

MODELAÇÃO INTEGRADA DA DRENAGEM URBANA EM ZONAS ESTUARINAS: AVALIAÇÃO DA INUNDAÇÃO PARA CENÁRIOS CLIMATÉRICOS

M. Adriana CARDOSO¹, Maria Céu ALMEIDA², Rita S. BRITO³, Paula BECEIRO⁴

RESUMO

O estudo apresentado no presente artigo enquadra-se no âmbito do projeto “MOLINES – Modelação da inundação em estuários. Da avaliação da perigosidade à gestão crítica PTDC/AAG-MAA/2811/2012”, que tem como objetivos a melhoria do conhecimento científico sobre os processos de inundação em margens estuarinas, a avaliação do risco de inundação de zonas com diferentes tipologias e a criação de uma estratégia coordenada de gestão do risco. O projeto MOLINES apresenta uma abordagem que combina a modelação hidrodinâmica de estuários e da drenagem urbana. Em zonas urbanas, a ligação entre o estuário e o sistema de drenagem é fundamental para estudar os processos de inundação, sendo necessário analisar as causas e os efeitos da sua ocorrência. O objetivo do presente artigo é apresentar um trabalho de avaliação da suscetibilidade à inundação e identificação de potenciais medidas para redução do risco na zona urbana de um aglomerado de elevada ocupação na zona ribeirinha do Tejo. A avaliação da ocorrência de inundações foi efetuada construindo um modelo matemático de drenagem urbana acoplado 1D/2D, aplicando-se o modelo 1D ao sistema de drenagem enterrado e o 2D à componente superficial.

Palavras-chave: sistema de drenagem urbana, modelação matemática, risco, inundações

¹ Investigadora Auxiliar, Núcleo de Engenharia Sanitária, LNEC, macardoso@lnec.pt

² Investigadora Principal, Núcleo de Engenharia Sanitária, LNEC, mcalmeida@lnec.pt

³ Bolseira de Pós-doutoramento, Núcleo de Engenharia Sanitária, LNEC, rsbrito@lnec.pt

⁴ Bolseira de Investigação, Núcleo de Engenharia Sanitária, LNEC, pbeceiro@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo enquadra-se no âmbito do trabalho realizado no projeto “MOLINES – Modelação da inundação em estuários. Da avaliação da perigosidade à gestão crítica PTDC/AAG-MAA/2811/2012”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este projeto tem como parceiros o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que coordena, o Centro de Estudos Sociais da Universidade de Coimbra (CES) e a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC).

O projeto MOLINES visa contribuir para a melhoria do conhecimento do processo de inundação em margens estuarinas, decorrente da interação entre níveis de maré, sobrelevação meteorológica e drenagem urbana, para diferentes cenários climáticos, para avaliação do risco de inundação em zonas com diferentes tipologias e para a criação de uma estratégia coordenada de gestão do risco. O projeto MOLINES apresenta uma abordagem que combina a modelação hidrodinâmica de estuários e da drenagem urbana (FREIRE *et al.*, 2014). Em zonas urbanas estuarinas, a ligação entre o estuário e o sistema de drenagem é fundamental para estudar os processos de inundação, sendo necessário analisar as causas e efeitos da sua ocorrência.

O estuário do Tejo foi selecionado como local de estudo. O presente artigo descreve a avaliação da suscetibilidade à inundação e a identificação de potenciais medidas para redução do risco na zona urbana ribeirinha do Dafundo. A avaliação da ocorrência de inundações foi efetuada construindo um modelo matemático de drenagem urbana acoplado 1D/2D, aplicando-se o modelo 1D ao sistema de drenagem enterrado e o 2D (VOJINOVIC *et al.*, 2009) à componente superficial.

2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

2.1 Localização do caso de estudo

A área em estudo situa-se na margem direita do estuário do Tejo (Figura 1a), na bacia de drenagem da ribeira da Junça (Figura 1b), mais concretamente no Dafundo (distrito de Lisboa, concelho de Oeiras) (Figura 1c).

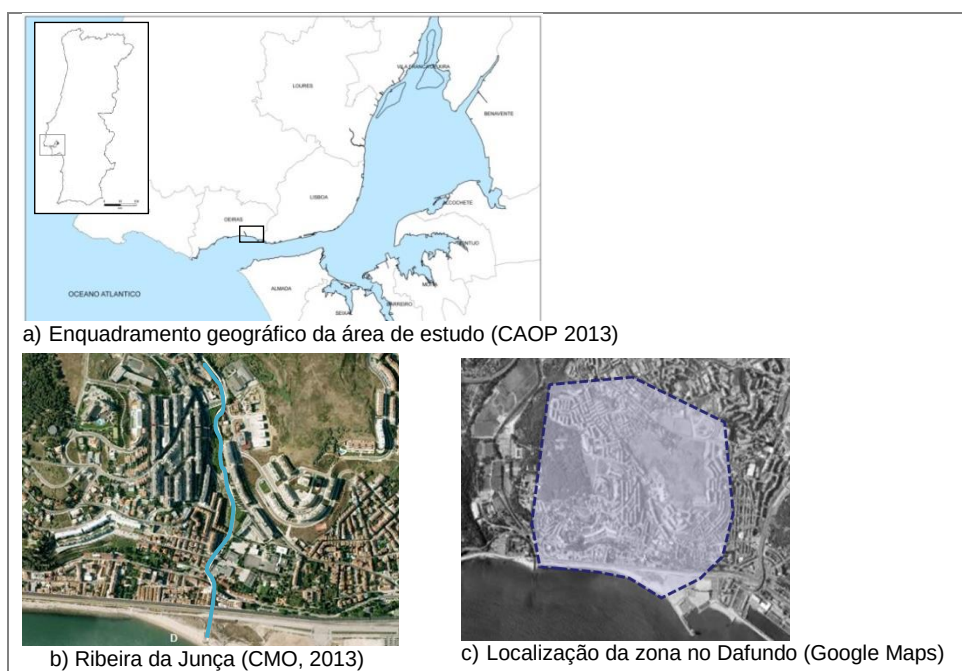


Figura 1 - Localização da zona em estudo

2.2 Informação e caracterização do caso de estudo

A caracterização da bacia e do sistema de drenagem urbana do Dafundo foi efetuada através de uma análise prévia da informação cadastral e do funcionamento hidráulico da rede. Para tal, foram realizadas campanhas experimentais para observação dos coletores, confirmação de informação cadastral e seleção dos locais para instalação de equipamentos de medição de caudal e precipitação, essenciais para a construção e utilização do modelo matemático do sistema.

A construção, ampliação, operação e manutenção das redes de drenagem de água residual doméstica e de água pluvial são efetuadas pelos Serviços Intermunicipalizados de Água e Saneamento de Oeiras e da Amadora (SIMAS OA) e pela Câmara Municipal de Oeiras (CMO). O Serviço de Proteção Civil (SPC) da CMO, em cooperação com a Associação Humanitária de Bombeiros Voluntários do Dafundo (BVD), presta apoio à população em caso da ocorrência ou iminência de cheias graves ou catástrofes na zona urbana. As referidas entidades facultaram informação histórica relativa à identificação de zonas urbanas com registo frequente de inundações e de localizações no meio recetor com assoreamento frequente. Foi efetuado um levantamento de fotografias e de registos de ocorrências, provenientes de notícias na comunicação social, de ordens de trabalhos dos SIMAS OA, do SPC da CMO ou da BVD (Figura 2).



Figura 2 - Fotografias de inundações registadas na zona em estudo, em março de 2014 (cedidas pelos SIMAS OA)

A informação de cadastro disponível no Sistema de Informação Geográfica dos SIMAS OA foi analisada e permitiu estruturar o planeamento das visitas de campo e efetuar uma delimitação prévia da zona a estudar. Verificou-se que existia informação de cadastro que não se encontrava completa ou atualizada, alguns coletores não se encontravam acessíveis e certos troços de ribeira da Junça apresentavam assoreamento significativo. Tendo os SIMAS OA um serviço permanente de limpeza e desobstrução de coletores e um trabalho de levantamento de cadastro em curso, e a CMO um contrato para remoção de areias, as campanhas de trabalho de campo do projeto MOLINES foram articuladas com estes trabalhos.

Na campanha de monitorização foram instalados seis medidores de caudal e altura de água, em diferentes períodos, nos coletores pluviais de maior importância e afluentes ao estuário do Tejo. Foi ainda instalado um udómetro para medição dos eventos de precipitação. Genericamente, os medidores estiveram instalados entre início de setembro de 2014 e meados de março de 2015, tendo sido possível registar a influência de uma maré equinocial e de diversos eventos de precipitação.

Os trabalhos foram efetuados com o acompanhamento e a colaboração dos SIMAS OA e da BVD. No decurso das campanhas efetuou-se entrada no sistema pluvial enterrado. Foi utilizado equipamento de segurança individual para acesso a espaços confinados, sistema de apoio a descida vertical, equipamento de deteção de gases, sistema de iluminação autónomo, sistema de GPS, régua

graduadas e máquina fotográfica (Figura 3). Os resultados da inspeção visual foram registados em fichas de inspeção, elaboradas de acordo com requisitos da norma EN13508-parte 2 (Investigation and assessment of drain and sewer systems outside buildings - Part 2: Visual inspection coding system).



Figura 3 – Material de segurança para descida a espaço confinado

A ribeira da Junça encontra-se canalizada na zona baixa da bacia. No troço canalizado da ribeira verificou-se a presença de escoamento significativo de água residual, apesar dos esforços que têm vindo a ser feitos no sentido de mitigar as afluências indevidas. Na foz da Ribeira existe uma elevada acumulação de sedimentos e areia, em forma de duna. Os SIMAS OA solicitam regularmente à CMO a remoção das areias, o que foi efetuado em diversas ocasiões. Verificou-se que, devido à dinâmica natural do escoamento na praia, esta acumulação de sedimentos era reposta ao fim de cerca de 2 a 3 semanas (Figura 4). Foram identificados sinais de entrada em carga no troço final da ribeira canalizada.



a) 2014/09/04



b) 2014/10/21



c) 2015/03/17

Figura 4 – Imagens da Foz da ribeira da Junça e da duplicação do troço canalizado em diversas datas

Aproximadamente na zona intermédia da bacia verificou-se que a área de montante se dirige para uma câmara de visita, que entra na zona canalizada da ribeira da Junça através de uma tubagem em queda vertical. À partida, esta ligação condiciona o escoamento entre as zonas alta e baixa da bacia, constituindo um estrangulamento. Este estrangulamento apresenta duas consequências: a regulação do caudal para jusante e a entrada em carga da rede a montante, por afluência de caudal excessivo. Não obstante, uma vez que nesta zona o declive é acentuado e a ribeira da Junça se encontra canalizada através de uma sucessão de câmaras de visita de elevada profundidade e capacidade de reserva, não é frequente a inundação neste local. Em termos de modelação, esta característica significa que é possível segmentar o modelo em zona alta e zona baixa da bacia.

Com base na informação recolhida foi efetuado o trabalho de delimitação da mancha de inundação, que se ilustra na Figura 5, por ocorrência de eventos históricos que ocorrem maioritariamente na zona baixa da bacia. Apenas se registou uma ocorrência na zona alta.



Figura 5 – Delimitação esquemática da mancha de inundação e dos locais de inundação frequentes no Dafundo (com base em informação não documentada e em CMO, 2013)

A construção, há mais de uma década, da duplicação do troço canalizado da ribeira da Junça na Rua 7 de Junho de 1759 teve um efeito benéfico no número, extensão e gravidade das inundações na zona baixa do Dafundo, uma vez que foram significativamente reduzidos. No entanto, ainda foram reportadas algumas ocorrências posteriores à sua construção, cuja análise foi efetuada através da modelação 1D/2D do comportamento hidráulico do sistema.

3. MODELO 1D/2D

3.1 Considerações introdutórias

A modelação da zona em estudo foi efetuada considerando a segmentação da zona alta e da zona baixa da bacia. A zona alta da bacia foi estudada com recurso a um modelo simplificado, conceptual e agregado. Os dados de caracterização da zona alta para este modelo simplificado, que permitem reproduzir o seu comportamento hidrológico e hidráulico, foram representados no modelo da zona baixa, como elementos relativos à fronteira de montante. O modelo matemático de drenagem urbana confinou-se à zona baixa, tendo sido construído utilizando como base a informação inicialmente recolhida, assim como informação histórica de inundação disponibilizada.

A avaliação da ocorrência de inundações na zona baixa foi efetuada recorrendo a um modelo matemático acoplado 1D/2D. O modelo 1D aplica-se ao sistema de drenagem enterrado e o 2D (VOJINOVIC, *et al.*, 2009) à componente superficial. O modelo utilizado foi o *Mike Urban* (DHI, 2014) que constitui uma ferramenta especializada na modelação hidrodinâmica de redes de drenagem para diferentes eventos pluviométricos e diversas condições de fronteira, permitindo a modelação do escoamento superficial, mas não refletindo o seu comportamento bidimensional sobre a superfície do terreno, um dos objetivos do projeto MOLINES. Para obter resultados da modelação traduzidos em manchas de inundação na superfície do terreno, recorreu-se ao *software Mike Flood* (DHI, 2007), no qual é efetuado o acoplamento das componentes da rede de drenagem, com recurso a um Modelo

Digital do Terreno. Para a modelação integrada do sistema de drenagem enterrado e da componente superficial, prevendo-se um elevado número de cenários a simular e um elevado tempo de computação do *Mike Flood*, foi utilizado um modelo de drenagem acoplado 1D/2D através do módulo *Overland Flow* inserido no *Mike Urban*, que minimiza o tempo de cálculo.

3.2 Modelo simplificado da zona alta da bacia

A obtenção preliminar dos parâmetros de caracterização hidrológica da bacia de montante, que drena para a zona em estudo, foi realizada através da utilização de um modelo simplificado, calibrado com dados obtidos na campanha de monitorização.

O modelo desenvolvido em David (2006) visa a simulação contínua do comportamento hidráulico de uma bacia por ocorrência de séries de precipitação. Para o efeito, o funcionamento de toda a bacia de drenagem a modelar é representado de forma simples, conceptual e agregada, através de um número reduzido de bacias dispostas em série ou em paralelo. A jusante desta bacia, o modelo considera uma localização onde é controlado o caudal.

No presente estudo foi utilizado apenas um dos módulos do modelo, o módulo hidrológico, para a modelação agregada do escoamento superficial e na rede de coletores. O módulo hidrológico modela o escoamento pluvial, admitindo as perdas hidrológicas iniciais, as perdas contínuas através de um coeficiente de redução hidrológica e a propagação do escoamento através do método do reservatório linear. Ao hidrograma de escoamento pluvial calculado, o modelo permite adicionar outras contribuições atribuídas, por exemplo, a um hidrograma de infiltração ou a um hidrograma de base proveniente de bacias de drenagem a montante.

Para a utilização do modelo simplificado foi necessário analisar as características da zona alta da bacia, que tem uma área total de 87.15ha e uma percentagem de área impermeável de 78.2%. Verificou-se uma resposta diferente da bacia em função das características do evento. No caso de eventos de precipitação de menores intensidades, o modelo simplificado para a bacia anteriormente definida apresentou um bom ajustamento. Para os eventos de precipitação de maior intensidade, que originam caudais superiores a cerca de 350 l/s, verificou-se a afluência de um caudal adicional. Esta alteração de comportamento sugere uma mudança nas ligações entre bacias, ou seja, por exemplo caudais em excesso provenientes de bacias adjacentes que apenas contribuem no caso de eventos de maior intensidade.

Com base na resposta diferenciada da zona alta da bacia do Dafundo, optou-se por definir duas bacias a montante com características diferentes, que foram caracterizadas no processo de calibração.

3.3 Construção do modelo 1D/2D

3.3.1 Escoamento superficial

A modelação do escoamento superficial recorreu à utilização da componente 2D *Overland Flow* (*Mike Flood*) do modelo integrado. Para a avaliação do escoamento superficial foi definida, nesta componente 2D, uma malha quadrada uniforme de 1.0 m. A dimensão da malha foi estabelecida como solução de compromisso entre a exatidão requerida e o tempo de cálculo necessário.

Na modelação da componente superficial e avaliação dos processos de inundação na área urbana do Dafundo, a representação do terreno foi efetuada recorrendo a um Modelo Digital do Terreno (MDT), com base em pontos cotados fornecidos pelos SIMAS OA para toda a bacia do

Dafundo. Na zona ribeirinha do Dafundo estavam ainda disponíveis pontos cotados obtidos através da tecnologia LIDAR (PAULA *et al.*, 2014). Esta informação adicional permitiu a realização do MDT da zona de estudo com a exatidão necessária para a representação do traçado viário e das singularidades existentes na superfície urbana, sendo imprescindível para a avaliação da componente superficial do escoamento e a incorporação no modelo 1D/2D.

Com base no MDT e no cadastro foi desenvolvido o modelo 1D/2D do sistema de drenagem pluvial. Para a construção do modelo de escoamento superficial foi necessário delimitar inicialmente as sub-bacias de drenagem (Figura 6) e efetuar a sua caracterização em termos de extensão, área total, zonas permeáveis e impermeáveis. A área da bacia da zona baixa é de 2.7 ha, com uma percentagem de área impermeável de 84.3 %. Na zona baixa do Dafundo as sub-bacias foram diferenciadas em três categorias: zona viária, edificação ou zona verde. Na modelação do escoamento superficial das bacias foi utilizado o modelo curva tempo-área que tem em conta a forma das bacias. Por defeito, a geometria das bacias foi considerada retangular. No entanto, este aspeto foi analisado na calibração do modelo, assim como o tempo de concentração das sub-bacias.

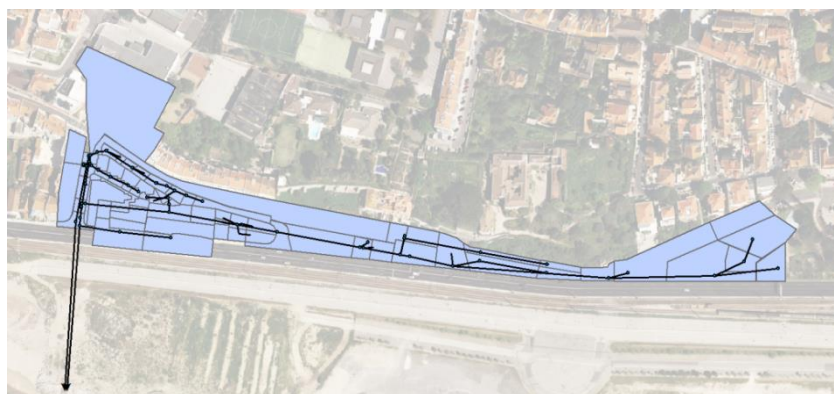


Figura 6 – Delimitação das sub-bacias pluviais da zona baixa do Dafundo

Conforme referido, foram definidas duas bacias contributivas a montante da zona em estudo, para simular o seu o comportamento hidráulico, em função das características dos eventos de precipitação. A bacia da zona alta foi definida com a área total e a percentagem de área impermeável determinadas e anteriormente apresentadas. O coeficiente de escoamento e o tempo de concentração foram analisados na calibração do modelo.

Para a representação adequada do escoamento superficial afluente à bacia da zona baixa, para eventos com diferentes características, foi necessário definir uma bacia adjacente adicional, com as mesmas características que a bacia da zona alta do Dafundo, cuja contribuição para a zona baixa é regulada. Para a regulação desta contribuição foi introduzido no modelo um descarregador retangular que permite simular a resposta da bacia para os casos de eventos de precipitação superior, sendo a regulação efetuada através da altura de água no descarregador. O escoamento superficial proveniente da bacia adjacente apenas é incorporado na rede de drenagem do Dafundo quando a altura de água no descarregador é superior a um valor determinado, definido na calibração do modelo.

3.3.2 Escoamento na rede de drenagem

A rede de drenagem pluvial foi construída no modelo com base nos dados do cadastro, que foram verificados e, em casos pontuais, modificados através da informação recolhida no trabalho de campo previamente efetuado. O tipo de elementos inseridos para a construção da rede de drenagem

foram as câmaras de visita, coletores, sarjetas e sumidouros. Foi necessário recorrer à utilização de elementos auxiliares, como a definição do descarregador de montante para efetuar a ligação da bacia adjacente à rede de drenagem. Foi também necessário introduzir dois descarregadores adicionais para modelar a obstrução da foz na ribeira da Junça e da duplicação do troço paralelo à ribeira. Conforme referido, na foz da ribeira existe uma elevada acumulação de sedimentos e areia, e nos coletores é frequente a ocorrência de obstruções que podem condicionar o escoamento na zona, pelo que a possibilidade desta situação contribuir para a inundação na zona baixa também foi tida em consideração.

No que respeita à caracterização das câmaras de visita, foram definidas câmaras de tipo normal, que permitem a entrada e saída de água pela tampa, e de câmaras seladas, que não o permitem. Estas últimas foram utilizadas para a introdução de nós auxiliares do sistema, quando estão cadastradas ligações em zonas intermédias dos coletores. A caracterização geométrica das sarjetas e sumidouros no modelo foi efetuada com recurso a curvas pré-estabelecidas. Cada curva define a relação entre a área superficial e a área transversal para cada tipo de componente.

3.3.3 Acoplamento de modelos

O acoplamento entre o modelo do escoamento superficial (2D) e modelo da rede de drenagem (1D) foi realizado através dos sistemas de recolha do escoamento superficial: sarjetas, sumidouros e câmaras de visita normais existentes na zona de estudo (denominados componentes de ligação). São criadas ligações ao MDT nestes componentes, permitindo fluxos do escoamento entre os modelos 1D e 2D, no caso de existir inundação.

Para o acoplamento entre modelos através das entidades seleccionadas é necessário que a cota do terreno nos componentes de ligação apresente uma diferença de cota menor do que 10 cm em relação ao MDT. Para este efeito, foi necessário proceder à validação dos dados introduzidos e a ajustes pontuais com base na informação recolhida nas campanhas experimentais. A título de exemplo, refere-se que as câmaras seladas e as secções terminais da ribeira não podem ser acopladas.

3.3.4 Modelo desenvolvido

Para o modelo 1D/2D foram definidas as características das bacias da zona alta, a condição de fronteira relativa à altura da maré a jusante e as solicitações correspondentes à precipitação. Como condição de jusante foi estabelecida a altura da maré calculada através da modelação hidrodinâmica do estuário do Tejo (FORTUNATO *et al.*, 2014) nas saídas da rede enterrada – ribeira da Junça e duplicação do troço canalizado.

A eventual restrição ao escoamento devida a obstrução da rede foi avaliada. Para a modelação do assoreamento na rede definiu-se uma situação padrão correspondente a uma determinada altura de sedimentos, nos coletores onde se conhece a existência destas condições, com base no cadastro fornecido e no trabalho de campo desenvolvido. Nesta situação padrão, considerou-se também a obstrução da foz da ribeira da Junça e da duplicação do troço canalizado. Para este efeito, recorreu-se à definição de descarregadores que limitam a entrada e saída do escoamento até a altura requerida. Impôs-se, ainda, a altura de sedimentos máxima permitida pelo *Mike Urban* (metade da secção do coletor), nos troços situados imediatamente a montante.

3.4 Calibração do modelo

A calibração do modelo permitiu aferir:

- o comportamento das bacias a montante, nomeadamente, por ajuste do parâmetro C (coeficiente de escoamento da fórmula racional) do modelo, dos tempos de concentração, da altura de água no descarregador a partir da qual a bacia adjacente contribui para jusante e do caudal de base;
- o comportamento da rede da zona baixa, nomeadamente, por acerto do parâmetro C do modelo, dos tempos de concentração e do caudal de base.

A calibração do modelo baseou-se nos hidrogramas obtidos com recurso ao modelo simplificado da zona alta da bacia do Dafundo e nos dados de altura de água nos locais de medição, a validação recorreu à informação histórica de inundações existentes, referidos anteriormente.

Conforme já mencionado, foram definidas duas bacias contributivas a montante da zona em estudo, para simular o seu comportamento hidráulico, em função das características do evento de precipitação. No modelo 1D/2D, a calibração dos parâmetros relativos às bacias da zona alta estabeleceu valores de $C=0.23$, tempos de concentração de 10 min e caudal de tempo seco de 20 l/s. Para a bacia adjacente, com as mesmas características que a bacia da zona alta do Dafundo, a contribuição para a zona baixa é regulada através da altura de água num descarregador, para os eventos de precipitação superior. Após a calibração verifica-se que esta contribuição ocorre quando a altura de água no descarregador é superior a 0.15 m.

Verifica-se um ajuste adequado entre as alturas de escoamento calculadas através do modelo 1D/2D e as alturas medidas na campanha de monitorização (Figura 7), quer para eventos de precipitação de reduzida intensidade, quer para eventos de maior intensidade (quando a bacia adjacente contribui para a rede de drenagem da zona baixa do Dafundo).

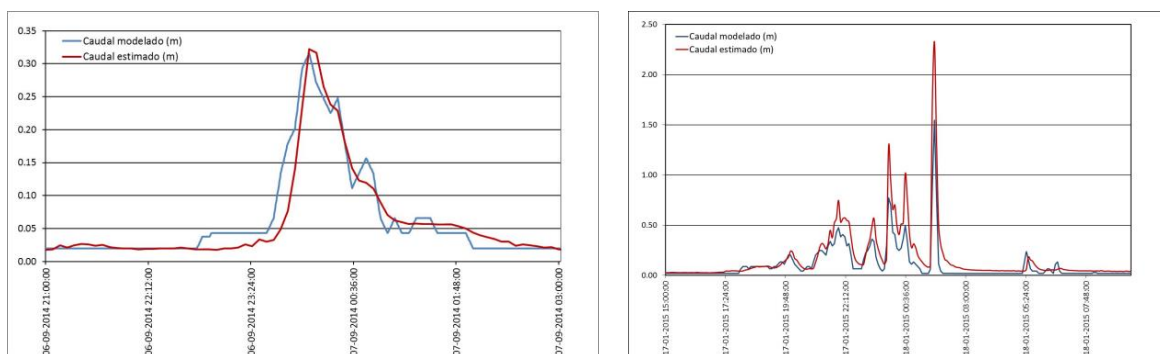


Figura 7 – Resultados da calibração do modelo da zona alta da bacia para diferentes eventos de precipitação

4. DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS

Após calibração do modelo foram simulados diversos cenários que permitem analisar a consequência em termos de mancha de inundação e das respetivas alturas de água no pavimento. O objetivo final é permitir a previsão da inundação na bacia, para janelas temporais de 3 horas para valores de maré e previsões de precipitação, para um horizonte temporal de 2 dias, podendo ser efetuados alertas de inundação. Os cenários de simulação foram estabelecidos em função das ocorrências que condicionam a inundação no caso de estudo. Para efetuar a previsão,

consideraram-se as previsões de precipitação acumulada em períodos de 3h e a altura de maré na praia do Dafundo. A finalidade foi criar um conjunto de simulações que replicassem os condicionamentos típicos de inundação no local, para que a previsão se possa basear apenas nos dados de maré e de precipitação atrás referidos.

Verifica-se que, para períodos de 3 horas com a mesma precipitação acumulada, a consequência em termos de inundação pode ser significativamente diferente em função da forma do hidrograma nesse período, ou seja, das características do evento em termos de tempo seco antecedente, intensidade máxima de precipitação e variação das intensidades de precipitação antes e após o pico de intensidade máxima.

Pretendia-se que os cenários criados permitissem avaliar, para cada par de valores x_1, x_2 (maré, precipitação acumulada em 3 horas), as situações mais e menos gravosas possíveis, em função das restantes variáveis condicionantes, em termos de altura de água por inundação (y). Assim, iniciou-se o estudo da influência da forma do hietograma com a determinação da intensidade máxima de precipitação para os períodos de retorno (T) de 10, 20 e 50 anos, com base nas curvas IDF do Decreto-Lei 23/95. Para essa intensidade máxima foi definida a forma para o hietograma de precipitação, correspondendo a uma precipitação de projeto (Figura 8).

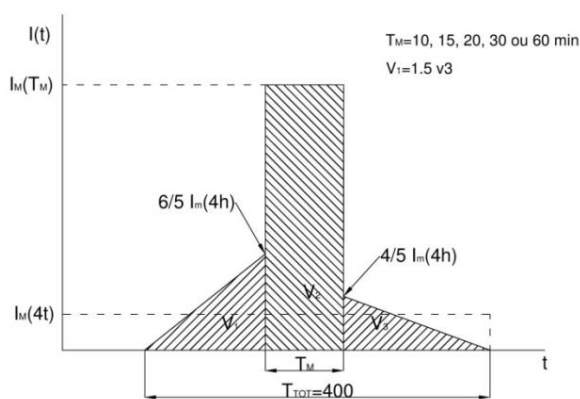


Figura 8 – Precipitação de projeto (MATOS, 1987)

Para o volume gerado por esse evento, definiu-se um outro formato de hietograma com o mesmo volume, mas para uma precipitação com intensidade uniforme, ao longo de um período de tempo pré-estabelecido (3 horas). Foram ainda simulados três eventos de precipitação reais medidos na bacia. No Quadro 1 apresentam-se as características dos eventos de precipitação utilizados para a definição de cenários.

Os cenários de maré foram estabelecidos tendo em conta as variações devidas à combinação da amplitude de maré com os efeitos provocados pelo *storm surge*, que consiste na alteração do nível da água do mar devido a condições extremas de pressão atmosférica. Os centros de baixa pressão são acompanhados por uma sobre-elevação da superfície da água. Para o *storm surge*, considerou-se um aumento máximo da altura de maré de 0.5m e um mínimo de -0.3m (correspondendo a uma descida). Para a amplitude de maré, consideraram-se os limites máximo e mínimo de 4.2m e 0.8m, respetivamente, com base em FORTUNATO *et al.* (2014). Os cenários para a altura da maré foram definidos para o nível médio do mar (NMM) de 0.14m, correspondendo o cenário mais desfavorável ao nível máximo de maré de 2.7m e o cenário mais favorável ao nível mínimo de maré de -2.3m, com base em FORTUNATO *et al.* (2014). Os valores de maré reportados são referenciados ao zero topográfico,

considerando que este se encontra 2.08m acima do zero hidrográfico. Conjugando estes limites, consideraram-se valores intermédios de maré, num total de cerca de 10 cenários.

Quadro 1 - Cenários de precipitação definidos na modelação 1D/2D

Tipo de eventos	Designação	T [anos]	I _{max} [mm/h]	P _{tot} [mm]
Precipitação de projeto	pp_1	10	56.12	57.38
	pp_2	20	63.40	66.62
	pp_3	50	72.74	79.13
Precipitação uniforme	pu_1	-	14.34	57.38
	pu_2	-	16.65	66.62
	pu_3	-	19.78	79.13
Precipitação real	pr_1	-	20.77	21.02
	pr_2	-	38.27	14.83
	pr_3	-	4.28	7.80

T: período de retorno

I_{max}: intensidade de precipitação máxima

P_{tot}: precipitação acumulada

Observou-se que, para além das variáveis precipitação acumulada e altura de maré, o registo de inundações pode depender das condições operacionais da rede, ou seja, se o sistema de drenagem se encontra com ou sem assoreamento, e se a fronteira de jusante se encontra com ou sem obstrução, nas saídas da ribeira e da duplicação do troço canalizado para o estuário, por transporte lateral de areias da praia. No que respeita às condições operacionais da rede, foi simulada a condição da rede apresentar ou não assoreamento nos coletores e obstrução das saídas para o estuário, para uma situação padrão. Como situação padrão, estabeleceu-se para os coletores com registo de assoreamento frequente um assoreamento de 0.20 m. Para a obstrução da foz da ribeira da Junça e da duplicação do troço canalizado, foi definido um grau de obstrução do 90%. Estes valores foram estabelecidos na sequência das conclusões obtidas nos trabalhos de campo efetuados no local e a conjugação destas ocorrências foi considerada como o cenário operacional “com obstrução”.

Para cada um dos valores de precipitação apresentados no Quadro 1 e para cada um dos cenários de maré em estudo, efetuou-se a modelação das condições operacionais com obstrução e sem obstrução.

5. RESULTADOS

5.1 Situação operacional sem obstrução

Para a condição operacional sem obstrução, a ocorrência de inundações apresenta reduzida dependência da altura de maré no estuário do Tejo. A altura de maré condiciona apenas a duração da inundação, por comprometer uma eficaz drenagem das redes pluviais, e não propriamente a extensão da mancha de inundação ou as alturas de água sobre o pavimento.

Para cenários de precipitação moderada e de intensidade uniforme, a rede de drenagem é submetida a inundações com extensão significativa no arruamento principal da zona em estudo, sendo reduzidas as alturas máximas de inundação. As maiores alturas de água verificam-se para o período de retorno de 50 anos e, embora sejam inferiores a 10 cm de altura de água, é criada uma mancha de inundação de dimensão considerável.

No caso de precipitações de maior intensidade, como é o caso dos cenários para precipitações de projeto, a área a nascente da zona em estudo também apresenta inundações, sendo a mancha de inundação de extensão variável em função da intensidade máxima do evento. Nestes casos, a área junto à estrada principal também passa a ser afetada pelas inundações na zona baixa do Dafundo, embora com alturas de água muito reduzidas.

Para os eventos de precipitação reais, eventos pr_1 e pr_2, a altura de água é reduzida mas a mancha de inundação é de extensão considerável. A máxima altura de inundação nos dois cenários é ainda inferior a 10 cm, sendo inferior a 2 cm na maior parte da mancha de inundação. Para o evento pr_3 a rede de drenagem não sofre inundações.

A título de exemplo, a Figura 9 ilustra a extensão e as alturas máximas (max_H (m)) da mancha de inundação para os cenários de precipitação de projeto, com um período de retorno de 20 e 50 anos, para a maré de 2.7 m.



Figura 9 - Máxima altura de inundação (m) para a situação de rede sem obstrução e para cenários de precipitação de projeto e maré de 2.7 m. Alinhamento da ribeira, arruamento e estrada principais

5.2 Situação operacional com obstrução

Para o caso da condição operacional com obstrução, para a situação padrão modelada, o comportamento hidráulico da rede de drenagem apresenta uma maior dependência da altura da maré. Para as maiores alturas da maré simuladas, e para os eventos de precipitação de maior intensidade, a altura máxima de água sobre o pavimento triplica, em relação à condição sem obstrução (Figura 10a).

A mancha de inundação afeta o alinhamento da ribeira canalizada, o arruamento principal e a estrada principal da zona em estudo (Figura 10b), devido à redução da capacidade nas saídas para o estuário do Tejo, causada pela elevada altura da maré. Na zona situada mais a nascente (Figura 10c), e também mais afastada do alinhamento da ribeira, também se pode verificar a ocorrência de inundação, devido ao assoreamento de grande parte dos coletores, especialmente dos ramais que ligam às sarjetas e sumidouros nesta área.

Para as precipitações reais pr1_ e pr_2, a mancha de inundação apresenta uma extensão similar aos cenários sem obstrução, sendo os valores de altura de água máxima geralmente superiores. No que respeita à precipitação pr_3, não há ocorrência de inundações. As inundações não dependem da altura da maré, sendo os resultados obtidos iguais para todos os cenários de maré testados.

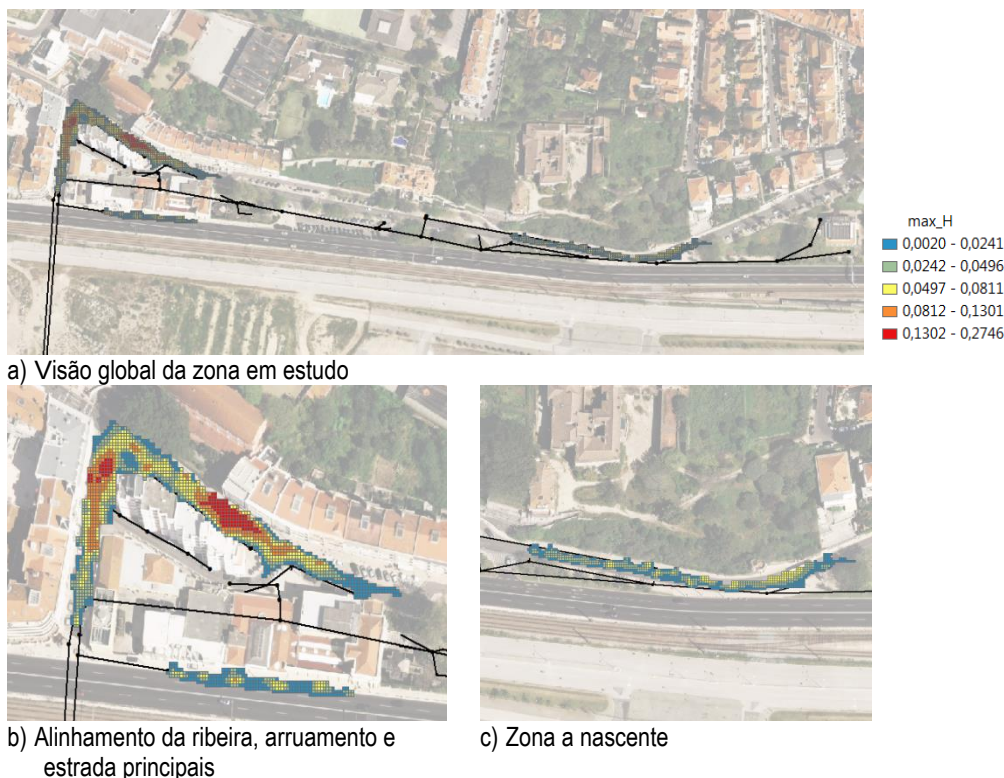


Figura 10 - Máxima altura de inundação (m) para a rede com obstrução, precipitação de projeto, T=50 anos e altura de maré de 2.7 m

5.3 Apreciação global e consulta de resultados

Os resultados traduzem um bom comportamento do modelo, permitindo identificar as principais deficiências da rede de drenagem e avaliar as alturas de água e a extensão da mancha de inundação, para os cenários e condições operacionais simulados. Os resultados obtidos em termos de mancha de inundação refletem a informação histórica disponibilizada (Figura 5). No entanto, não foi possível replicar em todos os locais da zona em estudo as alturas de água sobre o pavimento, identificadas na informação histórica. Para esse efeito, é necessário modelar condições de obstrução mais condicionantes do que as da situação padrão, o que constitui um objetivo para o desenvolvimento futuro do projeto.

Não obstante, dos resultados obtidos é possível avaliar desde já o impacto das condições operacionais da rede e do assoreamento nas saídas do sistema na ocorrência de inundações na zona baixa do Dafundo. Este impacto verifica-se quer na extensão da mancha quer nas alturas de inundação. A revisão do plano de manutenção e limpeza da rede, assim como o estudo de soluções para a redução da frequência de assoreamento nas saídas do sistema, constituem potenciais medidas para redução do risco na zona urbana ribeirinha do Dafundo.

No âmbito do projeto MOLINES prevê-se que os diferentes cenários sejam incorporados numa plataforma de integração de resultados (GOMES *et al.*, 2015), para realizar a previsão da inundação, permitindo efetuar alertas de inundação. Esta plataforma ainda se encontra em desenvolvimento e ficará acessível aos parceiros do projeto.

6. SÍNTESE E CONCLUSÕES

Apresentou-se o trabalho de avaliação da suscetibilidade à inundação da zona baixa do Dafundo. Sendo uma zona em que historicamente se verificava ocorrência de inundações, esta situação beneficiou claramente da construção de uma duplicação do trecho canalizado da ribeira da Junça no seu troço terminal, na zona baixa. Não obstante, continuam a verificar-se inundações esporádicas, geralmente associadas à ocorrência simultânea de períodos de precipitação intensa e maré elevada sendo, no entanto, mais gravosas para situações de obstrução quer na rede quer nas saídas para o estuário.

Para melhor se compreender a dependência destes fenómenos, implementou-se um modelo integrado 1D/2D, tendo agregado ainda informação relativa à condição operacional das redes de drenagem, nomeadamente, quanto ao assoreamento nos coletores e à obstrução nas saídas para o estuário. Confirmou-se que não se verificando os referidos problemas operacionais, a ocorrência de inundação não depende da altura de maré. No que respeita à extensão da mancha de inundação, esta pode ser considerável mas as respetivas alturas de água são sempre reduzidas. A maré condiciona a duração da inundação mas a sua severidade depende apenas da precipitação.

As consequências mais gravosas ocorrem quando se verificam os referidos problemas operacionais na rede de drenagem. Nesta situação, apenas não ocorre inundação para eventos de precipitação reduzida. Para os restantes eventos é previsível que ocorram inundações com extensão significativa. A análise do efeito das condições operacionais da rede permitiu perspetivar que a altura de água sobre o pavimento dependa da localização e do grau de obstrução das infraestruturas, enquadrando-se a continuação desta análise em futuros desenvolvimentos do projeto.

Em síntese, a condição operacional da rede de drenagem revelou-se o fator mais condicionante para a ocorrência de inundações, seguido das características do evento de precipitação, sendo o menos condicionante a altura de maré.

A revisão do plano de manutenção e limpeza da rede, assim como o estudo de soluções para a redução da frequência de assoreamento nas saídas do sistema constituem potenciais medidas para redução do risco na zona urbana ribeirinha do Dafundo.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito do projeto MOLINES (PTDC/AAG-MAA/2811/2012), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo que os autores agradecem o apoio da FCT para a sua concretização. Os autores agradecem ao SIMAS Oeiras e Amadora, aos Bombeiros Voluntários do Dafundo e ao Serviço de Proteção Civil da Câmara Municipal de Oeiras o apoio logístico, o acesso a informação e às infraestruturas, assim como o apoio prestado na realização das campanhas de monitorização.

BIBLIOGRAFIA

CMO (2013). *Plano Diretor Municipal de Oeiras. Relatório de Proposta.*

David, L. (2006). Descargas de excedentes de sistemas de drenagem urbana - estudo referenciado em resultados experimentais obtidos em Portugal. Dissertação para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, I.S.T./U.T.L., Setembro de 2005, 304 p.

DHI (2014). Mike Flood. 1D-2D Modelling. User Manual. MIKE BY DHI Software, Horsolm, Denmark.

Fortunato, A. B., Li, K., Bertin, X., Rodrigues, M. (2014). *Determination of extreme sea levels along the Portuguese coast*. 3.^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal.

Freire, P., Fortunato, A. B., Rilo, A., Bertin, X., Li, K. (2014). *Flood risk assessment in estuaries. The importance of historical data integration in predictive tools development*. Coastal systems under change: tuning assessment and management tools, Sesimbra, Portugal.

Gomes, J., Jesus, G., Rogeiro, J., Oliveira, A., Costa, R., Fortunato, A. (2015). *Molines – towards a responsive web platform for flood forecasting and risk mitigation*. Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 1183 – 1188.

Matos, R. (1987). Métodos de análise e de cálculo de caudais pluviais em sistemas de drenagem urbana. Estudo referenciado em dados experimentais de bacias urbanas portuguesas. Vol. 1. Publicação LNEC – I&D – Tese Hidráulica.

Paula, T. J., Simões, N., Marques J. A. e Machado, F. M. (2014). *Zonas inundáveis e quantificação do risco de inundação em meios urbanos: Estudo em Coimbra*. Revista Eletrónica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v.2, n. 1, 9 - 19.

Vojinovic, Z., Tutulic, D. (2009). *On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas*. Urban Water Journal, 6:3, 183 - 199.