Modelação numérica de cheias fluviais e urbanas na bacia do Mondego

F. J. Seabra Santos
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
fseabra@dec.uc.pt

J. Alfeu Sá Marques
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
jasme@dec.uc.pt

N. E. Simões
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
nunocs@dec.uc.pt

P. Amado Mendes
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
pamendes@dec.uc.pt

Resumo:

Após a caracterização física da bacia do Rio Mondego, a montante da cidade de Coimbra e análise de alguns eventos de cheias ocorridos na segunda metade do século XX e no início do século XXI, faz-se uma curta apresentação da estratégia de modelação hidrológico-hidráulica de cheias fluviais e urbanas, concretizando-se a sua importância e utilidade em três casos estudados pelo Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, e mostrando-se a enorme potencialidade da modelação numérica ao nível do Planeamento, Gestão, Exploração dos Recursos Hídricos e do Território.

Para as cheias verificadas no Rio Mondego, em dezembro de 2000 e janeiro de 2001, foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento hidráulico e hidrológico deste rio, tendo como objetivo último a definição das possíveis áreas inundadas na zona compreendida entre a Ponte de Santa Clara e a Ponte Rainha Santa Isabel. No segundo estudo de caso, demonstra-se a utilidade da modelação numérica no Planeamento do Espaço Urbano, possibilitando a análise do risco de inundação de áreas urbanas, com base em simulações hidráulicas. No último estudo de caso, apresenta-se uma situação de drenagem urbana em que a modelação numérica, através de metodologias complementares (drenagem dual), permite evidenciar e analisar problemas de funcionamento de infraestruturas urbanas de drenagem, face a precipitações de grande intensidade.

Palavras-chave: Bacia do Rio Mondego. Cheias fluviais. Cheias urbanas. Modelação numérica.

Abstract:

Numerical modelling of fluvial and urban floods in the Mondego river basin.

This chapter starts with a brief physical characterization of Mondego river basin upstream from Coimbra and the analysis of some flood events that occurred in the twentieth and early twenty-first centuries. Then, three case studies are presented to make clear the enormous potential of fluvial numerical modelling for planning and management of water resources and territory.

In the first case study, a hydraulic model based in one-dimensional Saint-Venant equations was implemented and validated with the natural flood events of Mondego River in Coimbra area, in December 2000 and January 2001. In the second case study, hydraulic modelling was used to delineate floodable areas in Santa Comba Dão. These floodable areas were associated to different precipitation scenarios, in order to implement the obtained numerical results in future urban master plans. In the third case study, an urban flood in Coimbra city centre was modelled. The 9th June 2006 flood was used to validate the numerical model and it was shown that this type of floods requires modelling strategies where both sewers and the surface paths/channels are modelled together (dual drainage).

Keywords: Mondego river basin. Fluvial floods. Urban floods. Numerical modelling.

1. Introdução

A vivência do centro urbano da cidade de Coimbra e das populações a jusante foi marcada ao longo dos tempos, até à década de oitenta do século XX, pela ocorrência frequente de cheias e inundações importantes, que igualmente afetaram toda a região do Baixo Mondego. Datam do século XVI os primeiros registos de trabalhos sobre este tema em que participaram engenheiros e arquitetos, mas seria necessário esperar pelo final do século XVIII para que fosse realizada a primeira intervenção física relevante sobre o sistema, da autoria do Padre Estêvão Cabral (Sanches, 1996). Depois, após quase dois séculos de novos estudos e perante a continuada ocorrência de cheias devastadoras no centro da cidade de Coimbra, foi finalmente tomada a decisão de executar um conjunto de intervenções, genericamente conhecidas por Aproveitamento Hidráulico do Mondego, concebido para fins múltiplos, mas que assumia como objetivos principais a regularização fluvial e a proteção contra cheias. Após a conclusão destas obras[1], o controlo de cheias a montante que a infraestrutura agora existente torna possível reduziu muito significativamente a frequência e a magnitude das grandes cheias. No entanto, a diminuição do nível de exigência relativamente aos critérios de gestão projetados para o sistema, e nomeadamente o deficiente controlo da capacidade de encaixe da barragem da Aguieira, tem permitido a ocorrência de episódios de cheia fluvial, embora já não no centro da cidade de Coimbra e nem com a intensidade de outros tempos.

A Figura 1 ilustra a cheia de janeiro de 2001 na zona do Choupalinho, que atingiu naquela secção um caudal máximo de cerca de 2100 m^3/s, a que corresponde um tempo de recorrência que se estima em 8 anos. De notar que o caudal de cheia não laminado para este episódio pluviométrico teria atingido, em Coimbra, um valor próximo de 3000 m^3/s, a que corresponde um tempo de recorrência de cerca de 30 anos. Portanto, mesmo gerido de uma forma deficiente, o sistema tem permitido uma sensível redução dos picos de cheia.

Figura 1
Cheia de 22 a 31 de janeiro de 2001. Vista a partir da margem esquerda do Mondego, na manhã do dia 28 de janeiro [cortesia do Estúdio 2000].

A crescente urbanização observada no País, nas últimas décadas, não tem sido acompanhada do necessário redimensionamento dos equipamentos da infraestrutura urbana. No que se refere à drenagem pluvial, a situação não é diferente, sendo mesmo mais complexa por força da impermeabilização gerada pelo próprio processo de urbanização, o que faz com

[1] De facto, só parcialmente foi concluído o conjunto de infraestruturas projetadas para o Aproveitamento Hidráulico do Mondego, sendo que, relativamente ao previsto, o principal volume de trabalhos que está por executar se situa no Baixo Mondego.

que as cheias se tornem progressivamente mais críticas. Em Coimbra tem-se vindo a acentuar o número de ocorrências de inundações em áreas vulneráveis, zonas baixas e planas, como por exemplo a zona da Solum e, principalmente, zonas da periferia urbana onde se tem verificado uma crescente urbanização com a expansão da cidade e a construção de importantes infraestruturas rodoviárias (como os casos da Ribeira de Eiras e Gorgulhão).

A generalidade das ocorrências de cheias urbanas é fundamentalmente devida a modificações das condições de drenagem natural, tais como:

- alterações da topografia e/ou do coberto vegetal;
- impermeabilização sistemática de zonas extensas;
- desvio e/ou canalização de linhas de água naturais e/ou obstruções no leito maior.

De um modo geral o controlo destas ocorrências pode ser efetuado através de um conjunto de medidas que incluem:

- um plano de monitorização/conservação das linhas de água naturais;
- um plano de manutenção e a expansão de uma rede de coletores, para drenar os caudais de ponta de cheia provocados por precipitações de curta duração e de intensidade elevada.

A degradação dos sistemas de drenagem, por falta de adequada manutenção, provoca a diminuição da capacidade de vazão das redes de drenagem e das linhas de água naturais, com os consequentes extravasamentos do leito, erosões localizadas e problemas de qualidade da água, para os quais se torna necessário encontrar solução.

É sobre estes dois tipos de problemas, as cheias fluviais e as inundações urbanas, que incide o presente artigo. São apresentados alguns exemplos concretos e estudos de caso relativos ao Rio Mondego e à cidade de Coimbra, retirados da experiência profissional dos autores.

2. Enquadramento dos estudos

Na sequência das cheias verificadas no Rio Mondego, em dezembro de 2000 e janeiro de 2001, a Sociedade Coimbra-Polis solicitou ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra a elaboração de um estudo sobre o comportamento hidráulico e hidrológico do Rio Mondego, no trecho adjacente à zona de intervenção deste programa e tendo como objetivo último a definição e análise das possíveis áreas inundadas na zona objeto de intervenção. A partir do estudo desenvolvido foram definidas novas cotas para as possíveis áreas inundadas naquela zona de intervenção, correspondentes a vários períodos de recorrência.

Após a conclusão deste estudo, a Câmara Municipal de Coimbra celebrou com a Universidade de Coimbra um protocolo, designado "Estudos de Hidrologia Urbana", cujo objetivo foi o de dotar esta autarquia de informação hidrológica/hidráulica, nomeadamente quanto à caracterização de zonas de precipitações intensas concentradas e zonas suscetíveis de inundação face ao desenvolvimento do tecido urbano, bem como quanto ao cálculo de caudais de cheia e à identificação de zonas de maior risco. Previa-se, ainda, a colaboração da Universidade na identificação de medidas mitigadoras a serem integradas na revisão do Plano Diretor Municipal de Coimbra e no respetivo regulamento, o que de facto veio a acontecer.

No seguimento destes estudos foram ainda celebrados diversos protocolos com a empresa AC, Águas de Coimbra, E.E.M., entidade gestora dos sistemas urbanos de drenagem, tendo sido implementadas regulamentações diversas e que se sintetizam na "imposição de uma regra de impacto nulo", em matéria de drenagem, para todas as novas urbanizações a executar em Coimbra. No entanto, a prossecução deste objetivo só será viável caso seja elaborado um Plano Diretor de Drenagem e se acautelem as consequências negativas da atual tendência para a empresarialização do sector, da qual resultará, naturalmente, uma maior atenção ao subsector em que os clientes estão bem identificados e procurarão defender os seus interesses diretos, a distribuição da água e até a drenagem de águas residuais, e um maior abandono do subsector da drenagem pluvial, que todos pode afetar a mais ou menos longo prazo, mas que, individualmente, não pertence a ninguém. Deste modo, configura-se, nesta matéria, uma preocupante tendência sobre a qual é necessário refletir: a de "deixar para as empresas o abastecimento de água e a drenagem residual e para as autarquias a drenagem pluvial".

3. Caracterização do sistema físico

O Rio Mondego é o maior rio com bacia hidrográfica totalmente compreendida em território nacional, com uma área de cerca de 6 644 km^2. Corre, em grande parte do seu curso, num vale muito encaixado e entra, na zona de Coimbra, numa bacia aluvionar. Os seus principais afluentes são, na margem direita, o Rio Dão e, na margem esquerda, os Rios Alva e Ceira (Figura 2). O comportamento hidráulico da bacia hidrográfica na zona de intervenção do Programa Polis é, em grande medida, determinado pelo funcionamento da barragem da Aguieira, situada no Rio Mondego, imediatamente a jusante da foz do Rio Dão, e da barragem de Fronhas, situada no Rio Alva, a cerca de 10 km da sua foz, e ainda pelo açude-ponte de Coimbra, situado imediatamente a jusante da zona em análise no estudo de caso.

O sistema físico observado é, assim, constituído pelo troço da bacia do Rio Mondego limitado a montante pelas barragens da Aguieira e de Fronhas, e a jusante pelo açude-ponte de Coimbra.

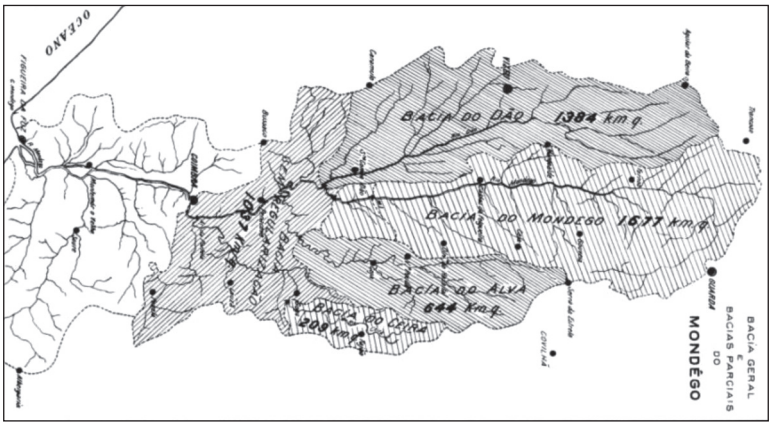

Figura 2
Delimitação da bacia e sub-bacias do Rio Mondego, a montante de Coimbra.
Fonte: Sanches, 1996.

Após a realização de vários estudos foi decidido, na década de 70, executar um conjunto de intervenções na bacia do Mondego, genericamente designadas por Aproveitamento Hidráulico do Mondego (Figura 3), cujas obras principais têm as seguintes características:

Barragem da Aguieira – é uma barragem cuja albufeira apresenta um volume de armazenamento de 450 hm^3 até ao Nível de Máxima Cheia (NMC), situado à cota 126.00 m, e de 432.03 hm^3 até ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA), situado à cota 124.70 m. A sua principal função no controlo das cheias em Coimbra e no Baixo Mondego consiste em encaixar os volumes afluentes, de forma a garantir que o caudal de ponta da cheia centenária em Coimbra não ultrapasse 1200 m^3/s. A barragem da Aguieira foi concluída em 1981;

Barragem de Fronhas – trata-se de uma barragem implantada no rio Alva, cujos NMC e NPA se situam, respetivamente, às cotas 140.00 m e 136.00 m. A barragem de Fronhas foi concluída em 1985;

Barragem da Raiva – é uma barragem que não tem uma intervenção relevante no controlo de cheias, dada a sua baixa capacidade de armazenamento (26.80 hm^3, ao nível de pleno armazenamento). A barragem da Raiva entrou em exploração em 1983;

Açude-Ponte de Coimbra – trata-se de uma barragem móvel, sobre a qual se lançou também uma ponte rodoviária. A sua localização no tecido urbano e o facto de a albufeira apresentar uma reduzida capacidade (1.6 hm^3), evidenciam o papel determinante da exploração do açude-ponte nos níveis de água atingidos em situações de cheia em Coimbra. O nível de exploração normal corresponde à cota 18.00 m e o nível de cota máxima de cheia é 19.00 m, correspondente ao caudal de 2000 m^3/s, para a cheia modificada pelas albufeiras da Aguieira e de Fronhas (Sanches, 1996). A construção do açude-ponte de Coimbra ficou concluída em 1981.

A Figura 3 permite visualizar, em perfil, as barragens do Aproveitamento Hidráulico do Mondego.

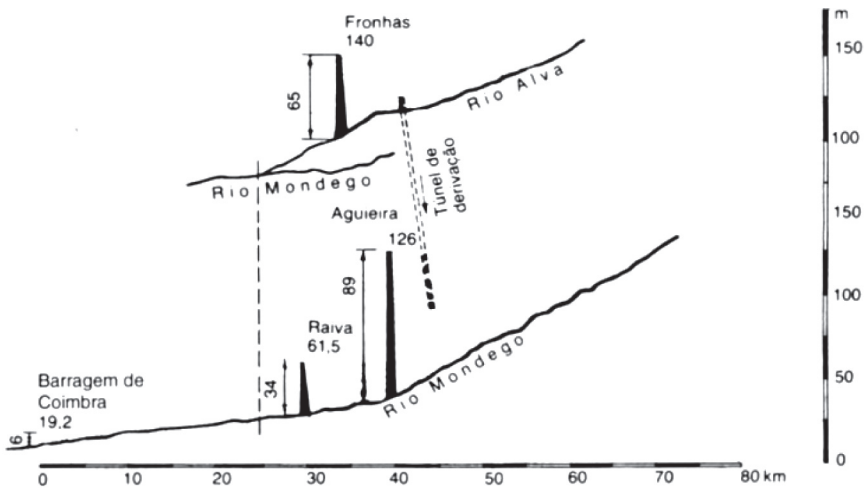

Figura 3
Esquematização do Aproveitamento Hidráulico do Mondego.
Fonte: Sanches, 1996.

4. Avaliação dos caudais máximos de cheia naturais

Os métodos estatísticos aplicados ao estudo de caudais de ponta de cheia têm por finalidade a obtenção de caudais de ponta de cheia para períodos bastante superiores aos da amostra. São vários os tipos de distribuição estatística propostos na bibliografia como sendo aplicáveis à distribuição de caudais extremos, aceitando-se, como regra geral, que não deverão ser estimados valores para períodos de recorrência superiores a duas ou três vezes a dimensão da amostra. A exiguidade das amostras de que normalmente dispomos em Portugal obriga-nos, muitas vezes, a extrapolar os resultados para períodos de recorrência superiores, o que não fazemos sem dar conhecimento desta reserva.

A aplicação destas metodologias a registos de caudais de linhas de água a montante das quais tenham sido construídas obras de regularização (barragens) não pode ser efetuada, em virtude da modelação (laminação) que estas efetuam ao escoamento. Por esta razão, a aplicação do método de Gumbel para estimativa dos caudais de cheia naturais, cujos resultados se resumem no Quadro I, baseou-se em séries de caudais máximos instantâneos anuais disponíveis nos postos de Ponte de Santa Clara e de Ponte da Mucela até ao ano de 1981, ano de construção das barragens da Aguieira e de Fronhas. Pode observar-se, na Figura 4, a representação de caudais máximos instantâneos em função dos respetivos períodos de recorrência.

Quadro I

Estimativa dos caudais máximos instantâneos naturais, para vários períodos de recorrência, em diversas estações hidrométricas, calculados com o método de Gumbel.

Nome do Posto	Caudais máximos instantâneos (m^3/s)						
	Período de retorno (anos)						
	5	10	25	50	100	500	1000
Aguieira	1160	1461	1841	2123	2403	3050	3328
Ponte da Mucela	420	534	678	785	892	1137	1242
Ponte do Cabouco	295	376	478	554	629	803	877
Ponte de Santa Clara	1988	2501	3148	3628	4104	5205	5678

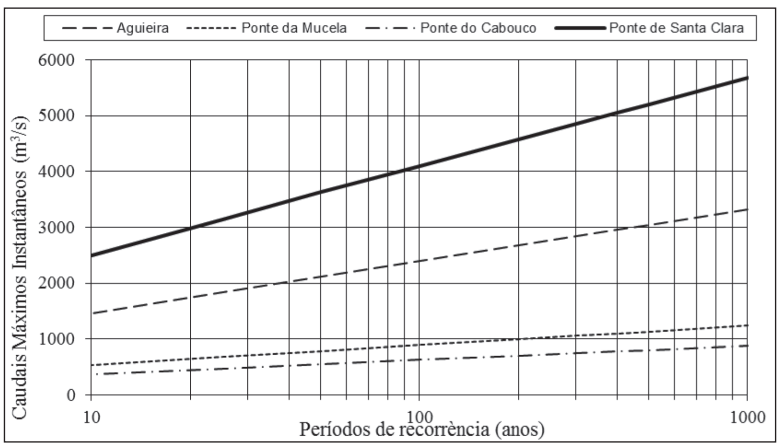

Figura 4

Representação de caudais máximos instantâneos naturais *vs.* períodos de recorrência.

5. Modelação hidrológico-hidráulica

Para o desenvolvimento de um estudo hidrológico-hidráulico de uma bacia hidrológica é necessário um vasto conjunto de elementos, designadamente:

a) Elementos que se podem designar por geomorfológicos, como por exemplo a topografia/batimetria e a geologia/cobertura do solo;
b) Dados hidrológicos e hidrométricos: Precipitações; Caudais máximos instantâneos; Hidrogramas das cheias relevantes;
c) Modelos matemáticos de simulação do comportamento hidrológico-hidráulico, nomeadamente os processos de transformação da precipitação em escoamento e o comportamento da água nos canais, rios ou linhas de água. Estes modelos computacionais tanto podem funcionar como ferramenta de previsão, como de análise. Na modelação matemática e, em especial, na conceção do modelo global a adotar, assumem especial relevância os desenvolvimentos matemático e numérico, a correta implementação computacional, as validações analítica e numérica e a verificação recorrendo a dados experimentais (vejam-se os trabalhos de Amado Mendes, 2001 e Amado Mendes *et al.*, 2001).

6. Estudos de caso

Os três estudos de caso que de seguida se descrevem e analisam configuram possíveis utilizações da modelação matemática hidrológico-hidráulica:

a) Cheia de 2000/2001 em Coimbra - para este estudo, realizado a pedido da Sociedade Coimbra Polis, foi implementada de raiz toda uma estrutura computacional que permitiu analisar o comportamento do sistema hidráulico a jusante das barragens da Aguieira e das Fronhas e também da Ponte Açude de Coimbra, tendo sido obtidos os níveis de água expectáveis na zona da área de intervenção do programa Coimbra Polis, para diferentes períodos de recorrência e cenários de exploração da barragem da Aguieira. Foi assim possível atingir um objetivo de "solução de um problema existente", isto é, a definição de cotas de implantação de um projeto (Sá Marques *et al.*, 2005).
b) Risco de inundação do centro de Santa Comba Dão - neste estudo, realizado a pedido da Câmara Municipal desta cidade, pretendeu-se analisar o risco de inundação das áreas urbanas adjacentes à Ribeira das Hortas, que "corta" toda a malha urbana do centro da cidade.
c) Inundações pluviais no centro de Coimbra - este estudo corresponde a uma "síntese" dos trabalhos realizados em colaboração com a Câmara Municipal de Coimbra e com a empresa AC, Águas de Coimbra, E.E.M. e revela um outro importante aspeto da modelação matemática dos sistemas hidrológico-hidráulico, o das inundações urbanas produzidas por precipitações de grande intensidade.

6.1. Cheia do Rio Mondego em Coimbra em janeiro de 2001

A caracterização da cheia que atingiu o seu pico no intervalo de tempo que decorreu entre 22 e 31 de janeiro de 2001 pode ser efetuada de forma razoavelmente detalhada,

nomeadamente no que se refere aos hidrogramas que a originaram, à evolução temporal dos níveis de escoamento, ao levantamento de cotas de inundação máximas, entre outros parâmetros disponíveis. A simulação daquela cheia permite, assim, aferir e validar os resultados do modelo numérico em condições de propagação de uma cheia real, permitindo o tratamento cuidado das condições de fronteira, em especial da fronteira do açude-ponte de Coimbra, e possibilitando ainda a delicada operação de calibração dos coeficientes de atrito correspondentes a cada secção do escoamento.

A componente hidrodinâmica da estrutura computacional desenvolvida baseia-se em equações de escoamento gradualmente variável com superfície livre, habitualmente designadas na literatura por *equações de Saint-Venant*. Trata-se de equações às derivadas parciais, quasi-lineares, de tipo hiperbólico, obtidas por aplicação dos princípios gerais de conservação aplicados a um volume de controlo.

Os hidrogramas adotados na simulação numérica podem observar-se na Figura 5. Inclui-se ainda o hidrograma do caudal afluente à albufeira da barragem da Aguieira, apesar de a secção de montante do modelo coincidir com a barragem da Raiva.

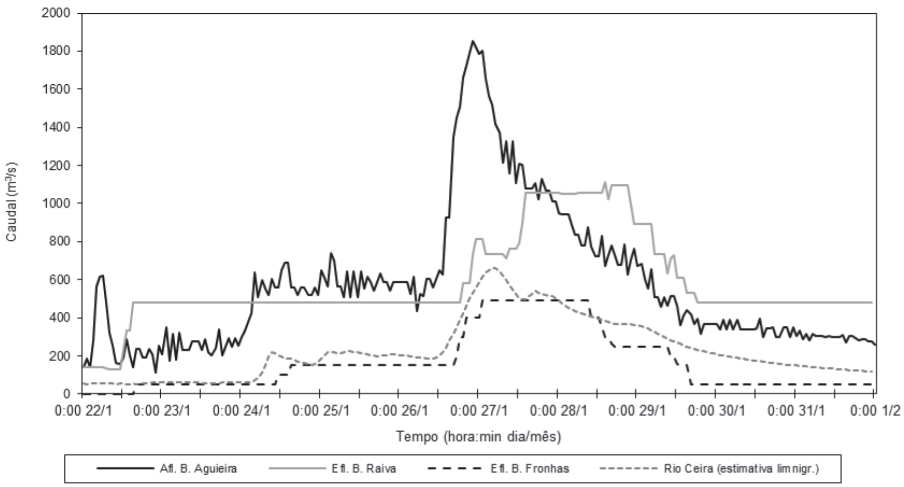

Figura 5
Hidrogramas adotados na simulação numérica da cheia de 22 a 31 de janeiro de 2001.

O mapeamento da zona inundada, resultante da modelação computacional, pode observar-se na Figura 6a), desde a Ponte da Portela ao açude-ponte de Coimbra, e, um pouco mais em detalhe, nas imediações da zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra, na Figura 6b).

Deve agora salientar-se a boa concordância da aproximação dos resultados computacionais, não só em termos da evolução dos caudais registados, mas também em relação aos níveis máximos de cheia atingidos pelo escoamento, tal como foram medidos pela DRAOT-Centro. No Centro Náutico do Choupalinho, a montante da Ponte de Santa Clara, a cota de inundação terá atingido os 20.86 m, tendo-se obtido o valor de 20.8 m através da simulação com o modelo numérico. Um pouco mais a montante, na Ponte Rainha Santa Isabel (anteriormente denominada

por Ponte Europa), observou-se que o nível da água chegou à cota 21.05 m, estimando a simulação computacional a cota 21.3 m.

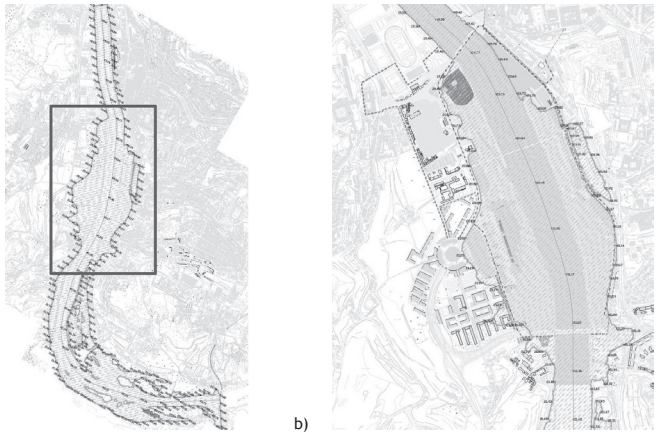

Figura 6
Mapeamento da zona inundada, resultante da modelação computacional.

Por outro lado, os registos fotográficos observáveis na Figura 1 permitem, também eles, corroborar os níveis de água resultantes da modelação computacional.

De acordo com a análise estatística dos caudais máximos instantâneos naturais, recorrendo ao método de Gumbel, pode associar-se ao caudal máximo na Ponte de Santa Clara, de 2070 m^3/s, um período de retorno de cerca de 5 anos.

O modelo computacional permitiu ainda simular a cheia de janeiro de 2001, tal como ela teria ocorrido sem a laminação de caudais introduzida pelo Aproveitamento Hidráulico do Mondego. Os hidrogramas considerados para esta simulação são os que afluíram às barragens da Aguieira e de Fronhas, e o que se estima ter ocorrido no Rio Ceira. A esta cheia natural, cujo caudal máximo instantâneo em Coimbra se avalia em cerca de 3000 m^3/s, corresponderia um período de retorno de aproximadamente 20 anos na Ponte de Santa Clara. Associado ao significativo incremento do caudal máximo instantâneo, ter-se-iam igualmente verificado cotas de inundação entre a Ponte Rainha Santa Isabel e a Ponte de Santa Clara superiores em 0.2 m a 0.9 m aos valores efetivamente verificados.

6.2. Mapas de risco de inundação em Santa Comba Dão

A Ribeira das Hortas, cuja nascente está localizada na Fonte do Salgueiro, é o último afluente da margem norte do Rio Dão. Atravessa as freguesias de S. Joaninho, Couto do Mosteiro e Santa Comba Dão, onde se encontra o maior núcleo populacional. A bacia, maioritariamente rural a montante, tem uma área de aproximadamente 14 km^2 e inclui, na parte final, a cidade de Santa Comba Dão. O último troço, imediatamente a montante da confluência com o Rio Dão, caracteriza-se por um elevado declive (Pina *et al.*, 2010).

Com base na cartografia disponível (escalas 1:2000 e 1:5000, e levantamento batimétrico da Ribeira das Hortas na zona de estudo), foi construído um modelo digital do terreno, através

do *software* QuantumGIS, que permitiu desenhar a carta de declives, delimitar as sub-bacias e traçar a rede hidrográfica natural, com a ferramenta TauDEM. Na Figura 7 apresenta-se o tratamento cartográfico efetuado.

Figura 7
Rede hidrográfica da bacia e perspetiva tridimensional do modelo digital do terreno da bacia.

Em regra, considera-se que o escoamento superficial se inicia depois de o volume da precipitação ter excedido um valor representativo das perdas iniciais na bacia, dependendo das características do terreno e da ocupação do solo. As perdas referentes à precipitação vão sendo ajustadas ao longo do evento, consoante as alterações registadas no processo de infiltração de água no solo, que é função do seu nível de saturação. O escoamento superficial termina quando a precipitação acumulada na bacia é inferior ao valor de perdas de precipitação verificadas.

Neste estudo foi utilizado o *Storm Water Management Model* (SWMM, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA)), modelo de simulação baseado nos processos físicos com discretização temporal. Emprega princípios da conservação de massa, energia e dinâmica, sempre que necessário.

Os hietogramas de precipitação foram calculados através do método dos blocos alternados, com recurso às curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência), com durações de precipitação iguais e triplas do tempo de concentração.

Após a calibração dos modelos foi efetuado um vasto conjunto de ensaios numéricos os quais permitiram desenhar os mapas de riscos para as diversas situações: estado de desenvolvimento atual e futuro e para vários períodos de recorrência. Na Figura 8 é apresentado o mapa com as áreas de inundação.

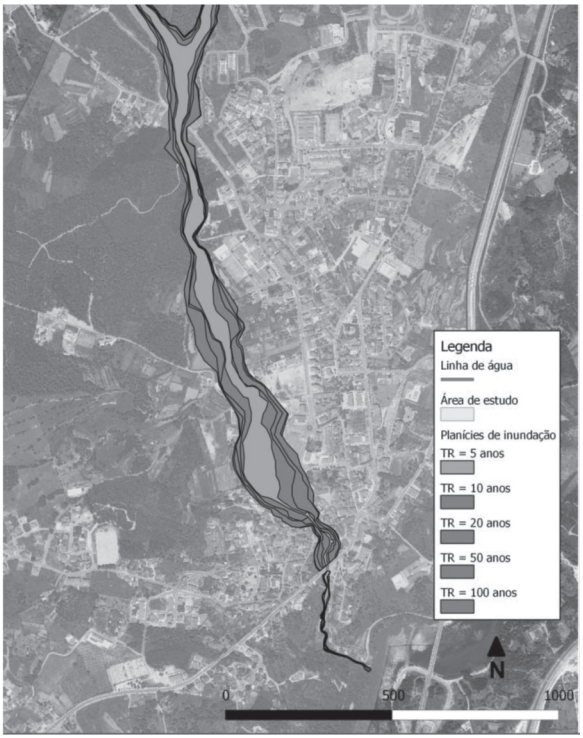

Figura 8
Mapa de risco de inundação com base nas simulações hidráulicas.

6.3. Zona central de Coimbra

A zona baixa da cidade de Coimbra tem sofrido várias inundações urbanas com origem em episódios pluviométricos de elevada intensidade, entre as quais se destacam as de 9 de junho de 2006, 25 de outubro de 2006 e 21 de setembro de 2008. Uma das zonas mais afetadas é a zona central, junto à Câmara Municipal e à Igreja de Santa Cruz (Figuras 9 e 10).

Figura 9
Praça 8 de Maio na cheia de 09/06/2006.

Figura 10
Praça 8 de Maio na cheia de 21/09/2008.

A bacia hidrográfica da zona referida tem uma área total de cerca de 1,5 km^2. A área pode ser dividida em três regiões com características diferentes: (i) a "Baixa", que é uma área de comércio e serviços, com 0,4 km^2 e com um sistema de drenagem unitário; (ii) a "Alta", que é uma área com relevo acentuado e grandes declives, altamente urbanizada e com uma área de aproximadamente 0,2 km^2, e (iii) a área restante, que também é altamente urbanizada, com uma área de 0,9 km^2, onde os principais problemas das inundações são gerados.

No dia 9 de junho de 2006, um evento de precipitação extrema causou graves inundações na cidade. Após o término da precipitação, a água continuou a escoar ao longo dos arruamentos para a Praça 8 de Maio, que é o ponto mais baixo em toda a bacia e onde tende a acumular. A relevância do evento, para o qual foi estimado um tempo de recorrência de 50 anos, resultou em grande medida do facto de a sua duração total, 45 min, ter sido aproximadamente igual ao tempo de concentração da bacia.

Foram usados modelos de drenagem dual para analisar a cheia ocorrida. O conceito de drenagem dual, apresentado em Djordjevic *et al.* (1999) e esquematicamente representado na Figura 11, visa proporcionar uma imagem mais realista das cheias e inundações em meio urbano. Este conceito permite a modelação de interações entre os dois sistemas, designadamente entre a rede de coletores que podem estar parcialmente em sobrecarga e o escoamento superficial em espaços abertos, pelas ruas da cidade, entre casas, depressões do terreno, etc. (Sá Marques *et al.*, 2013).

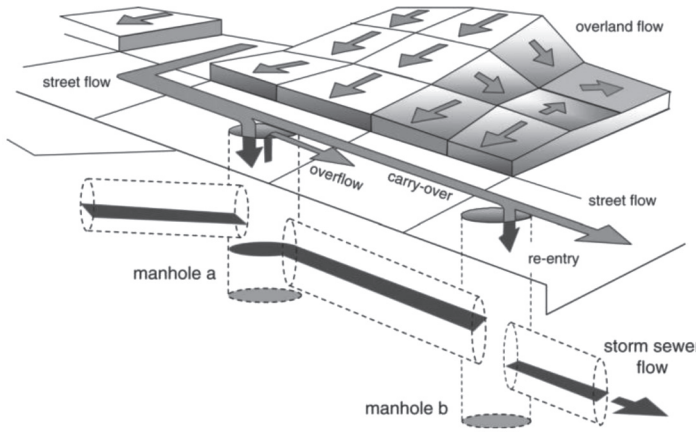

Figura 11
Representação esquemática do conceito de drenagem dual.
Fonte: Smith, 2006.

Existem atualmente duas abordagens distintas nos modelos de drenagem dual: ambas têm um modelo unidimensional para a rede de coletores, mas uma representa a superfície através de um modelo unidimensional (1D/1D) e outra a superfície através de um modelo bidimensional (1D/2D). No caso 1D/1D, a superfície urbana é tratada como uma rede de canais abertos e zonas de acumulação de água, formando assim um conjunto de canais e nós ligados ao sistema de coletores. No caso 1D/2D, não é necessário fazer uma pré-identificação dos

canais superficiais e das zonas de acumulação de água. Em ambos os casos as redes de coletores e superficiais estão interligadas e são calculadas simultaneamente.

O *software InfoWorks CS* foi utilizado para realizar as simulações hidráulicas de ambos os modelos. A metodologia AOFD (acrónimo de *Automatic Overland Flow Delineation*) (Maksimović *et al*. 2009), usada para gerar a rede de escoamento considerada no modelo 1D1D, foi aplicada a este caso concreto pelo *Urban Water Research Group* (UWRG), do *Imperial College* de Londres, e analisa automaticamente o modelo digital do terreno (DTM) e o uso do solo (por exemplo edifícios, ruas, áreas verdes) para quantificar e criar a rede superficial 1D constituída por canais e pontos de acumulação de água.

Os modelos foram calibrados com os registos históricos de inundações fornecidos pela AC, Águas de Coimbra, E.E.M.. A rede de escoamento superficial foi calibrada usando imagens de inundações, como a do evento de 9 de junho de 2006 (Figura 9).

A Figura 12 apresenta: a) a fotografia da inundação ocorrida; b) o resultado da geração da rede superficial 1D; e c) o resultado da simulação 1D/2D. Apesar da inundação superficial ser visível, o coletor não se encontra em carga. Assim sendo, a inundação resulta da falta de capa-

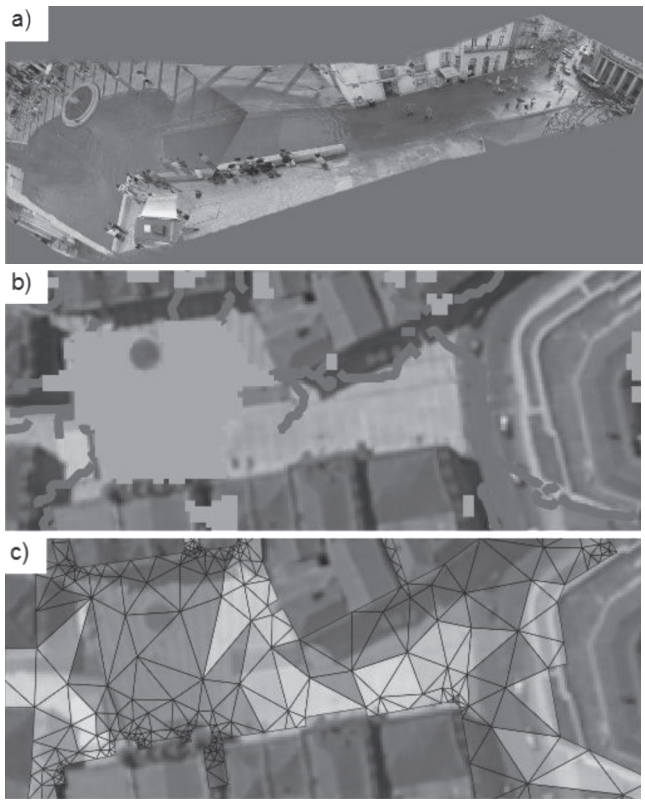

Figura 12
a) Fotografia da inundação de 9/6/2006 na Praça 8 de Maio, em Coimbra; b) resultado da identificação automática dos caminhos superficiais e zonas de acumulação de água; c) resultado da modelação 1D/2D.

cidade de entrada de água nos coletores, possivelmente gerada pelo insuficiente dimensionamento ou pela falta de manutenção das sargetas. A elevada percentagem de água envolvida no escoamento superficial torna desadequado o modelo clássico de simulação apenas nos coletores (Simões *et al.*, 2011). Ambos os modelos, 1D/1D e 1D/2D, representam com precisão os locais de inundação (observem-se as representações da Figura 12). Os locais identificados e as alturas de água estão de acordo com os registos fotográficos disponíveis para o mesmo evento.

7. Conclusões

Após a conclusão das obras do Aproveitamento Hidráulico do Mondego, as grandes cheias que ocorriam na baixa de Coimbra passaram a ser menos frequentes e de menor dimensão. Aliás, tal como é demonstrado num outro estudo (Seabra Santos *et al.*, 2002), elas teriam sido completamente evitadas se o protocolo de projeto para a gestão hidráulica das barragens tivesse sido sempre seguido. Assim, e se em relação às tradicionais zonas de inundação não se têm verificado ocorrências significativas, já em outras zonas do concelho se têm vindo a verificar, com alguma regularidade, fenómenos de inundações e cheias. De facto, com a expansão da cidade e a construção de infraestruturas rodoviárias, os solos estão cada vez mais impermeáveis, as linhas de água naturais são alteradas ou obstruídas e os coletores existentes deixam de ter capacidade de vazão para os novos caudais. Zonas urbanas que só ocasionalmente eram afetadas são agora inundadas com demasiada frequência.

Na modelação hidráulica os modelos habitualmente usados são determinísticos, isto é, a uma determinada combinação de dados de entrada corresponde uma única combinação de resultados. Todos os modelos são representações aproximadas da realidade e compreendem, sempre, um certo grau de simplificação. Assim, independentemente da qualidade da calibração

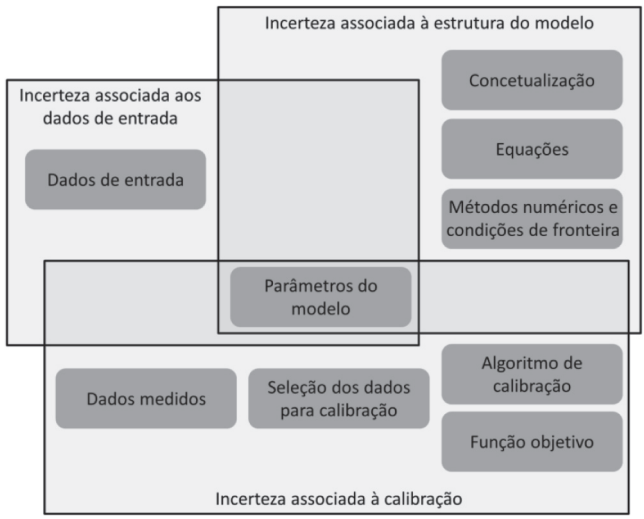

Figura 13
Principais fontes de incerteza.
Fonte: Adaptado de Deletic *et al.*, 2012.

e verificação, todos eles têm associado algum grau de incerteza. Por este facto, não se pode dizer que o modelo está correto, mas sim que dá resultados úteis (Butler e Davies, 2011). De acordo com Deletic *et al*. (2012), as fontes de incerteza podem ser divididas em 3 grandes grupos: incerteza associada aos dados de entrada, incerteza associada à estrutura do modelo e incerteza associada ao processo de calibração (Figura 13).

Neste trabalho foram apresentados 3 estudos de caso que evidenciam o papel da modelação matemática dos fenómenos hidrológico-hidráulicos: no caso das cheias do rio Mondego, a modelação permite fazer uma gestão da cheia mais eficiente, de forma a minimizar os seus impactos; no caso da elaboração dos mapas de risco de cheia de Santa Comba Dão, a modelação matemática permitiu identificar as zonas afetadas pela inundação da ribeira das Hortas, associando uma determinada probabilidade de ocorrência, podendo ser útil no planeamento do território; a modelação das inundações urbanas em Coimbra permite uma melhor compreensão e análise dos fenómenos ocorridos, possibilitando assim uma escolha mais acertada de soluções de projeto e um melhor planeamento.

Bibliografia

Amado Mendes, P. (2001) - *Contribuição para o estudo da modelação das ondas de cheia provocadas pela ruptura de barragens: Aspectos hidrodinâmicos e morfodinâmicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, área de especialização em Hidráulica e Recursos Hídricos, FCTUC, Coimbra.

Amado Mendes, P.; Seabra Santos, F. J. e Antunes do Carmo, J. S. (2001) –"Escoamentos unidimensionais com superfície livre: análise comparativa de métodos numéricos com ênfase no tratamento dos termos fonte" *Recursos Hídricos. Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, vol. 22, N.º 1, Maio, pp. 5-24.

Butler, D. e Davies, J. W. (2011) - *Urban drainage*. Spon Press, Taylor & Francis, 3rd Edition, London and New York.

Deletic, A.; Dottoa, C.; McCarthya, D.; Kleidorferb, K.; Frenic, G.; Manninad, G.; Uhle, M.; Henrichse, M.; Fletchera, T.; Rauchb, W.; Bertand-Krajwsekif, J. e Tait, S. (2012) – "Assessing uncertainties in urban drainage models". *Physics and Chemistry of the Earth*, Volumes 42-44, 2012, pp. 3-10.

Djordjevic, S.; Prodanivic, D. e Maksimiovic, Č. (1999) – "An approach to simulation of dual drainage". *Water Science and Technology*, 39 (9), pp. 95-103.

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

Pina, R.; Simões, N.; Sá Marques, A. e Sousa, J. (2010) - *Estudo hidrológico-hidráulico com vista ao planeamento urbano: o estudo de caso de Santa Comba Dão*. XIV SILUBESA, Porto, Portugal.

Sá Marques, A.; Simões, N. e Pina, R. (2013) - " Simulação em sistemas de drenagem de águas pluviais". *In:* Pedroso de Lima, J. (ed.) - *Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas*. Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Sá Marques, A.; Amado Mendes, P. e Seabra Santos, F. J. (2005) – "Cheias em áreas urbanas: A zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra". *Territorium, Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, Edições Minerva Coimbra / Riscos, Coimbra, pp. 29-53.

Sanches, R. (1996) - *O problema secular do Mondego e a sua resolução*, LNEC, Lisboa.

Seabra Santos, F. J.; Sá Marques, J. A. e Amado Mendes, P. J. (2002) – *Estudo hidráulico e hidrológico do rio Mondego na zona de intervenção do Programa Polis em Coimbra* - Relatório final, DEC, FCTUC, COIMBRA.

Simões, N.; Ochoa, S.; Leitão, J. P.; Pina, R.; Sá Marques, A. e Maksimovic, Č. (2011) - *Urban drainage models for flood forecasting: 1D/1D, 1D/2D and hybrid models.* 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brasil.

Smith, M. B. (2006) - "Comment on 'analysis and modeling of flooding in urban drainage systems'". *Journal of Hydrology*, 317(3-4), pp. 355-363.