



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

Avaliação do Impacto dos Órgãos de Entrada no Comportamento dos Sistemas de Drenagem Urbanos

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

Autor

Elva Marlene Anastácio Matias

Orientador

Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões

Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques

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, Fevereiro, 2016

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização do presente trabalho. A todos eles os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e ao Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques, pela partilha de conhecimentos, disponibilidade e apoio permanente, indispensável à realização deste trabalho.

Em segundo lugar um agradecimento muito especial à minha família. Aos meus pais, pelo apoio incondicional, esforço, incentivo e dedicação ao longo de toda a minha formação. À minha irmã Rita e aos meus irmãos de coração Inês e Diogo, pela companhia, diversão e me fazerem sempre acreditar nas minhas capacidades. Aos meus avós pelos valores transmitidos e seus conselhos tão sábios.

Por último mas não menos importantes agradecer aos meus amigos. Às minhas amigas de longa data Sarah e Ana Maria, pela sua amizade incondicional, pelos momentos de diversão proporcionados e acima de tudo pela compreensão de não poder estar sempre presente ao longo dos últimos anos. Aos meus amigos que conheci ao longo do meu percurso académico com quem além de partilhar casa partilhei momentos de angústia, alegria, descontração e companheirismo, Telma, João, Vanessa, Zacarias, Rita, Carla e Paulo. Um especial agradecimento ao Tomé por toda a paciência e auxílio na formação do presente trabalho.

RESUMO

Ao longo dos últimos anos têm-se verificado um acentuado crescimento da população urbana, levando a uma maior impermeabilização do solo. Este facto aliado às alterações climáticas e ao inadequado planeamento dos sistemas de drenagem tem provocado elevados impactos nas sociedades, essencialmente devido a problemas relacionados com o aumento da frequência e do nível das inundações.

Os sistemas de drenagem pluviais urbanos são uma infraestrutura indispensável ao bom funcionamento dos meios urbanos, desempenhando um papel fundamental na intercepção, recolha, transporte e rejeição em meios apropriados das águas pluviais. A sua incapacidade para drenar toda a água ocorre fundamentalmente pela falha na entrada de água nos coletores ou devido ao facto destes entrarem em carga, levando a um aumento do caudal superficial, escoando este através de caminhos preferenciais, acumulando-se posteriormente em zonas baixas, originado deste modo inundações.

O presente trabalho tem como objectivo analisar uma rede de drenagem usando as mais modernas técnicas de modelação de drenagem urbana, nomeadamente, modelar um sistema de drenagem dual 1D/2D, situado na zona central da cidade de Coimbra, recorrendo ao *software InfoWorks ICM*. O modelo utilizado permitiu uma análise completa e detalhada das causas que levam a problemas relacionados com inundações nesta zona, sendo uma das principais causas detectadas a ineficiência por parte dos órgãos de entrada da rede, não permitindo uma eficaz intersecção do escoamento superficial. Com o modelo utilizado e identificados os problemas, o presente trabalho pretende uma resolução dos mesmos através de soluções localizadas, as quais consistem na implementação de grelhas transversais aos arruamentos, só possíveis de avaliar corretamente com estes modelos.

No decorrer do trabalho foi possível concluir que a principal causa dos problemas associados a inundações pluviais na zona central da cidade de Coimbra prendem-se pelo facto da mesma não estar munida de uma rede de drenagem eficiente. Estes problemas seriam totalmente resolvidos com uma reestruturação ao nível do número e da localização dos órgãos de entrada da rede. Sendo este o principal problema, também foi detectado em algumas zonas, uma insuficiente capacidade na rede de colectores de drenagem.

Palavras-chave: Drenagem Urbana, órgãos de entrada, modelação hidráulica, drenagem dual.

ABSTRACT

Over the past few years the increase of the urban population, combined with climate change and the inadequate planning of drainage systems, has had great impacts on society, mostly due to the increase number of flooding situations.

Urban stormwater drainage systems are an indispensable infrastructure in urban areas and have a fundamental role in the interception, collection, transportation and rejection of stormwater. Its inability to drain all water occurs when water fails to enter in the system or the system surcharges, which leads to an increase of superficial flow. In these situations, water flows through preferential paths, later accumulate in local depressions, originating floods.

The purpose of the present work is to analyze a network of drainage using the most modern urban drainage modeling techniques, namely, to model a draining system in the central area of the city of Coimbra, with a 1D/2D model, by using *Infoworks ICM software*. The model used allowed a more complete and detailed analysis of the causes that lead to floods in this area. One of the main causes is the inefficiency of the network inlets, which do not have an effective intersection of the superficial flow. With the use of dual drainage models, this work intends to evaluate solutions by implementing transversal grids on the streets, and assess its efficiency, only possible with dual drainage models.

It was shown and quantified that, in this case study, despite insufficient capacity in some drainage network conduits, the main cause of pluvial floods is the insufficient number and capacity of inlets. With 1D/2D models it was possible to quantify the water that flows at the surface, in the sewer system and its interactions. With the correct quantification of this phenomenon, implementation of new network inlets was proposed to solve flooding problem in this area.

Keywords: Urban drainage, inlets, hydraulic modeling, dual drainage.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Estrutura do trabalho.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Introdução	3
2.2 Drenagem Urbana	3
2.3 Evolução da drenagem urbana	6
2.4 Impactos da Urbanização	9
2.5 Inundações Urbanas	12
2.6 Modelação Hidrológica e Hidráulica	14
2.6.1 Introdução	14
2.6.2 Precipitação	15
2.6.3 Modelos Hidrológicos	17
2.6.4 Modelos Hidráulicos	20
2.6.5 Softwares	26
2.7 Drenagem urbana e Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	28
2.7.1 Modelos Digitais de terreno	28
2.8 Dispositivo de entrada	30
2.8.1 Introdução.....	30
2.8.2 Impactos dos Dispositivos de Entrada nos Sistemas de Drenagem	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Introdução	33
3.2 Caso de estudo	33
3.3 Precipitação.....	36
3.4 Rede de Drenagem Dual	37

3.5	Quantificação de custos da solução adotada.....	38
4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	40
4.1	Introdução.....	40
4.2	Preparação do Modelo de Drenagem Dual.....	40
4.3	Caso de estudo.....	42
4.3.1	Introdução.....	42
4.3.2	Soluções implementadas.....	42
4.3.3	Resultados.....	45
4.3.4	Análise de resultados.....	60
4.3.5	Análise de Custos.....	62
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	63
5.1	Conclusões.....	63
5.2	Trabalhos Futuros.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática de um sistema do tipo unitário (Lima et al., 2013)...	4
Figura 2.2 - Representação esquemática de um sistema do tipo separativo (Lima et al., 2013).....	4
Figura 2.3 – Áreas de estudo e fases de um projeto de drenagem urbana (Ramos et al., 1999).	5
Figura 2.4- Canal subterrâneo da <i>Cloaca Máxima</i> (B_S_R@, 2015).	7
Figura 2.5 - Canal de drenagem pluvial de <i>Machu Picchu</i> (Turismo en el Perú@, 2011).....	8
Figura 2.6- Balanço hidrológico numa bacia rural e numa bacia urbana (Tucci e Bertoni, 2003).....	10
Figura 2.7 – Hidrograma natural, após construção da urbanização e após medidas corretivas (Lima et al., 2013).	11
Figura 2.8 – Inundação fluvial do Rio Mondego, Coimbra 11 de Janeiro 2016 (Expresso@, 2016).....	12
Figura 2.9 – Inundação pluvial provocada por precipitações intensas, Lisboa 22 Setembro 2013 (JN@, 2013).	12
Figura 2.10 – Inundação costeira no norte da Alemanha a 5 de Dezembro de 2013 (El País Internacional@, 2013).	13
Figura 2.11 – Pluviômetro (Meteorópole@, 2011).	15
Figura 2.12- Pluviógrafo (Agronomia@, 2010).....	15
Figura 2.13 – Imagem de Radar da Intensidade de Precipitação estimada (IPMA@, 2016)..	16
Figura 2.14 - Princípio da sobreposição aplicado a hidrogramas unitários (Leitão et al. 2008)...	19
Figura 2.15 – Isócronas e diagrama tempo-área (Portela, 2006).....	20
Figura 2.16 – Campo de aplicação das equações de <i>Saint-Venat</i> e suas simplificações (adaptado de Maksimovic et al., 1996).....	23
Figura 2.17 – Fenda de <i>Preissmann</i> (Butler e Davies, 2011).....	24
Figura 2.18 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (Sá Marques et al., 2013).....	25
Figura 2.19 – Tecnologia LIDAR (Batos e Filho, 2012).....	29
Figura 2.20 – Constituição do Sistema de Drenagem e respetivos órgãos de entrada e de saída (Sá Marques et al., 2013).....	30
Figura 2.21 – Exemplos de dispositivos de entrada (Sá Marques et al., 2013).....	31

Figura 3.1 – Zona central da cidade de Coimbra (branco) e zona fortemente afetada por inundações (vermelho) (Adaptado de Sá Marques et al., 2013).....	34
Figura 3.2 – Modelo digital da zona em estudo e área fortemente afetada por inundações assinalada a vermelho (Simões et al., 2010).....	34
Figura 3.3 – Resultados da simulação no coletor a montante da zona inundada aquando da inundação de 9 de junho de 2006 (Sá Marques et al., 2013).....	35
Figura 3.4 – Inundação na Praça 8 de Maio a 9 de junho de 2006 (MILIMAGENS@, 2006).....	36
Figura 3.5 - Intensidade de precipitação para um Tempo de Retorno de 20 anos.....	37
Figura 3.6 – Intensidade de precipitação para um Tempo de Retorno de 100 anos.....	37
Figura 3.7 – Modelo semi-distribuído de drenagem dual 1D/2D usado nas simulações.	38
Figura 4.1 – Alturas de água verificadas na zona da Praça 8 de Maio para um período de retorno de 20 anos.....	41
Figura 4.2 - Alturas de água verificadas na zona da Praça 8 de Maio para um período de retorno de 100 anos.....	41
Figura 4.3 – Numeração e respectiva localização das grelhas para resolução das inundações na Praça 8 de Maio.	43
Figura 4.4 – Colectores redimensionados.....	44
Figura 4.5 - Numeração e respectiva localização das grelhas para resolução das inundações na zona a jusante da Praça 8 de Maio.....	45
Figura 4.6 – Simulação efetuada antes da implementação de soluções.	46
Figura 4.7 - Altura de água na Praça 8 de Maio antes da implementação de soluções.....	46
Figura 4.8 - Altura de água na Rua Direita antes da implementação de soluções.....	46
Figura 4.9 – Altura de água inicial na Praça 8 de Maio.	47
Figura 4.10 – Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio antes da implementação de soluções.....	47
Figura 4.11 – Altura de água a montante da Grelha 1.....	48
Figura 4.12 – Altura de água na Praça 8 de Maio após a implementação da Grelha 1.	48
Figura 4.13 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio após a implementação das Grelhas 1 e 2.....	49
Figura 4.14 – Altura de água a montante da Grelha 2.....	49
Figura 4.15 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 2.....	49
Figura 4.16 – Altura de água a montante da Grelha 3.....	50
Figura 4.17 – Altura de água na praça 8 de Maio após a implementação da Grelha 3.	50
Figura 4.18 – Altura de água a montante da Grelha 4.....	50
Figura 4.19 – Altura de água a montante da Grelha 5.....	50

Figura 4.20 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação das Grelhas 4 e 5.....	51
Figura 4.21 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio e Jardim da Manga após a implementação da Grelha 6.	51
Figura 4.22 – Altura de água a montante da Grelha 6.	52
Figura 4.23 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelhas 6.	52
Figura 4.24 – Altura de água a montante da Grelha 7.	52
Figura 4.25 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 7.....	52
Figura 4.26 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio e Jardim da Manga após a implementação da Grelha 8.	53
Figura 4.27 – Altura de água a montante da Grelha 8.	53
Figura 4.28 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 8.....	53
Figura 4.29 – Altura de água a montante da Grelha 9.	54
Figura 4.30 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 9.....	54
Figura 4.31 – Altura de água a montante da Grelha 10.	54
Figura 4.32 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 10.....	54
Figura 4.33 - Mapa final das alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio após a implementação das 11 Grelhas a montante.	55
Figura 4.34 – Altura de água obtida na Praça 8 de Maio após Implementação das 11 Grelhas.	55
Figura 4.35 - Zona 2 em estudo na situação inicial.	56
Figura 4.36 - Zona 2 em estudo após a implementação das 11 Grelhas a montante da Praça 8 de Maio.	56
Figura 4.37 - Alturas de água verificadas num colector da Rua Direita.	56
Figura 4.38 - Alturas de água verificadas num colector da Rua João Cabreira.	56
Figura 4.39 - Alturas de água verificadas no colector da Rua da Nogueira.	57
Figura 4.40 - Alturas de água verificadas num colector da Rua do Carmo.	57
Figura 4.41 - Alturas de água verificadas num colector na zona do Terreiro da Erva.	57
Figura 4.42 - Alturas de água verificadas num colector do Pentagonal.	57
Figura 4.43 – Alturas de água verificadas após o redimensionamento dos coletores.	58
Figura 4.44 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 12.....	59
Figura 4.45 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 13.....	59
Figura 4.46 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 14.....	59
Figura 4.47 - Alturas de água verificadas num colector do Pentagonal após implementação das soluções.	60
Figura 4.48 - Alturas de água verificadas para um tempo de retorno de 100 anos.	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tipos de inundações e suas causas (Adaptado Matos, 2003).....	13
Quadro 2.2 - Modelo da fenda de <i>Preissmann</i> aplicados a diferentes tipos de escoamento (adaptado (Lopes et al, 2011).	24
Quadro 4.1 – Estimativa dos custos para as diferentes soluções adoptadas.....	62

SIMBOLOGIA

A – Área de drenagem

a - Celeridade

b – Largura da fenda de *Preissman*

C – Coeficiente de escoamento

g – Aceleração da gravidade

h – Altura de água

I – Intensidade da chuvada

Q – Caudal

S – Volume armazenado na bacia de drenagem

S_0 – Declive do canal

S_f - Função do atrito

S_{fx} – Função do atrito na direção x

S_{fy} – Função do atrito na direção y

S_{0x} – Declive do canal na direção x

S_{0y} – Declive do canal na direção y

t – Tempo;

u – Velocidade na direção x

v – Velocidade na direção y

x – Direção do escoamento

y – Direção do escoamento perpendicular a x

ABREVIATURAS

AESN – *Agence de l’eau Seine-Normandie*

AOFD – *Automatic Overland Flow Delineation*

CGE – *Compagnie Générale des Eaux*

DHI – *Danish Hydraulic Institute*

EPA – *Environmental Protection Agency*

IDF – *Intensidade Duração Frequência*

InSAR - *Interferometria Synthetic Aperture Radar*

LIDAR – *Light Detection And Ranging*

SEDIF – *Syndicat des Eaux d’Ile-France*

SIG – *Sistemas de Informação Geográfica*

SUDS – *Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável*

SWMM – *Storm Water Management Model*

UWRG – *Urban Water Research Group*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As inundações urbanas continuam em pleno século XXI a ser um problema que provoca elevados impactos sobre a sociedade, causando danos ao nível das atividades comerciais, serviços, circulação rodoviária, podendo levar à destruição de áreas residenciais, e à perda de vidas humanas.

Nos últimos anos, devido às alterações climáticas têm sido mais frequentes eventos climáticos extremos, tais como chuvadas intensas. Por outro lado, a crescente urbanização que se tem vindo a verificar leva a uma impermeabilização do solo não permitindo que a água proveniente de eventos pluviosos se infiltre. A junção destes dois problemas leva a um aumento dos caudais que se escoam à superfície originando inundações. De forma a resolver este problema é necessário as áreas urbanas estarem munidas de uma rede de drenagem eficiente que permita recolher e transportar as águas pluviais de forma a posteriormente serem rejeitadas nos meios receptores.

Os sistemas de drenagem de águas pluviais têm como principal função escoar as águas prevenindo inundações garantindo deste modo qualidade de vida assim como a segurança de pessoas e bens.

A modelação matemática de sistemas de drenagem urbana é uma ferramenta indispensável no dimensionamento e gestão das redes de drenagem. Os modelos de simulação permitem simular vários cenários possibilitando a extração de resultados necessários à gestão e bom funcionamento dos referidos sistemas.

1.2 Objetivos

O principal objectivo deste trabalho consiste na análise completa e detalhada das cheias na zona central da cidade de Coimbra, usando modelos avançados de modelação, sendo posteriormente efectuada uma avaliação de soluções para minimizar esse risco nomeadamente através do estudo da localização, tipo e número de órgãos de entrada.

O caso de estudo é o de uma bacia urbana, situada na zona central da cidade de Coimbra, tal como já foi referido no parágrafo anterior. É de elevado interesse e importância o estudo

focalizar-se nesta área visto ser uma zona histórica, rica em património cultural e comercial, que sofre elevados danos devido à elevada ocorrência de cheias, as quais ocorrem principalmente pela falta de capacidade dos órgãos de entrada.

As simulações necessárias ao referente estudo serão realizadas com recurso ao *software InfoWorks*, usando um modelo avançado de drenagem dual 1D/2D, uma vez que são os modelos que permitem uma representação mais aproximada ao caso real. A modelação avançada permite fazer um estudo rigoroso ao nível da capacidade dos dispositivos de entrada, estudo este que não seria possível com a utilização de uma modelação tradicional.

Efectuado o estudo das melhores soluções para resolver os problemas em causa, será posteriormente analisada a sua eficiência e custos associados.

1.3 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo é feito o enquadramento do tema em estudo na presente dissertação, assim como os objectivos e estrutura da mesma.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, no qual são abordados, de forma breve, conceitos relevantes ao desenvolvimento do trabalho em causa. Ao longo deste capítulo é abordado o conceito de drenagem urbana de diversas perspectivas, explicitando a sua evolução ao longo dos tempos, o impacto que a urbanização apresenta e como é feita a sua modelação, fazendo referência a modelos hidrológicos e hidráulicos, assim como a *softwares* de modelação, sendo o *Infoworks ICM* o de maior ênfase. Neste capítulo também é apresentado o conceito de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) aliado à drenagem urbana. Por último, é feita referência aos órgãos de entrada, explicando como deve ser o seu dimensionamento e a sua importância nos sistemas de drenagem urbanos de águas pluviais.

No terceiro capítulo apresentam-se as metodologias que serão usadas nas diferentes fases de trabalho, assim como o caso de estudo.

Ao longo do quarto capítulo, serão apresentados trabalhos necessários ao bom funcionamento do modelo utilizado. Neste capítulo, será ainda analisado de forma detalhada o caso de estudo, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Por último, no quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões gerais obtidas com o presente trabalho, assim como uma abordagem de eventuais trabalhos futuros que poderão dar continuidade ao estudo efectuado na presente dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

As inundações urbanas são catástrofes naturais que provocam problemas nas sociedades há milhares de anos. No entanto, o aumento da permeabilização do solo devido à elevada taxa de urbanização, aliado às alterações climáticas e ao inadequado dimensionamento dos sistemas de drenagem tem aumentado a frequência e os danos causados por estes fenómenos.

Ao longo deste capítulo abordam-se conceitos base para uma melhor compreensão e contextualização dos temas estudados na presente dissertação. Entre eles destacam-se conceitos relativos à drenagem urbana, impactos provocados pela urbanização, modelação hidrológica e hidráulica, gama de *softwares* utilizados em drenagem urbana, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dispositivos de entrada em sistemas de drenagem.

2.2 Drenagem Urbana

A água além de fonte de vida foi a origem de todas as formas de energia que o homem vem utilizando ao longo do tempo. A utilização da água por parte das comunidades tem como consequência uma alteração significativa no seu estado, caracterizando-se esta pela elevada percentagem de matéria orgânica e outras matérias poluentes nocivas à saúde humana. Por outro lado, a precipitação atmosférica dá origem a escoamentos superficiais, que, se não forem devidamente controlados e conduzidos, podem provocar inundações com consequências nefastas para a segurança das populações e respectivos bens (Sá Marques e Sousa, 2009).

De forma a contornar os problemas anteriormente descritos surge o conceito de Drenagem Urbana. Os sistemas de drenagem urbana têm como principal finalidade, a recolha, o transporte e a rejeição em condições apropriadas das águas residuais e pluviais, sendo estas últimas o tema abordado na presente dissertação.

Consoante a origem das águas que escoam os sistemas de drenagem podem denominar-se em dois tipos principais, sistemas unitários (Figura 2.1) e sistemas separativos (Figura 2.2). Lima et al. (2013) define os sistemas unitários como aqueles que são constituídos por uma única rede de coletores onde são conjuntamente admitidas as águas residuais e pluviais, as quais são

recolhidas e drenadas na totalidade de forma a serem afastadas dos aglomerados populacionais. O mesmo autor assume que os sistemas separativos são constituídos por duas redes de drenagem distintas, uma destinada às águas residuais e outra reservada a águas pluviais, não havendo ligação entre ambas.

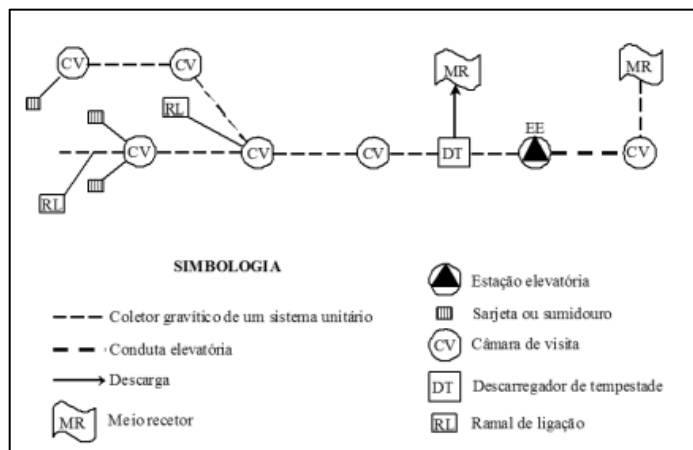


Figura 2.1 - Representação esquemática de um sistema do tipo unitário (Lima et al., 2013).

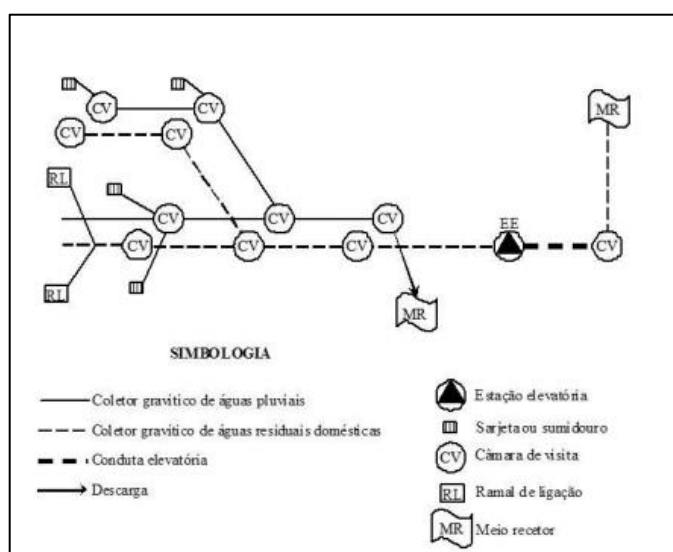


Figura 2.2 - Representação esquemática de um sistema do tipo separativo (Lima et al., 2013).

A drenagem urbana pluvial é um conjunto de medidas que tem como objetivo minimizar os riscos aos quais a população está sujeita, ou seja, diminuir os prejuízos causados pelas inundações, manter a qualidade da água e possibilitar o desenvolvimento urbano de forma harmoniosa. Segundo (Lima et al., 2013) a drenagem pluvial urbana não é só uma

necessidade, mas uma prioridade por estar diretamente ligada à qualidade de vida e à segurança de pessoas e bens.

Como tal, um adequado sistema de drenagem deve proporcionar uma série de benefícios, nomeadamente (Lima et al., 2013):

- Redução de áreas inundadas;
- Proteção do tráfego rodoviário e pedestre;
- Redução dos gastos com manutenção das vias públicas e áreas adjacentes permeáveis e impermeáveis;
- escoamento rápido das águas superficiais;
- Eliminação da presença de águas estagnadas;
- Abaixamento do nível freático;
- Redução da erosão hídrica do solo e reaproveitamento de parte da água pluvial.

De forma a conseguir estes benefícios, um projeto de drenagem urbana deve seguir os passos presentes na Figura 2.3.

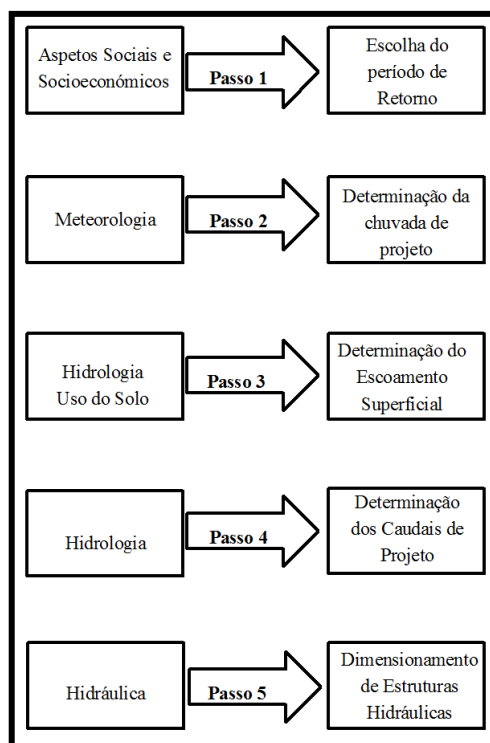


Figura 2.3 – Áreas de estudo e fases de um projeto de drenagem urbana (Ramos et al., 1999).

O aumento da população tem produzido impactos significativos no ciclo natural dos recursos hídricos, o que leva a perturbações nos sistemas de drenagem urbana, nomeadamente o aumento da frequência e magnitude das inundações e conseqüentemente degradação ambiental.

2.3 Evolução da drenagem urbana

A drenagem urbana é bastante antiga, datando desde 3000 antes de Cristo (Burian e Edwards, 2002). No entanto, até à idade Moderna não era considerada como uma infraestrutura necessária e condicionante ao desenvolvimento e ordenamento dos núcleos urbanos, tendo apenas como principal objetivo conduzir as águas para longe das áreas urbanas.

Ao longo dos anos a drenagem urbana tem sofrido diversos tipos de entendimento. Fatores como o clima, a topografia, a geologia, o conhecimento científico, a capacidade de engenharia e construção, os valores sociais, as crenças religiosas, entre outros têm influenciado o desenvolvimento de soluções de drenagem urbana.

Relatos históricos de antigas civilizações, sugerem que os sistemas de drenagem urbana foram construídos e melhorados sem o recurso a cálculos de engenharia, sendo criados através de processos de tentativa-erro com o objetivo de coletar a água da chuva evitando inundações (Burian e Edwards, 2002). Apesar da falta de otimização e o recurso a métodos de construção rudimentares, vários sistemas de drenagem urbana antigos foram bem-sucedidos.

Os persas consideravam o escoamento urbano sagrado, como tal, estabeleciam leis para protege-lo da poluição. Poluir a água na Pérsia era considerado pecado. A água da chuva e do escoamento urbano era armazenada em cisternas para usos não potáveis, nomeadamente lavagens e rega. Com o passar dos anos, passou a haver mudanças nas atitudes e comportamentos dos persas, o que contribuiu para problemas de poluição da água, o que eventualmente originou a queda da civilização.

O império da mesopotâmia marcou grandes avanços na civilização durante o 2º milénio antes de Cristo. As cidades mesopotâmicas continham sistemas de drenagem pluvial e residual bem construídos e eficazes, com o objectivo de manter as cidades mais limpas. Dois grandes exemplos deste tipo de construções eram as cidades de Ur e Babilónia, localizadas no atual Iraque, cidades estas onde a água da chuva era coletada para uso doméstico e irrigação.

A civilização etrusca construiu algumas das primeiras cidades organizadas no centro de Itália por volta de 600 antes de Cristo. Marzabotto, uma das cidades etruscas mais importantes, teve

um sistema de drenagem habilmente projetado, fazendo uso do declive natural para manter a cidade limpa e seca.(Burian e Edwards, 2002)

De forma análoga às civilizações anteriormente enunciadas, também outras civilizações, tais como, egípcios, hititas, gregos e chineses, construíram sistemas de drenagem urbana bem planeados para fins muito idênticos.

Os romanos foram a única civilização em toda a Ásia Ocidental e Europa desde a antiguidade até 1800 a construir um sistema viário cuidadosamente planeado com superfícies adequadamente drenadas (Hill, 1986). Durante o período da civilização etrusca, no decorrer dos anos 800 a 350 a. C., foram construídas estradas em Itália, não sendo estas tão elaboradas, nem os sistemas de drenagem tão eficazes como as construídas durante o império romano. Além da componente de drenagem urbana incorporada no design das rodovias, os romanos usavam a recolha de águas pluviais no seu sistema de drenagem, a qual era posteriormente utilizada para uso local, nomeadamente em processos de lavagem e regas.

A construção de um sistema de drenagem urbana eficiente foi motivada pela necessidade de drenar os bairros de baixa altitude e remover o excesso de água importada para as cidades através de aquedutos. De modo atender à drenagem urbana de forma apropriada foi necessário a construção de uma vasta rede de canais abertos e esgotos subterrâneos. A maior rede deste tipo foi designada de “*Cloaca Máxima*”, considerada como uma obra pública de excelência do império (Figura 2.4) *Cloaca* é um termo latino que significa “condutor de drenagem urbana” e provém segundo Plínio, do termo *cluere* que equivale a “limpar, purificar”. (Matos, 2003).



Figura 2.4- Canal subterrâneo da *Cloaca Máxima* (B_S_R@, 2015).

Posteriormente à queda do Império Romano, grande parte das cidades europeias e parte de cidades asiáticas diminuíram consideravelmente, migrando os seus habitantes para longe dos

centros urbanos. Este facto levou ao abandono dos serviços municipais, nomeadamente, sistemas de esgotos e água corrente, o que contribuiu para a sua deterioração. Durante a idade das Trevas, na Europa, poucos avanços tecnológicos foram feitos ou implementados no campo da drenagem urbana, sendo a higiene e a limpeza praticamente ignorada pela maior parte dos habitantes.

Nas principais cidades da Europa medieval, Paris, Londres e Roma, as práticas de drenagem urbana foram limitadas, sendo as águas pluviais, industriais e residuais descarregadas diretamente em rios e ribeiras da região. Todas estas questões desencadearam graves problemas de poluição e como consequência problemas de saúde pública.

Por outro lado, na América do Sul, os Incas (1438-1533), continuaram a manter as práticas de drenagem urbana, principalmente em drenagem de águas pluviais. Um exemplo é o sistema de drenagem construído em *Machu Picchu*, a propriedade real do governador Inca *Pachacutti*. A Figura 2.5 representa um canal que permitia drenar a água proveniente dos fenómenos de precipitação.



Figura 2.5 - Canal de drenagem pluvial de *Machu Picchu* (Turismo en el Perú@, 2011).

O século XIX foi marcado por uma grande evolução no sector da drenagem urbana, principalmente nas cidades europeias. Durante a primeira parte deste século, os resíduos sanitários eram colocados em fossas, sendo a maior parte dos esgotos projetados exclusivamente para a drenagem de águas pluviais. Com o decorrer do século, o conceito de drenagem urbana mudou, com a incorporação da recolha de resíduos sanitários nos projetos do sistema, os quais englobavam águas residuais e pluviais. Estes deixaram de ser projetados por processos de tentativa-erro passando a ser planeados e projetados por engenheiros com recurso a cálculos numéricos. Foi também durante este século que surgiu a primeira ideia de

sistemas de drenagem que separavam águas pluviais e águas residuais de forma a proporcionar uma rápida remoção dos resíduos, protegendo assim a saúde pública.

Durante a segunda metade do século XIX, os métodos de dimensionamento dos sistemas de drenagem foram significativamente melhorando com o desenvolvimento inicial do Método Racional, ainda utilizado na atualidade. No mesmo período de tempo, a perspectiva da drenagem urbana voltou a sofrer modificações, passando a incluir no seu projeto o tratamento de águas residuais, a poluição da água e problemas de saúde pública associados a descargas de esgotos em águas receptoras.

Na primeira metade do século XX a drenagem urbana foi firmemente estabelecida como uma obra pública indispensável à comunidade, continuando os especialistas a melhorar conceitos de concepção e métodos de projeto e dimensionamento. Na segunda metade do mesmo século, houve uma preocupação significativa com diversos temas relacionados com a drenagem urbana, uns recentes, outros já abordados no passado nomeadamente questões relacionadas com o ambiente, a saúde pública, o risco de inundações, a proteção de ecossistemas e a sustentabilidade urbana.

Ao longo dos últimos anos, métodos para projetar sistemas de drenagem sustentável têm sido estudados e testados, de forma a minimizar os impactos provocados pelo crescente índice de urbanização que se têm vindo a verificar. Hoje em dia, cada vez mais a água desempenha um papel fundamental nas sociedades, sendo considerada como um bem para as cidades. Na maior parte das comunidades desenvolvidas, são procuradas técnicas inovadoras de captura, recolha e armazenamento da água proveniente da precipitação, para que esta possa ser aproveitada para diferentes fins sem recurso a estruturas de drenagem maciças. Planos de gestão e qualidade das águas pluviais são outros estudos que têm tido grande importância, com o objectivo de prevenir inundações e controlar a qualidade da água. (Fletcher et al., 2015)

Em suma, a drenagem urbana tem ganho uma importância significativa ao longo das últimas décadas, para além de um desafio técnico para drenar a área urbana esta tem em consideração fatores políticos, sociais, económicos e ambientais, fatores estes que impulsionam ou retardam o seu desenvolvimento.

2.4 Impactos da Urbanização

Durante a segunda metade do século XX o desenvolvimento urbano cresceu de forma exponencial, devido à concentração da população em espaços reduzidos, principalmente

devido à necessidade de mão-de-obra na indústria. Este facto provocou grande competição pelos recursos naturais levando à destruição de grande parte da biodiversidade natural.

O crescimento da população urbana tem continuado a aumentar ao longo dos últimos anos, sendo de esperar que em 2030 cerca de 60% da população mundial viva nas cidades (Lima et al., 2013). A tendência de urbanização das cidades tem provocado impactos significativos na população e no meio ambiente, impactos estes que têm condicionado a qualidade de vida da população através do aumento da frequência e do nível de inundações, redução da qualidade da água e aumento de materiais sólidos no escoamento pluvial.

O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram o ciclo hidrológico natural que se verificava numa bacia hidrográfica rural. Numa bacia hidrográfica rural, grande parte do fluxo da água proveniente da precipitação é retido pela vegetação, infiltrando-se seguidamente no subsolo ou evaporando, o restante, escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão. Com o aumento da urbanização, há uma maior impermeabilização do solo, logo a água que outrora ficava retida na vegetação e se infiltrava, passa a escoar livremente. Este facto aliado ao mau funcionamento dos sistemas de drenagem, nomeadamente o subdimensionamento dos órgãos de entrada e/ou rede de colectores de drenagem, leva ao aumento do volume do escoamento superficial e do caudal de ponta de cheia, demorando este menos tempo a ser atingido, conduzindo a um aumento do risco de inundações. A Figura 2.6 traduz o impacto provocado pela urbanização nas bacias hidrográficas.

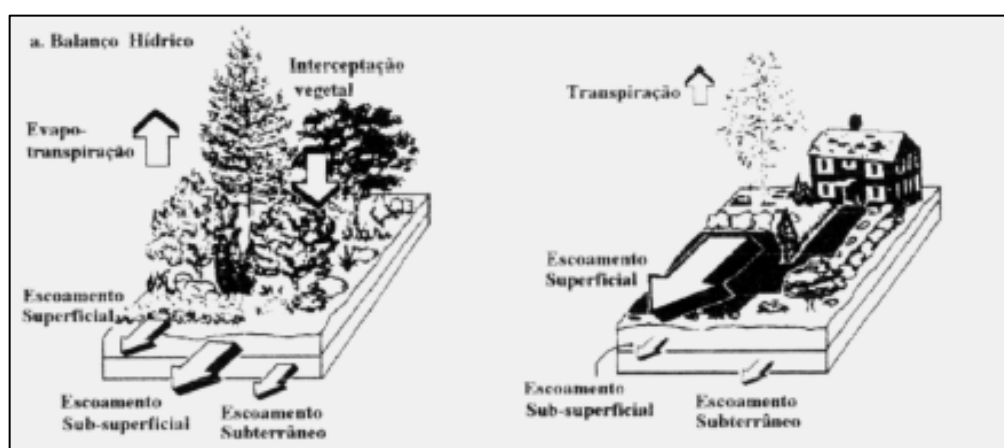


Figura 2.6- Balanço hidrológico numa bacia rural e numa bacia urbana (Tucci e Bertoni, 2003).

A urbanização introduz várias alterações nas bacias hidrográficas, nomeadamente:

- Aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização do solo e consequente redução da infiltração de água, permitindo um escoamento mais rápido. A Figura 2.7 representa este efeito;
- Diminuição do nível do lençol freático devido à redução da infiltração, reduzindo o escoamento subterrâneo;
- Redução da evapotranspiração devido à substituição da cobertura vegetal.
- Aumento da produção de sedimentos que provoca a obstrução das redes de drenagem;
- Deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, provocada pela lavagem das ruas, transporte de material sólido e ligações clandestinas de esgotos;

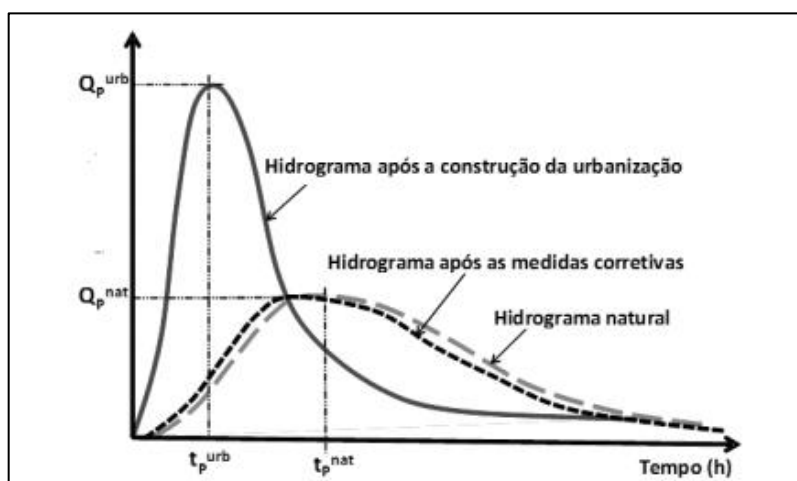


Figura 2.7 – Hidrograma natural, após construção da urbanização e após medidas corretivas (Lima et al., 2013).

Como já foi referido anteriormente, a urbanização tem tendência a continuar a aumentar nos próximos anos, assim sendo, as entidades responsáveis pelo planeamento e desenvolvimento das cidades têm vindo a desenvolver medidas de forma a reduzir os problemas provocados pela urbanização na drenagem urbana. Essas medidas passam pela implementação de sistemas de drenagem sustentável, vulgarmente conhecidos por SUDS. Este tipo de sistemas permite reduzir o pico verificado na Figura 2.7, passando este a assemelhar-se ao de uma bacia natural.

2.5 Inundações Urbanas

A inundação urbana é uma ocorrência tão antiga quanto as cidades ou qualquer aglomerado urbano (Tucci e Bertoni, 2003). Por inúmeras vezes o conceito de cheia e inundação são considerados como sinónimos, erradamente, pois todas as cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são originadas por cheias.

Chow (1956), define cheia e inundação como fenómenos hidrológicos extremos, de frequência variável, naturais ou introduzidos pela ação humana. A cheia é um fenómeno hidrológico temporário, o qual consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito original. Ao contrário das cheias, as inundações, na sua maioria, são fenómenos hidrológicos definitivos que consistem na submersão de uma área usualmente emersa, podendo estas ser classificadas consoante a sua origem como fluviais, pluviais ou costeiras. As inundações fluviais acontecem quando as águas dos rios galgam as suas margens (Figura 2.8), as pluviais ocorrem quando a capacidade dos sistemas de drenagem não permite o escoamento eficaz das águas provenientes de uma chuvada extrema levando ao aparecimento de água à superfície (Figura 2.9). Por último, as inundações costeiras ocorrem quando o nível do mar sobe de tal maneira que acaba inundando áreas urbanizadas (Figura 2.10).



Figura 2.8 – Inundação fluvial do Rio Mondego, Coimbra 11 de Janeiro 2016 (Expresso@, 2016).



Figura 2.9 – Inundação pluvial provocada por precipitações intensas, Lisboa 22 Setembro 2013 (JN@, 2013).



Figura 2.10 – Inundação costeira no norte da Alemanha a 5 de Dezembro de 2013 (El País Internacional@, 2013).

No Quadro 2.1 são apresentadas as causas para os diferentes tipos de inundações enunciados anteriormente.

Quadro 2.1 - Tipos de inundações e suas causas (Adaptado Matos, 2003).

Tipo	Causas
Fluvial	<ul style="list-style-type: none">• Chuvas abundantes e/ou intensas;• Fusão da neve ou do gelo;• Efeito combinado chuva com efeito das marés;• Obstáculos ao escoamento fluvial ou derrocada dos obstáculos.
Pluvial	<ul style="list-style-type: none">• Chuva intensa que provoca sobrecarga dos sistemas de drenagem;• Subida da toalha freática.
Costeira	<ul style="list-style-type: none">• Tsunami ou maremoto;• Subida eustática do nível do mar;• Sismos com fenómenos de subsidência tectónica.

Por muito estudadas e planeadas que sejam, as cheias e inundações são fenómenos hidrológicos impossíveis de evitar, podendo tornar-se fenómenos extremamente perigosos se houver população, propriedades, estruturas ou atividades económicas nas zonas propícias a serem inundadas. O perigo de uma determinada cheia ou inundação é tanto maior quanto maior for a magnitude atingida, a velocidade com que se propagam e a frequência com que ocorre.

De forma a contornar este problema, devem ser tomadas medidas de controlo de inundações, podendo estas classificar-se como estruturais ou não-estruturais. As medidas estruturais, tal como o nome indica, dizem respeito a estruturas construídas pelo homem que permitem minimizar os estragos causados pelas inundações, nomeadamente barragens, diques, canalizações de drenagem entre outras. Medidas preventivas, tais como zonamento de áreas de inundação, avisos de alertas e seguros, dizem respeito a medidas não estruturais, medidas estas mais económicas e de maior facilidade de aplicação.

2.6 Modelação Hidrológica e Hidráulica

2.6.1 Introdução

A modelação na drenagem urbana propõe-se a atender a diversos objectivos, tais como a avaliação de todas as respostas da bacia, como parte da estratégia e planeamento detalhado do sistema, avaliação da poluição, gestão operacional, controle em tempo real e análise de interação entre sub-bacias. Esta pode ser dividida em dois tipos de modelos, modelos hidrológicos e hidráulicos e modelos relativos à qualidade da água nos sistemas. (Maksimovic, 2001)

Como o próprio nome indica, os modelos hidrológicos e hidráulicos permitem simular e testar como os sistemas de drenagem de águas pluviais se comportam a nível hidrológico e hidráulico. Estes modelos, regra geral, são modelos determinísticos, ou seja, os resultados gerados pelos modelos são constantes para os mesmos dados de entrada no modelo, independentemente do número de simulações.

Os modelos hidrológicos procuram descrever o processo de transformação de precipitação em escoamento, tendo como parâmetros, a taxa de áreas impermeáveis e a eficiência do escoamento superficial. Os modelos hidráulicos são usados para representar o movimento da água proveniente da precipitação na bacia e na rede dos coletores.

2.6.2 Precipitação

O estudo da precipitação é de extrema importância quando se trabalha com modelos cujo objectivo é estudar o comportamento de sistemas de drenagem num determinado local. De forma resumida a precipitação pode ser definida como a queda de água no estado líquido (chuva) ou sólido (granizo e neve), resultante da condensação do vapor de água existente na atmosfera. É de salientar que de entre as formas de precipitação possíveis, para o presente trabalho será de interesse tratar apenas a água em estado líquido, a chuva, não sendo as outras formas de precipitação preponderantes na situação estudada.

A quantidade de chuva pode ser medida pela altura de água caída e acumulada sobre uma superfície plana impermeável através de aparelhos denominados de pluviômetros (Figura 2.11) ou pluviógrafos (Figura 2.12). De entre os dois dispositivos referidos, os pluviógrafos, têm uma elevada importância em projetos de drenagem urbana, pois os seus registos permitem obter a relação intensidade-duração-frequência de uma determinada chuvada, relação esta bastante significativa no estudo de inundações em bacias hidrográficas, a principal desvantagem destes dispositivos é não permitir a representatividade espacial. Por outro lado, os pluviômetros efetuam uma medição periódica, normalmente em períodos de 24 horas, fornecendo dados como a altura pluviométrica, intensidade e duração da precipitação.



Figura 2.11 – Pluviômetro (Meteorópole@, 2011).



Figura 2.12- Pluviógrafo (Agronomia@, 2010).

Na atualidade, técnicas mais sofisticadas têm sido desenvolvidas e utilizadas com o intuito de medir a quantidade de chuva, nomeadamente a estimativa da precipitação com recurso a radares meteorológicos. No entanto, este tipo de técnicas pode possuir erros, uma vez que os radares são equipamentos muito sensíveis, podendo estes ser descalibrados por diversos fatores (IPMA@, 2016).

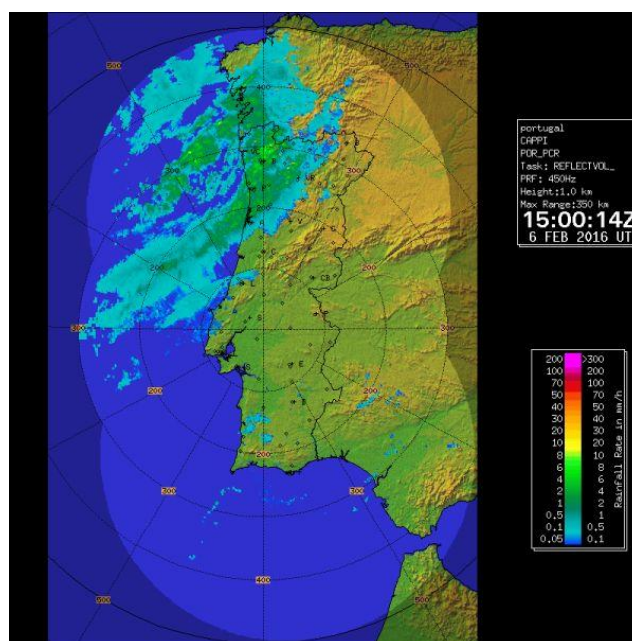


Figura 2.13 – Imagem de Radar da Intensidade de Precipitação estimada (IPMA@, 2016).

O estudo de sistemas de drenagem é efetuado para o maior caudal de cheia que corresponde a uma precipitação uniforme sobre a bacia hidrográfica com duração igual ao tempo de concentração. A precipitação de projeto é uma metodologia de representação simplificada da distribuição temporal da precipitação, sendo esta determinada a partir das curvas intensidade-duração-frequência, curvas IDF, considerando um certo período de retorno e uma certa duração crítica igual ao tempo de concentração.

A intensidade média de um determinado evento pluvioso é dada pela relação entre a altura pluviométrica (altura da lâmina de água precipitada sobre uma determinada área) e a duração do evento (período de tempo contado desde o início até ao fim da chuvada), sendo expressa em milímetros hora. É de salientar que a intensidade de uma chuvada varia durante a mesma, como tal é necessário proceder à construção de gráficos, designados de hietogramas, que permitem a representação da intensidade da chuvada em função de um determinado intervalo de tempo.

A determinação dos hietogramas de projeto pode ser efetuada pelo método triangular (Yen e Chow, 1980), a partir da análise de um evento ou pelo método dos blocos alternados, recorrendo às curvas IDF.

O método dos blocos alternados (Chow et al., 1988) é um dos métodos mais frequentemente utilizados, sendo este usado na determinação dos hietogramas de projeto da presente dissertação. Este é um método baseado nas curvas IDF, sendo previamente definido a duração e o tempo de retorno da chuvada a determinar. Neste tipo de modelos são determinados os incrementos ou parcelas da precipitação que, de acordo com a curva IDF característica da zona em estudo, ocorrem em sucessivos intervalos de tempo, com duração constante, Δt . Posteriormente, estas parcelas de precipitação são reorganizadas numa sequência temporal, considerando que o maior valor de precipitação ocorre sensivelmente a meio da duração total do evento pluvioso. As restantes parcelas de precipitação são ordenadas por ordem decrescente e dispostas sequencialmente e de modo alternado em torno do bloco central (bloco de maior valor).

2.6.3 Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos são instrumentos que permitem a compreensão do funcionamento de uma bacia hidrográfica (Tucci, 1998). Estes modelos incidem essencialmente na análise do escoamento superficial, permitindo a determinação do caudal de ponta e volume escoado para uma precipitação com um determinado período de retorno (Lima e Lima., 2010).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados consoante a abordagem utilizada. Tucci (1998) classifica-os como:

- **Estocásticos ou determinísticos:** Um modelo diz-se estocástico quando pelo menos uma das suas variáveis tem comportamento aleatório. Caso o resultado gerado pelo modelo seja constante para o mesmo *input*, este diz-se determinístico.
- **Empíricos ou conceptuais:** os modelos empíricos são baseados apenas em observações, enquanto que os modelos conceptuais são baseados em processos físicos.
- **Agregados ou distribuídos:** Nos modelos agregados, a variabilidade espacial não é considerada, por outro lado, nos modelos distribuídos, as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo.
- **Estacionários ou dinâmicos:** Os modelos estacionários descrevem o fenómeno em determinado momento, não variando os parâmetros no tempo. Nos modelos

dinâmicos os parâmetros variam no tempo, vindo as variáveis em função do tempo.

Existem vários modelos hidrológicos que permitem a estimativa de caudais de escoamento, sendo uns mais precisos e mais utilizados que outros. No presente trabalho serão abordados os métodos mais utilizados na atualidade sendo os considerados por Leitão et al. (2008): Método Racional; Método do Hidrograma Unitário; Método Curva Tempo-Área e Modelos de reservatórios.

O método racional é um método indireto, sendo apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney, sendo dos primeiros métodos a contrapor os métodos antigos que eram empíricos e não racionais. Este método estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial, sendo usado para calcular o caudal resultante de uma determinada bacia, considerando uma seção de estudo através da seguinte equação:

$$Q = C I A \quad (2.1)$$

Em que:

Q – Caudal escoado à superfície;

C – Coeficiente de escoamento;

I – Intensidade da chuvada;

A – Área de drenagem.

Este método apresenta algumas limitações, podendo estas levar a erros aquando a sua utilização, nomeadamente:

- Apenas é aplicável a bacias com áreas inferiores a 25 Km² (Sá Marques e Sousa, 2009), e nas quais o coeficiente de escoamento seja igual em toda a área da bacia, ou seja, todas as condições relativas ao solo e ao escoamento conseguem ser traduzidas pelo mesmo coeficiente;
- Aceitar que a precipitação é distribuída uniformemente ao longo do tempo e do espaço;
- Considerar a relação linear na transformação da precipitação em escoamento;
- Admitir que o caudal de ponta de cheia só ocorre quando toda a bacia está a contribuir para o escoamento, o que acontece quando a duração da chuvada iguala o tempo de concentração.

O Método do Hidrograma Unitário foi apresentado por Sherman, em 1932. Traduz a resposta de uma determinada bacia hidrográfica a uma precipitação unitária, ou a um impulso de precipitação instantânea. Este método utiliza várias simplificações, como considerar as intensidades constantes e a precipitação distribuída de modo uniforme ao longo da bacia.

Além destas simplificações já referidas, o método do hidrograma unitário considera ainda que o hidrograma do escoamento direto pode ser determinado pela conjugação dos hidrogramas parcelares proporcionais ao hidrograma unitário mas desfasados no tempo (Figura 2.14).

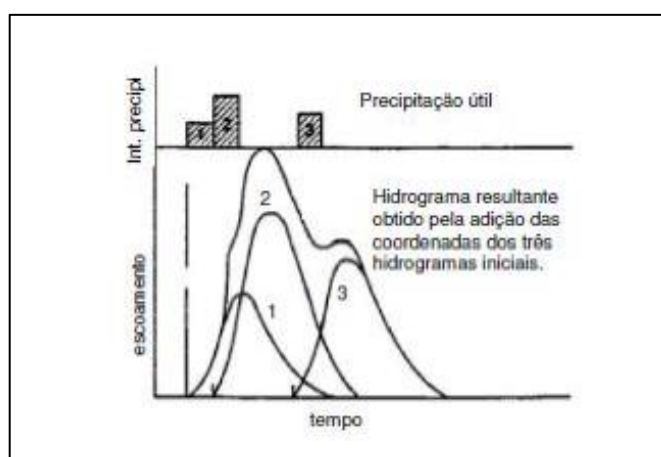


Figura 2.14 - Princípio da sobreposição aplicado a hidrogramas unitários (Leitão et al. 2008).

O método da curva tempo-área, também designado de método de Clark, data de 1945. Este método baseia-se no cálculo da evolução no tempo da área da bacia hidrográfica que contribui para o escoamento para uma chuvada contínua no tempo (Carvalho e Tavares), estando o volume de escoamento dependente do tempo de concentração, do coeficiente de armazenamento da água proporcionado pelo terreno e da curva do tempo-área.

O diagrama tempo-área (Figura 2.15), representa o hidrograma de escoamento direto que resulta de uma precipitação efetiva instantânea, sem ter em conta os efeitos devidos ao armazenamento de água na bacia hidrográfica. Para obter o diagrama tempo-área é necessário proceder ao traçado das isócronas. As isócronas são as linhas definidas pelo lugar geométrico dos pontos que apresentam igual tempo de percurso até à secção de referência da bacia (Figura 2.15).

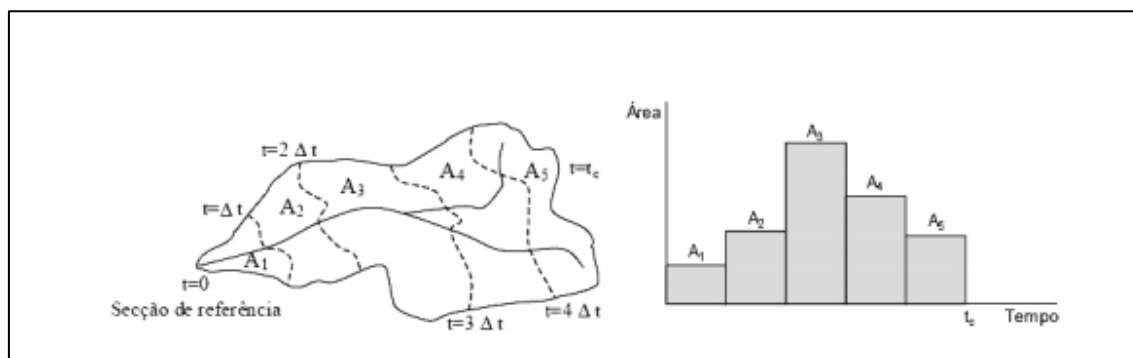


Figura 2.15 – Isócronas e diagrama tempo-área (Portela, 2006).

Os modelos de reservatórios apenas consideram a equação da continuidade, desprezando qualquer efeito da equação dinâmica, pelo que só têm em conta os efeitos de armazenamento e da respectiva atenuação. Por vários autores é considerado um modelo conceptual que se baseia no conceito de conservação da massa, ou seja, sendo a equação de balanço mássico da bacia dada pela seguinte expressão:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (2.2)$$

Em que:

S – Volume armazenado na bacia de drenagem;

I – Precipitação útil que cai sobre a bacia ou o caudal afluente;

Q – Escoamento direto que sai a jusante da bacia ou caudal efluente.

A diferença entre o caudal que entra a montante e o caudal que sai a jusante, ambos em função do tempo, fornece a variação do armazenamento ao longo do tempo.

As principais limitações encontradas neste método dizem respeito ao facto de serem ignorados os efeitos a jusante e de não permitir representar qualquer efeito de escoamento transitório.

2.6.4 Modelos Hidráulicos

Os modelos hidráulicos têm como principal objectivo representar a propagação do escoamento na rede de drenagem até ao seu destino final, sendo este escoamento normalmente unidimensional em superfície livre. Com o recurso aos modelos de simulação

hidráulica é possível analisar como determinado sistema de drenagem responde quando sujeito a diferentes condições, permitindo ao modelador analisar diferentes cenários, bem como o comportamento do sistema em situações correntes extremas (Sá Marques et al., 2013).

No estudo dos escoamentos variáveis com superfície livre que ocorrem em cursos de água naturais utilizam-se as equações completas de *Saint-Venant*, concebidas pelo matemático Francês com o mesmo nome na segunda metade do séc. XIX. Estas equações constituem a formulação matemática dos princípios fundamentais da hidráulica, sendo estas baseadas na equação da continuidade (2.3) e na equação da conservação do movimento, também designada de equação dinâmica (2.4). Segundo Sá Marques et al. (2013) as equações de *Saint-Venant* resultam da integração vertical das equações de *Navier-Stokes*, considerando:

- A componente da velocidade e aceleração no eixo vertical desprezáveis;
- A pressão é hidrostática;
- O fundo é fixo e com baixa inclinação;
- A velocidade horizontal é constante ao longo da vertical;
- Os efeitos da turbulência e das tensões tangenciais são considerados de forma agregada.

As equações de *Saint-Venant* representam modelos simples de fenómenos extremamente complexos, incorporando apenas fatores cuja influência no escoamento é mais importante e desprezando aqueles que de acordo com os objectivos da modelação se consideram de importância secundária (Martins dos Santos e Hipólito, 2005).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (2.4)$$

Em que:

A – Área Util;

Q – Caudal;

t – Tempo;

x – Direção do escoamento;

h – Altura de água;
 g – Aceleração da gravidade;
 S_0 – Declive do canal;
 S_f - Função do atrito.

A forma conservativa das equações 2D de *Saint-Venant* é caracterizada pelas seguintes expressões (Sá Marques et al., 2013):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) = gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad (2.7)$$

Em que:

u – Velocidade na direção x ;
 v – Velocidade na direção y ;
 x – Direção principal do escoamento;
 y – Direção do escoamento perpendicular a x ;
 S_{ox} – Declive do canal na direção x ;
 S_{oy} – Declive do canal na direção y ;
 S_{fx} – Função do atrito na direção x ;
 S_{fy} – Função do atrito na direção y .

A simulação dos escoamentos com as equações de *Saint-Venant* apresenta muitas vezes dificuldades devido à sua forma não-linear e à presença dos termos convectivos. Em muitos problemas, os termos convectivos são uma fonte de dificuldades computacionais e oscilações não-físicas, podendo ser resolvidas com a redução da sua influência (Djordjević et al., 2004) .

Antes do aparecimento do computador digital, o cálculo da propagação de cheias era feito manualmente através de métodos algébricos ou por métodos gráficos. Desta forma surgiram várias aproximações, tendo em conta a importância dos diferentes termos das equações de *Saint-Venant*, nomeadamente:

- Regime Permanente;
- Modelo de onda difusiva;
- Modelo de onda cinemática.

As equações de *Saint-Venant* e as suas respetivas simplificações em drenagem urbana podem ser exprimidas através da Figura 2.16, tal como sugere Maksimóvic et al. (1996).

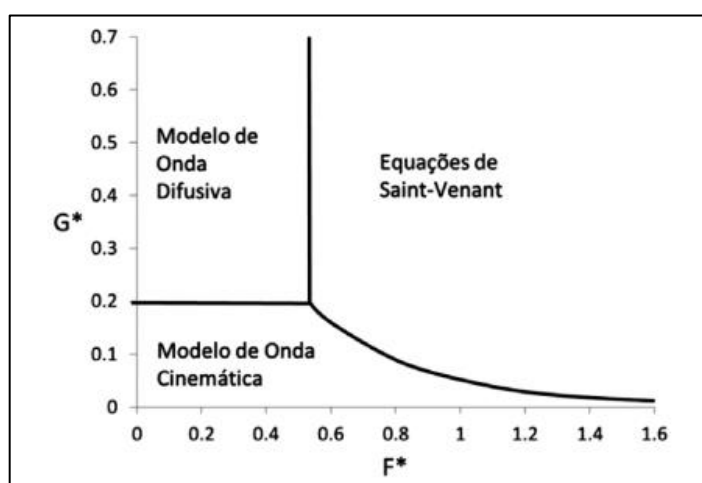


Figura 2.16 – Campo de aplicação das equações de *Saint-Venant* e suas simplificações
(adaptado de Maksimovic et al., 1996).

2.6.4.1 *Sistemas em carga*

Diz-se que um sistema de drenagem entra em carga quando o nível de água nele existente atinge a capacidade máxima dos colectores, passando o escoamento a dar-se sob pressão. Este facto acontece maioritariamente devido a precipitações intensas, surgindo a água à superfície, saindo através dos sumidouros, sargetas e câmaras de visita.

As equações de *Saint-Venant*, referidas no subcapítulo anterior, apenas são válidas para escoamentos em superfície livre, tratando-se de um escoamento sob pressão, as mesmas deixam de ser viáveis, sendo necessário para a sua aplicação o recurso ao conceito da fenda de *Preissmann*.

O conceito da fenda de *Preissmann* (Figura 2.17), consiste na utilização de uma fenda hipotética que permite ficticiamente que a lâmina líquida esteja sempre em contacto com a atmosfera, permitindo desta forma que as equações de *Saint-Venant* sejam aplicadas a escoamentos em pressão (Quadro 2.2) (Lopes et al, 2011).

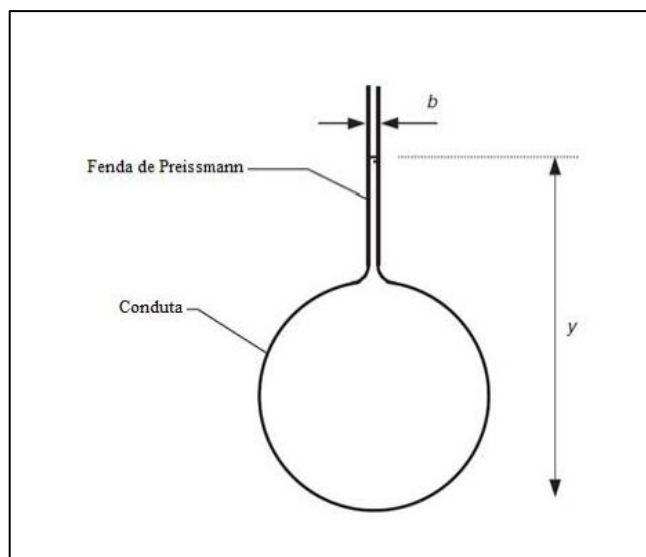


Figura 2.17 – Fenda de *Preissmann* (Butler e Davies, 2011).

Quadro 2.2 - Modelo da fenda de *Preissmann* aplicados a diferentes tipos de escoamento (adaptado (Lopes et al, 2011)).

Casos	Modelo da fenda de <i>Preissmann</i>
Escoamento com superfície livre	
Escoamento em pressão	<p data-bbox="933 1680 1109 1780">Incremento de área de escoamento</p>

A aplicação deste conceito está inerente a algumas limitações tal como sugere (Lopes et al, 2011):

- Não permite simular escoamentos onde ocorram depressões, exibindo instabilidades a partir do momento que a velocidade da onda de pressão na conduta aumenta;
- A largura da fenda (b (Figura 2.17)) é ajustada para se obter a celeridade (a) pretendida na zona pressurizada do escoamento utilizando a equação (2.8)

$$a = \sqrt{g \frac{A}{b}} \quad (2.8)$$

Em que:

A – Área da seção transversal do escoamento;

g – Aceleração da gravidade;

b – Largura da fenda de *Preissmann*.

2.6.4.2 Drenagem Dual

Um modelo de drenagem dual possui duas componentes que interagem entre si. Uma parte subterrânea, também designada de sistema “*minor*”, formada pelos coletores, podendo estes estar parcialmente em sobrecarga e uma parte superficial, sistema “*major*”, formada por canais naturais e artificiais, depressões e zonas de acumulação de água. Segundo Djordjevic et al. (1999) este conceito pode ser explicado através da Figura 2.18.

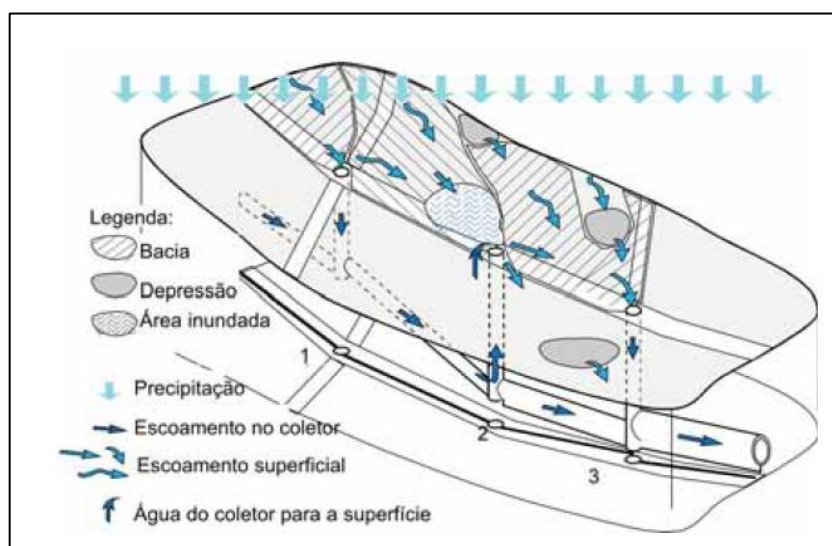


Figura 2.18 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (Sá Marques et al., 2013).

Adjacentes ao conceito de drenagem dual estão associados dois tipos distintos de modelos, modelos 1D/1D e modelos 1D/2D, considerando ambos um modelo unidimensional para a rede de coletores. A principal distinção entre estes dois modelos passa pelo facto do modelo 1D/1D representar a superfície através de um modelo unidimensional, enquanto o modelo 1D/2D representa a superfície urbana através de um modelo bidimensional, não sendo necessário fazer uma pré-identificação dos canais superficiais e das zonas de acumulação (Sá Marques et al., 2013).

Em ambos os modelos são encontradas vantagens e inconvenientes, por exemplo o modelo 1D/2D permite fazer uma melhor representação do caso real, sendo os modelos mais convenientes para a produção de mapas de risco e consequente análise de danos causados pelas inundações. O inconveniente deste modelo reside no facto de serem necessários tempos de cálculos bastante elevados, o que leva a que apenas seja usado em pequenas bacias.

2.6.5 Softwares

2.6.5.1 Introdução

Hoje em dia existem inúmeros *softwares* que permitem efetuar a simulação dinâmica de sistemas de drenagem, englobando estes na sua constituição modelos hidráulicos e modelos hidrológicos, podendo ainda incluir componentes relativas à modelação da qualidade da água. Estes *softwares* operam com modelos baseados em equações matemáticas assentes em parâmetros físicos.

Segundo Butler e Davies (2011), além dos aspectos referidos no parágrafo anterior, os *softwares* de modelação de sistemas de drenagem devem apresentar uma interface de dados versátil, serem compatíveis com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e permitirem a representação de mapas de inundação, na sequência de eventos pluviosos.

Como já foi referido anteriormente, existe uma vasta gama de programas comercialmente disponíveis que tratam da modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais, nomeadamente:

- FLUPOL, desenvolvido pela *Agence de l'eau Seine-Normandie* (AESN), pelo *Syndicat des Eaux d'Ile-France* (SEDIF) e pela *Compagnie Générale des Eaux* (CGE);
- InfoWorks, pacote de *softwares* da *Innovyze*;

- MIKE URBAN CS (baseado no *Model for Urban Sewer* (MOUSE)), desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI);
- SOBEK, produzido pelo instituto de pesquisa da *WL/Delft Hydraulics*;
- SWWM, desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA).

Dentro dos *softwares* referidos acima, o utilizado na simulação da presente dissertação foi o *InfoWorks* da *Innovyze*.

2.6.5.2 InfoWorks ICM

O *InfoWorks* foi desenvolvido na década de 90, sendo este um pacote de *softwares* comerciais que permite modelar os diferentes aspetos do ciclo da água. Dentro das componentes que constituem o pacote de *softwares*, o *InfoWorks ICM* (*Integrated Catchement Model*) torna-se na componente mais relevante no caso de estudo da presente dissertação, visto focar-se na modelação de sistemas de drenagem em bacias urbanas.

Este *software* combina uma série de distintas características nomeadamente:

- Análise e previsão da extensão, profundidade, velocidade e direção da inundação;
- Modelação completa e integrada da superfície e sistema subterrâneo;
- Resultados de fácil interpretação, tanto estáticos como animados;
- Suporte de diferentes tipos de sistemas no mesmo modelo (águas residuais, pluviais ou combinação de ambas).

O *InfoWorks ICM* permite uma perfeita integração entre os modelos 1D e 2D, ou seja, ambos os elementos acima e abaixo da superfície das bacias hidrográficas podem ser modelados, representando com rigor todos os caminhos possíveis de escoamento. O mecanismo de simulação a uma dimensão (1D) permite calcular todos os fluxos abaixo do nível solo. Por outro lado, modelação 2D facilita a modelação da superfície de forma rápida, precisa e detalhada. A zona 2D é representada por uma malha, constituída por uma série de triângulos contíguos que cobre toda a superfície da bacia. A altura de cada ponto de cada triângulo é derivada a partir de um modelo do terreno. Esta informação é na maioria das vezes obtida através da tecnologia LIDAR. A malha utilizada é irregular, ou seja, o tamanho e a orientação dos triângulos é variada, permitindo um maior detalhe e complexidade.

A integração de modelos hidráulicos e hidrológicos, quer naturais ou criados pelo homem é possível neste *software*, através da criação de um único modelo que contém as principais características existentes num determinado espaço.

O *InfoWorks* simula a propagação do escoamento superficial através do modelo do reservatório linear, sendo a propagação do escoamento na rede de coletores simulada a partir da resolução das equações de *Saint-Venant*, considerando o modelo dinâmico completo.

É uma poderosa ferramenta de simulação hidráulica, a qual fornece um controle totalmente integrado e em tempo real da qualidade da água, passando algumas das suas aplicações pela capacidade de avaliar o impacto das mudanças climáticas, inundações e previsões da poluição em sistemas de drenagem urbana.

2.7 Drenagem urbana e Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

A crescente preocupação e desenvolvimento dos sistemas de drenagem urbanos tem tornado cada vez mais a gestão técnica e operacional das infraestruturas ligadas a esta área numa tarefa complexa e trabalhosa, motivos estes que têm levado as entidades responsáveis a adoptar novas tecnologias adaptadas às suas necessidades específicas. Desta necessidade surge o Sistema de Informação Geográfica, SIG.

Os SIGs são usualmente definidos como um sistema organizado, constituído por *hardware*, *software*, meios humanos e informação georreferenciada, os quais desempenham um papel de relevo nas diversas áreas ligadas às entidades gestoras, nomeadamente ao nível do planeamento, operação e manutenção, tornando-se num instrumento eficaz na gestão de vários tipos de redes, nomeadamente, redes de drenagem, abastecimento, gás, tráfego entre outras. Além da gestão de forma eficaz de vários tipos de sistemas, os SIGs permitem ainda o auxílio à geração de modelos digitais do terreno, cartas de declive e redes de escoamento superficiais.

A integração e o tratamento no mesmo sistema de grandes volumes de informação não só espacial mas também de outros tipos, faz com que hoje em dia os SIGs sejam utilizados como ferramentas de análise geográfica de excelência.

2.7.1 Modelos Digitais de terreno

Um modelo digital do terreno é um modelo topográfico que permite associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude, podendo este ser manipulado por diferentes *softwares*. Este tipo de modelos está na base de muitos processos de modelação, nomeadamente, modelação hidrológica e estudos de traçado viário, climatológicos, florestais e agrícolas.

Os modelos digitais de terreno podem ser obtidos por diversas técnicas, sendo umas mais sofisticadas que outras. Segundo Leitão (2009) os modelos digitais de terreno podem ser criados a partir de:

- Levantamento convencional por técnicas terrestres;
- Captura de dados fotogramétricos;
- Digitalização das curvas de nível de mapas topográficos;
- InSAR (*Interferometria Synthetic Aperture Radar*);
- LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

Da lista de técnicas referidas acima, uma das mais recentes e utilizadas é a tecnologia LIDAR. Esta tecnologia apresenta uma solução mais precisa, sendo também economicamente mais rentável.

O princípio de funcionamento está baseado na emissão de pulsos *laser* com uma determinada frequência e repetição ao longo de um vector que vai varrendo geralmente na perpendicular à direção da linha de voo. Parte do pulso retorna para o dispositivo. Através da medição do tempo que o pulso demorou a chegar é possível calcular a distância. Os pontos obtidos são geralmente espaçados de 0,5 m, com uma precisão de 0,3 m na horizontal e 0.15 m na vertical.

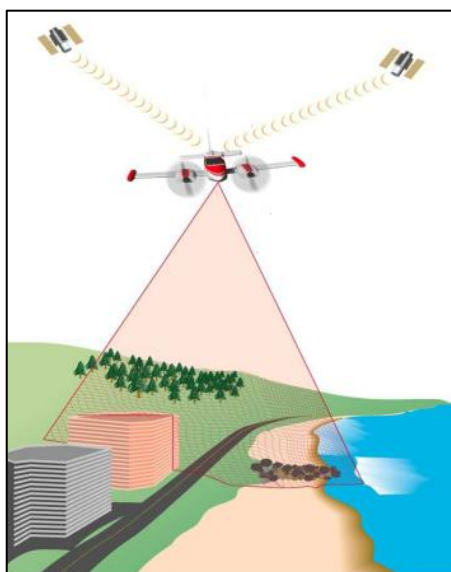


Figura 2.19 – Tecnologia LIDAR (Batos e Filho, 2012).

2.8 Dispositivo de entrada

2.8.1 Introdução

Um sistema de drenagem de águas pluviais apresenta órgãos de entrada a montante e ao longo da rede de coletores e órgãos de saída a jusante da mesma (Figura 2.20). O correto funcionamento destes dispositivos condiciona todo o processo do sistema de drenagem. (Sá Marques et al., 2013)

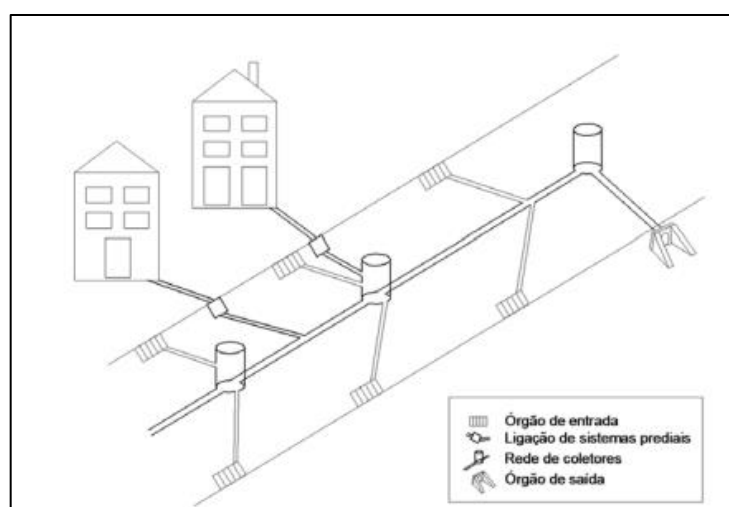


Figura 2.20 – Constituição do Sistema de Drenagem e respectivos órgãos de entrada e de saída (Sá Marques et al., 2013).

Os dispositivos de entrada são responsáveis pela captação das águas pluviais que se escoam à superfície, tornando-se num órgão essencial ao bom desempenho da rede de drenagem. Em sistemas de drenagem urbana são normalmente designados de sarjetas e sumidouros, podendo haver a combinação de ambos. De acordo com o Decreto Regulamentar nº23, de 23 de agosto de 1995, Regulamento Geral de Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais, as sarjetas são definidas como dispositivos com entrada lateral das águas superficiais, normalmente instaladas no passeio da via pública. O mesmo decreto define sumidouros como dispositivos com entrada superior das águas de escorrência, os quais implicam necessariamente a existência de uma grade que permita a entrada de água sem prejudicar a circulação rodoviária, sendo usualmente implementados no pavimento da via pública. A Figura 2.21 apresenta diferentes tipos de dispositivos de entrada.

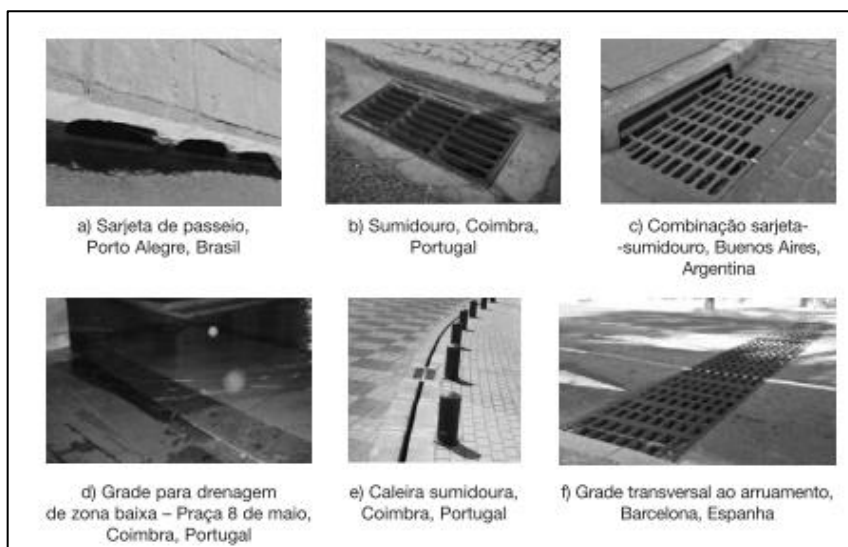


Figura 2.21 – Exemplos de dispositivos de entrada (Sá Marques et al., 2013).

Os sistemas de drenagem urbanos devem ser dimensionados tendo por base o funcionamento dos dispositivos de entrada, pois a capacidade de vazão e interceptação destes dispositivos influencia o períodos de retorno para o qual o sistema é dimensionado. O ineficaz desempenho dos dispositivos de entrada permite que os arruamentos funcionem como canais de escoamento superficial, o que eventualmente pode provocar inundações de zonas com baixa cota topográfica.

2.8.2 Impactos dos Dispositivos de Entrada nos Sistemas de Drenagem

Os órgãos ou dispositivos de entrada permitem a passagem do escoamento superficial, escoamento que se dá através de valas, valetas e bermas, a escoamento profundo, escoamento que se processa através de colectores.

Normalmente, a principal preocupação no projeto de sistemas de drenagem restringe-se ao dimensionamento dos colectores, não dando grande importância à adequada localização e dimensionamento dos dispositivos de entrada de águas pluviais, levando à ineficiência dos mesmos sistemas. Um adequado sistema de drenagem deve ser capaz de captar e transmitir com eficiência a água que circula à superfície para os coletores de drenagem. Djordjevic (2005) afirma que a eficiência dos sistemas de drenagem depende da capacidade que os dispositivos de entrada possuem para interceptar o escoamento superficial.

A eficiência hidráulica é definida como o quociente entre a capacidade de entrada do dispositivo e o caudal que se aproxima deste, sendo a capacidade de entrada o termo que

define a maior quantidade de escoamento superficial que pode ser interceptado por uma sarjeta ou sumidouro.

A eficiência hidráulica que um determinado dispositivo de entrada possui para interceptar o escoamento superficial está dependente de vários fatores, entre os quais se incluem as características do troço de rua a montante do local onde o dispositivo está implementado. O declive longitudinal e transversal, a rugosidade do pavimento e existência de depressões são alguns dos fatores a considerar, bem como o caudal afluente e a configuração geométrica do dispositivo.

Um correto dimensionamento dos dispositivos de entrada deve respeitar os seguintes três critérios, tendo por base períodos de retorno de 2 a 10 anos (Sá Marques et al., 2013):

- Critério de não transbordamento.
- Critério de limitação da velocidade.
- Critério de limitação da largura máxima da lâmina de água na valeta junto ao lancil.

No primeiro critério é considerado que as águas pluviais devem ter um percurso superficial o mais extenso possível, devendo deste modo os dispositivos de entrada ser localizados em zonas onde seja atingida a altura máxima de água junto ao passeio.

No segundo critério referido a cima, limita-se a velocidade do escoamento da água pluvial nos arruamentos a 3 m/s (Sá Marques et al., 2013), de forma a não serem provocados estragos significativos nos pavimentos, nem sejam induzidos incómodos exagerados aos peões e condutores.

O último critério enunciado indica que a largura máxima da lâmina de água nas valetas junto dos lancis não deve exceder 1m de largura.

Uma adequada localização dos dispositivos de entrada é um fator preponderante no bom desempenho dos sistemas de drenagem. Segundo o Decreto Regulamentar nº23, de 23 de agosto de 1995, Regulamento Geral de Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais, os dispositivos de entrada devem ser localizados em pontos baixos da via pública, cruzamentos ou ao longo dos percursos das valetas. Todas estas possíveis localizações devem respeitar os três critérios de dimensionamento enunciados anteriormente.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Concluída a Revisão Bibliográfica, capítulo este que permitiu um esclarecimento e um melhor conhecimento de temas e conceitos relacionados com o tema em estudo, é possível proceder com a Metodologia.

Ao longo deste capítulo será apresentada a metodologia necessária à análise detalhada das cheias na zona central da cidade de Coimbra e posterior avaliação de soluções localizadas para a resolução desse problema. Neste capítulo também será apresentada uma breve descrição do caso de estudo.

3.2 Caso de estudo

A área em estudo, na qual será aplicada a metodologia, localiza-se na cidade de Coimbra, sendo esta sede de concelho e distrito, e principal cidade do centro de Portugal, com cerca de 140 mil habitantes.

O estudo realizado no decorrer da presente dissertação será focado numa área da bacia situada na zona central da cidade de Coimbra, a qual abrange a Praça 8 de Maio, nas proximidades da Câmara Municipal e zona adjacente (Figura 3.1). Esta bacia hidrográfica compreende uma área total de aproximadamente 1.5 Km² e um tempo de concentração estimado em 45 minutos (Simões, 2012). O seu sistema de drenagem possui um comprimento total de 34.8 Km, destinando-se apenas 1.2 Km para a drenagem de águas pluviais.



Figura 3.1 – Zona central da cidade de Coimbra (branco) e zona fortemente afetada por inundações (vermelho) (Adaptado de Sá Marques et al., 2013).

A topografia acidentada da bacia influencia a ocorrência de inundações de origem pluvial. A quando de eventos pluviosos de maior intensidade, os declives acentuados da bacia dificultam a entrada do escoamento superficial na rede de coletores, permanecendo este à superfície ou fluindo através de ruas, acumulando-se posteriormente em zonas planas com altas taxas de impermeabilidade (Pina et al., 2014). Na Figura 3.2 é possível perceber como varia a altitude ao longo da bacia, representando os tons mais escuros zonas de maior altitude e os mais claros zonas baixas (menor altitude).



Figura 3.2 – Modelo digital da zona em estudo e área fortemente afetada por inundações assinalada a vermelho (Simões et al., 2010).

Tal como se pode verificar na Figura 3.2, uma das zonas da cidade mais afetada por inundações trata-se de uma zona baixa da bacia que engloba a Praça 8 de Maio e zona adjacente a esta. Esta zona é frequentemente afectada por inundações quando se verificam fenómenos pluviosos de maior intensidade. As inundações ocorrem fundamentalmente devido à falta da capacidade dos órgãos de entrada na captação do escoamento a montante. Devido a este facto o escoamento em vez de ser interceptado e transmitido à rede de coletores flui à superfície, acumulando-se em zonas baixas da bacia, como é o caso da Praça 8 de Maio. Na Figura 3.3 podemos evidenciar este facto, representado a figura um coletor a montante da zona inundada a 9 de Junho de 2006.

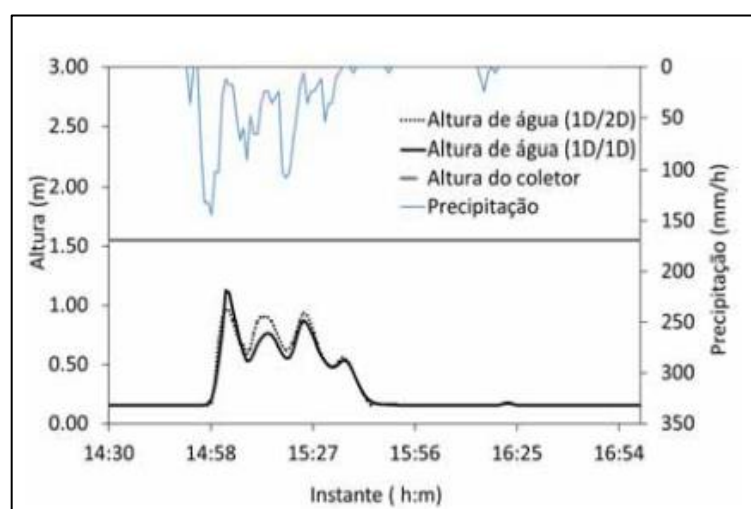


Figura 3.3 – Resultados da simulação no coletor a montante da zona inundada aquando da inundação de 9 de junho de 2006 (Sá Marques et al., 2013).

A 9 de Junho de 2006 ocorreram graves inundações na cidade de Coimbra, causadas por um evento pluvioso extremo com um período de retorno de aproximadamente 50 anos. Uma das zonas bastante afectadas foi a Praça 8 de Maio (Figura 3.4). No entanto, apesar de ocorrer uma grande acumulação de água nesta zona comprovou-se que os colectores a montante não tinham atingido a sua capacidade, tal como se pode verificar na Figura 3.3. O estudo efectuado para a inundação de 9 de Junho de 2006 vem comprovar a ideia que os órgãos de entrada da rede de drenagem pluvial na zona central da cidade de Coimbra são ineficientes, não tendo capacidade de interceptar grande parte do escoamento quando se verificam eventos pluviosos mais intensos.



Figura 3.4 – Inundação na Praça 8 de Maio a 9 de junho de 2006 (MILIMAGENS@, 2006).

3.3 Precipitação

Os eventos de precipitação considerados para o presente estudo, foram obtidos de acordo com Chow et al. (1988), através da aplicação do método dos blocos alternados, sendo a intensidade de precipitação obtida pela utilização das curvas IDF para a zona em estudo.

Portela et al. (2000) refere que a utilização de um evento de precipitação com duração três vezes superior ao tempo de concentração da bacia pode conduzir a um caudal de ponta de cheia superior ao caudal resultante de um evento com uma duração igual ao tempo de concentração. Ao considerar-se apenas uma vez o tempo de concentração para a duração da chuvada, corre-se o risco de obter valores de caudal de ponta mais baixos do que os que realmente se verificam. Nesta perspetiva, e sabendo que o tempo de concentração da bacia em estudo é de aproximadamente 45 minutos (Simões, 2012), a duração utilizada para cada evento de precipitação foi de 135 minutos, considerando incrementos de 5 minutos.

O estudo foi feito para um tempo de retorno de 20 anos, uma vez que a bacia é densamente edificada e bastante declivosa. Posteriormente foi testada a solução adoptada para um tempo de retorno de 100 anos. A Figura 3.5 e Figura 3.6 representam respetivamente os eventos de precipitação obtidos e utilizados para um período de retorno de 20 e 100 anos.

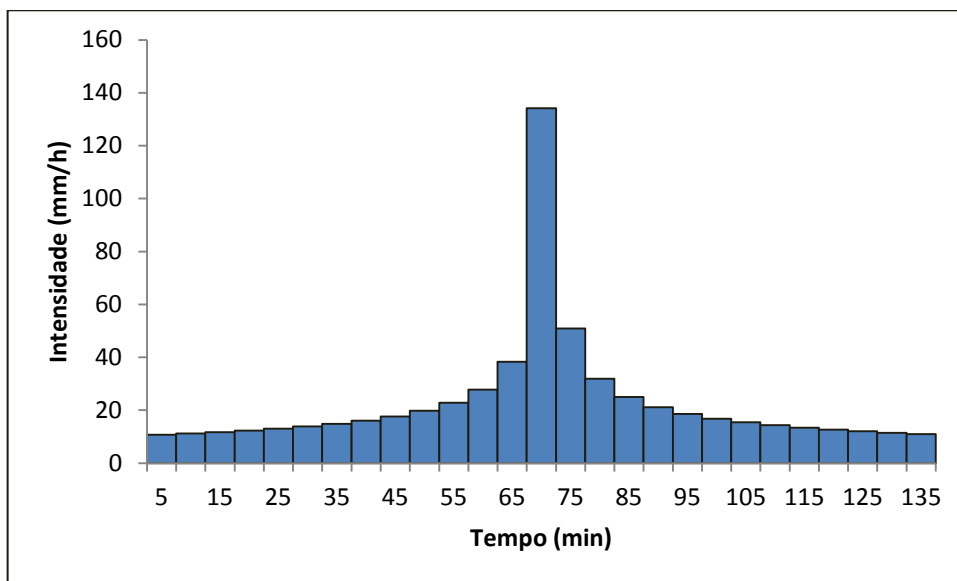


Figura 3.5 - Intensidade de precipitação para um Tempo de Retorno de 20 anos.

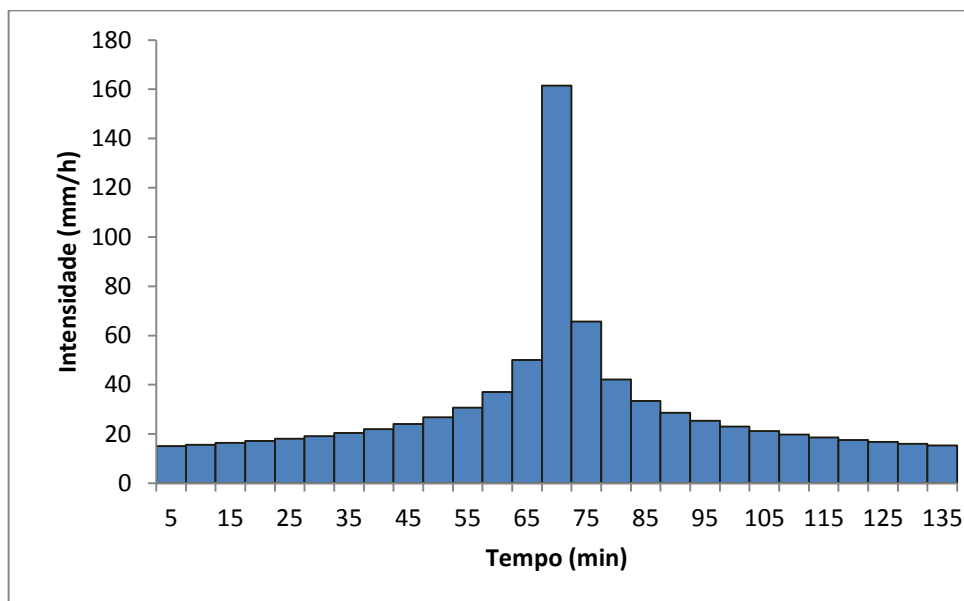


Figura 3.6 – Intensidade de precipitação para um Tempo de Retorno de 100 anos.

3.4 Rede de Drenagem Dual

O modelo utilizado no presente trabalho trata-se de um modelo de drenagem dual 1D/2D, já anteriormente utilizado em outros estudos, nomeadamente na previsão de cheias urbanas

(Simões, 2012) e na comparação de modelos semi-distribuídos e totalmente distribuídos (Pina et al., 2014). O modelo digital do terreno foi gerado a partir da tecnologia LIDAR.

Para a realização das diferentes simulações e implementação de soluções recorreu-se ao *software InforWorks ICM*, usando um modelo de drenagem dual 1D/2D, tal como já referido anteriormente, semi-distribuído (SD) (Figura 3.7). Um modelo semi-distribuído é um modelo baseado na divisão da bacia em sub-bacias de forma a abranger toda a área de captação da bacia. Cada sub-bacia tem as suas próprias características físicas e hidrológicas, nomeadamente área, inclinação, largura, rugosidade, áreas permeáveis e impermeáveis, perdas iniciais, entre outras.



Figura 3.7 – Modelo semi-distribuído de drenagem dual 1D/2D usado nas simulações.

3.5 Quantificação de custos da solução adoptada

Posteriormente ao ser efectuada uma análise completa e detalhada das causas que levam à ocorrência de inundações na área em estudo, será necessário a implementação de soluções localizadas que visam resolver esses problemas. Essas soluções passam essencialmente pela implementação de grelhas transversais às ruas a montante da zona inundada assim como um novo dimensionamento dos colectores na “zona crítica” da área em estudo, zona esta frequentemente inundada.

De forma a se poder ter uma noção de quanto custaria a solução adoptada foi efectuada uma breve quantificação de custos com base em tabelas disponibilizadas pela empresa AC, Águas de Coimbra, E.M..

Os custos das soluções são influenciados por diversos factores, nomeadamente mão-de-obra e movimentações de terra necessárias, materiais a utilizar, entre outros. No caso das grelhas, o custo será quantificado consoante o número de sumidouros necessários à implementação de cada grelha, considerando que cada sumidouro tem um comprimento de aproximadamente 70 cm. Por outro lado, o custo da implementação de novos colectores é feito por metro linear de comprimento, variando consoante o seu diâmetro e material utilizado no seu fabrico, não sendo este último relevante, visto todos os colectores adoptados serem fabricados no mesmo material, betão de classe III.

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Introdução

Como já foi mencionado anteriormente, o estudo do presente trabalho foca-se na análise completa e detalhada das cheias na zona central da cidade de Coimbra, sendo efectuada posteriormente uma avaliação de soluções localizadas para a resolução desse problema.

O modelo matemático utilizado neste estudo já se encontrava construído, sendo no entanto detectadas algumas falhas no sentido de escoamento em algumas condutas, que se encontravam a escoar no sentido contrário ao real. Após a resolução dessas falhas e estando o modelo a simular corretamente um sistema de drenagem dual prosseguiu-se com o estudo das melhores soluções de forma a solucionar o problema.

Ao longo deste capítulo são apresentadas as soluções testadas assim como os resultados obtidos.

4.2 Preparação do Modelo de Drenagem Dual

O modelo de drenagem dual 1D/2D, já se encontrava construído e pronto a ser alvo de simulações no *software InfoWorks ICM*. No entanto, após alguns testes procedeu-se à verificação de pequenos ajustes devido a pequenas alterações feitas recentemente pela empresa AC, Águas de Coimbra, E.M..

Efectuadas as alterações necessárias de forma a corrigir as pequenas falhas encontradas, foram feitos testes para um período de retorno de 20 e 100 anos de modo a que fosse possível verificar se o modelo se encontrava a funcionar nas condições pretendidas. Ao serem efectuados estes dois testes era expectante que as alturas de água verificadas para um tempo de retorno de 20 anos fossem inferiores às de um tempo de retorno de 100 anos. Como seria de esperar e se pode verificar pela Figura 4.1 e Figura 4.2, as alturas de água nas zonas a montante e jusante da Praça 8 de Maio para um tempo de retorno de 20 anos são bastante inferiores às verificadas para um tempo de retorno de 100 anos.

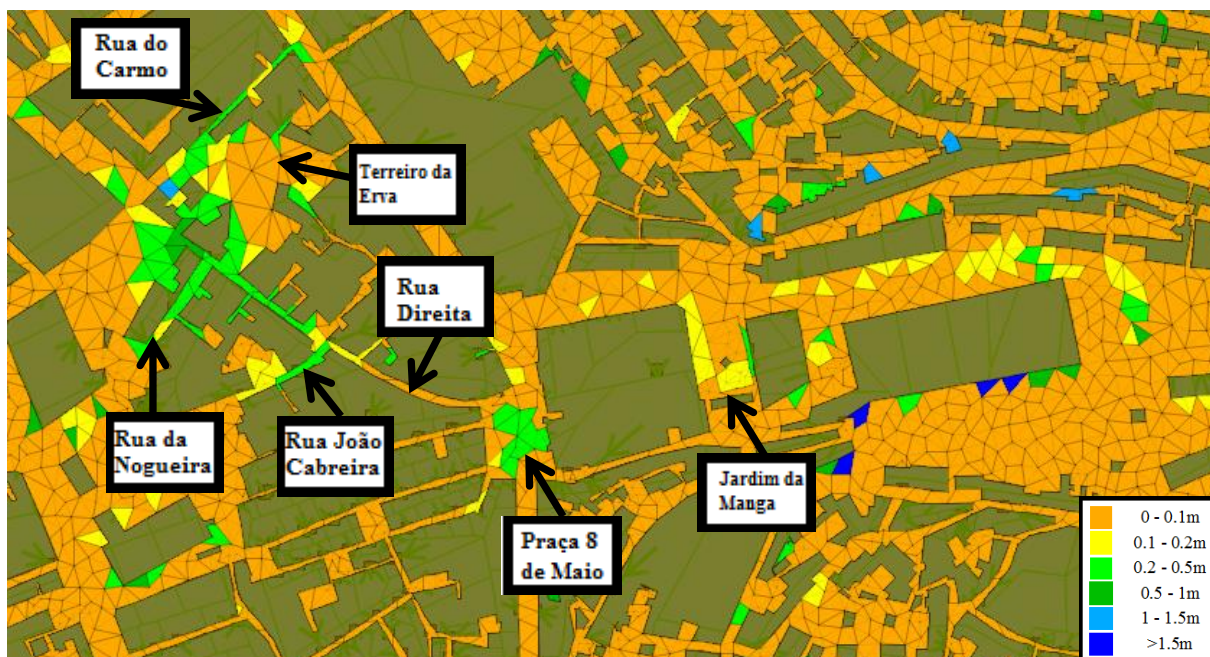


Figura 4.1 – Alturas de água verificadas na zona da Praça 8 de Maio para um período de retorno de 20 anos.

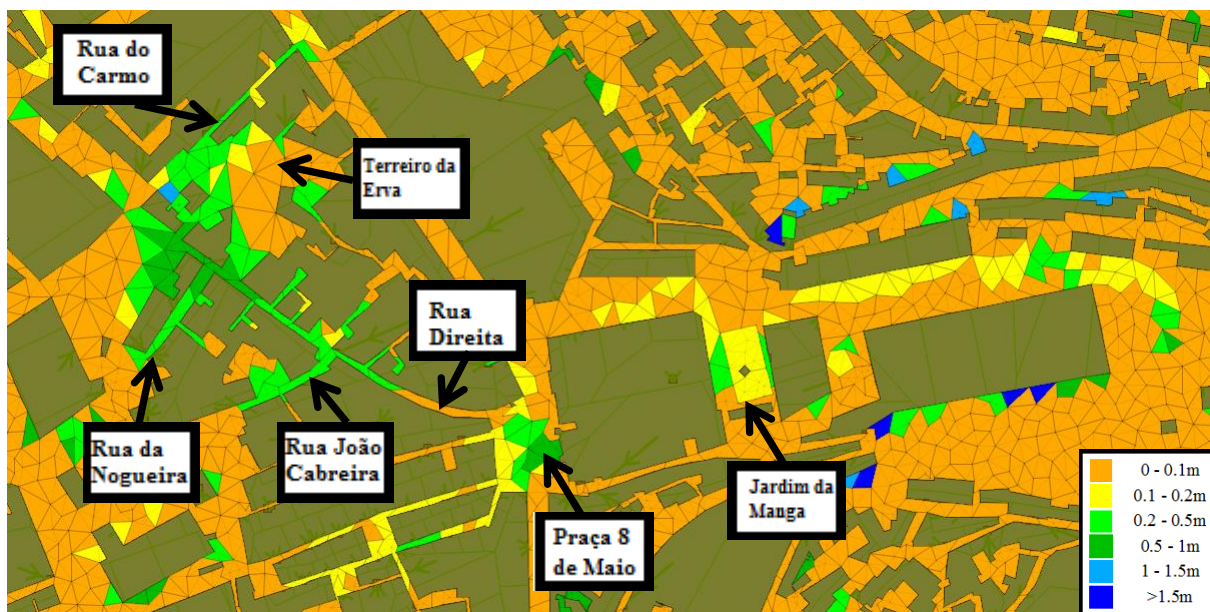


Figura 4.2 - Alturas de água verificadas na zona da Praça 8 de Maio para um período de retorno de 100 anos.

4.3 Caso de estudo

4.3.1 Introdução

O principal problema das cheias na zona baixa da cidade de Coimbra prende-se, tal como já referido no capítulo anterior, pelo facto de uma quantidade considerável de água proveniente dos eventos de precipitação não entrar nos sistemas de drenagem urbana, escoando à superfície acabando por se acumular em zonas planas da cidade, como é o caso da Praça 8 de Maio. Este problema deve-se essencialmente ao mau dimensionamento e localização dos órgãos de entrada que não permitem uma eficaz intercepção do escoamento superficial, possibilitando deste modo que as zonas planas inundem mesmo que a montante e a jusante destas a rede de coletores de drenagem ainda tenha capacidade.

De forma a solucionar o problema foi elaborado um estudo de soluções localizadas, que passa pela implementação de grelhas transversais aos arruamentos a montante da Praça 8 de Maio. Para uma maior captação de escoamento estes órgãos foram colocados em pontos onde se verificava uma maior acumulação de água. Este estudo foi elaborado tendo por base um tempo de retorno de 20 anos, sendo posteriormente a solução final testada para um período de retorno de 100 anos.

4.3.2 Soluções implementadas

A implementação de grelhas no *software* de simulação *InfoWorks*, foi feita através da criação de nós do tipo “2D” considerando de uma forma simplificada uma área de 1.5m^2 para cada nó. Este tipo de nós considera que a troca de água entre a malha e a rede de coletores é calculada com base nas equações de descarregadores, assumindo como nível da crista do descarregador o nível do solo e como comprimento da crista o comprimento do eixo do nó. O coeficiente de descarga de inundação equivale ao coeficiente de descarga do descarregador, o qual o programa assume como 0.5. O fluxo de escoamentos captado por cada nó é posteriormente transmitido à rede de coletores através de um ramal de ligação.

4.3.2.1 Fase 1 - Implementação de grelhas a Montante da Praça 8 de Maio

Tal como já foi referido anteriormente para solucionar o problema da acumulação de água na zona da Praça 8 de Maio foram implementadas várias grelhas transversais aos arruamentos a montante desta zona, sendo a colocação destas em zonas próximas de cruzamentos e pontos onde se verificava uma maior acumulação de água. A empresa AC, Águas de Coimbra, E.M. procedeu recentemente à colocação de algumas grelhas, pelo que este estudo também serviu para a sua validação (Grelhas 7,9,10,11 (Figura 4.3)).

Para facilitar a identificação de cada grelha foi efectuada uma numeração das mesmas. De seguida apresenta-se a lista e localização das mesmas assim como a sua representação no modelo (Figura 4.3):

- Grelha 1 – Rua Lourenço de Almeida Azevedo;
- Grelha 2 – Rua Alexandre Herculano;
- Grelha 3 – Rua Oliveira Matos;
- Grelha 4 – Avenida Sá da Bandeira (lado Norte);
- Grelha 5 – Avenida Sá da Bandeira (lado Sul);
- Grelha 6- Rua Olímpio Nicolau Rui Fernandes;
- Grelha 7 – Rua Olímpio Nicolau Rui Fernandes;
- Grelha 8 – Rua Olímpio Nicolau Rui Fernandes;
- Grelha 9 – Início da Praça 8 de Maio;
- Grelha 10 – Rua Visconde da Luz;
- Grelha 11 – Praça 8 de Maio.

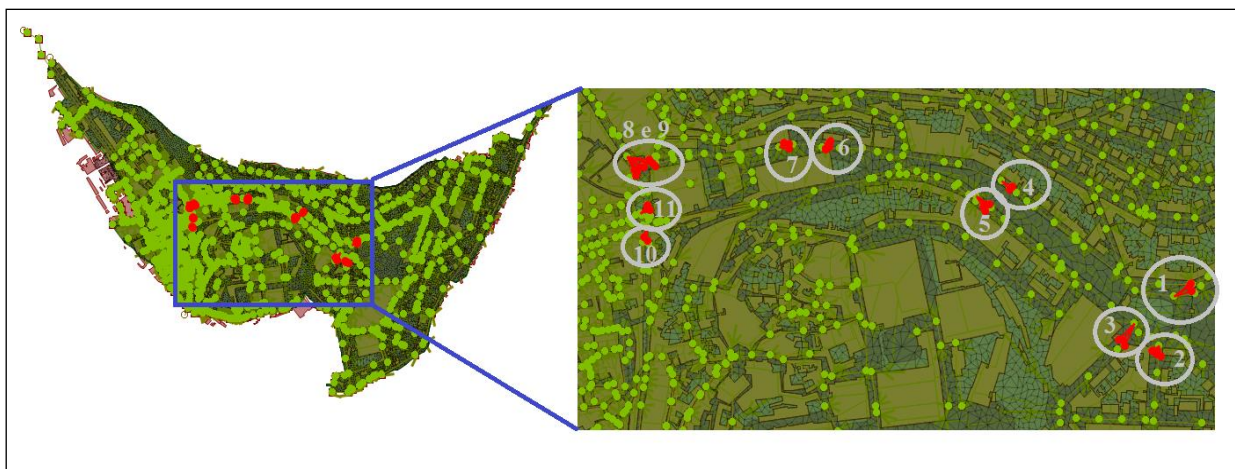


Figura 4.3 – Numeração e respectiva localização das grelhas para resolução das inundações na Praça 8 de Maio.

A implementação das grelhas no modelo foi efectuada consoante a sua ordem numérica. Ao ser efectuada desta forma foi permitido perceber que influência cada grelha causaria a jusante, verificando deste modo a sua relevância no modelo.

4.3.2.2 Fase 2 – Redimensionamento na Rede de Colectores e Implementação de Grelhas a Jusante da Praça 8 de Maio

No entanto, e tal como será demonstrando no subcapítulo seguinte, esta solução resolve o problema da acumulação de água à superfície na Praça 8 de Maio, não resolvendo o problema da zona a jusante, zona esta que engloba a Rua direita, Rua do Carmo, Rua da Nogueira, Terreiro da Erva entre outras. Neste caso verificou-se que a rede de colectores de drenagem se encontrava em carga nesta zona, tendo os colectores a jusante ainda capacidade. Posto isto, de forma a solucionar o problema de incapacidade por parte dos colectores, foi efectuada um novo dimensionamento dos mesmos. Esta intervenção foi efectuada ao longo da Rua direita, Rua João Cabreira, Rua da Nogueira, Rua do Carmo e Terreiro da Erva. A Figura 4.4 apresenta os colectores intervencionados.



Figura 4.4 – Colectores redimensionados.

Efectuado o novo dimensionamento dos colectores, verificou-se que a existência de água à superfície em algumas ruas não resultava somente da falta de capacidade da rede de colectores, pois apesar destes passarem a ter capacidade continuava a existir uma acumulação de água à superfície. Havendo capacidade na rede de colectores, o problema reside no mau dimensionamento dos órgãos de entrada. Posto isto, e à semelhança do efectuada para a resolução das inundações na Praça 8 de Maio, foram implementadas grelhas nas ruas onde se verificava uma maior acumulação de água, nomeadamente (Figura 4.5):

- Grelha 12 – Rua do Carmo;
- Grelha 13 – Rua do Carmo;
- Grelha 14 – Rua Direita.



Figura 4.5 - Numeração e respectiva localização das grelhas para resolução das inundações na zona a jusante da Praça 8 de Maio.

4.3.3 Resultados

4.3.3.1 Introdução

Explicadas as soluções adoptadas, o presente capítulo destina-se a apresentação dos resultados obtidos após a implementação das mesmas. Os resultados serão apresentados em duas fases, uma vez que foram detectados problemas distintos em zonas diferentes. Numa primeira parte serão apresentados os resultados referentes à resolução do problema da Praça 8 de Maio. Na segunda parte serão demonstrados os resultados relativos ao problema da zona que engloba a Rua direita, Terreiro da Erva e zona envolvente.

Como referido em capítulos anteriores, as simulações foram efectuadas para um evento de precipitação com um tempo de retorno de 20 anos.

Como se pode observar na Figura 4.6, ao efetuar-se uma simulação do modelo antes de ser feita qualquer tipo de intervenção, verificam-se alturas de água significativas na zona de Praça 8 de Maio e zona a jusante, como é caso da Rua Direita, Terreiro da Erva e respectiva zona envolvente. No caso da Praça 8 de Maio atinge-se uma altura máxima próxima de 50 cm (Figura 4.7), chegando a zona a jusante a ultrapassar os 60 cm de altura (Figura 4.8).



Figura 4.6 – Simulação efetuada antes da implementação de soluções.

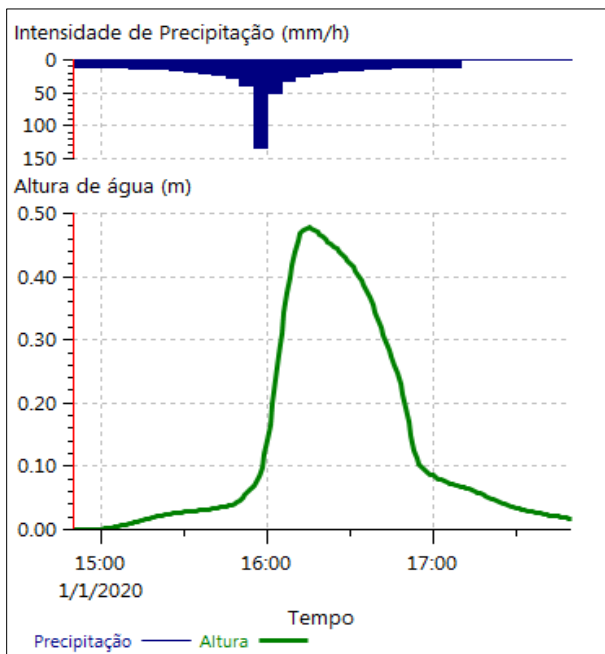


Figura 4.7 - Altura de água na Praça 8 de Maio antes da implementação de soluções.

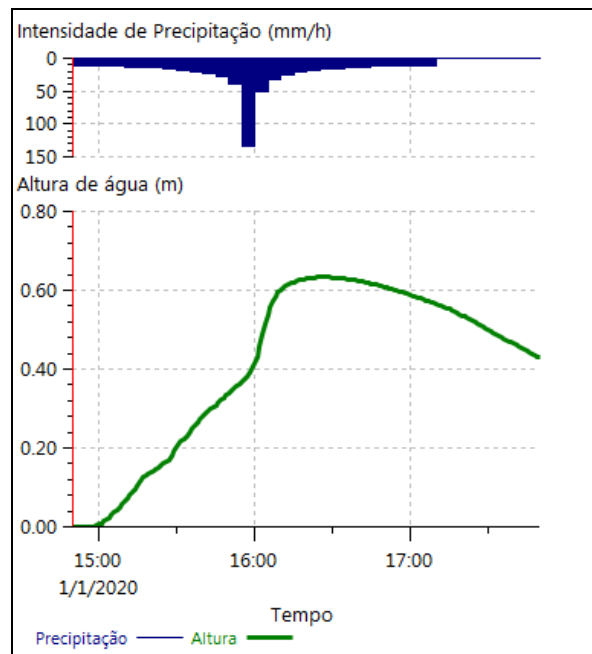


Figura 4.8 - Altura de água na Rua Direita antes da implementação de soluções.

4.3.3.2 Fase 1 - Implementação de grelhas a Montante da Praça 8 de Maio

Inicialmente na Praça 8 de Maio verificava-se uma altura de água à superfície de aproximadamente 0,5 m (Figura 4.9). Para facilitar posteriormente a análise de resultados é apresentado também o mapa da zona da Praça 8 de Maio, onde são representadas por diferentes cores as alturas de água observadas à superfície (Figura 4.10).

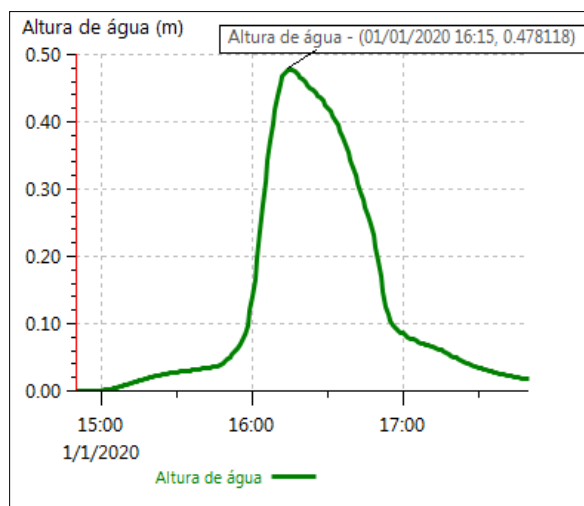


Figura 4.9 – Altura de água inicial na Praça 8 de Maio.

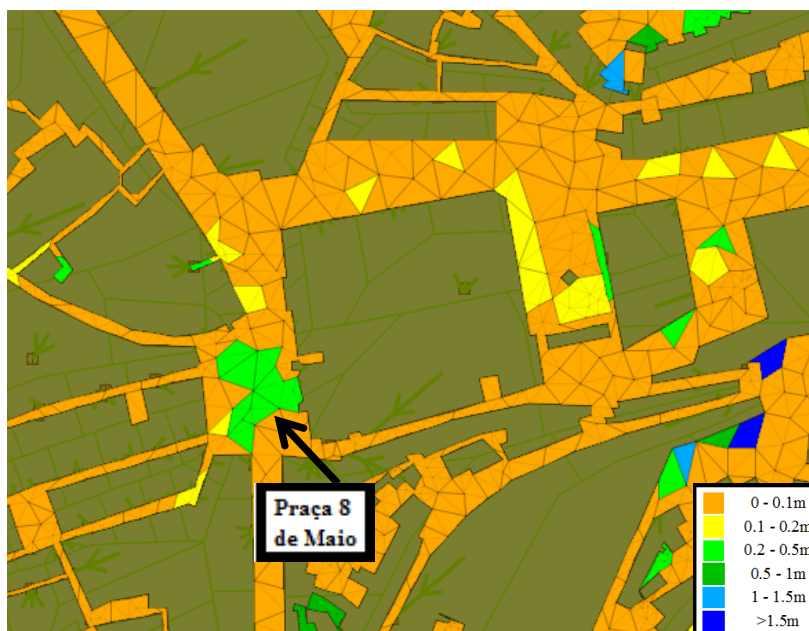


Figura 4.10 – Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio antes da implementação de soluções.

À medida que as grelhas foram sendo implementadas foram verificadas diminuições significativas na altura de água na Praça 8 de Maio. De seguida serão apresentados os resultados obtidos após a implementação de cada grelha, sendo apresentadas imagens relativas à altura de água verificada na Praça 8 de Maio e alturas de água captadas pelas respectivas grelhas.

Ao ser implementada a Grelha 1, as alterações verificadas ao nível da altura de água na Praça 8 de Maio foram mínimas, como se pode observar pela Figura 4.12. Deste modo o mapa não sofre alterações, não sendo apresentado por uma questão de limitação de espaço do documento. No entanto, a Figura 4.11 mostra a altura de água a montante da Grelha 1. Esta será toda captada por essa grelha.

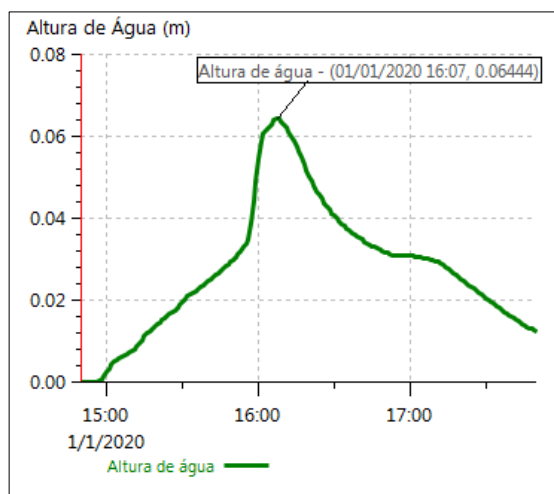


Figura 4.11 – Altura de água a montante da Grelha 1.

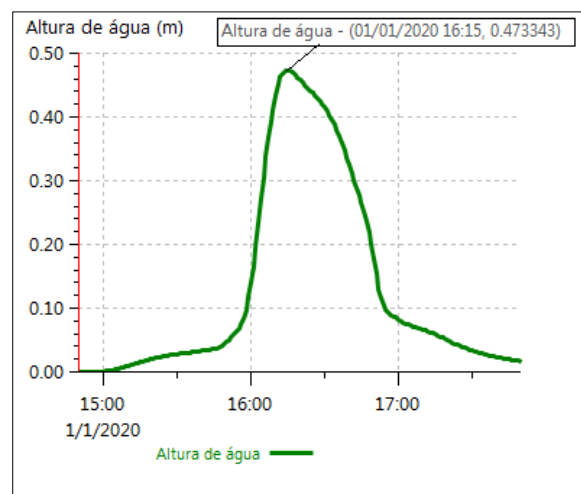


Figura 4.12 – Altura de água na Praça 8 de Maio após a implementação da Grelha 1.

Com a implementação da Grelha 2 já são visíveis alterações no mapa de alturas de água (Figura 4.13), permitindo a Grelha 2 uma captação de cerca de 7.5 cm de altura de água (Figura 4.14). O nível da altura de água continua a diminuir, sendo a sua diminuição mínima na Praça 8 de Maio (Figura 4.15).

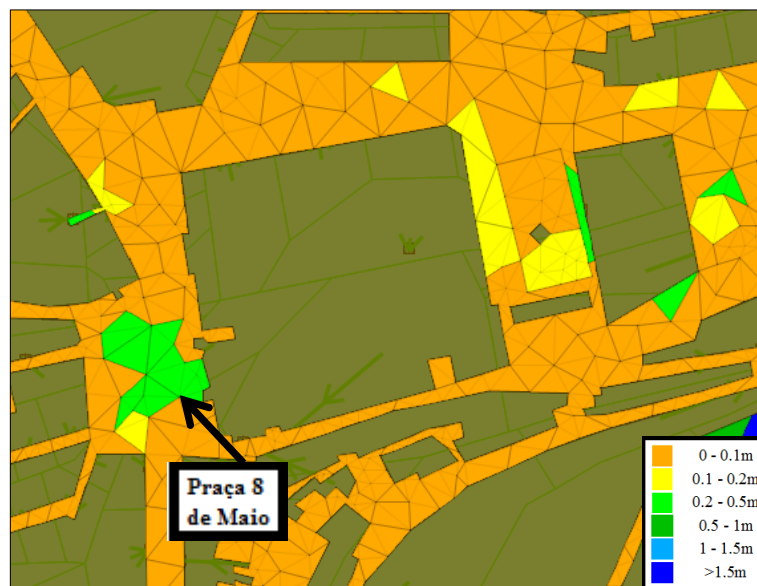


Figura 4.13 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio após a implementação das Grelhas 1 e 2.

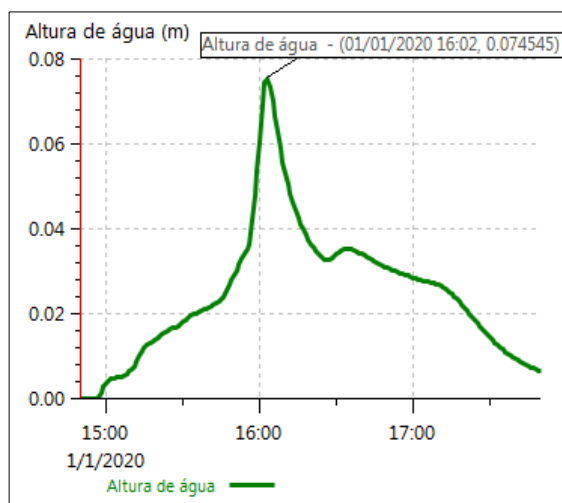


Figura 4.14 – Altura de água a montante da Grelha 2.

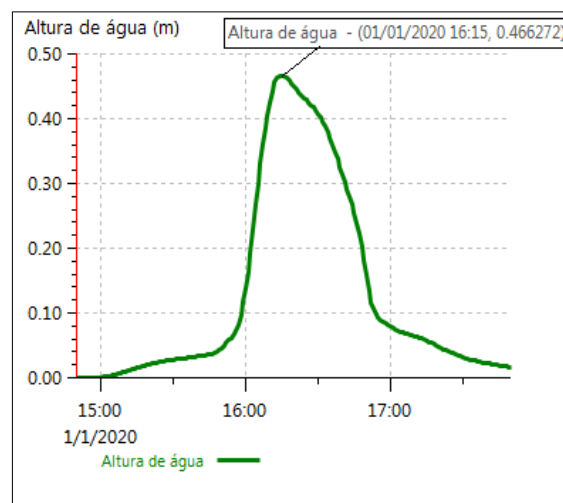


Figura 4.15 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 2.

Com a Grelha 3 o mapa de alturas de água na Praça 8 de Maio permaneceu semelhante ao apresentado para a Grelha 2, sendo os resultados obtidos para água a montante da grelha implementada e altura de água na Praça 8 de Maio os verificados na Figura 4.16 e Figura 4.17 respectivamente.

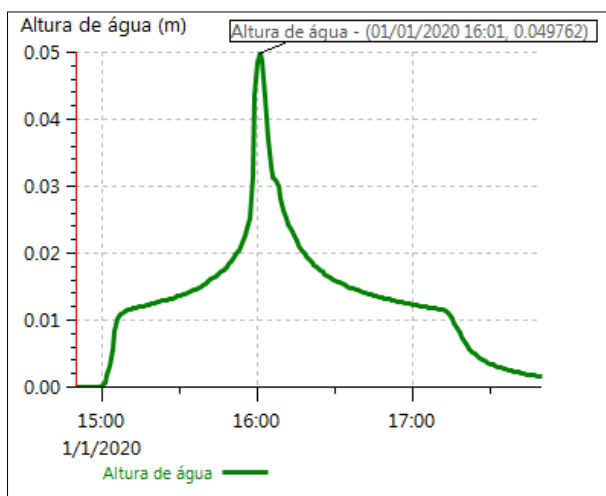


Figura 4.16 – Altura de água a montante da Grelha 3.

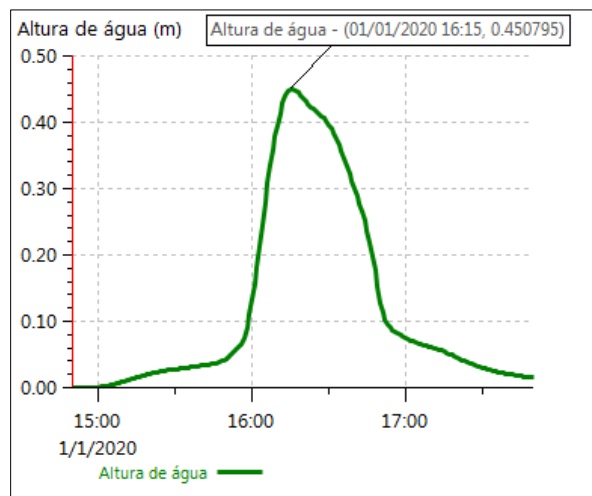


Figura 4.17 – Altura de água na praça 8 de Maio após a implementação da Grelha 3.

Os resultados obtidos para as grelhas implementadas na Avenida Sá da Bandeira (Grelha 4 e Grelha 5), serão apresentadas após a colocação de ambas as grelhas, mais uma vez devido a limitações no espaço do documento. Os resultados obtidos para a altura de água a montante de cada uma das grelhas e o nível de água na Praça 8 de Maio são apresentados na Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20 respectivamente



Figura 4.18 – Altura de água a montante da Grelha 4.

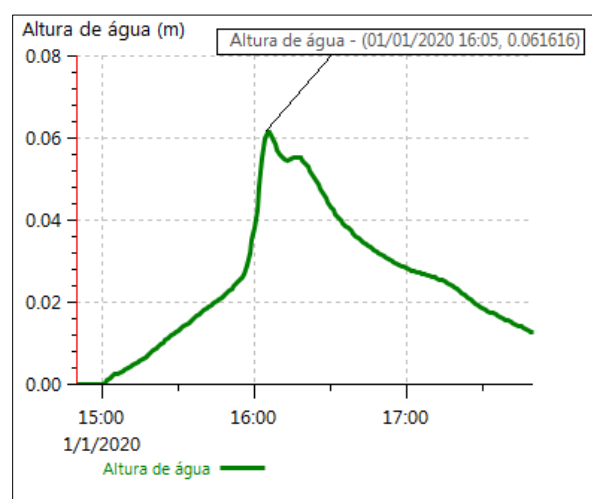


Figura 4.19 – Altura de água a montante da Grelha 5.

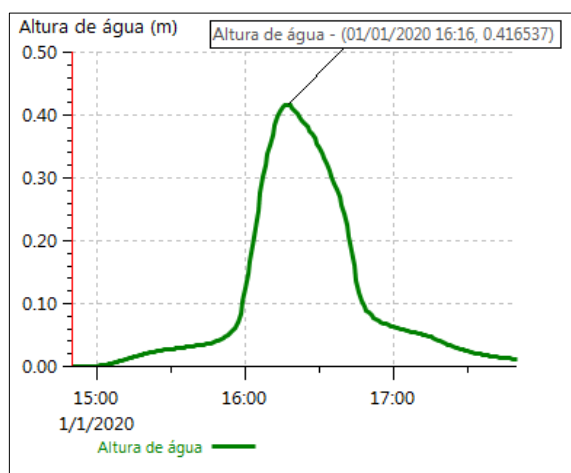


Figura 4.20 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação das Grelhas 4 e 5.

Como se pode verificar na Figura 4.21 a implementação da Grelha 6 reduz não só a altura verificada na Praça 8 de Maio como também se verifica uma diminuição significativa da altura de água na zona do Jardim da Manga. Esta grelha permite uma captação de cerca de 9,5 cm de água (Figura 4.22), e a altura de água que se acumula na Praça 8 de Maio é próxima dos 37 cm (Figura 4.23).

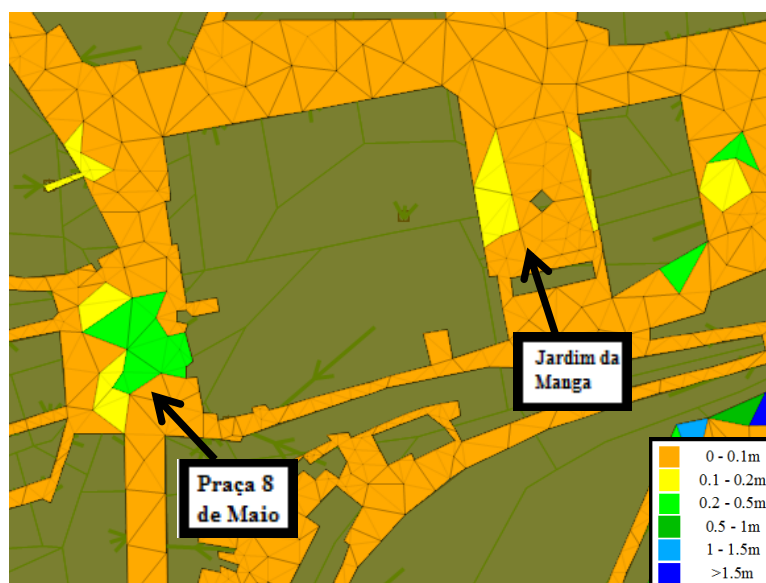


Figura 4.21 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio e Jardim da Manga após a implementação da Grelha 6.

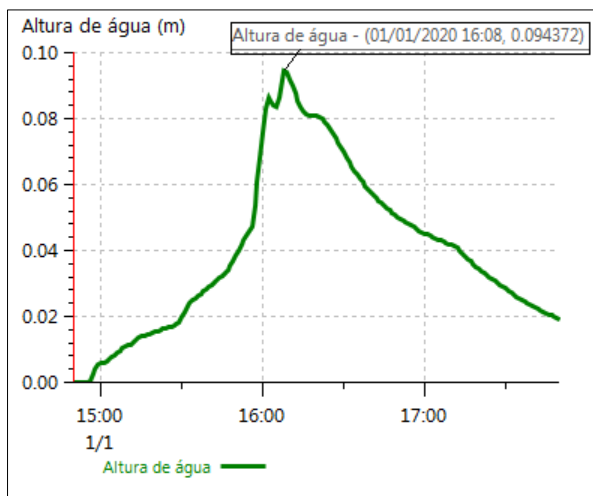


Figura 4.22 – Altura de água a montante da Grelha 6.

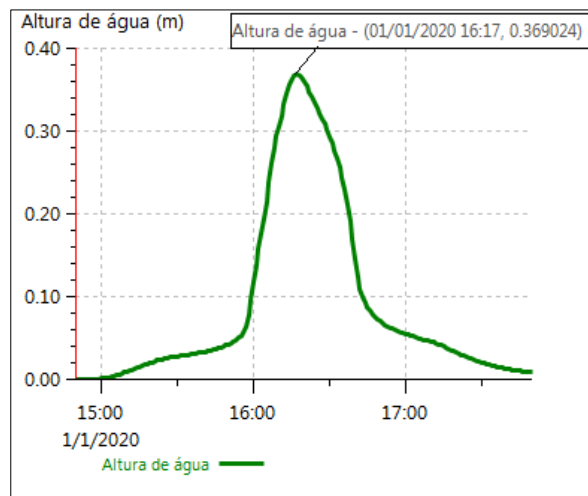


Figura 4.23 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelhas 6.

Semelhante ao que acontece com a implementação das grelhas anteriores, ao ser implementada a Grelha 7 continua-se verificar uma diminuição da altura de água acumulada na zona da Praça 8 de Maio (Figura 4.25), permitindo esta grelha uma recolha de cerca de 7,5 cm de água (Figura 4.24).

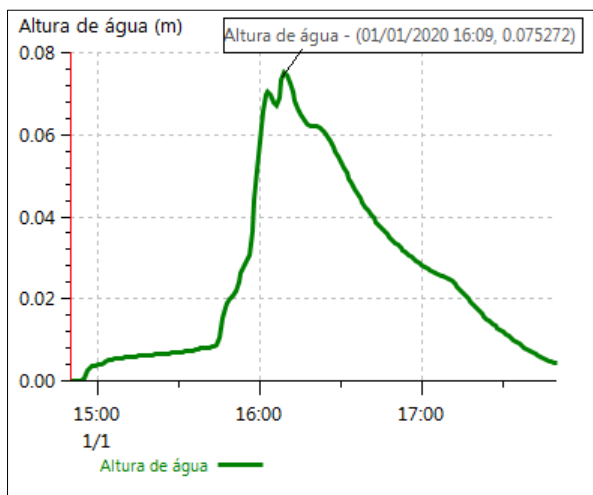


Figura 4.24 – Altura de água a montante da Grelha 7.

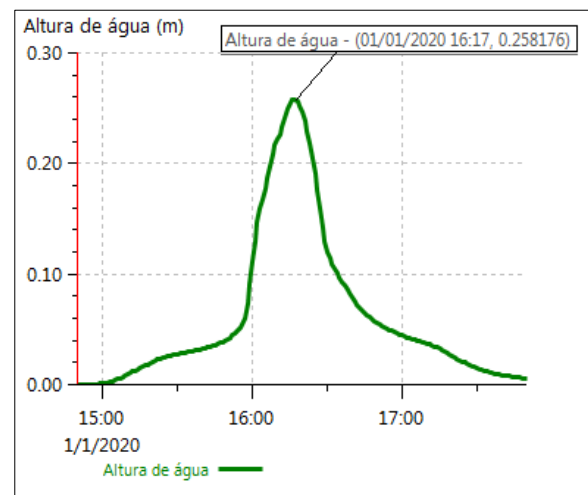


Figura 4.25 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 7.

Ao ser implementada a Grelha 8, são notáveis as alterações que esta provoca no modelo (Figura 4.26). As alturas de água na Praça 8 de Maio que inicialmente estavam

compreendidas entre os 0,2 e 0,5 m diminuem para um intervalo entre 0,1 e 0,2 m, não chegando a atingir o valor máximo do limite (Figura 4.28). Também na zona do Jardim da Manga a água foi praticamente extinta.

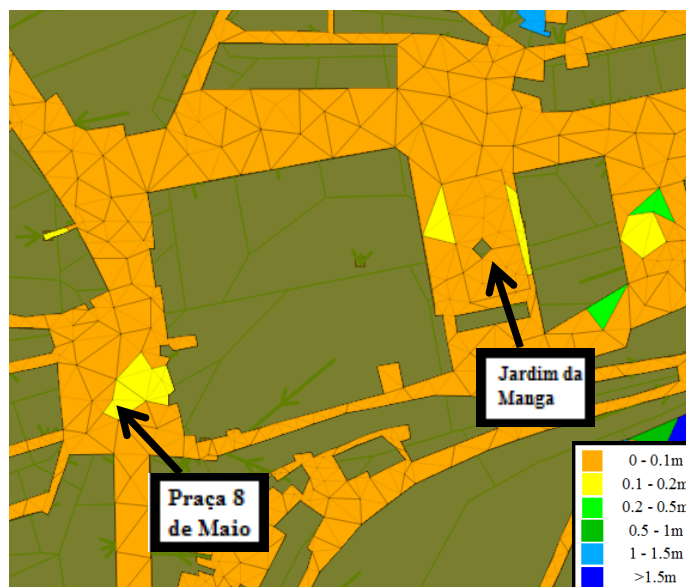


Figura 4.26 - Mapa de alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio e Jardim da Manga após a implementação da Grelha 8.

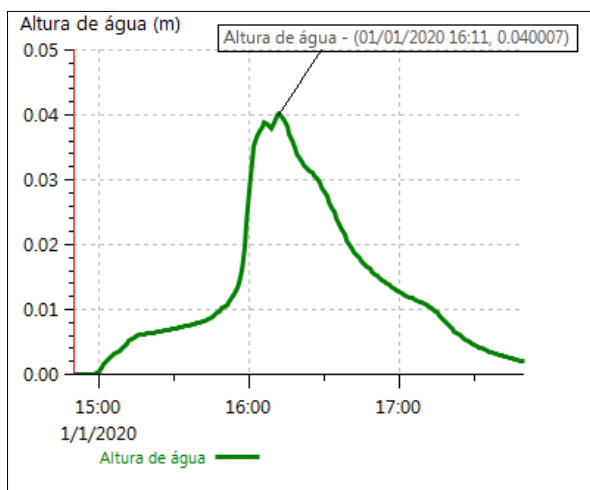


Figura 4.27 – Altura de água a montante da Grelha 8.

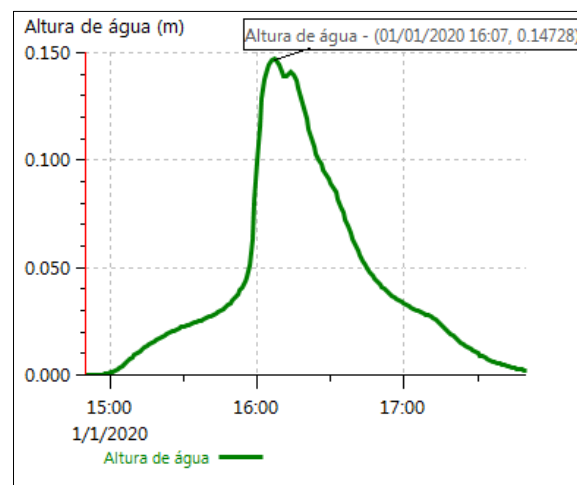


Figura 4.28 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 8.

Com a implementação da Grelha 9 os resultados obtidos para a altura de água a montante desta e do nível de água acumulada na Praça 8 de Maio são os apresentados na Figura 4.29 e Figura 4.30 respectivamente.

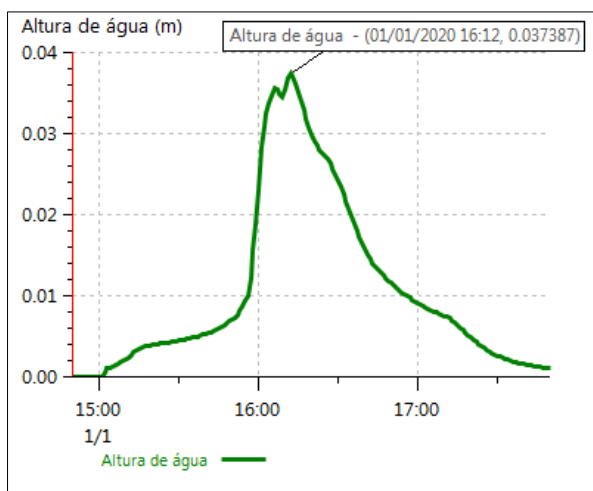


Figura 4.29 – Altura de água a montante da Grelha 9.

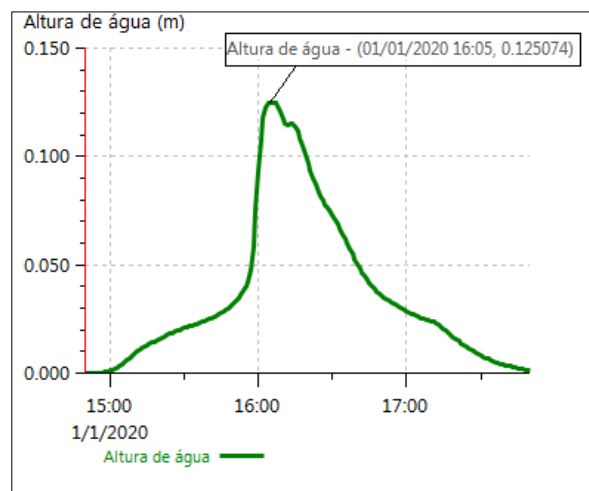


Figura 4.30 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 9.

Para a Grelha 10 os resultados obtidos foram os seguintes apresentados na Figura 4.31 e Figura 4.32:

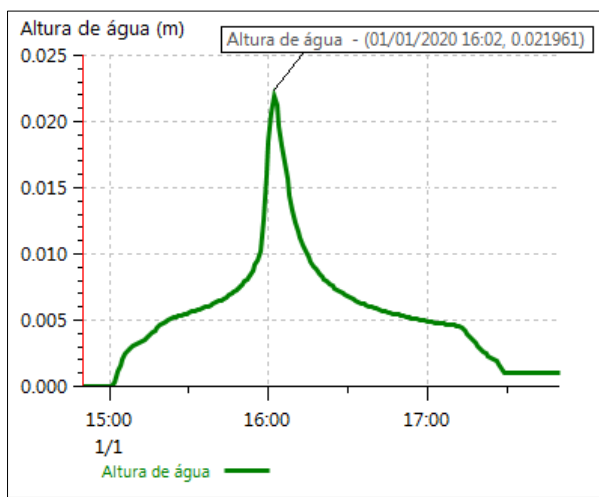


Figura 4.31 – Altura de água a montante da Grelha 10.

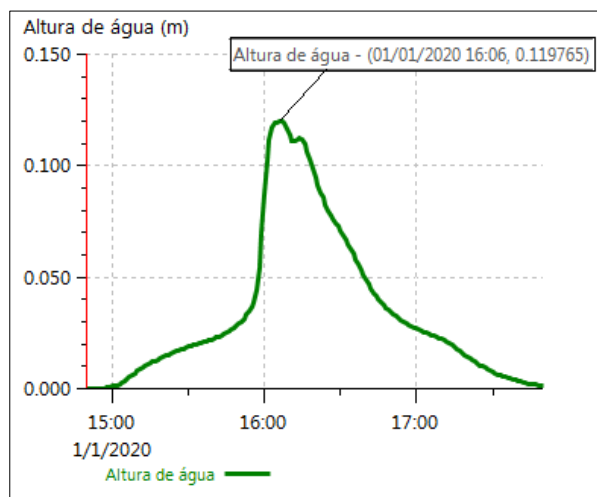


Figura 4.32 - Altura de água na Praça 8 de Maio após implementação da Grelha 10.

Após a colocação das 10 Grelhas ter reduzido consideravelmente o nível de água na praça 8 de Maio ainda permanecia uma acumulação de cerca de 12 cm (Figura 4.32). Sendo o objectivo fulcral do presente trabalho reduzir os níveis de água abaixo dos 10 cm, optou-se pela implementação de uma grelha na zona onde se verificava a acumulação de água, Grelha 11. Os resultados obtidos para os níveis de água na Praça 8 de Maio são representados na Figura 4.33 e apresentados na Figura 4.34.

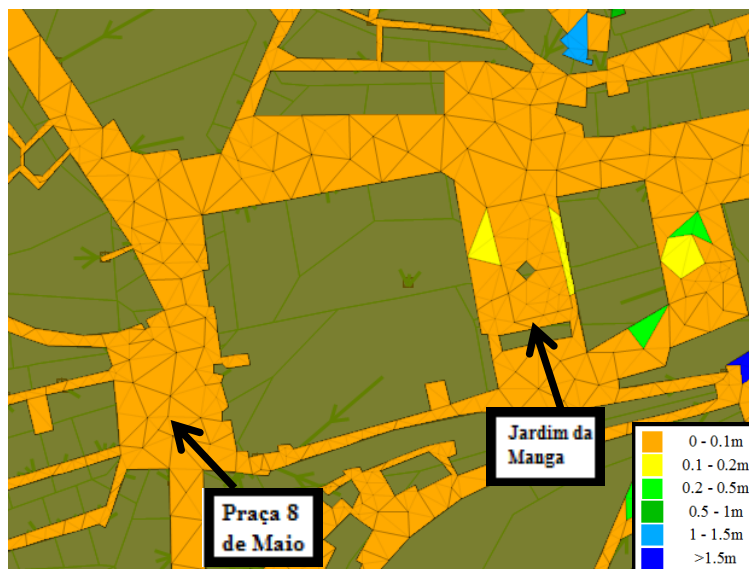


Figura 4.33 - Mapa final das alturas de água verificadas na Praça 8 de Maio após a implementação das 11 Grelhas a montante.

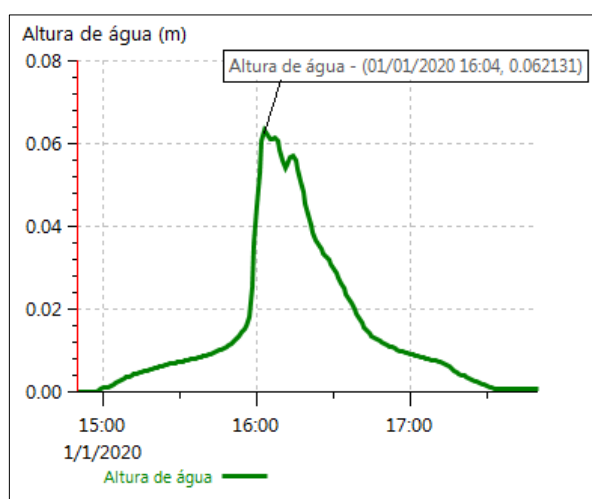


Figura 4.34 – Altura de água obtida na Praça 8 de Maio após Implementação das 11 Grelhas.

4.3.3.3 Fase 2 - Redimensionamento na Rede de Colectores e Implementação de Grelhas a Jusante da Praça 8 de Maio

Pela análise da Figura 4.35 e Figura 4.36 facilmente se conclui que apesar de se verificar uma ligeira melhoria no que diz respeito à acumulação de água na segunda zona em estudo, zona esta que engloba Rua Direita e zonas adjacente a esta, a implementação das 11 Grelhas a montante da Praça 8 de Maio não resolve o problema nesta zona.

Verificou-se que grande parte dos colectores tinha atingido a sua capacidade, nomeadamente na Rua Direita (Figura 4.37), Rua João Cabreira (Figura 4.38), Rua da Nogueira (Figura 4.39), Rua do Carmo (Figura 4.40) e na zona do Terreiro da Erva (Figura 4.41), tendo no entanto o sistema a jusante (Pentagonal) ainda capacidade (Figura 4.42).



Figura 4.35 - Zona 2 em estudo na situação inicial.



Figura 4.36 - Zona 2 em estudo após a implementação das 11 Grelhas a montante da Praça 8 de Maio.

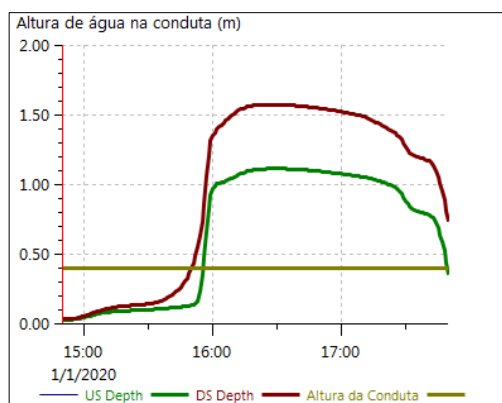


Figura 4.37 - Alturas de água verificadas num colector da Rua Direita.

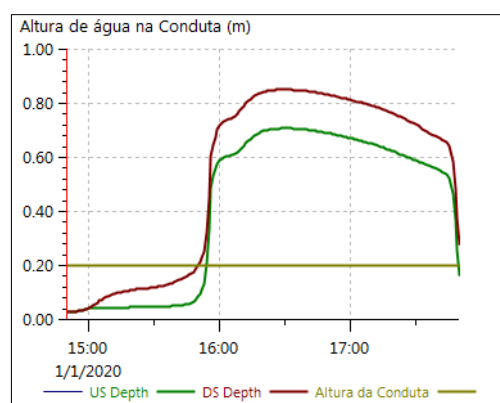


Figura 4.38 - Alturas de água verificadas num colector da Rua João Cabreira.

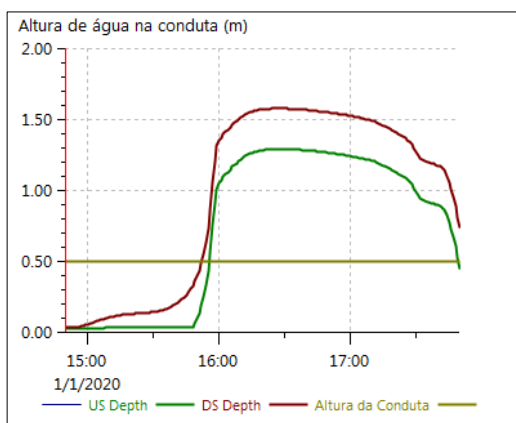


Figura 4.39 - Alturas de água verificadas no coletor da Rua da Nogueira.

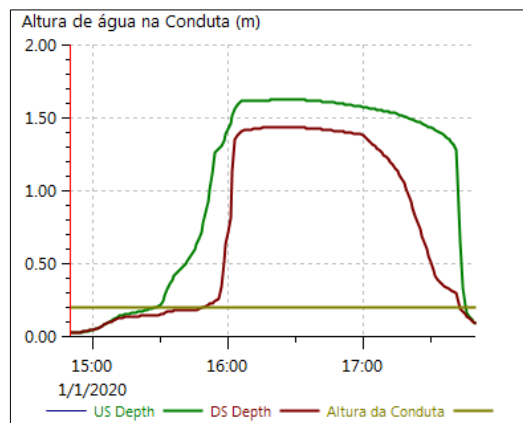


Figura 4.40 - Alturas de água verificadas num coletor da Rua do Carmo.

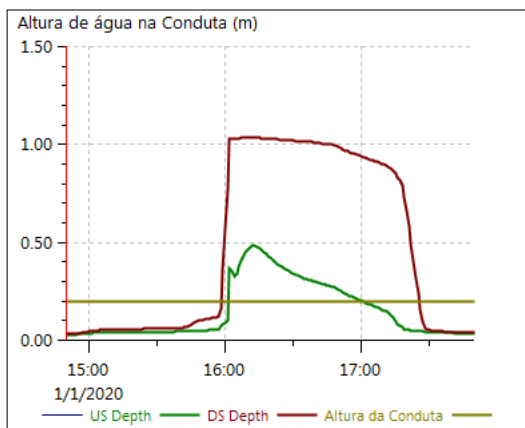


Figura 4.41 - Alturas de água verificadas num coletor na zona do Terreiro da Erva.

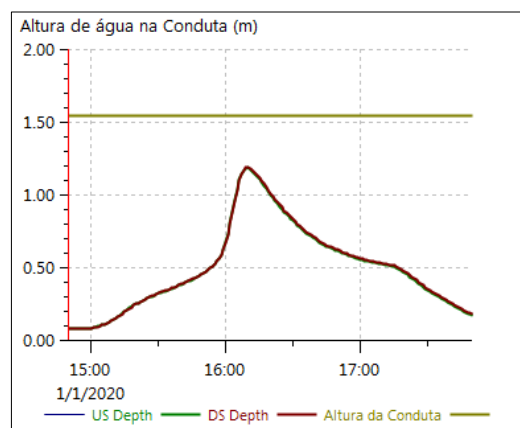


Figura 4.42 - Alturas de água verificadas num coletor do Pentagonal.

Alterados os diâmetros de forma que nenhum coletor do sistema atingisse a sua capacidade e feita a simulação para um período de retorno de 20 anos o aspecto do modelo no que diz respeito às alturas de água à superfície é o apresentado na Figura 4.43:



Figura 4.43 – Alturas de água verificadas após o redimensionamento dos coletores.

Como se pode verificar pela comparação da Figura 4.36 com a Figura 4.43, o redimensionamento dos coletores diminui o nível de água acumulada à superfície, no entanto não resolve totalmente o problema. Posto isto, e tal como já foi referido em capítulos anteriores, procedeu-se à implementação de grelhas transversais aos arruamentos nas zonas onde se verificava uma maior acumulação de água. De seguida apresentam-se os mapas ilustrativos das alturas de água no modelo após a implementação de cada grelha.



Figura 4.44 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 12.

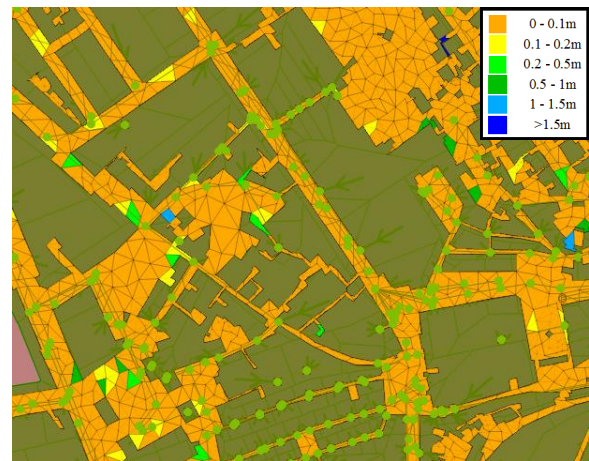


Figura 4.45 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 13.



Figura 4.46 - Alturas de água verificadas após a implementação da Grelha 14.

Redimensionados os coletores e implementadas as grelhas, é possível verificar que a rede de coletores a jusante (Pentagonal) não atingiu a sua capacidade máxima (Figura 4.47).

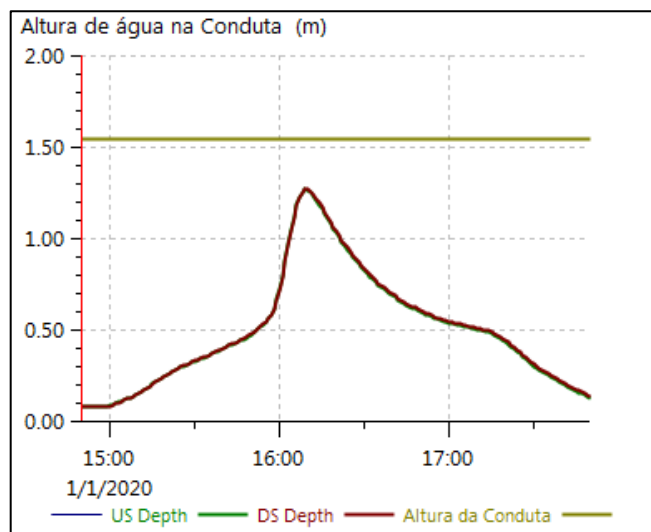


Figura 4.47 - Alturas de água verificadas num colector do Pentagonal após implementação das soluções.

4.3.4 Análise de resultados

Após apresentação dos resultados prossegue-se com a análise dos mesmos. Esta análise será feita tanto a nível hidráulico como a nível económico, sendo apresentada uma estimativa de quanto custaria a implementação das soluções apresentadas e descritas anteriormente.

Como se pode observar pelos resultados anteriormente apresentados, o problema de acumulação de água na Praça 8 de Maio é possível de resolver com a implementação de uma série de grelhas a montante desta zona. Ao ser implementada cada grelha permite a recolha do escoamento superficial para a rede de colectores, diminuindo deste modo o escoamento superficial, que devido ao declive acentuado fluía ao longo das ruas acumulando-se posteriormente nas zonas planas, como é o caso da Praça 8 de Maio. Ao ser implementada esta solução conclui-se que apesar de se reduzir a água acumulada na zona da Rua Direita, Terreiro da Erva e zona adjacente este problema não fica resolvido, permanecendo ainda um nível bastante elevado de água à superfície. O facto da acumulação de água nesta zona deve-se essencialmente a dois problemas distintos, uma incapacidade detectada na rede de colectores e uma insuficiência ao nível dos órgãos de entrada.

No que diz respeito à falta de capacidade por parte da rede de colectores, concluiu-se que era possível um aumento dos diâmetros dos colectores em carga, uma vez que o sistema a jusante ainda tinha uma larga margem até atingir a sua capacidade.

Tal como foi referido no parágrafo anterior a resolução deste problema não resolve por completo o problema da acumulação de água. Sendo esta zona uma zona muito plana, necessita de uma rede de órgãos de entrada extremamente eficiente de forma a não permitir a cumulação de água à superfície, entrando esta diretamente no sistema de drenagem. Ao serem implementadas 3 grelhas transversais aos arruamentos, o problema da acumulação de água ficou resolvido, sendo apenas verificados níveis de água em pequenos pontos baixos, não significativos.

Estando apresentados e analisados os resultados obtidos para um evento pluvioso com um tempo de retorno de 20 anos, onde se verificou que as soluções apresentadas eram bastante eficazes perante os problemas em causa, foi efectuada uma simulação de como reagiriam as soluções na ocorrência de um evento pluvioso com um tempo de retorno de 100 anos. Os níveis de água para os casos analisados são os apresentados na Figura 4.48.

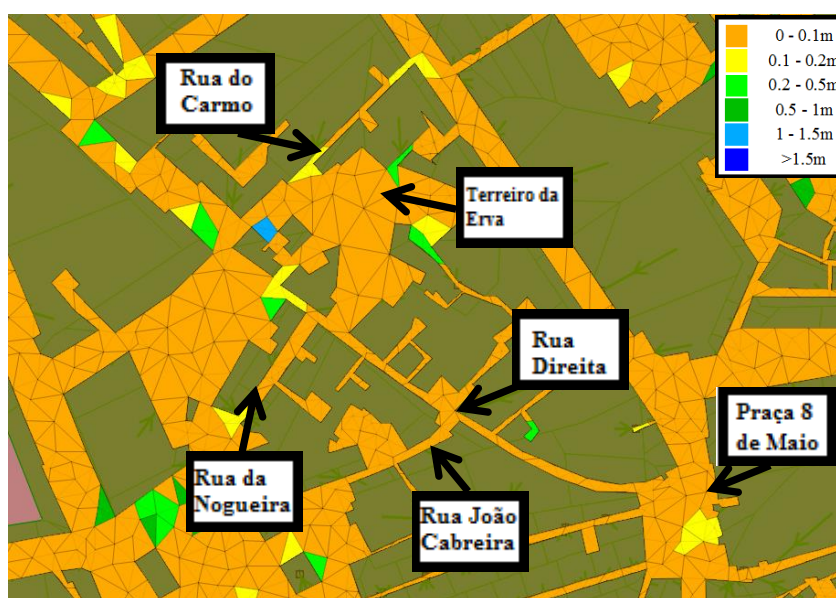


Figura 4.48 - Alturas de água verificadas para um tempo de retorno de 100 anos.

Pela observação da Figura 4.48 facilmente se conclui que para uma chuvada com um tempo de retorno de 100 anos as soluções adoptadas, apesar de não eliminarem a água acumulada à superfície por completo, resolvem praticamente o problema, não havendo o risco de problemas associados a inundações nesta zona. É de realçar que nos modelos de simulação superficiais existem sempre alguns erros devido à informação disponível. Como resultado, junto a edifícios é comum aparecerem algumas acumulações de água, que na realidade não acontecem. Isto ocorre porque, além do modelo digital do terreno ter alguma incerteza associada, não foram consideradas as ligações prediais.

4.3.5 Análise de Custos

Inerente à implementação de uma determinada solução está implícito um custo, sendo o modo como foram estimados os custos da presente solução descrito no subcapítulo 3.5. Na estimativa do valor do custo das soluções apenas é contabilizado o custo associado à sua implementação, não sendo considerados os danos prevenidos por estas. A estimativa total do valor do custo para as diferentes soluções é de aproximadamente 160 000€, o Quadro 4.1 apresenta a quantificação dos custos e as quantidades necessárias inerentes a cada tipo de solução adoptada (implementação de grelhas ou redimensionamento de colectores). Como já foi referido no subcapítulo 3.5, a quantificação dos custos das grelhas foi efectuada considerando o número de sumidouros necessários à implementação de cada grelha, considerando sumidouros com 70 cm de comprimento. No caso do redimensionamento dos colectores, a estimativa do seu custo será efectuada tendo em conta os metros necessários de cada diâmetros.

Quadro 4.1 – Estimativa dos custos para as diferentes soluções adoptadas.

Fase	Quantidades		Custo (€)
Implementação de Grelhas	190 uni.		81.700€
Redimensionamento na Rede de Colectores	D (mm)	Comp. (m)	
	300	80,9	4.288€
	400	85,7	5.657€
	500	23,5	2.162€
	600	83,8	9.051€
	700	148,8	19.791€
	800	81,2	6.594€
	900	150,5	29.794€
	Total	654,4	77.342€
Total			159.042€

Do ponto de vista económico não se trata de uma solução demasiado dispendiosa uma vez que resolve os problemas das inundações na baixa de Coimbra, permitindo uma diminuição considerável do nível de água na zona em estudo. Outros estudos já efectuados anteriormente, propõem soluções para resolver o problema através da implementação de bacias de retenção, sendo o seu custo estimado no valor de aproximadamente 130 000€ (Machado, 2013). Apesar desta solução do ponto de vista económico ser menos dispendiosa não permite a resolução completa dos problemas, resolvendo apenas as inundações na zona da Praça 8 de Maio.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A tendência do crescimento da população leva a um aumento do desenvolvimento urbano, desenvolvimento este que tem provocado impactos significativos na população e no meio ambiente. Este facto, aliado às alterações climáticas tem deteriorado a qualidade de vida da população através do aumento da frequência e do nível das inundações.

O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal através da impermeabilização do solo, modificando deste modo o ciclo hidrológico natural da água. A água que outrora se infiltrava, passa a escoar livremente à superfície aumentando o escoamento superficial, levando à ocorrência de inundações.

Apesar de passar despercebido à maioria da população, o sistema de drenagem pluvial urbana desempenha um papel fundamental para o bom funcionamento das cidades, minimizando os problemas relacionados com as inundações urbanas. Um sistema de drenagem eficiente deve estar munido de uma rede de órgãos de entrada que permita de forma eficaz a intercepção, recolha e transmissão do escoamento superficial à rede de colectores, que por sua vez deve efectuar o seu transporte até ao meio receptor. Um inadequado dimensionamento de uma destas duas redes que constituem o sistema de drenagem põe em causa todo o seu bom funcionamento.

No presente trabalho foi efectuada uma análise completa e detalhada da zona central da cidade de Coimbra, zona esta fortemente afectada por inundações quando se verificam fenómenos pluviosos mais intensos. Para se realizar o estudo recorreu-se a um modelo avançado de drenagem dual, onde se verificou que o principal problema das inundações nesta zona residia no facto de a água não entrar na rede de colectores, acumulando-se à superfície sem que a rede de colectores tivesse entrado em carga. Ao serem realizadas as primeiras simulações verificou-se que a rede disponibilizada possuía problemas ao nível das cotas topográficas de alguns pontos, o que faziam com que em determinadas condutas a água estivesse a circular em sentido contrario, não estando o modelo a funcionar convenientemente. Corrigidas essas pequenas falhas prosseguiu-se com o estudo, sendo as simulações efectuadas para um evento pluvioso com um tempo de retorno de 20 anos.

Ao serem efectuadas as simulações foram verificados dois tipos de problemas em duas zonas distintas. O primeiro problema encontrado provocava inundações na Praça 8 de Maio, sendo o problema causado pela ineficiência dos órgãos de entrada a montante desta zona. O segundo problema localizava-se na zona da Rua Direita, Terreiro da Erva e zona envolvente, sendo inicialmente detectado um mau dimensionamento dos coletores localizados nesta zona e posteriormente uma ineficiência dos órgãos de entrada.

De forma a resolver o primeiro problema encontrado, problema este localizado na Praça 8 de Maio, foi efectuado um estudo de possíveis localizações para a implementação de grelhas transversais aos arruamentos, para que estas captassem o escoamento superficial reduzindo o caudal que chega a zona afectada. As grelhas foram sendo implementadas de montante para jusante de forma a se perceber como cada grelha afectaria todo o sistema a jusante. Ao fim da implementação de 11 grelhas verificou-se que o problema ficaria resolvido, reduzindo drasticamente o caudal que aflui à Praça 8 de Maio, sem que a rede de coletores atingisse a sua capacidade.

No que diz respeito à segunda zona onde foram encontrados problemas de acumulação de água, a resolução dos mesmos passou inicialmente por um novo dimensionamento dos colectores nesta zona, de forma a que estes tivessem capacidade para receber e transportar de forma eficaz todo o caudal que a eles é transmitido. Efectuado o novo dimensionamento dos coletores, verificou-se uma falha por parte dos órgãos de entrada que foi resolvida com a implementação de 3 grelhas transversais aos arruamentos.

Pela análise de resultados é possível verificar que em ambos os casos as soluções adoptadas resolvem os problemas para um evento pluvioso com um tempo de retorno de 20 anos, sendo posteriormente testado como as mesma reagiriam perante uma precipitação com um tempo de retorno de 100 anos. Ao ser efectuado este teste verificou-se que apesar das soluções não eliminarem por completo a água acumulada nas zonas em estudo, os níveis observados são bastante reduzidos, não havendo risco de problemas associados a inundações.

Por último foi efectuada uma análise económica, onde se comparou as soluções adoptadas, com outras soluções anteriormente estudadas, nomeadamente a implementação de bacias de retenção. A nível económico as soluções adoptada são ligeiramente mais dispendiosa, no entanto resolvem o problema das inundações na zona central da cidade de Coimbra, permitindo uma diminuição considerável do nível de água acumulado na zona em estudo. Por outro lado, as bacias de retenção permitem uma redução do nível de água na Praça 8 de Maio, não resolvendo o problema de acumulação de água da Rua Direita, Terreiro da Erva e ruas adjacentes.

5.2 Trabalhos Futuros

No seguimento deste trabalho poderão ser realizados outros trabalhos que se foquem no âmbito dos impactos que os órgãos de entrada provocam nos sistemas de drenagem. Seria de extremo interesse, a realização de trabalhos no qual o principal objectivo fosse o dimensionamento detalhado dos órgãos de entrada, de modo a cumprir a capacidade desejada. Ainda no mesmo âmbito, o estudo da influência do estado de manutenção e conservação das infraestruturas na avaliação da capacidade dos órgãos de entrada, seria outro tema de interesse que daria continuidade ao presente trabalho realizado.

Outro tema para continuação deste trabalho era a quantificação do risco de inundação antes e após da implementação das soluções estudadas. Sendo efectuados mapas de risco de inundação que permitissem uma avaliação do dano causado e prevenido.

Neste trabalho foi feita uma comparação entre as soluções adoptadas e as bacias de retenção. Outro estudo que pode ser realizado é o mesmo tipo de comparação com outros tipos de SUDS, nomeadamente telhados verdes, pavimentos permeáveis entre outros.

Sendo a análise económica efectuada para a solução apresentada muito breve, uma avaliação dos custos mais pormenorizada seria interessante também.

Por último, outro trabalho possível de se realizar era efetuar o mesmo estudo tendo por base um modelo mais evoluído, ou seja, em vez de ser utilizado um modelo semi-distribuído, fazer-se uso de um modelo totalmente distribuído, onde a precipitação é directamente aplicada ao modelo de superfície 2D, não sendo aplicada em sub-bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agronomia@ (2010). <http://www.ucla.edu.ve/ecla/reshist.htm>. Pluviógrafo, tipo Hellmann, Espanha.

B_S_R@ (2015). <http://www.bsr.ac.uk/la-cloaca-maxima-tra-la-subura-e-il-foro-romano-le-nuove-indagini/cloaca-maxima>. Cloaca Maxima, Inglaterra.

Bastos, B. C., Filho, L. E. (2012). “Utilização da Tecnologia LIDAR em Projetos de Engenharia de Infraestruturas Viárias”. XI Congresso Nacional y VIII Latino-Americano de Agremensura, Córdoba, Argentina.

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

Butler, D., Davies, J. W. (2011). “Urban Drainage.” Oxon, Spon Press.

Carvalho, R. F., Tavares, P. “Modelos precipitação-escoamento” - Apontamentos de Hidrologia e Recursos Hídricos da Universidade de Coimbra. Departamento de Engenharia Civil. Coimbra.

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

Chow, V. T. (1956). “Hydrologic Studies of Floods in the United States”. Inter. Assoc. Sci. Hydrol., Publ. nº 42, 134-170.

Djordjevic, S., Prodanovic, D. e Maksimovic, C. (1999) "An approach to simulation of dual drainage", In Water Science and Technology, Vol. 39, No. 9, pp. 95-103.

Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C., Ivetic, M. e Savic, D. (2005). "SIPSON - Simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks." Water Science and Technology 52(5): 275-283

Djordjević, S., Prodanovic, D., Walters, G. A. (2004). “Simulation of transcritical flow in pipe/channel networks.” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 130(12).

El País Internacional (2013). http://brasil.elpais.com/brasil/2013/12/05/internacional/1386269386_260818.html. Porto de Degebuell, no norte da Alemanha.

Expresso@ (2016). <http://expresso.sapo.pt/sociedade/2016-01-11-Situacao-de-cheia-tende-a-normalizar-no-Baixo-Mondego>. Situação de cheia tende a normalizar no baixo Mondego.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S. (2015). "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage." *Urban Water Journal*. 12:7, 525-572.

Hill, D. (1986). "A history of engineering in classical and medieval times". Croom Helm Ltd.

IPMA@ (2016). <https://www.ipma.pt/pt/otempo/obs.radar/#>. Intensidade de Precipitação, Portugal.

JN@ (2014). http://www.jn.pt/multimedia/galeria.aspx?content_id=4138599. Chuva intensa causou várias inundações em Lisboa, Portugal.

Leitão, J. P. C. (2009). Enhancement of digital elevation models and overland flow path delineation methods for advanced urban flood modeling. Tese de Doutoramento, Department of Civil and Environmental Engineering - Imperial College, Londres.

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

Lima, J. P., Lima, M. I. P. (2010). Cap. 5- Conceitos Básicos de Hidrologia. In *Hidrologia Urbana - Conceitos Básicos*. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

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

Lopes, P., Abreu, J. M., Leandro, J. (2011). "Escoamentos mistos em coletores - Modelação matemática e algoritmos numéricos". 11º Congresso da Água. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. Portugal.

Machado, F. M. C. (2013). Modelação Hidráulica de Sistemas Urbanos de Drenagem. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.

Maksimovic, C. (2001). “General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. Urban Drainage in Specific Climates”. IHP-V-Technical Documents in Hydrology.

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

Martins dos Santos, M. I. e Hipólito, J. R. (2005). “Análise do Escoamento em Rios Sujeitos à Influência da Maré. Curva de Vazão.” 7.º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos do País.

Matos, J. S. (2003). "Aspetos Históricos e Atuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano." Revista Engenharia Civil 16: 13-23.

Meteorópole@ (2011). <http://meteoropole.com.br/2011/12/o-que-e-um-pluviometro/>. O que é um pluviómetro?, Brasil.

MILIMAGENS@ (2006). <http://milimagens-oldlau1.blogspot.pt/2006/06/chuvada-em-coimbra.html>. Chuvada em Coimbra, Portugal.

MOPTC (1995), Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais (RGSPDADAR), Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto.

Pina, R., Ochoa, S., Simões, N., Mijic, A., Marques, A. S. Maksimovic, C. (2014). “Semi-distributed or fully distributed rainfall-runoff models for urban pluvial flood modelling?” 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia.

Portela, M. M. (2006). Modelação Hidrológica - Apontamentos da disciplina de Modelação Hidrológica do Instituto Superior Técnico. DECivil, 2005/2006, 2º semestre. Lisboa.

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.

Ramos, C. L., Barros, M. T. L. d. e Palos, J. C. F. (1999). Diretrizes Básicas para projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo. Prefeitura do Município de São Paulo.

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

Sá Marques, J. A., Pina, R. D., Sousa, J. (2013) Cap. 5 – Órgãos de Entrada e de Saída. 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., Simões, N. E., Pina, R. D. (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.

Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R., Sá Marques, J. A. e Maksimovic, C. (2010). "Urban Floods Monitoring in Coimbra, Portugal". 10ª International Precipitation Conference. Coimbra, Portugal.

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

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

Tucci, C. E. M., Bertoni, J. C. (2003). "Inundações Urbanas na América do Sul". 1ª Edição. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

Turismo en el Perú@ (2011). <http://turismo-peru.webnode.es/cusco-ombbligo-del-mundo/machu-picchu-maravilla-del-mundo/>. Aspectos constructivos, Espanha.

Yen, B. C., Chow, V. T. (1980). "Design Hyetographs for Small Drainage Structures". Journal of the Hydraulics Division, 106, HY6.