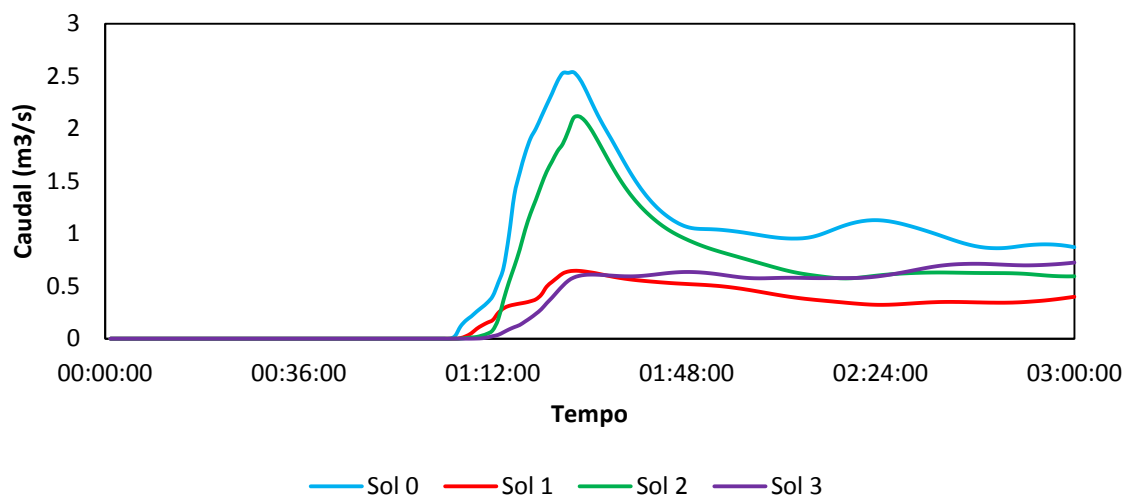


Figura 4.23 - Caudal registado à superfície (340.A) na Av. Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado

Quer a nível superficial, quer a nível de coletores os resultados obtidos são os esperados, isto é, as curvas obtidas nos locais 2 e 3 têm traçados sobreponíveis. Estes valores são compreensíveis pois não existe qualquer alteração física entre os dois locais referidos.

#### 4.3.4.4 Local 4

Os resultados para o local 4 são apresentados nos gráficos das Figura 4.24 e Figura 4.25.

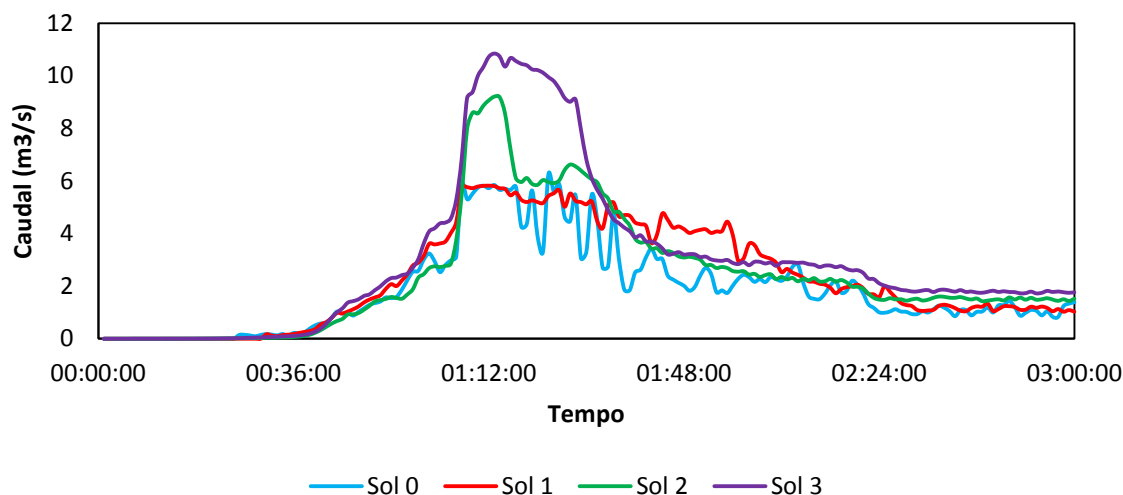


Figura 4.24 - Caudal registado nos coletores (516.1) da Av. Sá da Bandeira, pós Estacionamento do Mercado

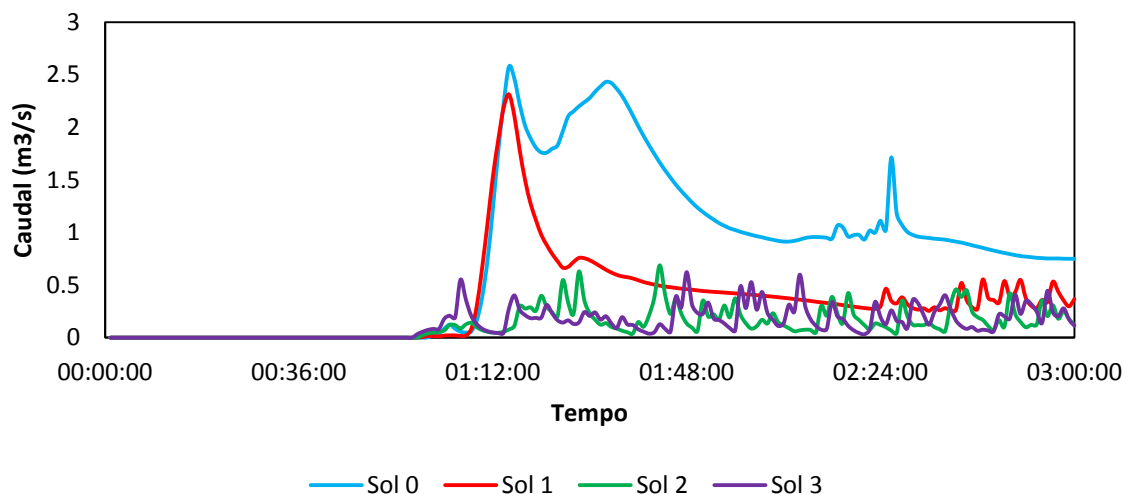


Figura 4.25 - Caudal registado à superfície (588.A) na Av. Sá da Bandeira, pós Estacionamento do Mercado

No local 4, para as soluções 2 e 3, já se podem verificar os efeitos da implementação da bacia no estacionamento do Mercado Municipal. A quantidade de caudal registada à superfície é muito menor para essas soluções. Por oposição, nas soluções 0 e 1, verificamos quantidades de caudal significativamente superiores.

#### 4.3.4.5 Local 5

Os resultados para o local 5 são apresentados nos gráficos das Figura 4.26 e Figura 4.27.

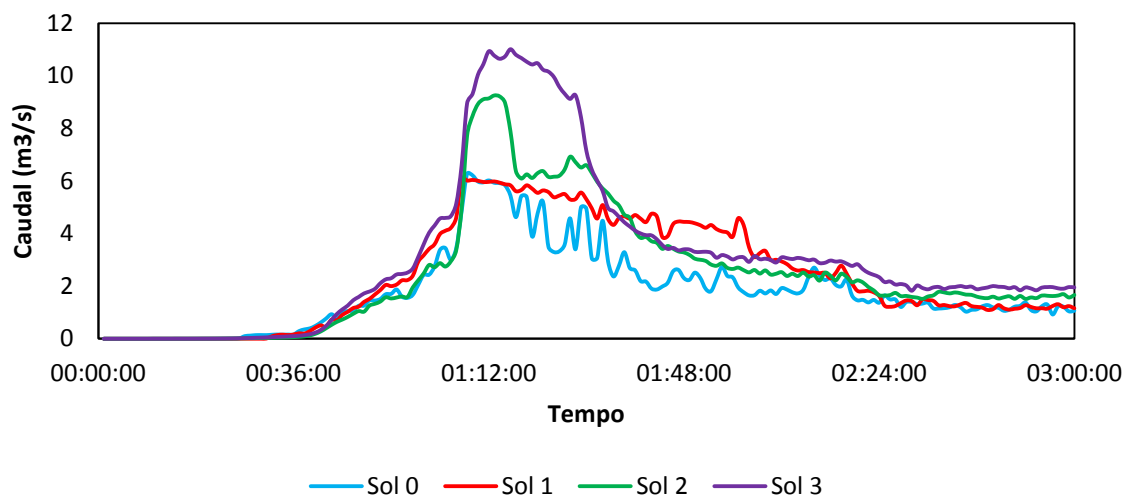


Figura 4.26 - Caudal registado nos coletores (517.1 + 588.1) da Praça 8 de Maio

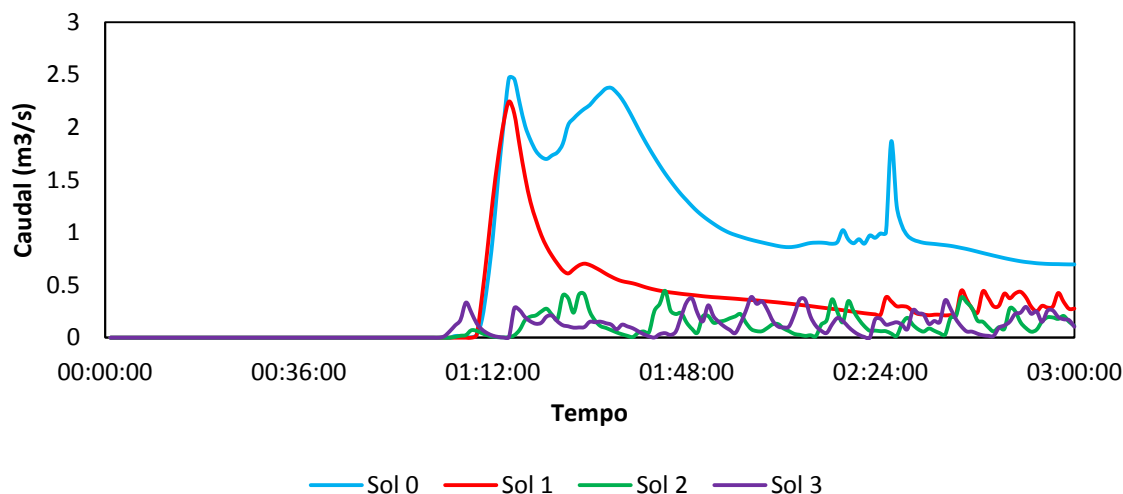


Figura 4.27 - Caudal registado à superfície (1\_677.A) na Praça 8 de Maio

A conclusão retirada anteriormente relativamente à sobreponibilidade das curvas de caudal nos locais 2 e 3 pode ser, de forma análoga, aplicada às curvas de caudal dos locais 4 e 5. O facto de não existirem alterações entre os locais referidos leva à semelhança de resultados obtidos.



#### 4.3.5 Análise de resultados

Após análise dos resultados obtidos é possível retirar algumas conclusões relativamente à viabilidade de cada solução, tanto a nível hidráulico, como a nível económico.

Na análise a nível de comportamento hidráulico é possível concluir o seguinte para cada solução:

- Solução 1 – A bacia não resolve os problemas para qual foi pensada. Como é possível verificar na Figura 4.27, a diferença de caudal existente à superfície em comparação com a solução 0 não é significativa. Após se observar tal resultado, procurou-se justificar o fraco desempenho desta solução e chegou-se à conclusão que o problema residia no facto do desvio feito na praça se situar demasiado a montante. Esta condicionante, aliada à contínua entrada de água superficial nos coletores nas zonas pós-praça e por limitações da capacidade da rede, leva à entrada em carga do sistema. Soluções como o aumento do volume da bacia, juntamente com um maior estrangulamento do caudal foram analisadas mas levariam a uma bacia de retenção com um volume exageradamente elevado.
- Solução 2 – A bacia na zona do estacionamento à frente do Mercado Municipal resolve o problema. Os resultados obtidos com esta solução tiram água da superfície na Praça 8 de Maio, encaminhando-a para os coletores de uma forma eficaz. Um problema poderá ser a quantidade de água superficial até à zona onde esta é desviada.
- Solução 3 – A implementação de bacias na Praça e estacionamento do Mercado, assim como sucedido na solução 2, também resolve os problemas de água à superfície na Praça 8 de Maio. Esta solução, no que diz respeito à análise hidráulica, é a melhor de entre as soluções propostas. A quantidade de água na Praça 8 de Maio é residual e, comparativamente às outras soluções, ao longo da bacia a água à superfície tem valores aceitáveis. Estes resultados já seriam de esperar visto que é feito um desvio de água em dois locais da rede. Poderia pôr-se a hipótese do problema ocorrido na solução 1, água a mais na rede de coletores, mas isso não acontece porque o local onde o sistema entra em carga está a jusante do desvio de águas para a bacia de retenção do estacionamento e a montante do local onde acontece a devolução de água para a rede de coletores.

Na análise económica apenas se teve em consideração a estimativa do valor de custo de construção das bacias e não dos danos que cada solução evitaria. O método para estimar os custos foi explicado no subcapítulo 3.2.4. O custo de cada solução é apresentado no Quadro 4.3:

Quadro 4.3 – Estimativa do custo para cada solução

| Solução | Volume                  | Custo (€)    |
|---------|-------------------------|--------------|
|         | Total (m <sup>3</sup> ) |              |
| 1       | 3900                    | 468 000.00 € |
| 2       | 1300                    | 156 000.00 € |
| 3       | 1625                    | 195 000.00 € |

No quadro de estimativa de custos é possível concluir que a solução 1 é a menos viável economicamente, as soluções 2 e 3 possuem custos muito semelhantes, sendo a 2 a mais barata.

Uma decisão final acerca de qual a melhor solução a implementar teria de englobar um estudo mais pormenorizado dos custos, no entanto a solução 1 é claramente mais desfavorável do ponto de vista hidráulico e económico.

#### 4.3.6 Observações sobre simulações de sistemas de drenagem dual e bacias de retenção no SWMM

A instabilidade do modelo no decorrer das simulações foi um problema que requereu bastante tempo de estudo para que fosse compreendida. Essa instabilidade pode ser justificada, segundo o manual do SWMM, por instabilidades numéricas nos cálculos e como indica Rossman (2010) o *software* não identifica, automaticamente, as instabilidades existentes numa determinada simulação, essa verificação terá de se feita pelo utilizador. As instabilidades verificadas no modelo podem acontecer quando no escoamento nas condutas ou na quantidade de água nos nós, se verifiquem pequenas oscilações.

O manual do SWMM propõe algumas medidas como: reduzir os intervalos de tempo das simulações; usar a opção de passos de tempo variáveis com um fator de passo de tempo menor; selecionar a opção de ignorar o tempo de inércia da equação de momento de Saint-Venant ou selecionar a opção de alongamento artificial das condutas curtas, todas estas medidas foram testadas mas não resolveram totalmente o problema.

No sentido de comprovar a instabilidade e a diferença no escoamento a montante das bacias de retenção no SWMM, foi utilizado um modelo dual simples, igual ao da Figura 4.10 – Modelo simplificado final. Com base nesse modelo, foram corridas simulações com as seguintes condições:

- Simulação 1 – Simulação com o modelo simplificado inicial;

- Simulação 2 – Introdução de uma bacia de retenção entre as caixas de visita 2 e 3, com desvio da água superficial e do coletor para a bacia, simulação com essa alteração;
- Simulação 3 – Anulando as alterações feitas na simulação 2, tornando-o igual ao modelo do passo 1, foi corrida nova simulação.

Na Figura 4.28 é possível observar um esquema representativo das simulações descritas em cima.

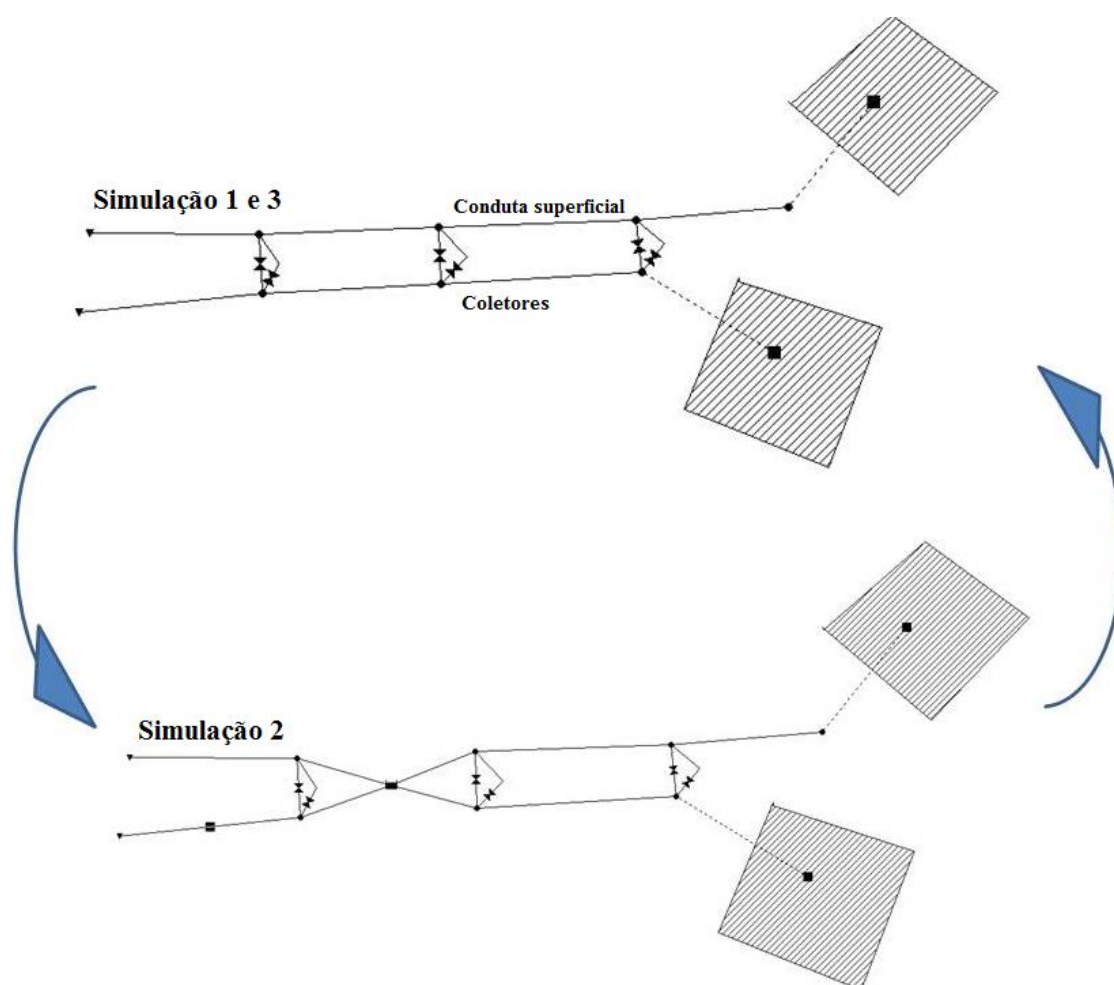


Figura 4.28 – Esquema representativo das simulações efetuadas

Após executadas as simulações, concluiu-se que nas condutas a montante da bacia foram registadas variações ao longo da simulação. Como é possível verificar nos gráficos das Figura 4.29 e Figura 4.30.

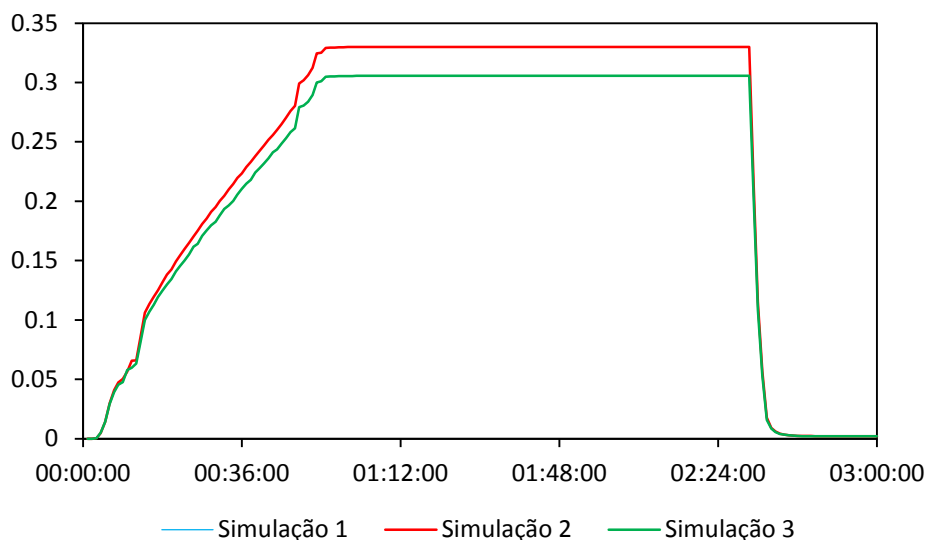


Figura 4.29 – Altura de água à superfície a montante da bacia de retenção no modelo simplificado

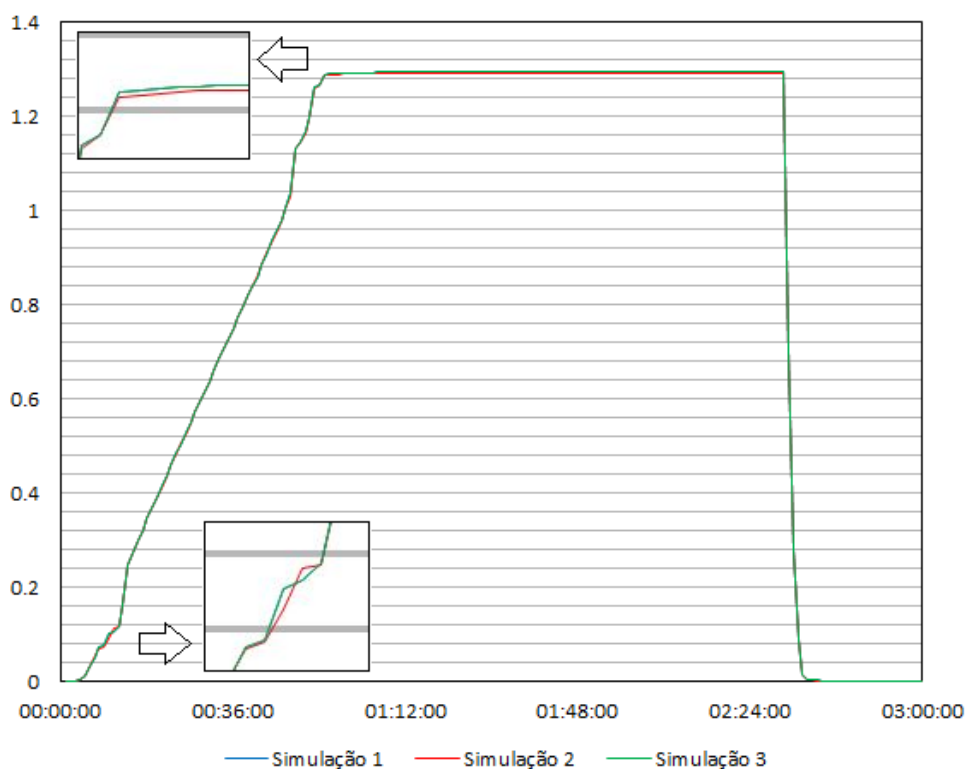


Figura 4.30 – Caudal registado à superfície a montante da bacia de retenção no modelo simplificado

Os resultados obtidos para a conduta a montante da bacia foram similares aos apresentados para a rede superficial. É importante referir que após a simulação 2, a mesma rede foi alterada

de modo a ficar com a configuração inicial e os resultados obtidos na simulação 1 e 3 são exatamente iguais.

Com estes resultados, é possível verificar que a implementação de uma bacia de retenção numa determinada rede irá provocar resultados diferentes nas condutas a montante da localização da bacia. Extrapolando os resultados obtidos para o modelo bacia da zona central de Coimbra, que possui cerca de 2000 nós e 7500 condutas, justificam-se assim as diferenças verificadas nos resultados obtidos no modelo.

## 5 CONCLUSÕES/TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O crescimento das cidades e as constantes alterações climáticas têm levado a um aumento da frequência com que ocorrem cheias. A constante alteração morfológica do terreno, nos grandes centros urbanos, leva à impermeabilização dos solos, que por sua vez, faz com que aumente o caudal à superfície, o que, conseqüentemente leva a inundações.

Devido a este fator, não se torna viável o aumento constante das redes de drenagem. Isto porque caso se assumisse tal medida, a partir de certos valores de caudal a drenar, os elementos da rede iriam ter dimensões exageradamente grandes.

Por esta razão é importante estudar medidas que consigam combater estes problemas de uma forma eficaz, quer a nível hidráulico, quer a nível económico. É assim que nasce o conceito de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável, SUDS. Os SUDS são conceitos, que ao ser aplicados às cidades e respetivas redes de drenagem, têm o objetivo de alterar o seu escoamento, tornando-o o mais parecido possível com o escoamento registado em meio natural, deste modo o risco para a ocorrência de cheias diminui.

No presente trabalho foram estudadas hipóteses onde foram introduzidas bacias de retenção. A principal função deste tipo de bacias é a de armazenar água proveniente da chuva, atuando como reguladora de caudal, permitindo a restituição do caudal consoante os limites da rede existente. Em muitos casos esta não é a única vantagem das bacias de retenção, outras como: Servir como local de armazenamento de água, podem levar à criação de espelhos de água e com isto criar espaços verdes em locais urbanizados, levar ao aumento da qualidade da água pluvial ao funcionarem como estações de tratamento de água reduzindo o teor de sólidos em suspensão e de matéria orgânica, servir de proteção a águas subterrâneas ao impedirem a infiltração de água pluvial no solo ou até como reservas de água para rega ou incêndios.

Para implementação das bacias foi necessário trabalhar num modelo da bacia da zona central de Coimbra. Esse modelo foi modelado com drenagem dual, pois, como foi observado, a bacia em estudo possuía problemas relativos à entrada de água na rede de coletores, existindo água à superfície sem a rede de coletores ter entrado em carga. A drenagem dual tornou-se assim num dos principais focos de estudo deste trabalho.

Ao se adaptar o modelo inicial da bacia para um modelo com drenagem dual, surgiram problemas relativamente à forma como a água à superfície entrava nos coletores e a que regras obedecia, após inúmeros testes, conseguiu-se ultrapassar o problema adaptando a rede com elementos que permitiam o controlo da entrada da água através de uma curva altura-

caudal. É importante referir que, da mesma forma que se arranjou uma solução para a entrada de água nos coletores, também se aplicou o mesmo conceito de modo a ser possível a saída de água dos coletores, caso estes entrassem em carga.

Uma vez tendo o sistema de drenagem dual a funcionar corretamente, a partir desse ponto foi possível simular a chuvada com tempo de recorrência de 100 anos para os diferentes cenários estabelecidos, onde o único fator variável era a localização da ou das bacias.

Após análise dos resultados foi possível concluir quais as melhores soluções, quer a nível hidráulico, quer a nível económico. A solução 1, com bacia na Praça da República, foi a que obteve os resultados mais fracos, a nível hidráulico não corrige o problema, pelo facto de ser implementada numa zona da bacia demasiado a montante, a nível económico também é a pior pois é a que requer um maior volume, logo um preço muito superior. As soluções 2 e 3, corrigem o problema de água à superfície na zona da Praça 8 de Maio, mas a montante da zona onde está implementada a bacia do estacionamento do Mercado Municipal, apenas a solução 3 apresenta bons resultados, isto acontece pelo facto de possuir uma bacia na zona da Praça da República. Foi também elaborada uma pequena previsão económica de cada solução, onde mais uma vez, a solução 1 é a mais dispendiosa, a solução 2 terá um custo de cerca de  $\frac{3}{4}$  do custo total da solução 3. Como já foi referido, teria de ser feito um estudo com maior pormenor para se poder concluir qual a melhor solução a adotar, pois teria de se fazer uma estimativa dos custos associados aos danos causados pela presença de água à superfície na solução 2 entre a Praça e o estacionamento do Mercado. É importante referir que caso se desejasse aplicar o estudo desenvolvido, seria possível diminuir bastantes os custos da solução 2 e 3, pois o estacionamento existente no Mercado poderá ter capacidade para funcionar como bacia de retenção.

Os resultados obtidos possuem algumas instabilidades, essas instabilidades podem ser justificadas com a presença dos diferentes tipos de bacias no modelo. Foi feito um estudo num modelo dual simplificado, que demonstra que a introdução de bacias num dado sistema altera o seu hidrograma de escoamento a montante da bacia, teoricamente esta alteração não deveria acontecer, mas realmente é comprovada para casos onde se implementem bacias de retenção.

## 5.2 Trabalhos Futuros

O trabalho realizado é um bom ponto de partida para estudos futuros que englobem análises onde se possam integrar outros tipos de SUDS em redes de drenagem dual. Seria extremamente interessante a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho, com os resultados de outros que englobassem outro tipo de SUDS para a bacia da zona central de Coimbra. Desse modo seria possível observar as melhores soluções, a nível económico, a nível de ordenamento de território e, até mesmo, a melhores *performances* da rede.

Existem outras vertentes onde o trabalho realizado pode ser utilizado. Por exemplo, a análise e quantificação do risco de inundações, antes e depois, da aplicação dos SUDS. Essas avaliações poderão englobar análises dos danos diretos, indiretos ou sociais das inundações registadas.

Elaborar um estudo mais aprofundado sobre as limitações e potencialidades do SWMM relativamente à drenagem dual, e caso fosse necessário aproveitar o fato do SWMM ser um *software open source* e implementar novos algoritmos. Nesse sentido, utilizar esses estudos de forma a ter um conhecimento mais profundo acerca dos parâmetros que possam influenciar o tipo de escoamento para o mesmo modelo.

Este trabalho pode servir de base para quem pretenda fazer estudos nesta, ou noutra bacia, utilizando outros *softwares* com maiores potencialidades. Seria interessante comparar resultados obtidos entre os diversos modelos e *software* e, *poderia* também permitir comparar as alterações que se sucederiam no escoamento aquando a implementação de bacias noutros *softwares*.

Outros tipos de trabalhos passíveis de serem desenvolvidos estarão relacionados com a tecnologia AOFD e análise do modelo digital do terreno. Por exemplo elaborar um estudo mais aprofundado acerca de possíveis interações entre a rede gerada e a rede de coletores.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adeyemo, O. J. (2007). Surface Runoff Modelling for Pluvial Urban Flooding under Extreme Conditions. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Allitt, R., Blanksby, J., Djordjevic, S., Maksimovic, C. e Stewart, D. (2009). Investigations into 1D-1D and 1D-2D Urban Flood Modelling. WaPUG Autumn Conference. Blackpool, Inglaterra.

Balmforth, D., Digman, C., Kellagher, R. e Butler, D. (2006). Designing for exceedance in urban drainage – good practice. Londres, CIRIA.

bela@ (2013). "<http://umpigodeluz.blogspot.pt/>." Um Pingo de Luz (acedido em 12-07-2013).

Brown, R. R., Keath, N. e Wong, T. (2009). "Urban Water Management in Cities: Historical, Current and Future Regimes." *Water Science and Technology* 59(5): 847-855.

Burian, S. J. e Edwards, F. G. (2002). "Historical Perspectives of Urban Drainage." *Global Solutions for Urban Drainage*.

Burian, S. J., Nix, S. J., Durrans, S. R., Pitt, R. E., Fan, C.-Y. e Field., R. (1999). "Historical development of wet-weather flow management." *Journal of Water Resources Planning and Management* 125(1): 3-11.

Butler, D. e Davis, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Oxon, Spon Text.

Butler, D. e Parkinson, J. (1997). "Towards sustainable urban drainage." *Water Science and Technology* 35(9): 53-63.

camarasorriso@ (2013). "<http://www.camarasorriso.mt.gov.br/noticia/parlamentar-cobra-investimentos-em-drenagem-de-aguas-pluviais>." Câmara Municipal de Sorriso (acedido em 16-07-2013).

Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W. (1988). *Design Storms - Chapter 14*. Em: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company.

coimbraantiga@ (2013). "<http://coimbraantiga.blogspot.pt/>." Fotos de Coimbra Antiga (acedido em 03-07-2013).

CRC@ (2012). "<http://watersensitivecities.org.au/what-is-a-water-sensitive-city/>." CRC for Water Sensitive Cities (acedido em 15-03-2013).

Crossette, B. e Kollodge, R. (2011). Relatório sobre a Situação da População Mundial 2011. UNFPA. Brasil.

Dunkerley, D. (2008) Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22: 5024–5036. Victoria, Austrália.,

Estellés, M. A. A. (2010). Analysis of rainfall data and rainfall forecasting techniques used as input for urban pluvial flood simulation and prediction. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

gazettenet@ (2013). "<http://www.gazettenet.com/home/4968871-95/storm-thursday-snow-coastal>." Gazettenet.com (acedido em 12-07-2013).

Hill, D. (1984). A history of engineering in classical and medieval times., Croom Helm Ltd.

Hodge, A. T. (1992). Roman aqueducts & water supply. London, Gerald Duckworth & Co. Ltd.

Konig, A., Schilling, W. e Saegrov, S. (2002). "Damage Assessment for Urban Flooding". Ninth International Conference on Urban Drainage. Portland.

Leandro, J. (2008). Advanced Modelling of Flooding in Urban Areas Integrated 1D/1D and 1D/2D Models. Tese de Doutoramento, University of Exeter.

Leitão, J. P. (2009). Enhancement of Digital Elevation Models and Overland Flow Path Delineation Methods for Advanced Urban Flood Modelling. Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering - Imperial College London, London.

Leitão, J. P., Almeida, M. d. C., Simões, N. E. e Martins, A. (2012). Methodology for qualitative urban flooding risk assessment. 9th International Conference on Urban Drainage Modelling. Belgrado, Sérvia.

---

Leitão, J. P., Matos, J. S., Prodanovic, D. e Maksimovic, C. (2008). Modelos de simulação do escoamento superficial em meio urbano - potencialidades e limitações. 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico. Covilhã.

Lima, J. P., Sá Marques, J. A. e Sousa, J. (2013). Cap. 2 - Sistemas de Drenagem. Hidrologia Urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Maksimovic, C. (1996). "Fundamentals of physically-based rainfall/runoff models" in Marsalek, J., Maksimovic, C., Zeman, E., e Price, R., (Ed.), NATO Advanced Study Institute on Hydroinformatics Tools for Planning, Design, Operation and Rehabilitation of Sewer Systems. Academic Publishers. Harrachov, República Checa.

Maksimovic, C., Prodanovic, D., Leitão, J. P., Boonya-Aroonnet, S., Allitt, R. e Djordjevic, S. (2009). "Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding." *Journal of Hydraulic Research* 47(4): 512-523.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B. e Djordjevic, S. (2004). "Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding." *Journal of Hydrology (Amsterdão)* 299: 284-299.

Matias, M. G. B. (2006). Bacias de Retenção - Estudo de Métodos de Dimensionamento. FEUP. Porto, Universidade do Porto.

Portela, M. M., Marques, P. e Carvalho, F. F. d. (2000). Hietogramas de Projeto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS). 5º Congresso da Água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo Século, Lisboa.

Rossman, L. A. (2010). Storm Water Management Model - User's Manual, Version 5.0. Cincinnati, National Risk Management Research Laboratory.

Sá Marques, J. A., Simões, N. E. e Pina, R. (2013). Cap. 3 - Simulação em Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais. in Hidrologia Urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Sá Marques, J. A. e Sousa, J. (2009). Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais. Coimbra, Imprensa da Universidade de Coimbra.

---

Shaw, E., M., Beven, K., J., Chappell, N., A. e Lamb, R. (2011). *Hydrology in Practice*, Spon Press.

Simões, N. E. (2012). *Urban Pluvial Flood Forecasting*. Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R., Marques, A. S. e Maksimovic, C. (2010). *Urban Floods Monitoring in Coimbra, Portugal*. 10<sup>a</sup> International Precipitation Conference. Coimbra, Portugal.

Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R., Sá Marques, J. A., Maksimovic, C. e Gonçalves, G. (2010). "Modelação Hidráulica de Inundações Urbanas. A Inundação de 9 de Junho de 2006 em Coimbra."

Skilton, D. (2010). *Implementation of Blue-Green Corridors in Urban Environments*. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College London, Londres.

STU, A. d. I. e. (1994). *Guide Technique des Bassins de Retenue d'Eaux Pluviales*. Tec&Doc, Lavoisier. Paris, França.

SWMM@ (2013). "<http://www.epa.gov/athens/wwqts/html/swmm.html>." Storm Water Management Model (acedido em 14-03-2013).

thehistoryblog@ (2013). "<http://www.thehistoryblog.com/>." The History Blog (acedido em 11-03-2013).

Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS/ABRH.

Wong, T. (2008). *Building Water Sensitive Cities*. EDAW & AECOM.