



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Diana Filipa Alves Freire

OS PROCESSOS FÍSICOS E AS INTERVENÇÕES  
ANTRÓPICAS EM SISTEMAS FLUVIAIS

PHYSICAL PROCESSES AND ANTHROPIC INTERVENTIONS IN FLUVIAL  
SYSTEMS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de  
Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada  
pelo Professor Doutor José Simão Antunes do Carmo e apresentada ao  
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Janeiro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Diana Filipa Alves Freire

# OS PROCESSOS FÍSICOS E AS INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS EM SISTEMAS FLUVIAIS

PHYSICAL PROCESSES AND ANTHROPIC INTERVENTIONS IN FLUVIAL SYSTEMS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente,  
orientada pelo Professor Doutor José Símeão Antunes do Carmo

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2021



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## **AGRADECIMENTOS**

A presente dissertação de mestrado foi elaborada com o apoio e contributo essencial de algumas pessoas que merecem o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor José Simão Antunes do Carmo, orientador desta dissertação, agradeço a confiança, paciência, disponibilidade e empenho com que me orientou nesta investigação, e também por todas as correções e ensinamentos transmitidos.

Aos meus pais e ao Nuno, o meu profundo e sincero agradecimento pelos sacrifícios, a dedicação contínua e o facto de nunca terem desistido de mim neste percurso académico, que parecia não ter fim.

Ao Adolfo por estar sempre disponível para responder às mais minuciosas questões, do Excel ao Baixo Mondego, pelas revisões e sugestões, pela amizade e motivação.

E por último, à Catarina, à Daniela, à Filipa, ao Joel, ao Jorge, à Laura, à Mafalda, à Patrícia e à Rita, agradeço a amizade, a inspiração de todos os dias e o apoio emocional, imprescindíveis para realizar este trabalho durante uma pandemia.

## RESUMO

A Natureza tem vindo a demonstrar, com frequência e de modo severo, as consequências de intervenções não planeadas e indevidamente executadas pelo Homem nos sistemas naturais. Na presente dissertação abordam-se as técnicas correntes de exploração dos cursos de água.

Esta exploração ocorre segundo duas vertentes: a primeira incide na gestão dos caudais dos rios, seja através de barragens de diferentes tipos e dimensões, de pequenos açudes, ou ainda, de regularizações fluviais. A segunda recai sobre a utilização de inertes que resultam da erosão natural dos leitos, de que é exemplo a extração não controlada de areias. Muitas destas intervenções podem ter graves consequências na morfologia dos cursos de água e nas infraestruturas existentes.

Os poucos estudos realizados sobre estas consequências, a frequente ausência de fiscalização e monitorização, bem como o desleixo ou ineficácia de programas governamentais, tem levado a acidentes com alguma gravidade, tanto em Portugal como noutros países.

Nesta dissertação analisam-se paralelamente algumas tragédias desta natureza que marcaram a história recente, como é o caso da queda da Ponte Hintze Ribeiro, no Rio Douro em 2001, onde 59 pessoas perderam a vida, as cheias do rio Mondego em Coimbra, em 2001, 2016 e 2019, entre outras ocorrências. Neste contexto, são ainda analisadas as repercussões do contínuo assoreamento do rio Mondego em Coimbra e a ausência de regularização do caudal do rio Ceira.

É ainda objeto deste trabalho, o estudo de uma possível solução alternativa à atual dragagem do rio Mondego em Coimbra, nomeadamente uma bacia de sedimentação localizada a montante da Ponte da Portela.

Pretende-se assim justificar a necessidade de realizar estudos que reflitam as alterações morfodinâmicas provenientes de intervenções antrópicas, de proceder a regulares monitorizações e de manter atualizados os dados referentes ao estado dos cursos de água com o objetivo de evitar que catástrofes idênticas às assinaladas se repitam.

**PALAVRAS CHAVE** – Rio Mondego; cheias; transporte de sedimentos; infraescavação; dragagens; bacia de sedimentação.

---

## ABSTRACT

Nature has been demonstrating, often and severely, the consequences of unplanned interventions and unduly enforced by man in natural systems. This dissertation discusses current techniques for exploring watercourses.

This exploration takes place according to two aspects: the first focuses on the management of river flows, either through dams of different types and dimensions, or even through river regularization. The second relates to the use of aggregates that result from the natural erosion of the beds, such as the uncontrolled extraction of sand. Many of these interventions can have serious consequences for watercourse morphology and existing infrastructure.

The few studies carried out on these consequences, the frequent lack of supervision and monitoring, as well as the negligence or ineffectiveness of government programs, has led to accidents with some seriousness, both in Portugal and in other countries.

This dissertation analyzes in parallel some tragedies of this nature that have marked the recent history, such as the fall of the Hintze Ribeiro Bridge, in the Douro River in 2001, where 59 people lost their lives, the floods of Mondego in Coimbra, in 2001, 2016 and 2019, among other occurrences. In this context, the repercussions of the continuous settlement of the Mondego River in Coimbra and the lack of regularization of the flow of the Ceira River are also analyzed.

It is also the object of this work, the study of a possible alternative solution to the current dredging of the Mondego River in Coimbra, namely a sedimentation basin near the Portela Bridge.

The intention is thus to justify the need to carry out studies that reflect the morphodynamic changes resulting from anthropic interventions, regular monitoring and to keep up-to-date data on the status of watercourses in order to prevent recurrent disasters.

**KEY WORDS** – Mondego River; floods; sediment transport; local scour; dredging; sedimentation basin.

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| Agradecimentos .....  | i    |
| Resumo .....  | ii   |
| Abstract.....   | iii  |
| Índice .....  | iv   |
| Índice de Figuras .....   | vi   |
| Índice de Quadros.....  | viii |
| Abreviaturas.....   | ix   |
| 1. Introdução.....  | 1    |
| 1.1 Enquadramento .....   | 1    |
| 1.2 Objetivos.....  | 3    |
| 1.3 Estrutura do documento .....  | 4    |
| 2. Revisão da Bibliografia .....  | 6    |
| 2.1 Dinâmica sedimentar em sistemas fluviais.....                               | 6    |
| 2.1.1 Erosão, transporte e deposição.....                                       | 6    |
| 2.1.2 Modelação morfodinâmica .....   | 8    |
| 2.1.2.1 Modelação física .....  | 9    |
| 2.1.2.2 Modelação numérica .....  | 9    |
| 2.1.2.3 Modelação de fenómenos de transporte e erosão.....                      | 11   |
| 2.2 Comportamento do leito aluvionar .....                                      | 11   |
| 2.2.1 Considerações gerais.....   | 12   |
| 2.2.1.1 Comportamento do leito aluvionar face à construção de uma barragem .... | 12   |
| 2.2.1.2 Comportamento do leito aluvionar face à extração de inertes .....       | 13   |
| 2.2.1.3 Comportamento do leito aluvionar face à construção de uma ponte .....   | 13   |
| 2.2.2 Queda da Ponte Hintze Ribeiro.....  | 14   |
| 2.2.3 Cheias do rio Mondego.....  | 19   |
| 2.2.3.1 Cheias do Baixo Mondego em 2001 .....                                   | 22   |
| 2.2.3.2 Cheias do Mondego em 2016.....  | 26   |
| 2.3 Gestão de sedimentos.....   | 30   |
| 2.4 A população e o risco.....  | 35   |
| 3. Análise das Cheias do Rio Mondego em 2019.....                               | 38   |
| 3.1 Enquadramento do evento de cheia .....                                      | 38   |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2   | Precipitação.....                                    | 38 |
| 3.3   | Níveis hidrométricos e caudais .....                 | 41 |
| 3.4   | Considerações finais .....                           | 48 |
| 4.    | Soluções de Gestão de Sedimentos .....               | 50 |
| 4.1   | Considerações gerais.....                            | 50 |
| 4.2   | Gestão de sedimentos no rio Mondego em Coimbra ..... | 50 |
| 4.2.1 | Enquadramento .....                                  | 50 |
| 4.2.2 | Evolução do leito do rio.....                        | 50 |
| 4.2.3 | Solução atual.....                                   | 52 |
| 4.2.4 | Soluções alternativas.....                           | 54 |
| 5.    | Conclusões.....                                      | 57 |
|       | Referências Bibliográficas.....                      | 59 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Zonas de erosão, transporte e deposição de sedimentos numa bacia hidrográfica, adaptado de (Kondolf, 1997). .....   | 7  |
| Figura 2.2 – Dimensões de modelos de escoamento com superfície livre (Adaptada de Martin e McCutcheon, 1999).....  | 10 |
| Figura 2.3 – Infraescavação em pilares (Adaptada de Wang et al., 2017). .....  | 14 |
| Figura 2.4 – Fotografia da Ponte Hintze Ribeiro, 1931 (Soromenho Rocha et al., 2008). .....  | 15 |
| Figura 2.5 – Fotografia da Ponte Hintze Ribeiro antes da construção da Barragem de Crestuma-Lever, no final da década de 70 (Teixeira, 2011). .....                                    | 16 |
| Figura 2.6 – Caudais nas barragens de Carrapatelo, Torrão e Crestuma-Lever entre 01/11/2000 e 07/03/2001 (Soromenho Rocha et al., 2008).....   | 17 |
| Figura 2.7 – Perfis transversais tipo do projeto de Regularização do Baixo Mondego (Antunes do Carmo, 2004). .....   | 20 |
| Figura 2.8 – Caudal afluente ao Açude-Ponte de Coimbra entre 1 de dezembro de 2000 e 1 de fevereiro de 2001 (LNEC, 2012). .....  | 22 |
| Figura 2.9 – Vista a partir da margem esquerda do Mondego, na manhã do dia 28 de janeiro, em Coimbra (Pina et al., 2010).....  | 23 |
| Figura 2.10 – Panorama da rotura do dique direito do canal principal (Baixo Mondego), junto a Santo Varão, foto de A. Carriço (30-01-2001), (Antunes do Carmo, 2004; Cunha, 2002)..... | 23 |
| Figura 2.11 – Mosteiro de Santa Clara-a-Velha, janeiro de 2016, foto de Paulo Novais/LUSA (CM, 2016). .....  | 26 |
| Figura 2.12 – Esplanadas do Parque Verde, janeiro de 2016, foto de Paulo Novais/LUSA (JN, 2016).....   | 26 |
| Figura 2.13 – Registos dos níveis e caudais afluentes e efluentes na Barragem da Aguieira durante a primeira quinzena de janeiro de 2016 (Ordem dos Engenheiros, 2016). .....          | 28 |
| Figura 2.14 – Comparação da variação dos níveis de água com a variação da batimetria (2001 e 2008) (Ordem dos Engenheiros, 2016).....  | 29 |
| Figura 2.15 – Técnicas comuns de evacuação de sedimentos (Adaptado de Chamoun et al., 2016).....   | 31 |
| Figura 2.16 – Estrutura de retenção de sedimentos no inverno de 2012 – 2013, no rio North Fork Toutle, em Washington (Sclafani et al., 2017).....                                      | 33 |

---



|  |    |
|--|----|
| Figura 2.17 – Ilustração do esquema de funcionamento do método <i>drawdown flushing</i> em duas barragens consecutivas (Adaptada de Sumi e Kantoush, 2018).....  | 34 |
| Figura 3.1 – Estações meteorológicas da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRH, 2020).<br>.....  | 39 |
| Figura 3.2 – Caudais afluentes (traço contínuo), e efluentes (traço interrompido) às barragens da Aguieira e Fronhas, de 17 a 24 de dezembro de 2019 (APA, 2020). ....   | 41 |
| Figura 3.3 – Caudais máximos diários afluentes e lançados/efluentes na Barragem da Aguieira, entre os dias 17 de dezembro de 2019 e 1 de janeiro de 2020 (ANPC, 2020). ....  | 42 |
| Figura 3.4 – Caudais médios diários afluentes e efluentes, e cotas registadas na albufeira da Barragem da Aguieira, de 10 a 24 de dezembro de 2019. ....   | 43 |
| Figura 3.5 – Caudais médios diários afluentes e descarregados e níveis instantâneos na albufeira da Barragem das Fronhas, de 10 a 24 de dezembro de 2019. ....   | 44 |
| Figura 3.6 – Nível hidrométrico instantâneo registado na Ponte da Conraria (rio Ceira) e o caudal correspondente, entre os dias 10 e 24 de dezembro de 2019. ....  | 45 |
| Figura 3.7 – A subida do nível da água do rio Ceira, em 21 de dezembro de 2019; fotografia de Paulo Novais/LUSA (Público, 2019).....   | 45 |
| Figura 3.8 – Caudais médios diários afluentes e níveis hidrométricos registados a montante do Açude-Ponte na última hora de cada dia, em Coimbra, entre os dias 10 e 24 de dezembro de 2019.....   | 46 |
| Figura 3.9 – Parque Verde em Coimbra, em 21 de dezembro de 2019; fotografia de Paulo Novais/LUSA (Público, 2019).....  | 47 |
| Figura 3.10 – Imagens de Montemor-o-Velho, 4/12/2019 e 24/12/2019, captadas pelos satélites Sentinel da Agência Espacial Europeia; Ereira assinalada a amarelo e Montemor-o-Velho assinalado a branco (ESA, 2019). ....  | 48 |
| Figura 4.1 – Batimetrias realizadas em 2001 (à esquerda) e em 2003 (à direita), no troço do rio Mondego a montante do Açude-Ponte, a área assinalada com elipse de contorno vermelho representa a zona onde se identificou maior acumulação de sedimentos (Antunes do Carmo e Bravo, 2004). .... | 52 |
| Figura 4.2 – Identificação do trecho a ser desassoreado (à esquerda) e batimetria do rio Mondego correspondente ao ano de 2016 modelada pela Undersee (à direita) (Canilho et al., 2016). ....   | 53 |
| Figura 4.3 – Localização da bacia de sedimentação (assinalada a vermelho) no rio Mondego a montante da Ponte da Portela (Adaptada de Google Earth, 2020). ....   | 55 |
| Figura 4.4 – Localização das duas bacias de sedimentação; bacia no rio Ceira representada a azul, a montante da confluência com o rio Mondego (Adaptada de Google Earth, 2020).....  | 55 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 3.1 – Precipitações diárias e acumuladas em 15 dias (de 10 a 24 de dezembro de 2019), e registos máximos históricos em cada estação (SNIRH, 2020)..... | 40 |
| Quadro 4.1 – Contribuição do caudal do rio Ceira para o rio Mondego durante o evento de cheia de 2019 (SNIRH, 2020). .....                                    | 56 |

## **ABREVIATURAS**

ANPC – Autoridade Nacional de Proteção Civil

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

INAG – Instituto da Água

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

NMC – Nível de Máxima Cheia

NPA – Nível de Pleno Armazenamento

PDM – Plano Diretor Municipal

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SVARH – Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento

A Natureza tem um ciclo próprio e as alterações introduzidas pelo Homem neste ciclo podem ter consequências severas. No que diz respeito a intervenções antrópicas em sistemas fluviais, estas nem sempre são planeadas de modo a prever o seu real impacte negativo a médio e longo prazo.

Na presente dissertação expõem-se as repercussões de algumas técnicas de exploração dos cursos de água. No entanto, é necessário começar por compreender os tipos de exploração bem como o comportamento do leito aluvionar face às alterações impostas.

As intervenções humanas em meios fluviais podem ocorrer de dois modos diferentes. O primeiro modo caracteriza-se pela gestão dos caudais das linhas de água, através da implantação de barragens, da construção de pequenos açudes, ou ainda por regularizações fluviais. O segundo modo refere-se à utilização de inertes provenientes da erosão natural dos leitos dos rios, que ocorre através da extração não controlada de areias.

Quando estas intervenções não são alvo de gestão contínua, e de inspeções e manutenção frequentes, podem resultar graves consequências, quer do ponto de vista morfológico do curso de água, quer no que se refere à segurança das infraestruturas existentes.

Relativamente à morfologia dos rios, a construção de uma barragem ou açude provoca alterações no leito do curso de água, tanto a jusante como a montante. O bloqueio da passagem de sedimentos causado pela implantação da barragem leva à acumulação de material sólido na zona da albufeira e, simultaneamente, causa erosão acentuada no leito do rio a jusante da secção da barragem, uma vez que se perde o transporte sedimentar pré-existente (Antunes do Carmo, 2004).

Quanto à segurança das estruturas existentes, como é o caso das pontes construídas sobre fundos aluvionares, esta deixa de ser assegurada aquando da perda de capacidade de reposição de sedimentos a montante da estrutura, como referido acima. Esta perda acontece devido à

construção de um açude ou barragem, mas também é consequência da extração excessiva de areias a montante da obra. A ausência da reposição natural de sedimentos a montante dos pilares pode originar infraescavação localizada das fundações da estrutura. Este fenómeno consiste na erosão do fundo aluvionar sob a sapata de fundação dos pilares, que por sua vez pode levar ao colapso da ponte (Soromenho Rocha et al., 2008).

Em Portugal existe o risco de ocorrência de acidentes desta natureza dado que há um histórico de colapsos de pontes e de cheias em várias bacias hidrográficas, de Norte a Sul do país. Muitos deles justificados pela atual “cultura” de abandono das obras públicas após a sua construção e também devido à falta de informação que alerte para a existência deste risco.

Com o intuito de colmatar a falta de informação nesta área, na presente dissertação analisam-se em primeiro lugar duas tragédias que ocorreram em Portugal, no ano hidrológico de 2000/2001. As cheias do Baixo Mondego, em janeiro de 2001, que provocaram estragos, até hoje, incalculáveis, e a queda da Ponte Hintze Ribeiro, no rio Douro, na zona de Castelo de Paiva e Entre-os-Rios, em março de 2001, que vitimou 59 pessoas (Antunes do Carmo, 2017).

Estes acontecimentos foram objeto de estudo por parte de várias entidades com o intuito de apurar responsabilidades, dada a sua dimensão e gravidade. Neste trabalho relacionam-se as causas destes dois acidentes, de modo a reforçar a necessidade de monitorização das alterações morfodinâmicas dos leitos dos rios por parte das entidades responsáveis.

Esta investigação incide sequencialmente de forma mais alargada sobre as cheias do rio Mondego, uma vez que estas se têm vindo a repetir recentemente. No ano de 2016, em que foram mais devastadoras na cidade de Coimbra, mas também em 2019, onde voltaram a provocar graves estragos nos municípios do Baixo Mondego.

Estes dois fenómenos de cheias poderão ter ocorrido devido à combinação de vários fatores desfavoráveis, como a deposição de sedimentos no leito do rio, a montante do Açude-Ponte em Coimbra, os caudais libertados pela Barragem da Aguieira, e também não deve ser desconsiderado o comportamento da bacia do rio Ceira, afluente do rio Mondego (Ordem dos Engenheiros, 2016).

Neste contexto, e com caráter de aplicação prática, também se propõe o estudo de um mecanismo alternativo à recente dragagem do rio Mondego entre a Ponte da Portela e o Açude-Ponte. Este estudo tem por base várias metodologias utilizadas na gestão de sedimentos, a nível internacional. A possível solução consiste na implantação de uma ou duas bacias de sedimentação, localizadas no rio Mondego, a montante da Ponte da Portela, e no rio Ceira, a

---

montante da sua afluência com o rio Mondego. O propósito desta alternativa é a retenção de sedimentos numa área delimitada e acessível, que permita a remoção regular dos sedimentos de modo a funcionar em pleno. Assim, a acumulação de sedimentos no leito do rio, na zona da cidade, seria muito menor, aumentando conseqüentemente a capacidade de armazenamento da albufeira/espelho de água. Por conseguinte, tal solução resulta num equipamento útil na mitigação de cheias.

Destaca-se deste modo a importância de acompanhar as alterações morfodinâmicas dos cursos de água resultantes do transporte ou retenção sedimentar, a par de construções ou intervenções feitas pelo Homem. Este acompanhamento poderá realizar-se através de regulares monitorizações e inspeções às obras hidráulicas construídas, não excluindo as zonas a montante e a jusante das mesmas. Manter atualizada uma base de dados referente ao estado dos sistemas fluviais também seria uma ferramenta de grande relevância, pois só assim será possível evitar que catástrofes como as acima mencionadas se repitam, ou pelo menos mitigar os seus efeitos.

## **1.2 Objetivos**

Nem sempre é previsível o comportamento da Natureza em áreas urbanas. O aquecimento global e as alterações climáticas têm vindo a demonstrar esta imprevisibilidade cada vez mais frequentemente. Compete aos cidadãos estar conscientes do risco que correm, pois são os primeiros a conseguir agir sem depender da tomada de decisão de terceiros. No entanto, só é possível reagir de forma correta em situações de catástrofe se toda a comunidade estiver previamente sensibilizada para o risco destas ocorrências.

É propósito deste estudo informar, sensibilizar e alertar, tanto a população como as entidades responsáveis pela segurança das populações e das infraestruturas, bem como os órgãos de gestão local, para a necessidade de ter em conta a vulnerabilidade à ocorrência de eventos extremos em zonas próximas de planícies aluvionares, como a cidade de Coimbra e os municípios do Baixo Mondego, onde a subida do nível da água pode ter conseqüências devastadoras.

Assim, reunir e sintetizar as causas de acidentes passados de modo a facilitar a compreensão de alguns dos fenómenos para que se consiga evitar que estes se repitam é igualmente intuito deste trabalho de investigação.

Também é objetivo da presente dissertação, advertir para a necessidade da realização de mais estudos sobre as alterações morfodinâmicas causadas por intervenções antrópicas, que possam

---

ser utilizados tanto em estruturas já existentes, como no estudo prévio e planeamento de novas estruturas em meios fluviais, de modo a prevenir a ocorrência de outras potenciais catástrofes.

Para atingir os objetivos propostos, a dissertação é composta por uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de transporte sedimentar que se desenvolvem num sistema fluvial, bem como a revisão de duas graves tragédias desta natureza que ocorreram em Portugal no ano hidrológico de 2000/2001. São em seguida analisadas as cheias do rio Mondego em 2016 e 2019 e é justificado o estudo de uma bacia de sedimentação a montante da cidade de Coimbra. Uma solução que visa diminuir significativamente a acumulação de sedimentos no espelho de água a montante do Açude-Ponte, constituindo, por conseguinte, uma alternativa ambiental e economicamente mais viável a longo prazo do que o recurso a dragagens, como as que decorreram recentemente.

### **1.3 Estrutura do documento**

A estrutura da presente dissertação é constituída por cinco capítulos, sendo o primeiro capítulo, o presente, denominado de Introdução, o qual serve para enquadrar o tema, expor os objetivos da investigação e a estrutura da mesma.

O segundo capítulo, designado de Revisão da Bibliografia, é o mais longo e diversificado. Começa por abordar vários conceitos básicos relacionados com o movimento de sedimentos numa bacia hidrográfica e sobre a complexidade de modelação deste processo físico. Em seguida, é analisada a tendência de resposta do leito aluvionar a diferentes intervenções antrópicas realizadas em sistemas fluviais. Neste contexto, são estudados três acidentes que ocorreram em Portugal: a queda da Ponte Hintze-Ribeiro, em 2001, e as cheias do rio Mondego em 2001 e em 2016. São também apresentados conceitos relativos à gestão do risco e à vulnerabilidade da população a este tipo de acidentes em Portugal. E é elaborada uma revisão bibliográfica sobre as soluções existentes de gestão sedimentar.

No terceiro capítulo, designado de Análise das Cheias do Rio Mondego em 2019, são detalhadamente analisadas as condições que proporcionaram o evento de cheia, de acordo com as referências relativas a eventos semelhantes do passado. São expostos alguns dos prejuízos e a dimensão das inundações resultantes do fenómeno de cheias. Apresenta-se também a resposta das entidades responsáveis.

No quarto capítulo, denominado de Soluções de Gestão de Sedimentos, é analisada a evolução da morfologia do leito do rio Mondego no trecho junto a Coimbra e a obra de desassoreamento

---

realizada entre 2017 e 2019, com base nos levantamentos e documentos existentes. É também apresentada uma possível solução para a acumulação de sedimentos a montante da cidade.

Por último, no quinto capítulo, designado de Conclusões, enumeram-se as lições aprendidas, resumem-se as principais conclusões do estudo realizado e apresentam-se sugestões para uma gestão ambiental e economicamente mais sustentável do rio Mondego.



## **2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

### **2.1 Dinâmica sedimentar em sistemas fluviais**

A presente secção aborda os fenómenos relacionados com a dinâmica sedimentar que decorrem ao longo do sistema fluvial. O escoamento superficial, consequência da precipitação, desencadeia vários processos físicos tratados por diversos investigadores.

#### **2.1.1 Erosão, transporte e deposição**

Os fundos aluvionares alteram-se naturalmente, ao longo do tempo. Estas alterações ocorrem em função da hidrodinâmica local e provêm da interação entre o escoamento de água e as partículas que constituem o leito do rio. A interação entre os meios líquido e sólido caracteriza-se por processos muito complexos que, por sua vez, dão origem a “fenómenos de erosão, transporte e deposição” (Antunes do Carmo, 2004).

Numa bacia hidrográfica, o escoamento superficial tem tendência a erodir a superfície do solo e, conseqüentemente, as partículas resultantes deste processo são transportadas ao longo do curso de água. No que diz respeito ao transporte sedimentar, uma bacia hidrográfica tipo pode ser dividida em três zonas (ver Figura 2.1): a de erosão ou de “produção” de sedimentos, a de transporte e, por fim, a de deposição (Kondolf, 1997).

A zona de erosão ou de “produção” de sedimentos refere-se a encostas íngremes, onde se verifica a erosão acentuada das cabeceiras. Esta zona corresponde aos primeiros quilómetros do curso de água.

A zona de transporte refere-se ao troço do rio onde os sedimentos se movem. O declive do perfil longitudinal do curso de água, a existência de vegetação nas margens, bem como a irregularidade do itinerário causada por meandros, permitem a deposição de partículas (barras naturais) e, ao mesmo tempo, a erosão contínua do leito, o que se reflete na variação do transporte sedimentar.

A zona de deposição corresponde aos últimos quilómetros do curso de água. Inicia-se na planície aluvionar, onde o perfil longitudinal do rio tem menor inclinação, o que diminui a capacidade de transporte e origina o depósito natural de inertes em grandes volumes.

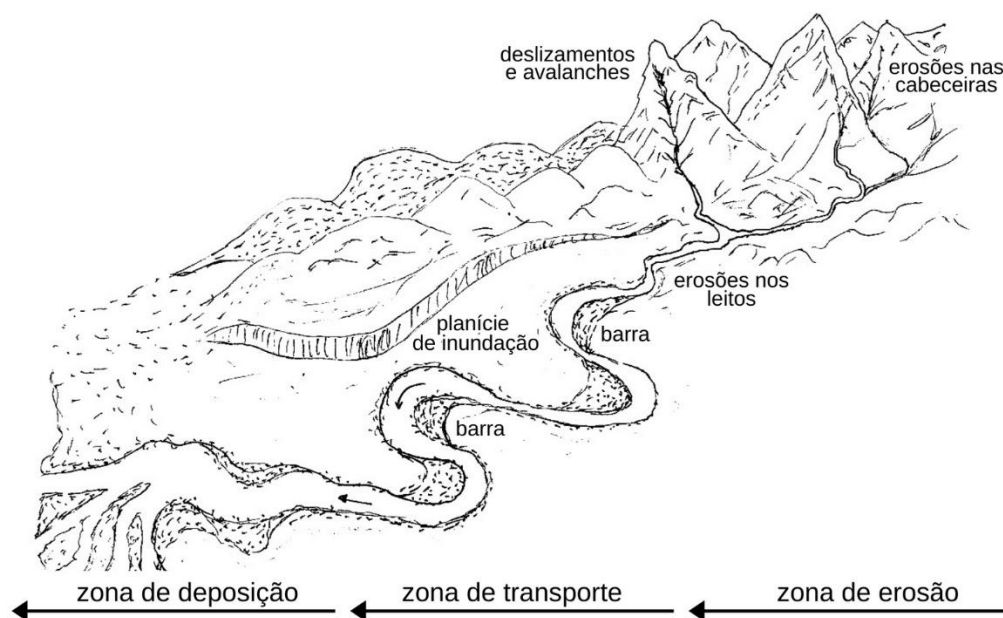


Figura 2.1 – Zonas de erosão, transporte e deposição de sedimentos numa bacia hidrográfica, (Adaptado de Kondolf, 1997).

O leito e a foz de um curso de água podem adquirir vários formatos. A morfologia do rio altera-se com a quantidade de caudal escoado e, no caso de um estuário, também depende da onda de maré. Caudais de cheia provocam alterações acentuadas no formato do leito, levando ao desaparecimento ou formação de barras e pequenas ilhas, enquanto que na foz, a intensidade do escoamento de cheia pode dar origem a pequenos canais entre a areia depositada no mar, formando um delta (Cunha, 2002).

A quantidade de material sólido transportado aumenta em função do escoamento superficial, o que justifica que a maioria do transporte de sedimentos ocorra durante eventos de cheia (Kondolf, 1997).

O movimento de sedimentos num sistema fluvial pode classificar-se segundo vários critérios. O mais corrente, distingue os mecanismos de transporte por arrastamento e em suspensão; o transporte por arrastamento refere-se às partículas que mantêm contacto quase permanente com o fundo do leito durante o transporte, que rolam, escorregam ou saltitam sobre esta superfície,

e o transporte em suspensão refere-se aos sedimentos que se movimentam sem contactar o fundo, mantendo-se no seio da massa de água em movimento (Antunes do Carmo, 2004).

Outro critério corrente para classificar o transporte de sedimentos, consiste em distinguir a origem das partículas. Se a origem das partículas pertencer ao fundo do leito denomina-se por transporte de material de fundo, ou *bed load*, o qual pode ocorrer por qualquer dos mecanismos referidos acima, em função das condições locais de escoamento. Por outro lado, se as partículas tiverem origem externa à do trecho em estudo e dimensões menores que as constituintes do fundo, como silte ou argila, denomina-se por transporte de material de lavagem, ou *wash load* (Antunes do Carmo, 2004).

Em suma, os processos de sedimentação resultam da interface entre o escoamento líquido e a superfície de fundo do leito, variam de acordo com a velocidade do escoamento, a granulometria e a forma das partículas (Antunes do Carmo, 2004; Soromenho Rocha et al., 2008).

### **2.1.2 Modelação morfodinâmica**

O facto de ser possível prever fenómenos naturais complexos com relativa precisão, como a evolução do leito num sistema fluvial, “de forma relativamente simples, rápida, confortável e com custos comportáveis, é cada vez mais importante na área da gestão ambiental” (Antunes do Carmo, 2004).

A utilização de modelos numéricos é, atualmente, uma importante ferramenta de apoio a projetos de engenharia. A simulação numérica dos fenómenos permite uma previsão aproximada de comportamentos que não seria facilmente obtida de outro modo.

No entanto, é de salientar que a modelação numérica não deve ser utilizada como metodologia exclusiva ou em substituição de outra componente de estudo. Como referido acima, é útil como ferramenta de apoio. Pois, no meio fluvial, não é garantido que a simulação represente com exatidão os processos físicos característicos do meio. Por conseguinte, o estudo dos fenómenos hidráulicos deve valer-se de diferentes abordagens, de modo a colmatar possíveis falhas (Antunes do Carmo, 2004, 2020).

De seguida apresentam-se as principais características das modelações física e numérica em ambientes fluviais, com especial atenção à dinâmica sedimentar.

### 2.1.2.1 *Modelação física*

A modelação física adquire grande importância neste contexto. A resolução de alguns problemas hídricos só se torna possível através do ensaio experimental. O comportamento hidrodinâmico do escoamento em resposta a alterações do leito e à implantação de obstáculos ou o mapeamento de zonas inundáveis, pode ser analisado através de modelos físicos de cursos de água, admitindo o fundo como fixo. No entanto, no que se refere a fenómenos sedimentares, o modelo físico deverá contemplar um fundo móvel, formado por partículas com características pré-determinadas, como a dimensão, a massa volúmica e a granulometria (Antunes do Carmo, 2004).

A geometria dos modelos físicos influencia a qualidade da simulação. Os modelos físicos podem ser geometricamente idênticos ao protótipo, com a mesma escala para ambas as direções, ou podem ser concebidos com escalas diferentes, diminuindo os custos associados, bem como o espaço necessário. Contudo, este último tipo de modelo dificilmente terá capacidade de simular de forma correta o comportamento morfológico no protótipo (Antunes do Carmo, 2004).

### 2.1.2.2 *Modelação numérica*

De outro ponto de vista, a modelação numérica resulta do domínio de três áreas. Deve estabelecer-se a interação entre elas: a formulação matemática (representa os princípios físicos), a implementação de técnicas numéricas (permitem resolver as equações matemáticas da primeira) e a composição de uma estrutura computacional (permite resolver computacionalmente as operações da segunda área) (Antunes do Carmo, 2004).

Na aplicação à hidráulica fluvial, os modelos numéricos classificam-se segundo: *i*) os processos que traduzem; *ii*) o tipo de escoamento dominante, e *iii*) as dimensões do domínio e nível de estratificação do meio. Um modelo que traduz a hidrodinâmica da fase líquida (através de equações de conservação da quantidade de movimento e da massa líquida), e também representa a fase sólida, com equações de dinâmica e conservação sedimentar, classifica-se como um modelo morfodinâmico (Antunes do Carmo, 2004).

Relativamente ao escoamento dominante, os modelos numéricos classificam-se geometricamente. São modelos unidimensionais, se uma das dimensões se destaca das outras na propagação do fenómeno a analisar. Quando duas dimensões têm destaque equivalente, ou o escoamento ocorre principalmente em duas direções, consideram-se modelos bidimensionais. Por fim, e o caso mais comum, ocorre quando não se destaca nenhuma das dimensões por todas

---

assumirem importância equivalente, ou por o escoamento ocorrer nas três dimensões, trata-se de modelos tridimensionais.

Quanto às dimensões do domínio e nível de estratificação do meio, como se pode ver na Figura 2.2, os modelos unidimensionais podem classificar-se como 1DH (1-D Longitudinal) e 1DV (1-D Vertical), os modelos bidimensionais como 2DH (2-D Longitudinal-Lateral) e 2DV (2-D Longitudinal Vertical), e como 2.5DH, ou quase 3-D, os que descrevem o escoamento nas três direções, e onde se assume uma única simplificação (hipótese da hidrostaticidade). Os modelos tridimensionais, sem nenhuma simplificação complementar, designam-se como 3D (3-D) (Antunes do Carmo, 2004).

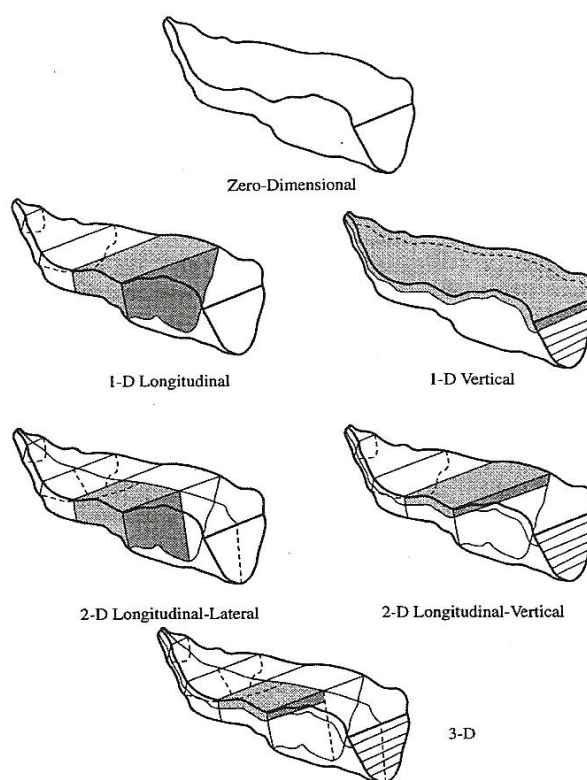


Figura 2.2 – Dimensões de modelos de escoamento com superfície livre (Adaptada de Martin e McCutcheon, 1999).

Em meios fluviais é usual a utilização de modelos hidrodinâmicos 1DH. Estes são acrescidos de equações que representam em simultâneo a dinâmica sedimentar e a evolução do fundo móvel, com o objetivo de reproduzirem a interação entre os meios sólido e líquido. Contudo, quando é necessário construir um modelo bidimensional 2DH, como referido acima, este será elaborado com as equações dos dois modelos, mas em geral de forma sequencial.

### *2.1.2.3 Modelação de fenómenos de transporte e erosão*

A modelação de fenómenos de drenagem e erosão, resultantes da precipitação numa bacia hidrográfica, só permite uma análise quantitativa “considerando um elevado número de hipóteses simplificativas” (Antunes do Carmo, 2004).

Consequentemente, a qualidade dos resultados obtidos por um modelo numérico é função da quantidade de informação que este processar. Ou seja, para além das equações da fase líquida, quanto mais informação for inserida (através de equações) para descrever as características do solo, do clima e da topografia do local em estudo, melhor será a solução, com uma reprodução mais aproximada da realidade.

Contudo, um modelo que considere apenas a topografia e admita uma caracterização média do solo, poderá ser aceitavelmente fiável, em termos qualitativos, na previsão da evolução do leito e do transporte de sedimentos resultantes de uma tempestade.

Com efeito, do ponto de vista da gestão de sedimentos num sistema fluvial, uma solução simplificada não deixa de ser um instrumento útil, capaz de indicar zonas potencialmente desfavoráveis, “que poderão necessitar de medidas preventivas de consolidação” (Antunes do Carmo, 2004).

Para finalizar, a possibilidade de reproduzir processos morfodinâmicos, resultantes da interação entre o escoamento líquido e as partículas sólidas do fundo do leito móvel, numa perspetiva qualitativa, pode ser uma mais valia na elaboração de medidas preventivas, ou mitigadores, de acidentes ou catástrofes.

## **2.2 Comportamento do leito aluvionar**

Esta secção trata o comportamento do leito aluvionar em resposta a alterações impostas pelo homem na morfologia do curso de água. Também se analisam alguns dos acidentes decorrentes da ação de chuvadas intensas em estruturas construídas em meios fluviais, que marcaram negativamente a história recente de Portugal.

### 2.2.1 Considerações gerais

O transporte de sedimentos ao longo de um curso de água não é considerado uma ameaça até ao momento em que é objeto de intervenção humana. Ações como a extração de inertes, construção de pontes e barragens, artificialização das margens, desflorestação e alterações na ocupação do solo, perturbam o natural equilíbrio da dinâmica fluvial e aceleram a erosão do leito aluvionar (Antunes do Carmo, 2017; Kondolf, 1997).

Por equilíbrio natural da dinâmica fluvial entende-se todos os processos naturais associados ao escoamento de uma bacia hidrográfica, que ocorrem no leito do rio, já referidos na secção inicial. Da interação entre o escoamento e a superfície do solo surgem erosões e, conseqüentemente, o transporte e deposição dos materiais erodidos. Esta cadeia de processos naturais procura continuamente manter o equilíbrio no sistema, e por isso deve ser respeitada.

Neste sentido, qualquer estrutura construída em leito aluvionar deverá causar o menor impacto possível no sistema fluvial, de modo a “respeitar a natural tendência de um rio na procura de condições globais de estabilidade” (Antunes do Carmo, 2004).

Assim, importa estudar as possíveis alterações morfodinâmicas resultantes das intervenções mais comuns em sistemas fluviais, como é o caso da construção de barragens e da extração de inertes, com o intuito de mitigar os impactos causados por estas intervenções.

#### 2.2.1.1 *Comportamento do leito aluvionar face à construção de uma barragem*

Uma barragem pode ser construída para múltiplas utilizações, como sejam o armazenamento de água para abastecer populações, rega, produção de energia elétrica e controlo de cheias. A construção de barragens é, possivelmente, das intervenções com maior impacto na dinâmica fluvial.

A redução da velocidade do escoamento causada pela barragem leva à deposição de sedimentos na zona da albufeira. Por conseguinte, o caudal libertado pela barragem terá uma percentagem de partículas sólidas muito inferior ao caudal equivalente que chega à albufeira (Antunes do Carmo, 2004).

O facto de o caudal descarregado conter menor quantidade de sedimentos leva a um aumento da energia do escoamento, que por sua vez acelera a erosão do leito a jusante da barragem, a qual não é compensada pelos sedimentos que ficaram retidos na albufeira. Posteriormente, os

sedimentos resultantes desta erosão serão depositados em secções ao longo do rio, muito a jusante da zona inicial, causando grandes alterações na morfologia do leito a jusante da barragem (Antunes do Carmo, 2017).

O aumento da erosão do leito aluvionar a jusante da barragem pode ter várias consequências, entre as quais se destacam: erosões nos cursos de água afluentes, deteriorações nas estruturas existentes como pontes ou muros de suporte das margens, e danos nas tomadas de água para o abastecimento da população ou regadio (Antunes do Carmo, 2017).

### *2.2.1.2 Comportamento do leito aluvionar face à extração de inertes*

A extração de areias pode ocorrer de dois modos. Os inertes podem ser removidos diretamente do fundo do leito aluvionar, dando origem a fundões, ou podem ser retirados das margens em zonas de deposição natural.

Relativamente à extração de inertes a partir do leito do rio, os fundões resultantes têm tendência a ser preenchidos a montante por sedimentos provenientes do escoamento, diminuindo a quantidade de material sólido transportado para jusante. Em consequência, à semelhança do comportamento descrito acima, aumenta a tendência de erosão do leito a jusante e a sua consequente degradação (Antunes do Carmo, 2017; Soromenho Rocha et al., 2008).

A natural deposição de sedimentos nas margens ocorre devido à morfologia do local, geralmente verifica-se a existência de barras de areia em meandros ou curvas do leito aluvionar. A extração de areias destes locais pode levar à migração do leito do rio a longo prazo, que por sua vez pode originar a degradação de estruturas; estruturas estas que anteriormente não estavam expostas à força do escoamento da água nem foram dimensionadas nesse sentido (Antunes do Carmo, 2005).

### *2.2.1.3 Comportamento do leito aluvionar face à construção de uma ponte*

A construção de uma ponte com pilares no fundo aluvionar leva à adaptação do escoamento a um novo elemento, gerando erosões localizadas; a este fenómeno dá-se o nome de infraescavação.

A infraescavação em pilares de pontes, ou *bridge scour*, é um processo complexo de erosão do solo em redor da fundação dos pilares implantados em fundos aluvionares. Este fenómeno



resulta da interação entre o escoamento do caudal líquido, os sedimentos do fundo aluvionar e a estrutura construída no leito (Wang et al., 2017).

Em estado avançado, este fenómeno pode descalçar o pilar e causar o colapso da estrutura, se não forem tomadas medidas de proteção atempadamente. Como se pode verificar da Figura 2.3, o vórtice a montante assume grande relevância junto do obstáculo, assim sendo, as soluções de proteção contra este tipo de erosão devem incidir sobre o vórtice principal, no sentido de diminuir a sua intensidade, ou através da proteção das zonas mais afetadas (Antunes do Carmo, 2004; Antunes do Carmo e Carreiras, 2002).

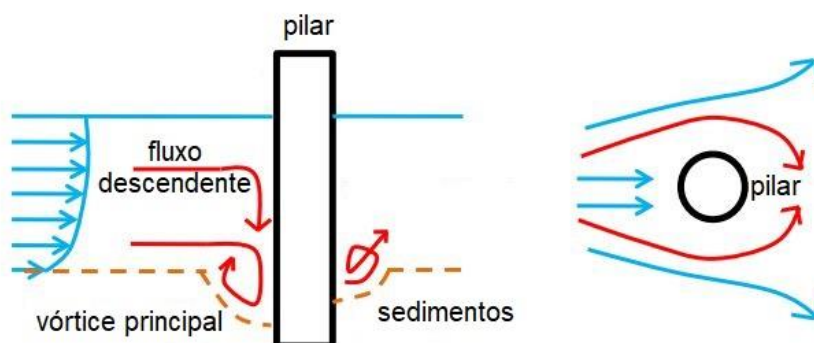


Figura 2.3 – Infraescavação em pilares (Adaptada de Wang et al., 2017).

As subsecções seguintes descrevem catástrofes que ocorreram em Portugal no ano hidrológico de 2000/2001. O ano em estudo foi marcado por vários períodos de chuvadas intensas. Ao caudal de cheia resultante associa-se a desvalorização do comportamento do leito aluvionar face às infraestruturas construídas, dando origem a graves acidentes.

## 2.2.2 Queda da Ponte Hintze Ribeiro

O colapso da Ponte Hintze Ribeiro é um exemplo concreto da resposta do leito aluvionar às alterações antrópicas. O fenómeno de erosão localizada em pilares de pontes construídas em fundos aluvionares representa um risco acrescido à segurança da estrutura e dos seus utilizadores. Deste modo, reforça-se a necessidade de estudar e acompanhar as alterações do leito junto aos pilares, mas também ao longo do trecho do rio onde a infraestrutura se encontra inserida.

Em Portugal há registo de vários acidentes em pontes devido à exposição das fundações à erosão fluvial. Nas décadas de 70 e 80, “os casos mais mediáticos por terem ocorrido em pontes importantes pelo tráfego, pela localização ou pela sua dimensão, foram o da Ponte de Penacova sobre o rio Mondego em 1979 e o da Ponte da Foz do rio Alva na década de 80”, citação de Soromenho Rocha et al. (2008), a qual refere ainda que todos estes casos estão relacionados com a ocorrência de cheias intensas.

A Ponte Hintze Ribeiro, também conhecida por Ponte de Entre-os-Rios, foi construída sobre o rio Douro, entre 1884 e 1886, para unir a aldeia de Entre-os-Rios a Castelo de Paiva. Situada numa curva do rio Douro, a ponte encontrava-se imediatamente a jusante da afluência do rio Tâmega. A montante do local em estudo situam-se as barragens do Torrão, no rio Tâmega, e de Carrapatelo, no rio Douro. A jusante, localiza-se a barragem de Crestuma-Lever, sendo que a secção da ponte se encontrava afetada pela respetiva albufeira desde a construção desta barragem.

A estrutura da ponte, aquando da sua construção, era constituída por 6 pilares, dos quais apenas dois se encontravam expostos ao escoamento (P2 e P3), enquanto que os pilares P4 e P5 estavam localizados na barra de areia existente à data, de acordo com a Figura 2.4. Como referido em Soromenho Rocha et al. (2008), e também pela observação da Figura 2.4, os pilares P2 e P3 encontravam-se protegidos por enrocamento.

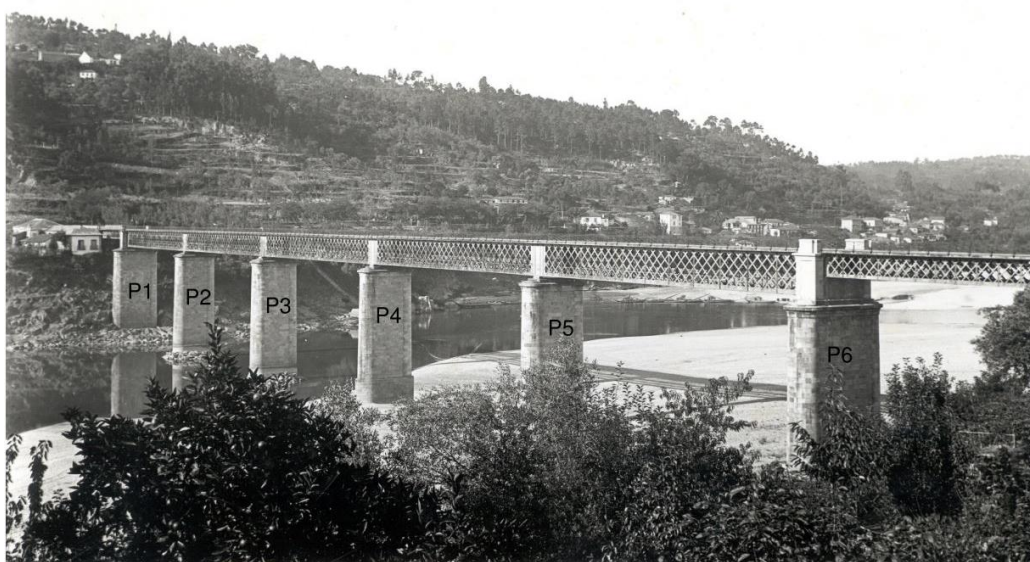


Figura 2.4 – Fotografia da Ponte Hintze Ribeiro, 1931 (Soromenho Rocha et al., 2008).

Entre a década de 70 e a formação da albufeira de Crestuma-Lever, nos anos 80, foram extraídas grandes quantidades de areia diretamente da barra onde a ponte estava implantada, e, após o enchimento da albufeira, as extrações de areia continuaram, mas através do desassoreamento do leito do rio Douro, ao longo do trecho a montante da ponte. Na Figura 2.5, fotografia tirada à Ponte Hintze Ribeiro no final da década de 70, antes da construção da barragem de Crestuma-Lever, pode observar-se a irregularidade da barra, a quase inexistência de areia em redor do pilar P4 e a ausência de enrocamento no mesmo pilar. As intervenções de extração de inertes foram de tal dimensão que levaram ao desaparecimento da barra de areia, de acordo com o levantamento efetuado em 1982, à diminuição geral do nível do leito na zona da ponte, e também à formação de fundões no rio (Soromenho Rocha et al., 2008).

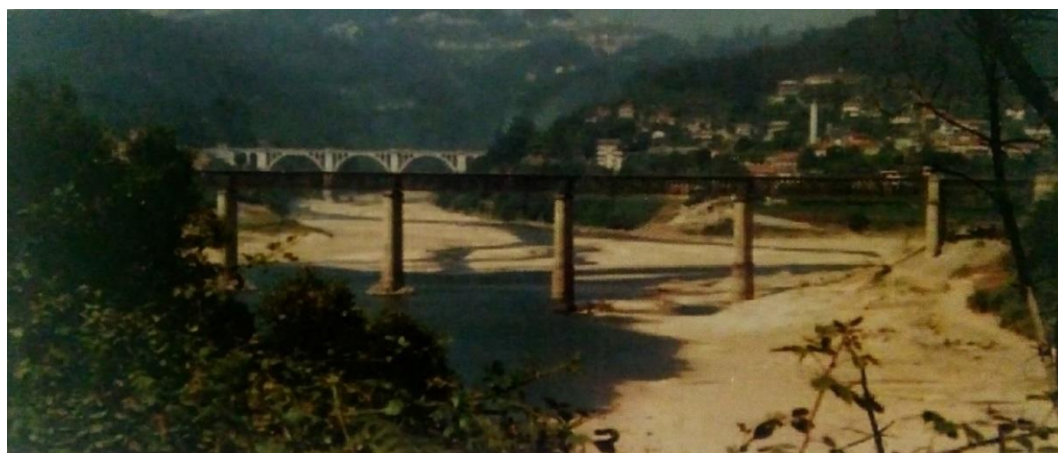


Figura 2.5 – Fotografia da Ponte Hintze Ribeiro antes da construção da Barragem de Crestuma-Lever, no final da década de 70 (Teixeira, 2011).

Analisando a documentação técnica relativa a inspeções feitas à ponte ao longo do tempo, é possível observar a descida do nível do fundo do rio, junto ao pilar P4, de 11.5 m no período de 1913 a 1982, e de 1.5 m entre 1982 e 1989. Tendo em conta que o intradorso da curva do rio Douro onde estava situado o pilar P4 é uma zona de assoreamento natural, a diminuição da cota do fundo não traduz esta tendência natural. A acrescentar a este facto, Soromenho Rocha et al. (2008) refere que, das barragens existentes a montante da secção da ponte, apenas a Barragem do Torrão não permite a passagem de sedimentos para jusante, no entanto, a contribuição a nível sedimentar do rio Tâmega é tão reduzida que não influencia o transporte sedimentar do rio Douro, não afetando o leito na área de implantação da ponte.

Os valores referentes à diferença de cotas registados até ao ano de 1989, a par dos factos mencionados, deveriam ter alertado as entidades responsáveis para a necessidade de avaliar o

estado da morfologia do leito do rio a montante da ponte e também para a requalificação dos pilares, adaptando a estrutura às novas condições do leito e do escoamento.

No ano hidrológico de 2000/2001 registaram-se grandes precipitações que originaram várias ondas de cheia em Portugal. Da análise dos caudais instantâneos libertados pelas barragens do Torrão e Carrapatelo, e do caudal afluente à barragem de Crestuma-Lever, verifica-se que a queda da ponte coincidiu com a passagem da 5<sup>a</sup> onda de cheia registada no rio Douro desde novembro de 2000, Figura 2.6 (Soromenho Rocha et al., 2008).

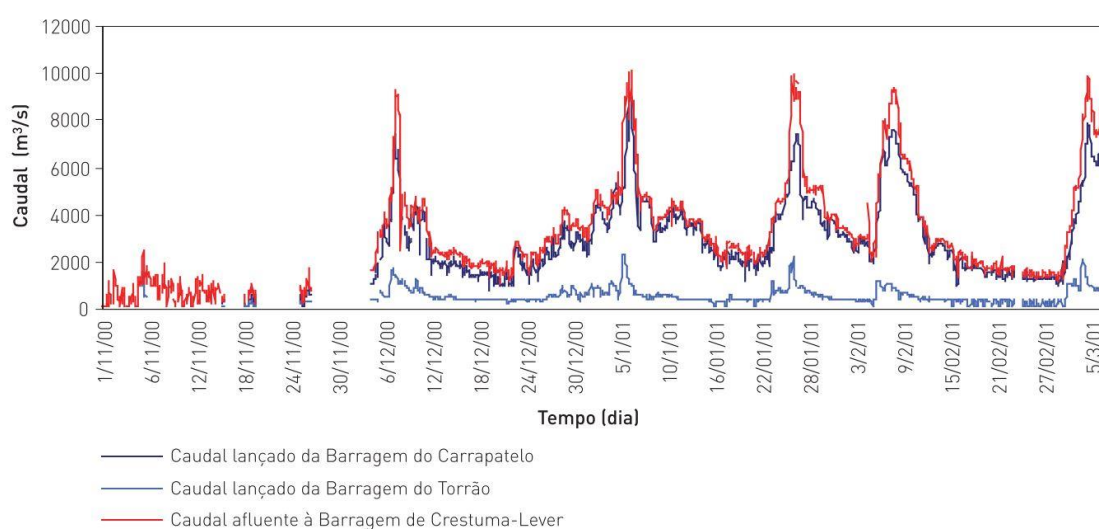


Figura 2.6 – Caudais nas barragens de Carrapatelo, Torrão e Crestuma-Lever entre 01/11/2000 e 07/03/2001 (Soromenho Rocha et al., 2008).

A sequência dos caudais de cheia do rio Douro não terá favorecido a deposição sedimentar necessária para repor as cotas do fundo aluvionar junto à ponte, acabando por propiciar a ocorrência de erosão localizada (Soromenho Rocha et al., 2008).

O colapso da ponte aconteceu no dia 4 de março de 2001, na sequência da queda de um dos pilares.

O pilar P4 tombou para montante, como comprovado por levantamento (Soromenho Rocha et al., 2008). Este facto contraria o sentido do escoamento, o que reforça a ocorrência de erosão localizada, pois o movimento de queda do pilar pode ser explicado com o fenómeno de infraescavação na fundação do pilar, que incide tendencialmente a montante, como explicado em 2.2.1.3.

---

Verifica-se então a ocorrência em simultâneo de vários processos de erosão, com diferentes origens, que terão contribuído em conjunto para a ocorrência do acidente. Os fenómenos de erosão em causa enumerados em Soromenho Rocha et al. (2008) foram os seguintes:

- Erosão geral provocada pela extração de areia do leito do rio. É uma intervenção antrópica com graves consequências quando não devidamente controlada, podendo ser reconhecida através da batimetria do local.
- Erosão localizada nas fundações dos pilares. É geralmente de curto prazo, podendo não ser totalmente assoreada nos meses de seca.
- Erosão geral temporária aquando da passagem de cheias. Tem tendência a recuperar passado algum tempo.
- Erosão geral, ou degradação, causada pela diminuição da quantidade de sedimentos transportados. Neste caso, a extração de areias a montante da ponte terá influenciado a quantidade de transporte sedimentar, bem como a formação de fundões por não permitirem a passagem de areias para jusante, contribuindo para a degradação, a médio prazo, do leito a jusante ao longo de vários quilómetros.

Dito isto, é possível afirmar que as alterações morfológicas do rio Douro, no trecho da secção da ponte, terão resultado não só da extração de areias, mas também da erosão sedimentar e do transporte naturalmente potenciados pelas ondas de cheia, não sendo possível determinar qual foi a principal causa (Soromenho Rocha et al., 2008).

No entanto, uma das conclusões de Soromenho Rocha et al. (2008) é que a estabilidade do pilar que caiu poderia ter sido garantida se este tivesse sido intervencionado com uma solução de proteção contra a erosão localizada. Uma vez que, os pilares P2 e P3 estavam protegidos com enrocamento, e embora se encontrassem mais expostos ao escoamento, pois foram os mais solicitados durante a vida útil da ponte, resistiram a cheias mais intensas que as de 2000/2001.

Este acidente resultou na morte de 59 pessoas que atravessavam a ponte quando se deu o seu colapso. Dos meios intervenientes nas ações de coordenação, busca, resgate e apoio às famílias das vítimas, destacam-se: o Ministério da Administração Interna, Proteção Civil, bombeiros das corporações locais, mergulhadores da Marinha, Força Aérea, Serviço Nacional de Bombeiros, Guarda Nacional Republicana, Instituto de Medicina Legal e diversos profissionais da Ação Social. Apenas 23 dos corpos foram encontrados, o último em maio de 2011 (Teixeira, 2011).

Uma tragédia com esta dimensão exige que se tirem lições para que não se repitam situações semelhantes no futuro. Assim, a adoção de medidas de mitigação de acidentes em pontes construídas em fundos aluvionares, é uma iniciativa fundamental. As medidas podem passar por, na fase de projeto, estimar a profundidade máxima da infraescavação através de previsões

e testes em laboratório, na fase de construção recorrer a soluções de proteção, como o exemplo da aplicação de enrocamento em torno dos pilares mais afetados, e, por fim, na fase de utilização, instalar instrumentos de monitorização nas estruturas e realizar regularmente levantamentos batimétricos que permitam acompanhar a evolução morfodinâmica do fundo aluvionar, garantindo uma vigilância contínua (Soromenho Rocha et al., 2008; Wang et al., 2017).

### **2.2.3 Cheias do rio Mondego**

As cheias do rio Mondego são um problema de cariz cíclico ao longo da sua história. Têm exigido a atenção de investigadores, geólogos e engenheiros na procura das causas e de possíveis soluções. Pois, apesar das obras implementadas para as resolver, os eventos de cheia continuam a causar grandes prejuízos na zona ribeirinha da cidade de Coimbra e nos municípios do Baixo Mondego. A desadequada gestão e falta de manutenção das infraestruturas e dos equipamentos de proteção de cheias a par de períodos de chuvas intensas, são alguns dos fatores apontados para a dimensão dos estragos (Ordem dos Engenheiros, 2019; Sequeira, 2015).

A cidade de Coimbra, em particular a zona da Baixa, foi afetada durante muito tempo por inundações provocadas pelas cheias do rio Mondego. Também a jusante da cidade, os campos agrícolas do Mondego eram frequentemente inundados. Dada a sua localização na planície aluvionar do rio, tendencialmente caracterizada por grande deposição sedimentar em períodos de cheia, e também devido à sua proximidade com a foz, as cheias do rio Mondego causavam graves prejuízos aos agricultores da região do Baixo Mondego. Estas consequências motivaram o desenvolvimento de soluções ao longo do tempo (Costa, 2013; Sequeira, 2015).

A primeira grande obra de regularização do rio Mondego realizou-se no fim do século XVIII (Sá Marques et al., 2013). O projeto foi elaborado pelo Padre Estevão Cabral, e tinha o objetivo de diminuir a tendência de assoreamento característica do Baixo Mondego, através da eliminação dos meandros naturais do rio. Foi então escavado um canal artificial, quase retilíneo, entre Coimbra e a Figueira da Foz, para o qual foi desviado todo o escoamento do rio Mondego, formando o “rio Novo” (Sequeira, 2015).

Esta intervenção não atingiu o objetivo inicial, pois, a retificação de um trecho de rio faz com que o comprimento final deste seja inferior ao inicial, esta alteração implica o aumento da inclinação média do fundo aluvionar, que se traduz numa maior capacidade de transporte sedimentar, acentuando a erosão do fundo aluvionar a montante e a deposição de sedimentos a jusante no troço intervencionado (Antunes do Carmo, 2004). Ou seja, com a obra fluvial, o

novo leito do rio Mondego passou a acumular mais sedimentos na zona do Baixo Mondego, que por sua vez aumentou o nível hidrométrico do escoamento naquela zona, facilitando o galgamento das margens e, conseqüentemente, a ocorrência de cheias (Sequeira, 2015).

Só mais recentemente, a partir da década de 60, a regularização do rio Mondego voltou a merecer atenção. Foi então desenvolvido um plano que previa a execução de um conjunto de obras e medidas a implementar, que ficou conhecido por Aproveitamento Hidroagrícola do Mondego. Os objetivos deste plano incluíam a regularização fluvial do Baixo Mondego e a proteção contra cheias. Para que tal fosse possível, foram construídas as barragens da Aguieira, Fronhas e Raiva, a montante de Coimbra, sendo a Barragem da Aguieira de maiores dimensões e única com capacidade significativa de regularização de caudais. A jusante da cidade de Coimbra, o leito do rio Mondego foi novamente dimensionado, agora composto por um canal principal e canais de rega laterais (Figura 2.7), construíram-se diques longitudinais de defesa ao longo das margens, e um sistema de inundação controlada dos campos agrícolas, a par da instalação de um sistema de rega (Cunha, 2002; Sá Marques et al., 2013; Sequeira, 2015).

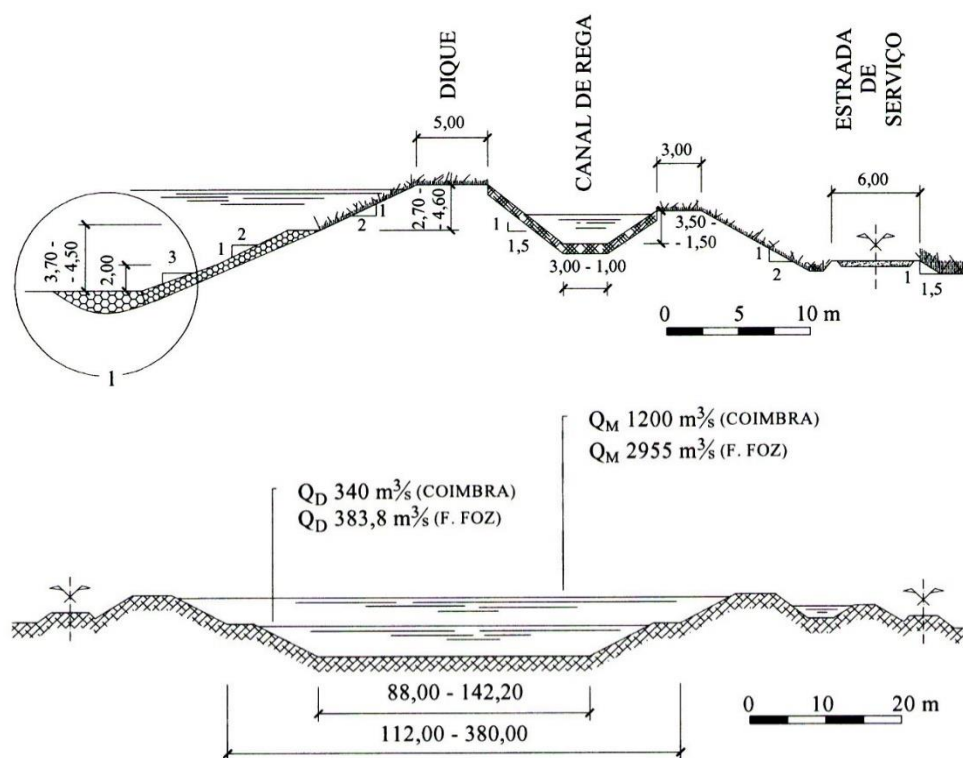


Figura 2.7 – Perfis transversais tipo do projeto de Regularização do Baixo Mondego (Antunes do Carmo, 2004).

---

Complementarmente à regularização do leito no Baixo Mondego, também foi necessário reforçar a rede viária da região, e neste contexto foi construído o Açude-Ponte em Coimbra. Esta infraestrutura de fins múltiplos permitiu desviar parte do tráfego da Baixa da cidade, criou um amplo espelho de água com impacte urbanístico positivo, e serve também de tomada de água para o canal de rega dos campos do Mondego.

As barragens do Aproveitamento Hidroelétrico do Mondego foram projetadas para garantir um caudal de ponta de cheia centenário de 1200 m<sup>3</sup>/s em Coimbra, em vez do caudal de 3700 m<sup>3</sup>/s sem regularização (Sequeira, 2015). Deste modo, as principais características das barragens são (Sá Marques et al., 2005):

- Barragem da Aguieira – localiza-se no rio Mondego, a jusante da afluência do rio Dão, entrou em funcionamento em 1981. Tem uma capacidade máxima de armazenamento de 450 hm<sup>3</sup>, à qual corresponde uma cota de 126.00 m (Nível de Máxima Cheia, NMC), e no Nível de Pleno Armazenamento (NPA) tem uma capacidade de 432.03 hm<sup>3</sup>, com uma cota correspondente de 124.70 m.
- Barragem das Fronhas – situa-se no rio Alva, um dos principais afluentes do Mondego. A sua construção foi concluída em 1985 e os seus NMC e NPA correspondem a 140.00 m e 136.00 m, respetivamente.
- Barragem da Raiva – situa-se no rio Mondego, a jusante da Aguieira, e entrou em funcionamento em 1983. Tem uma capacidade de armazenamento de apenas 26.80 hm<sup>3</sup> em pleno armazenamento, e por isso não tem grande influência no controlo de cheias.
- Açude-Ponte de Coimbra – localiza-se em Coimbra, no rio Mondego, como referido acima. É uma barragem móvel e a sua construção ficou concluída em 1981. Tem uma capacidade de armazenamento de apenas 1.6 hm<sup>3</sup>, com uma cota de 18.00 m no nível de exploração normal, e uma cota de 19.00 m para o nível máximo de cheia, que corresponde a um caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s.

A construção deste conjunto de obras, com maior destaque para a Barragem da Aguieira, diminuiu a frequência e a intensidade das cheias a jusante, principalmente a ocorrência de inundações na cidade. Contudo, a ausência de uma gestão rigorosa que a complexidade deste empreendimento exige, a tendência de ocupação urbana da planície aluvionar, bem como a desvalorização das alterações morfodinâmicas que ocorrem ao longo do leito aluvionar, têm dado margem para que o rio Mondego continue a causar prejuízos (Costa, 2013; Cunha, 2002; Sá Marques et al., 2013).



### 2.2.3.1 Cheias do Baixo Mondego em 2001

Em janeiro de 2001, a cidade de Coimbra e as planícies do Baixo Mondego foram fortemente inundadas pelas cheias do rio Mondego. Como referido na secção anterior, o ano hidrológico de 2000/2001 foi caracterizado por longos períodos de chuva contínua desde novembro de 2000, e a bacia do rio Mondego foi igualmente afetada por estas condições meteorológicas.

A primeira ponta de cheia aconteceu no início de dezembro de 2000, em que a cota de armazenamento da Barragem da Aguieira alcançou valores muito elevados. Coimbra registou um caudal afluyente de 1613 m<sup>3</sup>/s e a água galgou para as margens. Ao mesmo tempo, o rio Ceira, afluyente a montante de Coimbra, “transbordou e apresentava descarga intensa e rica de sedimentos em suspensão”, já a jusante da cidade, o nível da água ultrapassou em 20 cm o dique esquerdo do canal principal (Cunha, 2002).

À semelhança da primeira ocorrência, a segunda ponta de cheia foi registada entre 5 e 6 de janeiro de 2001, com um caudal de 1625 m<sup>3</sup>/s em Coimbra. No entanto, foi na terceira ponta de cheia, em finais do mês de janeiro, entre os dias 26 e 29, que foi atingido o maior caudal, e também o mais destrutivo; ver Figura 2.8 (Cunha, 2002).

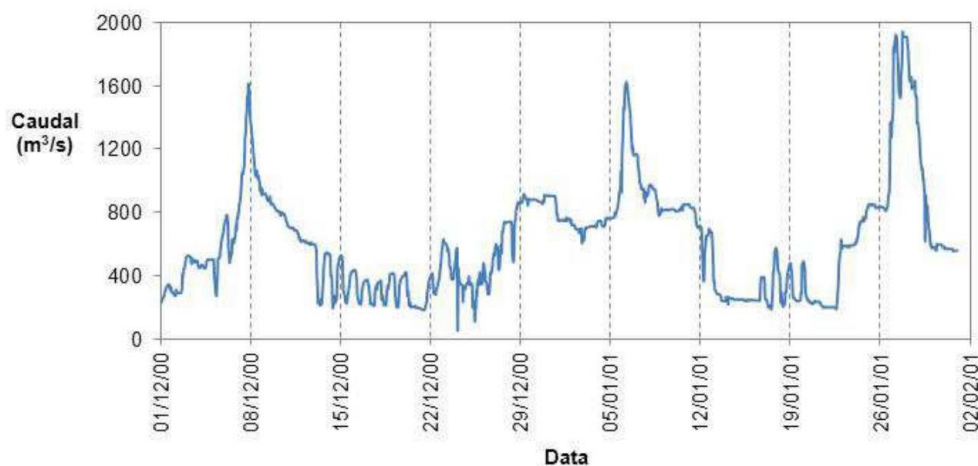


Figura 2.8 – Caudal afluyente ao Açude-Ponte de Coimbra entre 1 de dezembro de 2000 e 1 de fevereiro de 2001 (LNEC, 2012).

No dia 27 de janeiro de 2001, foi registado um caudal de 1942 m<sup>3</sup>/s no Açude-Ponte. Este caudal resultou da soma dos caudais descarregados pelas Barragens da Aguieira e das Fronhas, e ainda do caudal do rio Ceira, sem regularização. A Barragem da Aguieira encontrava-se perto

de atingir a sua capacidade total, colocando em risco de rotura a própria infraestrutura (Antunes do Carmo, 2017; Cunha, 2002).

As sucessivas pontas de cheia causaram inúmeros estragos, tanto em Coimbra como no Baixo Mondego. Como se pode verificar pela Figura 2.9 (Pina et al., 2010), a zona ribeirinha da cidade de Coimbra ficou inundada. A jusante, os diques do canal principal romperam em 14 secções diferentes, causando o alagamento brusco e violento dos campos agrícolas numa grande extensão, como a Figura 2.10 mostra. A aldeia de Ereira ficou totalmente rodeada de água (Antunes do Carmo, 2004; Cunha, 2002).



Figura 2.9 – Vista a partir da margem esquerda do Mondego, na manhã do dia 28 de janeiro, em Coimbra (Pina et al., 2010).



Figura 2.10 – Panorama da rotura do dique direito do canal principal (Baixo Mondego), junto a Santo Varão (Antunes do Carmo, 2004; Cunha, 2002).

Segundo o professor Fernando Rebelo, “As cheias são fenómenos hidrológicos resultantes de precipitações elevadas e de certas características das bacias hidrográficas. No caso em estudo, são particularmente importantes várias características da bacia hidrográfica do Mondego, algumas naturais, outras induzidas pelo Homem” (Rebelo, 2010).

Como fator natural propício à ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do Mondego destaca-se a hidrografia do curso de água principal e dos seus afluentes, Alva e Ceira. Ambos com propriedades torrenciais, que se evidenciam pela transição brusca do escoamento superficial entre encostas íngremes e rochosas que aceleram o escoamento, características do trecho fluvial a montante de Coimbra, e a ampla planície aluvionar que descreve o trecho final do rio Mondego a partir de Coimbra (Costa, 2013; LNEC, 2012).

Por outro lado, como fatores antrópicos, apontam-se as queimadas e incêndios florestais, que aumentam a quantidade de material sólido a ser escoado, reduzindo a capacidade de armazenamento de água nas barragens e diques, e aumentam o escoamento superficial. A regularização do Mondego que induziu a sensação de segurança às populações da planície aluvionar, aumentando a sua vulnerabilidade a eventos de cheias, como as ocorridas no inverno de 2000/2001, veio mostrar que a urbanização em leitos de cheia tem uma tendência invariável de sofrer grandes prejuízos (Costa, 2013).

Regularizar os caudais fluviais através da inserção de uma barragem no leito do rio causa grandes alterações na dinâmica fluvial, principalmente a jusante. O modelo de gestão das descargas da barragem, e a sua adaptação aos caudais sazonais, pode ter impacto direto nas alterações a jusante. Assim, a operação deste tipo de estruturas requer uma adequada coordenação entre as entidades responsáveis pela sua gestão, uma vez que qualquer erro pode dar origem a graves consequências em todo o vale a jusante (Antunes do Carmo, 2017).

A incorreta gestão da Barragem da Aguieira, de modo a privilegiar a produção de energia elétrica, não deixando suficiente capacidade de encaixe para eventos de cheia, foi uma das causas apontadas para justificar o caudal afluente a Coimbra no dia 27 de janeiro de 2001 (Cunha, 2002).

No entanto, segundo o Relatório do INAG sobre a hidrologia das cheias do Mondego de 2001, a ausência de qualquer infraestrutura de controlo de cheias a montante teria resultado num caudal de 2800 m<sup>3</sup>/s no Açude-Ponte, em vez dos 1942 m<sup>3</sup>/s registados (Rodrigues et al., 2001).

Durante os eventos de cheia, a quantidade de material sólido transportado no escoamento é muito elevada. Deste modo, as cheias de 2000/2001 favoreceram o transporte sedimentar de jusante da Barragem da Aguieira até ao Açude-Ponte, onde muitos sedimentos ficaram retidos. No entanto, a abertura total das comportas do açude permitiu a passagem de alguns sedimentos para jusante (Cunha, 2002).

A deposição de sedimentos no canal principal, a jusante de Coimbra, terá diminuído a capacidade de escoamento máxima para a qual o projeto foi dimensionado, pois a rotura dos diques do canal principal deu-se com caudais menores que os definidos em projeto. A acrescentar também, a possível degradação da obra devido à exposição a caudais elevados durante longos períodos e a falta de manutenção adequada das estruturas hidráulicas (Antunes do Carmo, 2004; Cunha, 2002).

Por outro lado, a retenção de sedimentos causada pelo Açude-Ponte tem tendência a agravar o processo de erosão a jusante, uma vez que não há a natural reposição sedimentar ao longo do leito. O Estudo elaborado pelo LNEC sobre as inundações do rio Mondego refere que, da análise ao levantamento batimétrico do rio Mondego no trecho a jusante do Açude-Ponte em 2004/2005, se verificou a “existência de erosões localizadas acentuadas a jusante das descontinuidades do leito” e recomenda vivamente o acompanhamento das alterações morfológicas nos trechos do rio em causa (LNEC, 2012).

Com o objetivo de repor o equilíbrio natural do sistema fluvial, diminuindo as consequências que possam surgir das alterações feitas no leito do rio, deve garantir-se que os sedimentos acumulados sejam repostos em locais apropriados, ou seja, em zonas do leito tendencialmente erosivas. O que, mais uma vez, destaca a importância de efetuar levantamentos que reflitam a evolução morfológica do fundo aluvionar (Antunes do Carmo, 2017).

Em tom conclusivo, são várias as lições a retirar das Cheias do Mondego em 2001. Entre elas a necessidade de implementar um modelo de gestão e manutenção eficaz do conjunto de estruturas de regularização do Mondego, a par de um ordenamento do território que não permita a ocupação da planície aluvionar para fins urbanos ou industriais, dada a sua suscetibilidade à ocorrência de inundações. É igualmente importante assegurar o cumprimento rigoroso do protocolo operacional do grupo de barragens Aguieira-Raiva e Fronhas (Antunes do Carmo, 2004; Cunha, 2002).

### 2.2.3.2 Cheias do Mondego em 2016

No início do mês de janeiro de 2016 a zona ribeirinha da cidade de Coimbra foi de novo atingida pelas cheias do rio Mondego. A inundação do Mosteiro de Santa Clara-a-Velha foi a imagem que mais marcou os *media* na altura, ver Figura 2.11. No entanto, foi a inundação das esplanadas do Parque Verde, ver Figura 2.12, localmente conhecidas por docas, que mais discussão gerou e ditou o seu encerramento e abandono até   data.



Figura 2.11 – Mosteiro de Santa Clara-a-Velha, janeiro de 2016, foto de Paulo Novais/LUSA (CM, 2016).



Figura 2.12 – Esplanadas do Parque Verde, janeiro de 2016, foto de Paulo Novais/LUSA (JN, 2016).

Na seqüencia destas cheias foi elaborado um relatório por parte da Ordem dos Engenheiros, em conjunto com outras entidades, com o objetivo de caracterizar as condições de escoamento do

---

rio Mondego que levaram à ocorrência das inundações em Coimbra, em 2016. Da análise deste relatório é possível obter as informações que se seguem.

No que diz respeito à pluviosidade na bacia hidrográfica do Mondego, durante o evento de cheia de 2016, foram analisados os dados de precipitação registados em diferentes estações meteorológicas da bacia referentes à primeira quinzena do mês de janeiro de 2016. A análise destes dados, obtidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), permite concluir que os valores máximos diários de precipitação registados no período em estudo são muito inferiores ao valor máximo de precipitação diária registado historicamente em cada uma das estações (Ordem dos Engenheiros, 2016).

Quanto aos caudais afluentes à albufeira da Barragem da Aguieira (dados também retirados da plataforma SNIRH), é possível constatar que o caudal máximo afluente foi registado no dia 11 de janeiro de 2016, com um valor de 1777 m<sup>3</sup>/s. Quando comparado com o caudal homólogo registado nas cheias de 2001, verifica-se que é inferior, pois o registado em 2001 foi de 1850 m<sup>3</sup>/s (Ordem dos Engenheiros, 2016; Sá Marques et al., 2018).

Uma vez que a gestão desadequada da Barragem da Aguieira foi uma das principais causas apontadas nas Cheias do Mondego em 2001, a Agência Portuguesa do Ambiente elaborou um conjunto de normas que visam regular a exploração da Barragem da Aguieira durante eventos de cheia. Analisa-se então a operação do conjunto de barragens ao longo do mês de janeiro de 2016.

As referidas normas caracterizam-se por uma “gestão adaptativa”, em que a cota de exploração da albufeira da Aguieira é variável em função do caudal médio afluente registado durante as 24 horas anteriores. Para um caudal médio afluente superior a 100 m<sup>3</sup>/s deverá corresponder um nível de água de 117.00 m na albufeira. Tal não se verificou, pois, a cota de exploração foi sempre superior a 118.00 m durante a primeira quinzena de janeiro, chegando a atingir 121.35 m no dia 7, como se pode verificar na Figura 2.13. No dia 11 de janeiro de 2016, coincidente ao dia em que se registou o caudal máximo afluente, foi efetuada uma súbita descarga de 1100 m<sup>3</sup>/s na Barragem da Aguieira/Raiva, ver Figura 2.13 (Ordem dos Engenheiros, 2016).

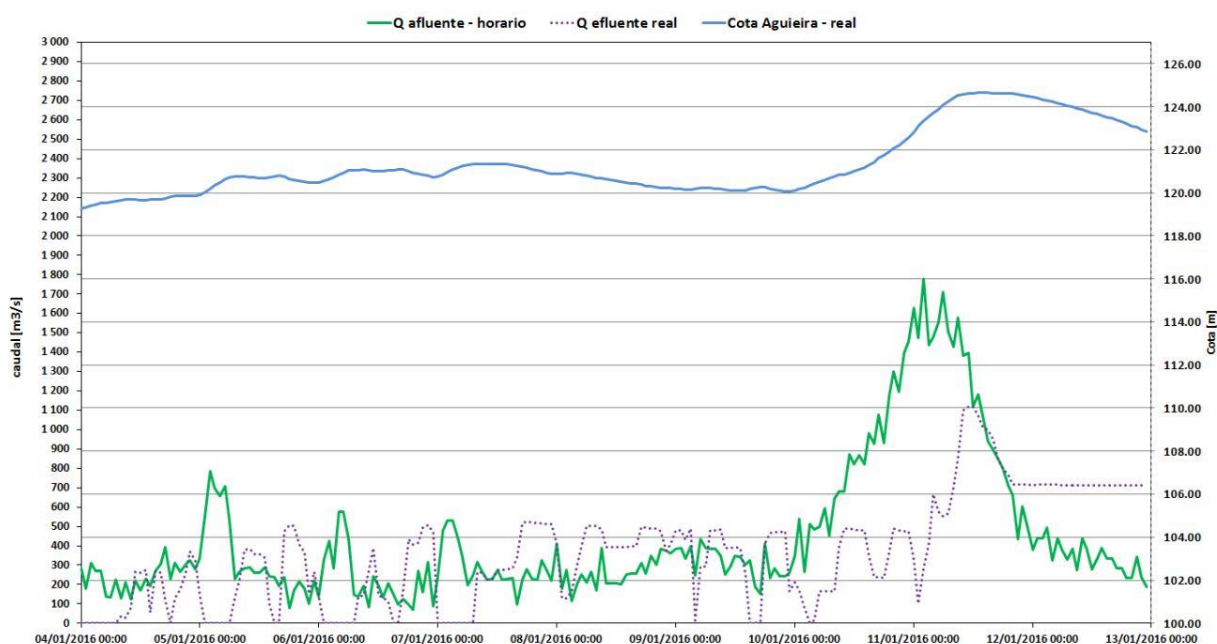


Figura 2.13 – Registos dos níveis e caudais afluentes e efluentes na Barragem da Aguieira durante a primeira quinzena de janeiro de 2016 (Ordem dos Engenheiros, 2016).

O Relatório da Ordem dos Engenheiros sublinha que se as normas de exploração da Aguieira tivessem sido cumpridas, mesmo que apenas a partir de 9 de janeiro, adotando um caudal efluente da Barragem da Aguieira de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , não teria sido necessário fazer a descarga de  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que diminuiria significativamente o caudal afluente a Coimbra. Ou seja, as inundações causadas pelas cheias do Mondego em Coimbra, em janeiro de 2016, poderiam não ter acontecido se a Barragem da Aguieira tivesse operado de forma adequada ao evento de cheia (Ordem dos Engenheiros, 2016).

A Barragem das Fronhas, no rio Alva, libertou um caudal máximo de  $54 \text{ m}^3/\text{s}$  no período em estudo, enquanto que o rio Ceira terá contribuído com um caudal de ponta de cheia de  $255 \text{ m}^3/\text{s}$  no dia 11 de janeiro de 2016, segundo a estimativa possível através da altura hidrométrica registada na estação de Ponte da Conraria (próxima da confluência com o Mondego) e pelas curvas de vazão do SNIRH (Ordem dos Engenheiros, 2016; Sá Marques et al., 2018).

Relativamente ao Açude-Ponte em Coimbra, concluiu-se que a gestão da abertura das comportas foi correta durante o evento de cheia do rio Mondego. No entanto, verificou-se que a medição de caudais nesta secção do rio é apenas uma estimativa, uma vez que os caudais são obtidos através da curva de vazão inicialmente elaborada no projeto da estrutura, sendo necessária a sua atualização (Ordem dos Engenheiros, 2016).

Nestas condições, durante o pico de cheia, no dia 11 de janeiro de 2016, foi atingido um caudal de aproximadamente 1500 m<sup>3</sup>/s no Açude-Ponte, correspondente a uma cota de 18.01 m a montante deste, e de 19.56 m a montante da Ponte de Santa Clara. O que se traduz num incremento de 1.55 m na cota da superfície livre do curso de água ao longo de 1300 m, esta diferença de alturas pode justificar-se com o facto de os pilares da ponte (de Santa Clara) reduzirem a secção do escoamento, causando um aumento do nível da água a montante. Deste modo, comprova-se a influência direta dos caudais libertados pelas barragens Agueira-Raiva nos caudais afluentes à cidade de Coimbra, e nos níveis de água que se observam na zona ribeirinha da cidade, que tanto impacte podem ter (Ordem dos Engenheiros, 2016; Sá Marques et al., 2018).

Ficou também provado que a acumulação de sedimentos a montante do Açude-Ponte em Coimbra não tem uma influência positiva em eventos de cheia, agravando mesmo a situação. Através de um modelo hidráulico, desenvolvido a partir dos levantamentos batimétricos realizados em 2001 e 2008, foi possível simular os níveis de água correspondentes a cada levantamento para o mesmo hidrograma (hidrograma de cheia de 2001), como se pode ver na Figura 2.14. Da análise ao perfil do nível de água obtido através de simulação na Figura 2.14, lembrando que não foi realizada qualquer intervenção de desassoreamento no trecho do rio a montante do Açude-Ponte, é notável o aumento do nível de água com a acumulação sedimentar que se verifica no leito do Mondego ao longo da zona ribeirinha da cidade de Coimbra (Canilho et al., 2016; Ordem dos Engenheiros, 2016).

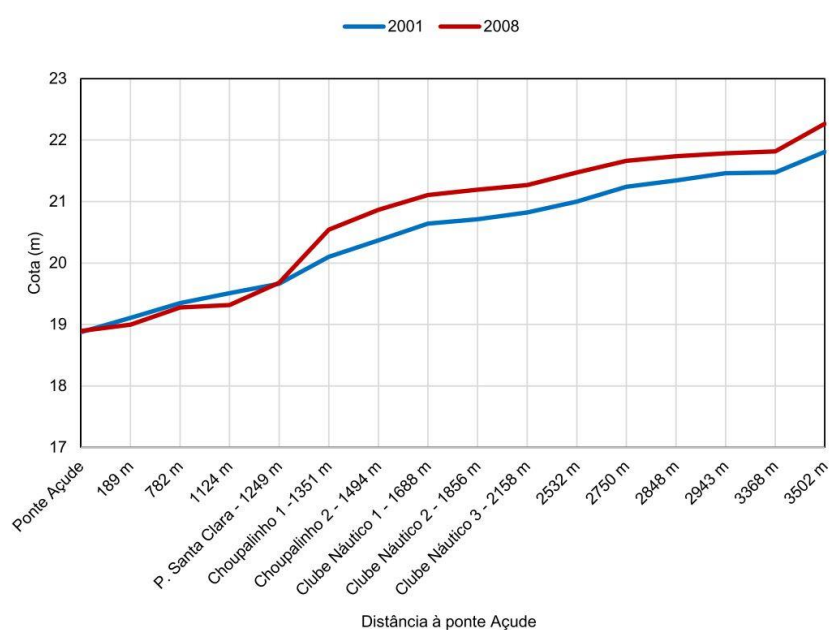


Figura 2.14 – Comparação da variação dos níveis de água com a variação da batimetria (2001 e 2008) (Ordem dos Engenheiros, 2016).



Apesar de ter sido possível elaborar um modelo que demonstra a influência das alterações morfológicas nas cheias do rio Mondego em Coimbra, alerta-se para o facto de não existirem dados batimétricos mais recentes, próximos da ocorrência das Cheias de 2016, que permitam apurar com maior precisão o impacte destes. É, assim, aconselhável a atualização dos dados batimétricos com maior frequência, do leito do rio Mondego junto à cidade de Coimbra, com o objetivo de melhorar a capacidade de previsão e de atuação em eventos de cheia (Ordem dos Engenheiros, 2016).

O Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH) em Coimbra é gerido pela APA, e tem estações de controlo nas barragens da Aguieira, Fronhas, Raiva e no Açude-Ponte. Funciona de acordo com a previsão de precipitação para a bacia, fornecida pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), e, em caso de eventos de cheias, a Proteção Civil é informada. Apesar dos dados das previsões serem atualizados em tempo real no SVARH, este sistema não é constituído por ferramentas informáticas recentes, como o que se verifica noutros países (Ordem dos Engenheiros, 2016).

Da análise às condições de escoamento que o rio Mondego apresentava aquando das cheias de 2016, é possível concluir que existiram várias falhas humanas que poderiam ter evitado a dimensão das inundações e dos prejuízos causados. Adverte-se então para a necessidade de cumprir as regras de exploração da Barragem da Aguieira recomendadas pela APA, criar um programa de monitorização da evolução morfodinâmica, atualizar o sistema de alerta e previsão de eventos meteorológicos e, complementarmente, estabelecer um acordo que garanta a comunicação e interação entre as entidades responsáveis pelas infraestruturas e a administração central, responsável pela gestão e resposta em situações de catástrofe.

### **2.3 Gestão de sedimentos**

O transporte de sedimentos atinge grandes proporções durante eventos de cheia, podendo agravar as consequências destes eventos com a subida do nível de água. Em sistemas fluviais com barragens e/ou açudes é necessário garantir o transporte de sedimentos de montante para jusante de modo a simular as condições de transporte natural, e assim, garantir a eficiência destas infraestruturas e diminuir os prejuízos causados por cheias. Nesta secção apresenta-se uma revisão de vários modelos de gestão de sedimentos em sistemas fluviais utilizados em diferentes países.

A crescer à perda contínua de capacidade de armazenamento de água devido à sedimentação nas albufeiras, o envelhecimento das barragens existentes, muitas destas construídas entre os anos 1940 e 1950, e as alterações climáticas têm dado origem a problemas sociais, económicos e ambientais crescentes (Antunes do Carmo, 2017; Sumi e Kantoush, 2018). Torna-se então um fator chave lidar com a acumulação sedimentar pois só assim é possível usufruir destes equipamentos hidráulicos de forma sustentável e salvaguardar o ambiente fluvial (Sumi e Kantoush, 2018).

A necessidade de aplicar modelos de gestão sedimentar durante a vida útil de uma albufeira é também comprovada pelos conceitos que definem uma albufeira como sustentável. Segundo Wang e Kuo (2018), definem-se como albufeiras sustentáveis, do ponto de vista da gestão sedimentar, aquelas em que: *i*) a vida útil e a capacidade de armazenamento são mantidas indefinidamente; *ii*) na análise ao ciclo de vida total, que considera a desativação e a gestão sedimentar até ao fim de vida do projeto, obtém-se um valor económico positivo, e *iii*) providenciam equidade entre gerações, por não sobrecarregarem as gerações futuras com custos sociais, ambientais ou económicos pela utilização dos recursos naturais pelas gerações anteriores.

Existem vários métodos de gestão de sedimentos já aplicados e outros ainda em estudo, algumas das estratégias utilizadas são de aplicação mais comum (Figura 2.15), como a redução de sedimentos afluentes à albufeira através da retenção dos sedimentos em represas a montante da albufeira, ou a remoção de sedimentos acumulados próximo da barragem através de dragagens (Wang e Kuo, 2018).

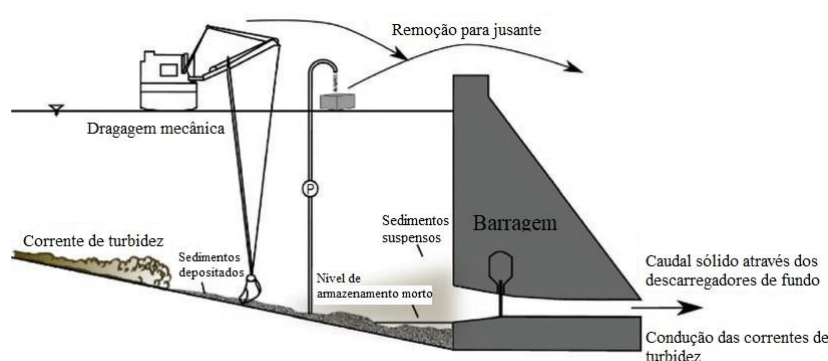


Figura 2.15 – Técnicas comuns de evacuação de sedimentos (Adaptado de Chamoun et al., 2016).

Os métodos utilizados na gestão de sedimentos acumulados em albufeiras podem ser divididos em três categorias distintas.

A primeira categoria consiste em prevenir a entrada dos sedimentos na albufeira. As técnicas utilizadas para conseguir esta prevenção podem passar pela estabilização e proteção das margens a montante, mas também por melhorar as práticas agrícolas no solo, ou seja, todo o tipo de ações que diminuam a erosão na sub-bacia hidrográfica a montante da albufeira.

As bacias de retenção de sedimentos também podem ser enquadradas nesta primeira categoria de gestão sedimentar. A implementação de barragens de sedimentação a montante de albufeiras é uma prática comum no Japão, geralmente utilizadas para a retenção de sedimentos como areia e brita. Os sedimentos retidos, tradicionalmente utilizados como materiais de construção, são regularmente extraídos das bacias de forma mecânica. No entanto, mais recentemente, para compensar a falta de sedimentos a jusante das barragens, o material retirado tem sido devolvido ao rio, para que este seja transportado naturalmente através da corrente fluvial. Grande parte dos projetos de reposição sedimentar têm tido impactes positivos quando os sedimentos repostos são naturalmente redistribuídos durante eventos de cheia (Sumi e Kantoush, 2018).

É exemplo de uma bacia de sedimentação a estrutura construída para reter os sedimentos de origem vulcânica do Monte Santa Helena, transportados pelo rio North Fork Toutle em Washington, nos Estados Unidos da América. A estrutura de retenção de sedimentos é uma barragem de terra compactada, com a face de montante em betão (superfície em contacto com o rio), o coroamento tem 575 m de comprimento e 55 m de altura, e capacidade para armazenar cerca de 200 milhões de m<sup>3</sup> de sedimentos (ver Figura 2.16). Foi construída entre 1987 e 1989, sendo que durante a década de 1990 reteve entre 75 a 95% dos sedimentos afluentes (Sclafani et al., 2017).

O segundo conjunto engloba as técnicas que previnem a ocorrência de deposição sedimentar na albufeira. Podem ser utilizados túneis ou condutas para desviar os sedimentos da albufeira ou outros métodos que acelerem a passagem de sedimentos finos através da barragem e assim evitar que estes se depositem.



Figura 2.16 – Estrutura de retenção de sedimentos no inverno de 2012 – 2013, no rio North Fork Toutle, em Washington (Sclafani et al., 2017).

Uma das técnicas mais estudadas da segunda categoria de métodos é denominada por *venting of turbidity currents*, e consiste na condução das correntes de turbidez por bombeamento para os descarregadores de fundo, de modo a impedir a concentração de partículas finas no fundo da albufeira (Chamoun et al., 2016). Pois, segundo Chamoun (2017), as correntes de turbidez são uma das principais causas da ocorrência de sedimentação em barragens, e por isso, defende que devem ser estudados e otimizados métodos de evacuação destas correntes. A eficiência desta prática depende de vários fatores, como o tamanho e altura dos descarregadores da barragem, o seu tempo de abertura, e também o caudal descarregado. Quando é aplicada em condições ótimas, a evacuação de correntes de turbidez pode ser uma das técnicas mais eficientes e económicas de mitigação da problemática de acumulação sedimentar (Chamoun, 2017).

A terceira categoria de técnicas consiste na remoção de sedimentos já depositados na albufeira. A retirada de sedimentos realiza-se pelo meio tradicional de dragagens ou, quando possível, através das descargas de fundo de modo a permitir a saída de caudais sólidos.

A dragagem de material sólido retido a montante da barragem é possivelmente um dos métodos correntemente mais utilizados; no entanto, como qualquer outro método, tem vantagens e desvantagens. A utilização corrente desta prática prende-se com a facilidade de implementação e o aparente baixo custo de investimento; contudo, a eficiência de recorrer à dragagem na manutenção da capacidade de armazenamento da albufeira relativamente à quantidade de

sedimentos afluentes anualmente considera-se muito reduzida quando comparada com outras práticas (Wang e Kuo, 2018).

Uma prática mais eficiente na remoção de sedimentos já depositado, é a “lavagem de fundo”, que consiste no escoamento de caudais sólidos através dos descarregadores de fundo das barragens, também denominado por *drawdown flushing* (ver Figura 2.17). É um método de fácil aplicação, uma vez que só é necessária a abertura dos descarregadores, no entanto tem algumas limitações, pois apenas pode ser acionado fora da época de cheias e em barragens com albufeiras de capacidade reduzida. Quando é considerada esta prática por descargas de fundo, também se deve atender ao facto de poder ocorrer erosão nos descarregadores induzida pelo arrastamento dos sedimentos transportados (Wang e Kuo, 2018).

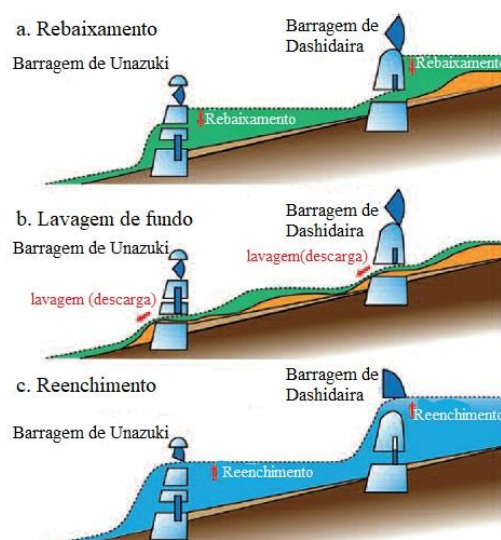


Figura 2.17 – Ilustração do esquema de funcionamento do método *drawdown flushing* em duas barragens consecutivas (Adaptada de Sumi e Kantoush, 2018).

Não existe uma solução perfeitamente compatível e sustentável para todas as situações. É necessário escolher a estratégia mais adequada de gestão sedimentar, tendo em conta as condições e características da albufeira e do sistema fluvial (Sumi e Kantoush, 2018). Em alguns casos, a melhor solução pode inclusive passar por utilizar várias técnicas que se complementem (Wang e Kuo, 2018).

Na comparação de estratégias de gestão sedimentar, uma métrica de referência é também o horizonte temporal, ou seja, a análise à sustentabilidade das soluções a longo prazo. As

---

características do local em estudo, tais como a geometria do vale e os acessos viários, podem também influenciar a viabilidade da solução em estudo (Wang e Kuo, 2018).

Importa relembrar que, independentemente dos métodos adotados, o modelo de gestão sedimentar deve contemplar um programa de monitorização frequente do canal fluvial, bem como das estruturas hidráulicas; também a gestão deve ser adaptativa em função das evoluções observadas, não descurando o impacte das alterações climáticas (Petuail, 2018; Sclafani et al., 2017; Sumi e Kantoush, 2018).

Por fim, sublinha-se a urgência de atuar na gestão de sedimentos depositados em albufeiras, uma vez que é uma problemática anualmente cumulativa quando não existe uma solução implementada. Sem ação, pode tornar-se um problema maior, mais complexo e com mais custos para as gerações futuras. O grande objetivo proveniente de um programa de gestão sedimentar passa por usufruir da capacidade de armazenamento do projeto das albufeiras, da vida útil das barragens e, conseqüentemente, beneficiar de uma gestão de risco de cheia otimizada e mais assertiva.

## **2.4 A população e o risco**

O risco associado a eventos de cheias, dos quais têm resultado graves prejuízos para as populações e para os seus bens, tem adquirido cada vez mais importância e consciencialização por parte das autoridades nacionais, uma vez que as alterações climáticas representam um previsível aumento de catástrofes naturais. A gestão e mitigação dos riscos tem o objetivo de melhorar a segurança das pessoas e bens, e ao mesmo tempo diminuir o impacte ambiental causado por este tipo de fenómenos extremos.

A definição de risco depende do contexto em que este está inserido. Neste caso, em termos técnicos, considera-se “o valor expectável de perdas ou danos decorrentes de um acontecimento num determinado período de tempo” (Viseu, 2013). Porém, de um ponto de vista prático, o risco também é expresso como o produto da probabilidade de ocorrência de um acidente pelas potenciais conseqüências associadas a esse mesmo acidente (Antunes do Carmo, 2019).

Segundo a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), o facto de as sociedades se tornarem mais artificiais, desafiando a harmonia com a Natureza, e a constante evolução tecnológica originar novas indústrias, tem exposto o ser humano e o meio ambiente a um número crescente de acidentes graves. Assim, a ANPC considera que os riscos podem ser naturais ou tecnológicos. No entanto, no presente estudo, a interação entre eventos hidrometeorológicos

extremos e intervenções ou infraestruturas construídas em meios fluviais implica os dois tipos de riscos, ou seja, riscos mistos.

Os projetos de intervenções em sistemas fluviais, como a construção de pontes, barragens, açudes ou regularizações, devem ser previamente avaliados de acordo com os riscos relacionados com a sua construção e exploração. Estes riscos são facilmente agravados pela incerteza associada à ocorrência de tempestades intensas e, por isso, no caso de se verificar a aprovação dos projetos, a identificação e gestão dos riscos é necessária (Antunes do Carmo, 2013, 2017).

Muitas das catástrofes naturais ocorrem de forma cíclica, afetando a mesma região. Neste contexto, o estudo de acidentes como a queda da Ponte Hintze-Ribeiro e as inundações causadas pelas cheias do rio Mondego têm o importante papel de fornecer informação detalhada sobre as estratégias que funcionaram e as que falharam na gestão destes desastres, de acordo com as características e condições locais em que ocorreram. Ou seja, é possível retirar lições de eventos passados e, assim, conseguir melhorar a resposta a eventuais ocorrências futuras.

A diminuição dos efeitos causados por acidentes ou catástrofes nas pessoas e bens pode ser conseguida através da implementação de uma estratégia adequada. Uma estratégia eficiente passará pelos seguintes quatro pontos: análise económica e social de vulnerabilidades e riscos; utilização de sistemas de monitorização, previsão e alerta; planos de emergência e evacuação; e, “um paradigma para a gestão de riscos que inclua a consciência social, a preparação para responder adequadamente a riscos e a prevenção de desastres” (Antunes do Carmo, 2013).

A vulnerabilidade das populações residentes junto a zonas ribeirinhas, ou em planícies de cheia, a jusante de barragens, depende do plano de exploração e manutenção da barragem. Uma exploração desadequada da infraestrutura pode colocar em perigo as populações do vale a jusante, como se verificou nas cheias do Mondego em 2001 e em 2016, ou, em caso extremo levar à rotura da barragem, o que deixaria um rasto de destruição incalculável ao longo de todo o vale.

A gestão do risco de cheias a jusante de barragens é composta por duas fases: a fase de avaliação e a fase de mitigação do risco. A avaliação do risco consiste em estimar os prejuízos e o número previsível de vítimas a jusante da barragem. A avaliação geralmente é feita através da simulação de cheia induzida, que possibilita a caracterização do evento em estudo e a elaboração do mapa de inundação, realizando-se em seguida uma análise à vulnerabilidade da área afetada pela cheia induzida. A fase de mitigação do risco é realizada em duas frentes: diretamente na barragem (reforço da estrutura e instalação de sistemas de controlo da segurança) e no vale a jusante,

---

através da implementação de planos de emergência e legislação sobre a ocupação do território (Viseu, 2013).

Relativamente ao planeamento integrado na gestão do risco de inundação, a ANPC desenvolveu um guia de boas práticas onde defende a importância da atuação política a nível local, de modo a (ANPC, 2016):

- Não apoiar alterações na ocupação do solo em áreas de inundação, como é o caso das planícies aluviais;
- Apresentar propostas que minimizem a intensidade da ocorrência de inundações ou os seus efeitos;
- Integrar a gestão do risco de inundação na tomada de decisão relativa à adoção de medidas de planeamento.

Ainda relativamente ao planeamento, é importante assegurar que o Plano Diretor Municipal limite o tipo de ocupação do solo de acordo com o risco de cheia, e que este seja rigorosamente cumprido. Não permitir construções em leitos aluvionares nem alimentar a falsa sensação de segurança induzida pela barragem a montante pode evitar prejuízos económicos e sociais.

Consciencializar diretamente a população sobre o risco de eventos extremos é também uma forma de mitigação do risco. Pode ser conseguida com a colaboração da ANPC, através da realização de sessões de esclarecimento e divulgação de informação sobre o risco de residir em zonas de cheia, e também dar a conhecer os planos de emergência existentes, com recurso a treinos práticos (Viseu, 2013).

A acrescentar ao risco de cheias existe também o risco de erosão fluvial. O risco de erosão fluvial está relacionado com os danos, que podem decorrer da tendência de erosão do escoamento a longo prazo ou durante eventos de cheia, nas margens naturais e nas estruturas construídas em leitos aluvionares (Costa, 2013).

Neste sentido, e uma vez demonstrada a influência do transporte de sedimentos no agravamento de eventos de cheia, como analisado nas Cheias do Mondego em 2001 e 2016, é de alguma importância desenvolver e aplicar medidas de gestão de sedimentos dos rios a longo prazo. Visto que os riscos naturais ainda não se conseguem evitar, incluir este tipo de medidas nos planos de gestão do risco de inundação contribuiria de forma a minimizar os efeitos causados pelas cheias.



### **3. ANÁLISE DAS CHEIAS DO RIO MONDEGO EM 2019**

#### **3.1 Enquadramento do evento de cheia**

No final do ano de 2019, em dezembro, a região de Coimbra foi de novo atingida pelas cheias do rio Mondego, das quais resultaram estragos de enorme dimensão. Populações, casas, estradas, ferrovias, estruturas e campos agrícolas sofreram as consequências das inundações fluviais.

A partir de 13 de dezembro, o território continental foi afetado por três depressões meteorológicas (Daniel, Elsa e Fabien) que deram origem a longos períodos de chuvas intensas. A zona centro do país encontrava-se particularmente debilitada devido aos grandes incêndios ocorridos em 2017, e os terrenos desflorestados com uma menor capacidade de infiltração terão aumentado a velocidade do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Mondego (Ordem dos Engenheiros, 2019).

A análise das cheias do rio Mondego em 2019 foi elaborada em duas fases. A primeira fase incidiu na análise da precipitação que ocorreu na bacia do Mondego no evento de cheia, e a segunda fase passou pelo estudo dos caudais registados nos aproveitamentos hidroelétricos da Agueira e das Fronhas, a jusante destes, junto à cidade de Coimbra, e no Baixo Mondego.

#### **3.2 Precipitação**

Para analisar o evento de cheia de dezembro de 2019 recorreu-se aos registos de precipitação disponibilizados no SNIRH. Foi escolhido o período de análise de 10 a 24 de dezembro, uma vez que corresponde ao intervalo de tempo em que Portugal continental foi afetado pelos eventos meteorológicos adversos e também coincidente com o estado de alerta emitido pela Proteção Civil para a região de Coimbra (ANPC, 2020).

No entanto, das 59 estações meteorológicas existentes na bacia hidrográfica do rio Mondego, apenas 19 apresentavam registos no período em estudo, representadas a vermelho na Figura

3.1. Das 19 estações, 11 localizam-se na sub-bacia a montante da Barragem da Aguieira (Aguiar da Beira, Forninhos, Mangualde, Santa Comba Dão, Sobral da Serra, Sobral do Pichorro, Sátão, Tamanhos, Tábua, Vale do Rossim e Vilar de Besteiros), apenas uma corresponde à bacia do afluente rio Alva (Lagoa Comprida) e outra corresponde em parte ao rio Ceira (Vila Nova de Poiares), duas estações correspondem ao rio Arunca (Pombal e Soure), a estação localizada em Condeixa representa em parte as contribuições para as bacias do rio Ceira e do rio Ega; as restantes localizam-se no troço a jusante do Açude-Ponte (Santo Varão, Tentúgal e Trouxemil). Ou seja, numa pré-análise, é evidente a falta de informação meteorológica referente aos afluentes Alva, Ceira, Ega e Arunca.

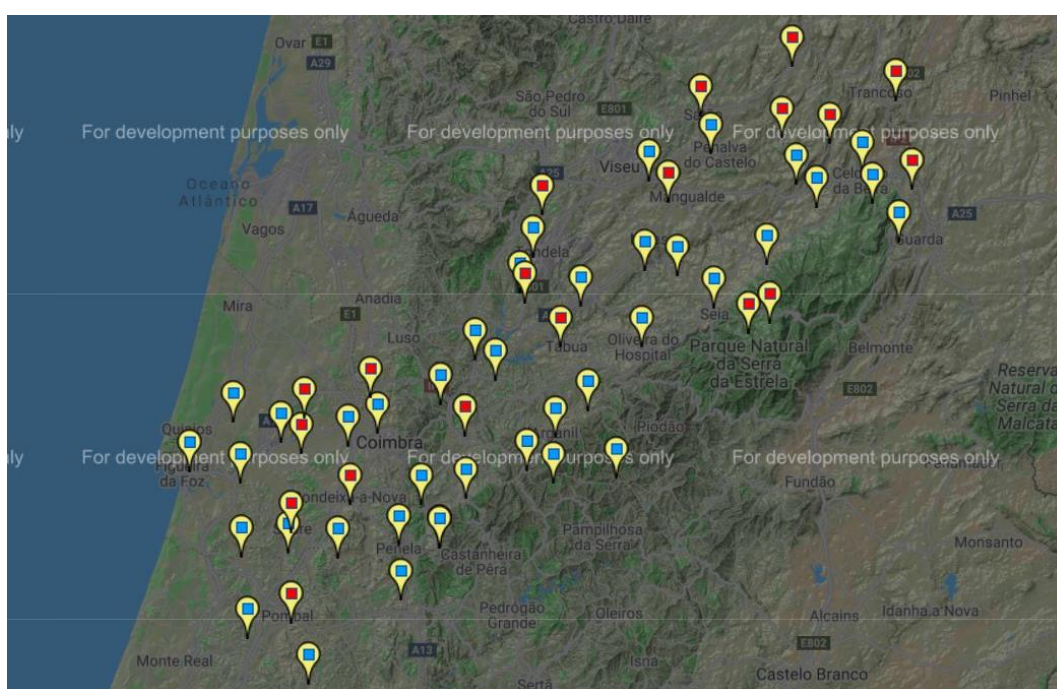


Figura 3.1 – Estações meteorológicas da bacia hidrográfica do rio Mondego (SNIRH, 2020).

Analisaram-se os registos referentes à precipitação diária nas 19 estações, dos quais se obtiveram os valores máximos diários correspondentes ao intervalo de tempo em estudo, e de seguida foram comparados com os valores de precipitação máximos diários históricos registados em cada uma das estações, como se pode ver no Quadro 3.1. É possível verificar que foram atingidos os máximos históricos nas estações de Sobral da Serra, Vale do Rossim e Condeixa, e que correspondem também aos maiores valores de precipitação registados na bacia hidrográfica do rio Mondego, de 10 a 24 de dezembro de 2019.

Quadro 3.1 – Precipitações diárias e acumuladas em 15 dias (de 10 a 24 de dezembro de 2019), e registos máximos históricos em cada estação (SNIRH, 2020).

| Estação meteorológica | Precipitação diária (mm) |                | Precipitação acumulada em 15 dias (mm) |                |
|-----------------------|--------------------------|----------------|--|----------------|
|                       | Máx. dez/2019            | Máx. histórico | dez/2019                               | Máx. histórico |
| Aguiar da Beira       | 82                       | 148            | 269                                    | 569            |
| Condeixa              | 99                       | 99             | 389                                    | 390            |
| Forninhos             | 53                       | 85             | 215                                    | 457            |
| Lagoa Comprida        | 63                       | 247            | 266                                    | 813            |
| Mangualde             | 44                       | 134            | 214                                    | 499            |
| Pombal                | 33                       | 105            | 136                                    | 336            |
| Santa Comba Dão       | 64                       | 113            | 243                                    | 462            |
| Santo Varão           | 74                       | 79             | 213                                    | 254            |
| Sobral da Serra       | 298                      | 298            | 742                                    | 748            |
| Sobral do Pichorro    | 43                       | 122            | 168                                    | 362            |
| Soure                 | 39                       | 120            | 156                                    | 331            |
| Sátão                 | 22                       | 107            | 43                                     | 583            |
| Tamanhos              | 56                       | 115            | 165                                    | 383            |
| Tentúgal              | 53                       | 99             | 180                                    | 386            |
| Trouxemil             | 53                       | 80             | 192                                    | 481            |
| Tábua                 | 54                       | 71             | 202                                    | 338            |
| Vale do Rossim        | 134                      | 134            | 510                                    | 516            |
| Vila Nova de Poiares  | 64                       | 69             | 172                                    | 349            |
| Vilar de Besteiros    | 82                       | 115            | 326                                    | 676            |

[A gradação de cores do quadro representa a altura de precipitação, tons mais escuros correspondem aos valores mais elevados e os tons mais claros representam os valores mais baixos; a cor azul corresponde ao evento de cheia de 2019, enquanto que o tom avermelhado corresponde ao máximo histórico registado na estação correspondente.]

Também é possível comparar os valores de precipitação acumulada entre 10 e 24 de dezembro de 2019 com o valor máximo de precipitação acumulada em intervalos de 15 dias consecutivos, tendo em conta a totalidade de registos de cada estação (Quadro 3.1). Novamente, nas estações de Sobral da Serra, Vale do Rossim e Condeixa verificou-se a proximidade aos máximos históricos. No entanto, nas precipitações acumuladas destas estações, os máximos históricos foram atingidos num intervalo de tempo diferente do intervalo em estudo, entre 11 e 25 de dezembro de 2019, o que corresponde ao mesmo evento de cheia.

Da análise aos registos das precipitações é possível concluir que os valores mais altos foram registados a montante da Barragem da Aguieira, que à partida tem capacidade para regular o caudal. Porém, os valores das estações de Condeixa e Santo Varão são também elevados, e

merecem algum destaque dada a sua proximidade aos locais onde ocorreram as situações mais graves das cheias do rio Mondego em dezembro de 2019.

### 3.3 Níveis hidrométricos e caudais

Em relação aos caudais e níveis hidrométricos registados durante o evento de cheia de dezembro de 2019, foi consultada novamente a base de dados disponível no SNIRH, e também duas apresentações em conferências realizadas pela APA e ANPC sobre o modo como foi gerida a crise provocada pelas cheias do rio Mondego.

Começou-se por estudar o modo de operação da Barragem da Aguieira, dada a sua importância no controlo de caudais. Foram analisados os caudais afluentes, efluentes e as cotas de exploração durante o período de cheia. Contudo, observaram-se algumas discrepâncias entre os gráficos cedidos pela APA, Proteção Civil e os dados registados no SNIRH. Esta diferença deve-se possivelmente ao facto de o SNIRH fornecer apenas valores dos caudais médios diários, enquanto que o gráfico da APA, como se pode ver na Figura 3.2, foi elaborado a partir de caudais horários, e o gráfico da Proteção Civil terá resultado dos caudais máximos diários (Figura 3.3).

A Figura 3.2 mostra um caudal afluente máximo à albufeira da barragem da Aguieira aproximado de 1500 m<sup>3</sup>/s, no dia 20 de dezembro, e um caudal efluente máximo aproximado de 900 m<sup>3</sup>/s no dia 22 de dezembro.

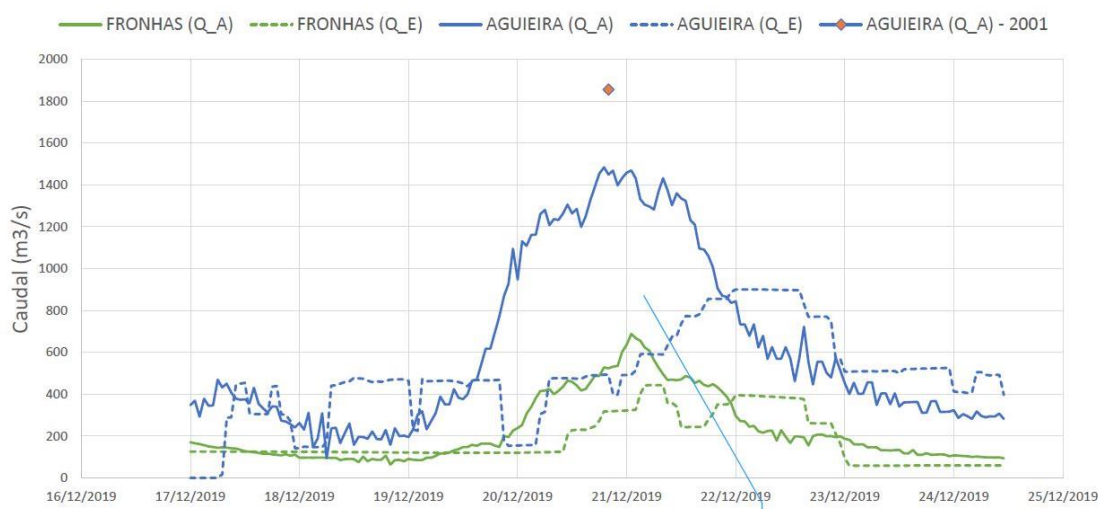


Figura 3.2 – Caudais afluentes (traço contínuo), e efluentes (traço interrompido) às barragens da Aguieira e Fronhas, de 17 a 24 de dezembro de 2019 (APA, 2020).

A Figura 3.3 indica um caudal máximo afluente de 1374.78 m<sup>3</sup>/s no dia 21 de dezembro à albufeira da Barragem da Aguieira, e um caudal máximo de 898.70 m<sup>3</sup>/s lançado no dia 22 de dezembro.



Figura 3.3 – Caudais máximos diários afluente e lançados/efluente na Barragem da Aguieira, entre os dias 17 de dezembro de 2019 e 1 de janeiro de 2020 (ANPC, 2020).

Por fim, o gráfico da Figura 3.4, elaborado a partir dos registos do SNIRH, indica um caudal afluente à albufeira máximo de 1320.81 m<sup>3</sup>/s, no dia 20 de dezembro, e um caudal efluente de 835.57 m<sup>3</sup>/s no dia 22 de dezembro. Na Figura 3.4 também foi representada a variação do nível de água na albufeira da Aguieira; a curva foi traçada com base no valor máximo registado em cada dia.

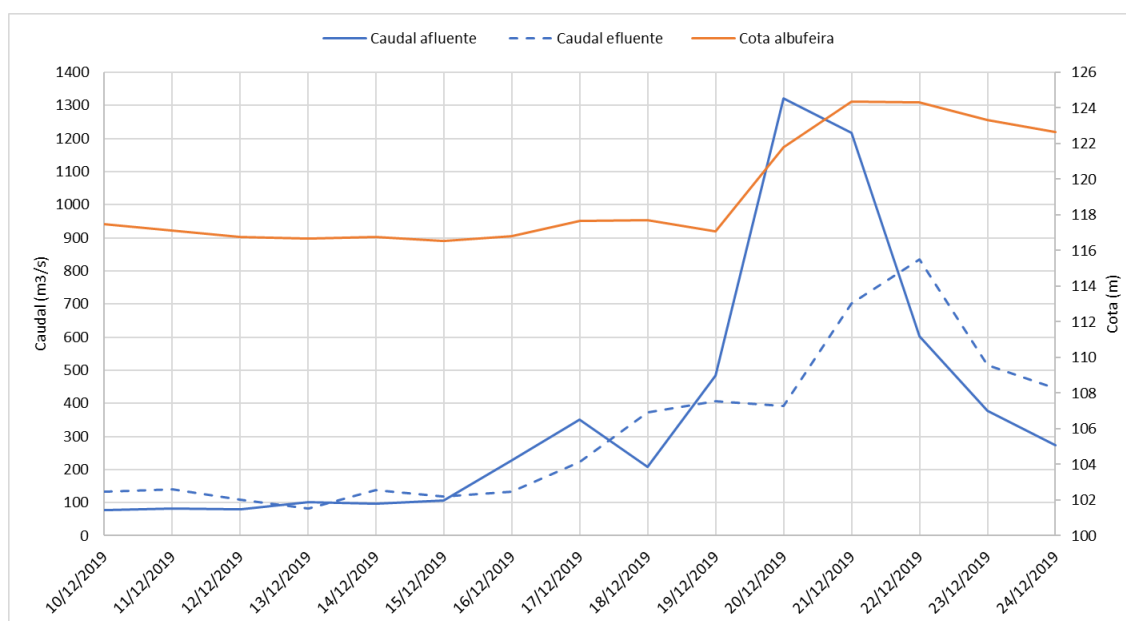


Figura 3.4 – Caudais médios diários afluentes e efluentes, e cotas registadas na albufeira da Barragem da Aguieira, de 10 a 24 de dezembro de 2019.

Ao analisar paralelamente a variação da cota de exploração da albufeira e os caudais afluentes pode concluir-se que foram aceitavelmente cumpridas as normas de exploração elaboradas pela APA, pelo menos até ao dia 19 de dezembro. Assim, relembra-se que, em situação de cheia, as normas estabelecem que o empreendimento da Barragem da Aguieira deve garantir uma cota de exploração não superior a 117.00 m quando nas 24 horas anteriores for registado um caudal afluente à albufeira superior a 100 m<sup>3</sup>/s (Ordem dos Engenheiros, 2016). Foi mantido o volume de encaixe na albufeira até ao dia 19, no entanto, a dimensão dos caudais afluentes levou ao aumento repentino do nível de água na albufeira (124.36 m), aproximando-se do nível de defesa de obra definido à cota de 125.00 m. Até atingir o nível de defesa de obra, o caudal lançado deveria ser de 450 m<sup>3</sup>/s, o que se verifica que terá ocorrido, como mostra a Figura 3.4; a partir desse nível são abertas as comportas dos descarregadores de cheia, o que justifica o aumento nos valores dos caudais efluentes registados nos dias 21 e 22 de dezembro. Conclui-se então que as normas de exploração da Barragem da Aguieira terão sido respeitadas.

No rio Alva, a Barragem das Fronhas registou um caudal afluente máximo no dia 21 de dezembro, de 507.73 m<sup>3</sup>/s (SNIRH, 2020). No mesmo dia foi libertado o caudal máximo de 339.56 m<sup>3</sup>/s. A cota máxima, também registada no dia 21 de dezembro, foi de 135.72 m, às 21h00 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2020; SNIRH, 2020). É possível analisar a evolução dos caudais médios diários afluentes e efluentes, e as cotas da albufeira da Barragem das Fronhas no período em estudo na Figura 3.5.

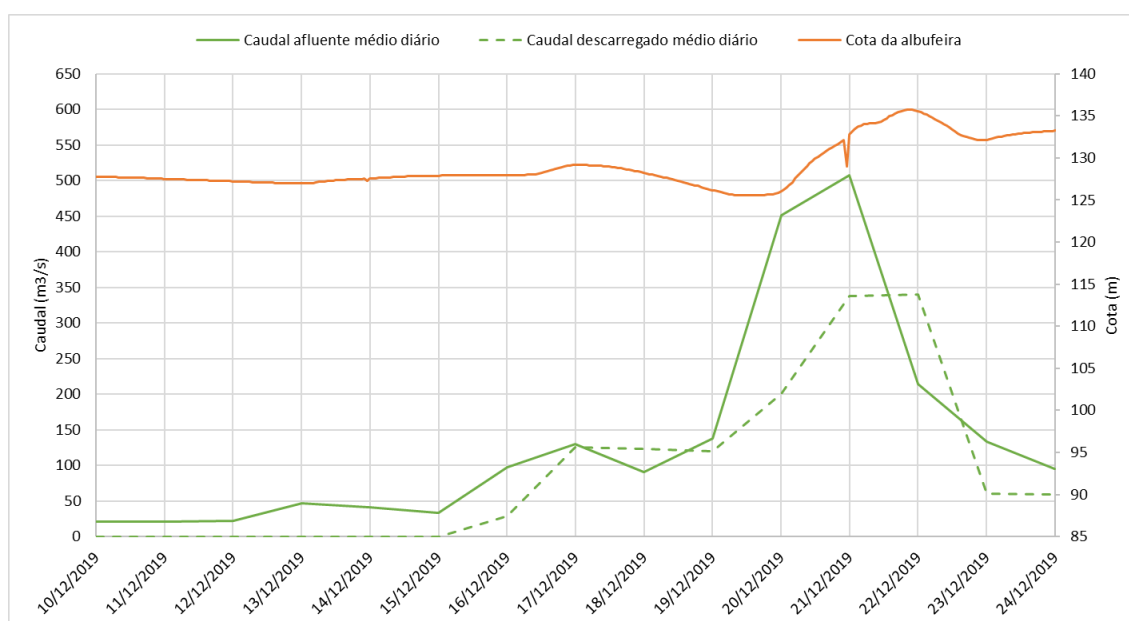


Figura 3.5 – Caudais médios diários afluentes e descarregados e níveis instantâneos na albufeira da Barragem das Fronhas, de 10 a 24 de dezembro de 2019.

No rio Ceira, a estação hidrométrica da Ponte da Conraria registou uma altura máxima histórica de 6.78 m, sendo o máximo histórico anterior de 5.22 m em 1988 (APA, 2020). Este valor ultrapassa a altura máxima estabelecida para a validade da curva de vazão desta estação disponibilizada pelo SNIRH, que é de 6.00 m, ou seja, os valores de caudal estimados para uma altura superior serão inferiores aos caudais reais, tendo em conta a geometria do vale. Ainda assim, determinaram-se os caudais instantâneos correspondentes, como se pode observar na Figura 3.6; obteve-se um caudal de ponta de 386.43 m<sup>3</sup>/s às 11h00 do dia 21 de dezembro, e posteriormente foram calculados os caudais médios diários aproximados, tendo-se obtido um máximo de 355.82 m<sup>3</sup>/s para o dia 21 de dezembro (SNIRH, 2020). A fotografia da Figura 3.7 mostra os estragos causados pela subida de nível do rio Ceira.

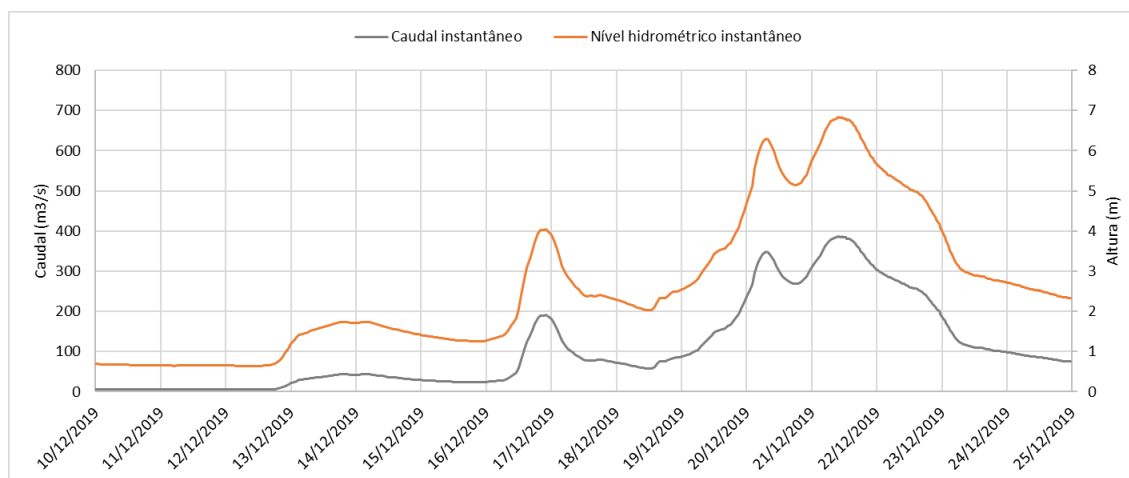


Figura 3.6 – Nível hidrométrico instantâneo registado na Ponte da Conraria (rio Ceira) e o caudal correspondente, entre os dias 10 e 24 de dezembro de 2019.



Figura 3.7 – A subida do nível da água do rio Ceira, em 21 de dezembro de 2019; fotografia de Paulo Novais/LUSA (Público, 2019).

No que diz respeito ao caudal de ponta afluente ao Açude-Ponte em Coimbra durante o evento de cheia 2019, este terá ultrapassado os valores registados nas Cheias de 2001; relembra-se que foi de  $1942 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em dezembro de 2019 o caudal de ponta estimado terá atingido os  $2184 \text{ m}^3/\text{s}$  no dia 21 de dezembro (ANPC, 2020). No entanto, os dados disponíveis no SNIRH apenas permitiram traçar o gráfico da Figura 3.8 em função dos caudais médios diários afluentes e as cotas da albufeira registadas na última hora de cada dia na estação hidrométrica do Açude-Ponte. A cota máxima registada a montante do Açude-Ponte foi de 18.46 m (SNIRH, 2020).



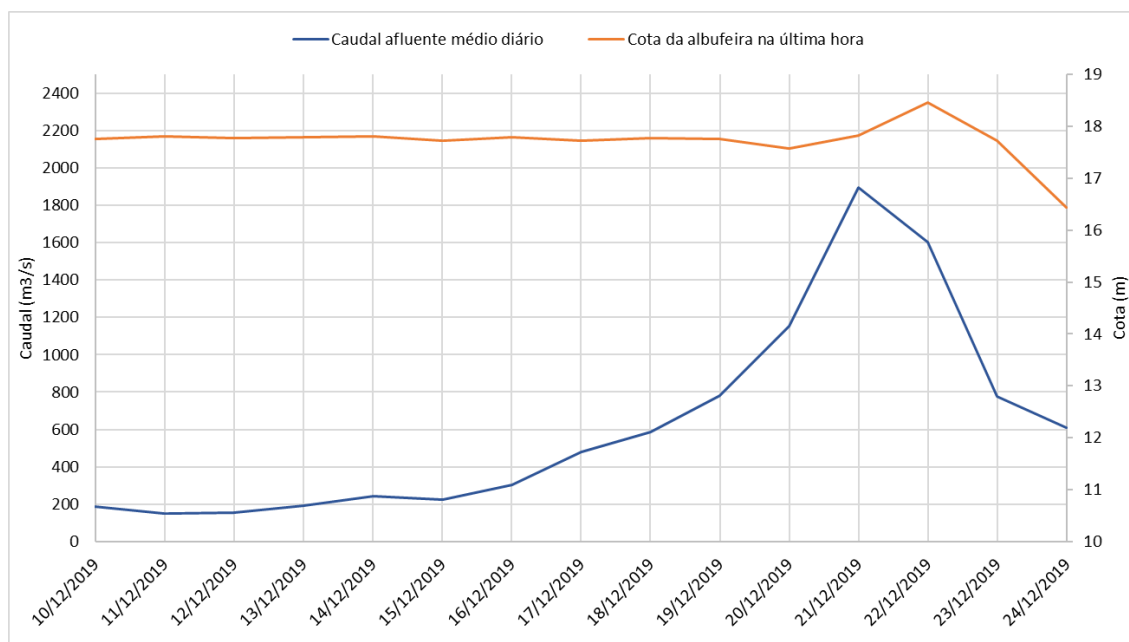


Figura 3.8 – Caudais médios diários afluentes e níveis hidrométricos registados a montante do Açude-Ponte na última hora de cada dia, em Coimbra, entre os dias 10 e 24 de dezembro de 2019.

O caudal afluente ao Açude-Ponte resulta dos caudais libertados pelas Barragens da Aguieira e das Fronhas, e dos caudais estimados na Ponte da Conraria. Contudo, importa salientar que a diferença resultante da soma destes caudais e os caudais efetivamente registados no Açude-Ponte se deve não só ao erro associado à curva de vazão da estação hidrométrica do rio Ceira, mas também a todo o caudal proveniente do escoamento superficial entre as barragens e a confluência com o rio Ceira. Neste sentido, destaca-se a falta de estações operacionais, como a estação de Torres do Mondego, para melhorar a previsão e medição de caudais a montante da cidade de Coimbra. Os estragos causados em Coimbra com a subida do nível da albufeira do Açude-Ponte são visíveis na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Parque Verde em Coimbra, em 21 de dezembro de 2019; fotografia de Paulo Novais/LUSA (Público, 2019).

Os valores elevados dos caudais afluentes ao Açude-Ponte, além de deixarem um rasto de destruição a montante, provocaram a jusante, no Baixo Mondego, estragos muito mais elevados. A estes caudais foram ainda acrescidos os caudais dos afluentes Ega e Arunca no vale a jusante de Coimbra (Ordem dos Engenheiros, 2019).

Numa tentativa de avaliar a contribuição dos rios Ega e Arunca nas cheias de 2019, recorreu-se ao SNIRH para analisar os seus caudais. No entanto, apenas uma das estações apresenta registos de caudal no período em estudo. A estação de Ponte Mocate, junto a Soure, no rio Arunca, registou o maior caudal médio diário no dia 21 de dezembro, de  $88.65 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em relação ao rio Ega, não foi possível obter registos de caudais; contudo, os registos de precipitação (referidos anteriormente no Quadro 3.1) revelaram elevados níveis de precipitação em Condeixa e Santo Varão, que posteriormente se terão transformado em escoamento superficial e contribuído para a sobrecarga do canal principal.

As cheias do rio Mondego em 2019 levaram à rotura de dois diques e consequentemente à inundação dos campos do Baixo Mondego, causando grandes prejuízos económicos e sociais. Foram deslocadas 300 pessoas durante o estado de alerta para evitar danos pessoais. As imagens captadas por satélite, antes (imagem superior) e durante (imagem inferior) o evento de cheia, da Figura 3.10 mostram a dimensão das inundações em Montemor-o-Velho e a aldeia de Ereira rodeada de água.

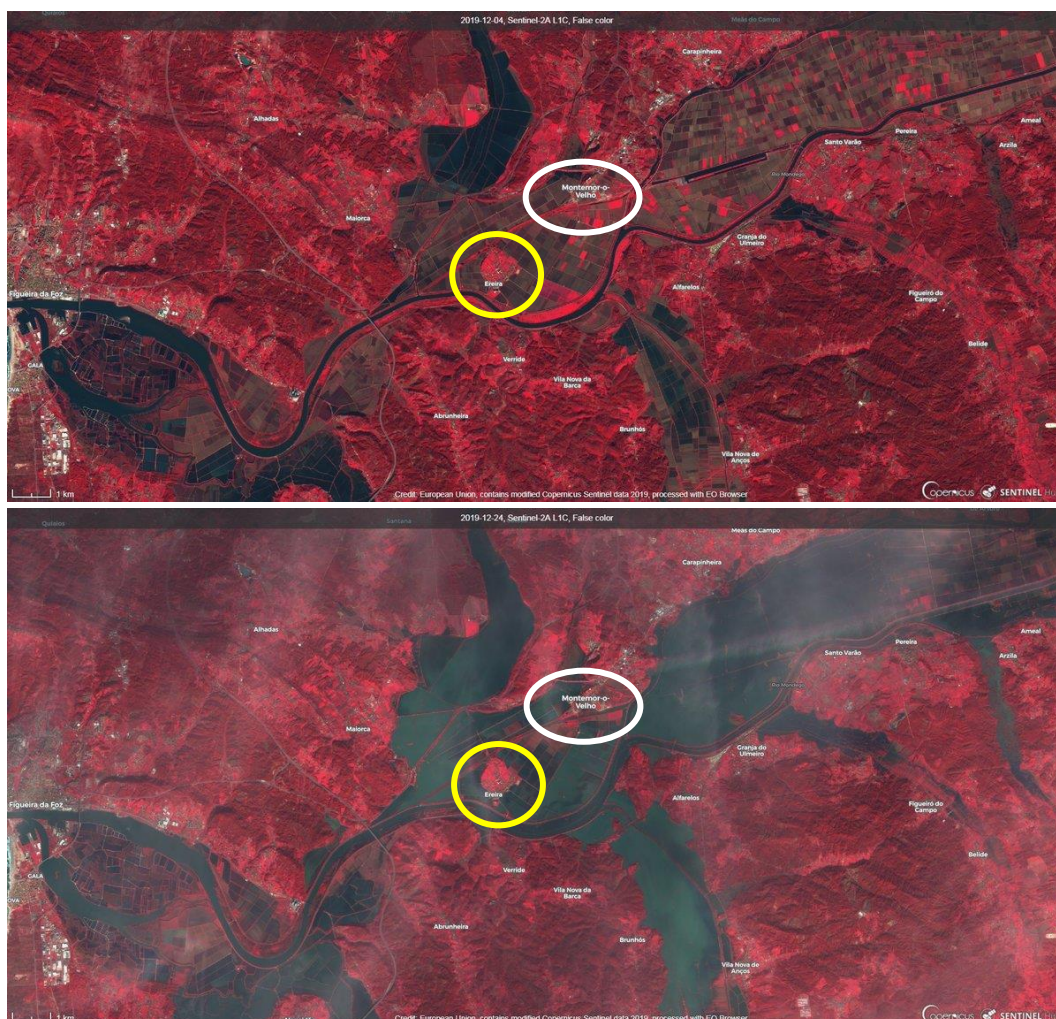


Figura 3.10 – Imagens do Baixo Mondego, 4/12/2019 e 24/12/2019, captadas pelos satélites Sentinel da Agência Espacial Europeia; Ereira assinalada a amarelo e Montemor-o-Velho assinalado a branco (ESA, 2019).

### 3.4 Considerações finais

Em resultado da análise às condições da bacia hidrográfica durante o período correspondente à ocorrência do evento de cheia de dezembro de 2019 no rio Mondego, podem ser retiradas algumas conclusões quanto às razões que contribuiriam para os avultados prejuízos causados. À semelhança dos eventos passados (2001 e 2016), é a sobreposição de vários fatores que se revela com consequências devastadoras, e nem sempre é possível determinar qual dos fatores corresponde à maior parcela. No evento em estudo, os longos períodos de precipitação intensa, que atingiram máximos históricos em algumas estações da bacia hidrográfica do rio Mondego, terão sido a causa principal e a origem de outras causas. Entre estas relevam-se a incapacidade

da barragem da Aguieira para encaixar mais caudal afluyente, e conseqüentemente ter libertado caudais superiores a 800 m<sup>3</sup>/s, e os níveis hidrométricos históricos registados na Ponte da Conraria no rio Ceira, que não é regularizado. A acumulação de sedimentos na albufeira do Açude-Ponte em Coimbra não terá sido uma das causas uma vez que esta foi desassoreada no ano anterior à ocorrência.

Como é referido ao longo do texto, eventos de cheia desta dimensão implicam grande capacidade de transporte de sedimentos. O relato de um dos agricultores afetados pelo colapso de um dos diques descreve que os seus terrenos ficaram totalmente assoreados (Observador, 2020). Da mesma forma que muito material sólido transbordou o leito do rio Mondego, também foram transportadas toneladas de sedimentos ao longo do leito, que se depositaram em várias zonas causando elevados prejuízos.

Entre 2017 e 2019 foi realizada a obra de desassoreamento da albufeira do Açude-Ponte, em Coimbra, com um custo de 4.031.139,59 euros (Câmara Municipal de Coimbra, 2017). A deposição dos inertes a jusante do açude terá ocupado parcialmente o canal principal limitando a capacidade de escoamento do caudal líquido, colocando também em risco a segurança da obra de regularização do Baixo Mondego (Quercus, 2018). Com o fenómeno das cheias de 2019, o troço a montante do Açude-Ponte terá acumulado novamente uma grande quantidade de sedimentos. Esta dinâmica sedimentar deve ser monitorizada de modo a evitar que se repitam as condições anteriores à obra de desassoreamento. A gestão de sedimentos no rio Mondego assume-se assim como uma necessidade na mitigação e gestão das cheias em Coimbra.

## **4. SOLUÇÕES DE GESTÃO DE SEDIMENTOS**

### **4.1 Considerações gerais**

A acumulação sedimentar a montante de barragens e açudes é uma problemática crescente a nível mundial. A prevenção ou redução da quantidade de sedimentos que podem ficar retidos em albufeiras em consequência de eventos de cheia é uma necessidade para a sustentabilidade das próprias estruturas hidráulicas (Chamoun, 2017; Chamoun et al., 2016).

A inexistência de planos de gestão e monitorização sedimentar na maioria dos sistemas fluviais é desolador. Apesar de conhecidos os potenciais benefícios de gerir o transporte sedimentar para manter a capacidade de armazenamento das albufeiras, continuam a ser poucos os sistemas fluviais com programas de gestão de sedimentos implementados (Wang e Kuo, 2018).

### **4.2 Gestão de sedimentos no rio Mondego em Coimbra**

#### **4.2.1 Enquadramento**

Em resultado da análise aos eventos de cheia do rio Mondego em 2001 e 2016, que causaram prejuízos incalculáveis em Coimbra e no Baixo Mondego, considera-se inevitável estudar a evolução morfodinâmica do leito do rio Mondego no troço entre o Açude-Ponte e a Ponte da Portela (em Coimbra), bem como o impacte dos fenómenos de cheia e a sustentabilidade das medidas tomadas pelas entidades competentes.

#### **4.2.2 Evolução do leito do rio**

A construção do Açude-Ponte em Coimbra alterou a natural dinâmica fluvial do rio Mondego, causando a acumulação de material sólido no trecho fluvial a montante e, conseqüentemente, a erosão do leito a jusante.

Em 2004 foi elaborado um estudo prévio para a realização do desassoreamento do leito do rio Mondego, num troço de 3 km de extensão a montante do Açude-Ponte, no qual foram assinaladas as zonas mais críticas de acumulação e erosão, bem como os volumes de sedimentos correspondentes ao trecho em análise. O estudo foi realizado com base nos levantamentos batimétricos existentes de 2001 e 2003. O facto de o estudo ser baseado em apenas duas batimetrias desfasadas de dois anos, e ambas serem posteriores às cheias de 2001, não confere ao estudo uma aproximação segura do comportamento morfodinâmico real do rio Mondego, pois, geralmente, após a ocorrência de um evento de elevada dinâmica fluvial segue-se “um longo período de calmaria, sem qualquer acontecimento que altere significativamente a dinâmica do regime fluvial característico do rio” (Antunes do Carmo e Bravo, 2004).

A metodologia utilizada no estudo de Antunes do Carmo e Bravo (2004) para determinar a evolução do fundo aluvionar consiste na comparação das duas batimetrias, ver Figura 4.1. As conclusões obtidas neste estudo apontam para um volume de sedimentos absoluto, resultante da diferença entre o volume acumulado e o volume erodido, de + 62 228.68 m<sup>3</sup> entre o Açude-Ponte e a Ponte Rainha Santa Isabel, ou seja, um valor próximo de 31 000 m<sup>3</sup>/ano (Antunes do Carmo e Bravo, 2004). No troço a montante da Ponte Rainha Santa Isabel não foi possível tirar conclusões, no entanto, por se tratar do troço mais extenso e se situar a montante, é de esperar que se acumulem mais sedimentos, com valores não inferiores a 20 000 m<sup>3</sup>/ano (Freire e Antunes do Carmo, 2020).

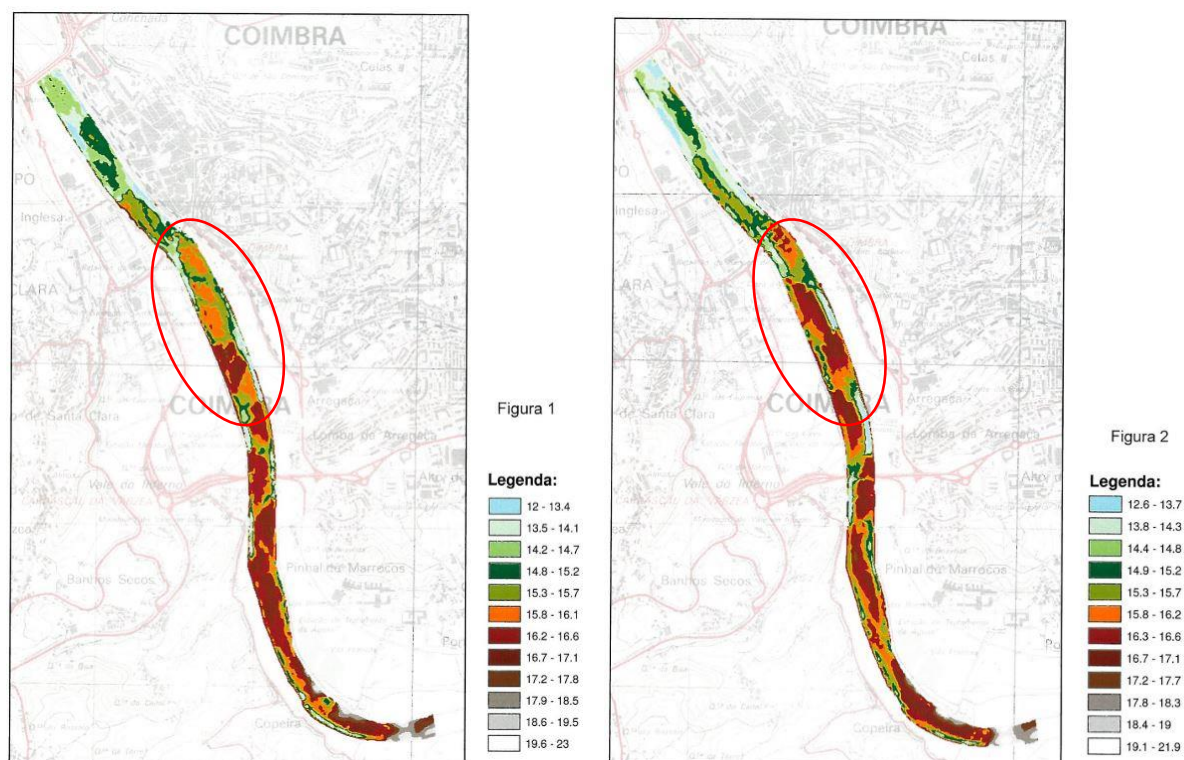


Figura 4.1 – Batimetrias realizadas em 2001 (à esquerda) e em 2003 (à direita), no troço do rio Mondego a montante do Açude-Ponte; a área assinalada com elipse de contorno vermelho representa a zona onde se identificou maior acumulação de sedimentos (Antunes do Carmo e Bravo, 2004).

Segundo o Estudo de Impacte Ambiental realizado para a intervenção de desassoreamento no rio Mondego em Coimbra, desde que a estrutura do Açude-Ponte entrou em funcionamento, em 1985, até ao ano de 2008, a albufeira acumulou um volume aproximado de 1 260 000 m<sup>3</sup> de sedimentos, sem que tivesse sido realizada nenhuma obra de desassoreamento (ARH Centro, 2010). Este montante acumulado pode traduzir-se num volume médio afluente anual de 52 500 m<sup>3</sup> à albufeira do Açude-Ponte, no período considerado de 24 anos (Freire e Antunes do Carmo, 2020).

#### 4.2.3 Solução atual

Em 2016, depois de publicado o Relatório da Ordem dos Engenheiros sobre as cheias do rio Mondego em 2016, a Câmara Municipal de Coimbra lançou o concurso para a realização do desassoreamento da albufeira do Açude-Ponte, no rio Mondego, com o objetivo de repor as cotas do fundo para níveis semelhantes aos de 1985, correspondente ao ano em que o Açude-

Ponte entrou em funcionamento. Pretende-se assim reduzir o risco de cheias, criar condições de navegabilidade e permitir a prática de desportos náuticos no rio Mondego. Segundo a Câmara Municipal de Coimbra (2017), o troço a ser intervencionado localiza-se entre o Açude-Ponte e a montante da Ponte Rainha Santa Isabel, numa extensão total de 3.5 km.

Neste contexto, a Undersee, uma *startup* portuguesa que combina dados de sensores subaquáticos com informação de satélites, desenvolveu um modelo do leito do rio a ser intervencionado, Figura 4.2 (à esquerda). Com base na informação batimétrica disponível de 2008, e com recurso ao *software open source* QuantumGIS, foi obtida uma aproximação atualizada da batimetria do leito aluvionar no ano de 2016, Figura 4.2 (à direita). Nesta figura é possível observar que as zonas mais críticas de acumulação sedimentar se encontram no setor a montante da Ponte de Santa Clara. Os níveis do fundo do leito obtidos variam entre os 14.1 m e os 17.3 m, acima do nível médio da água do mar. Neste estudo, a Undersee prevê que sejam retirados 1 000 000 m<sup>3</sup> de sedimentos na realização da obra de desassoreamento (Canilho et al., 2016).

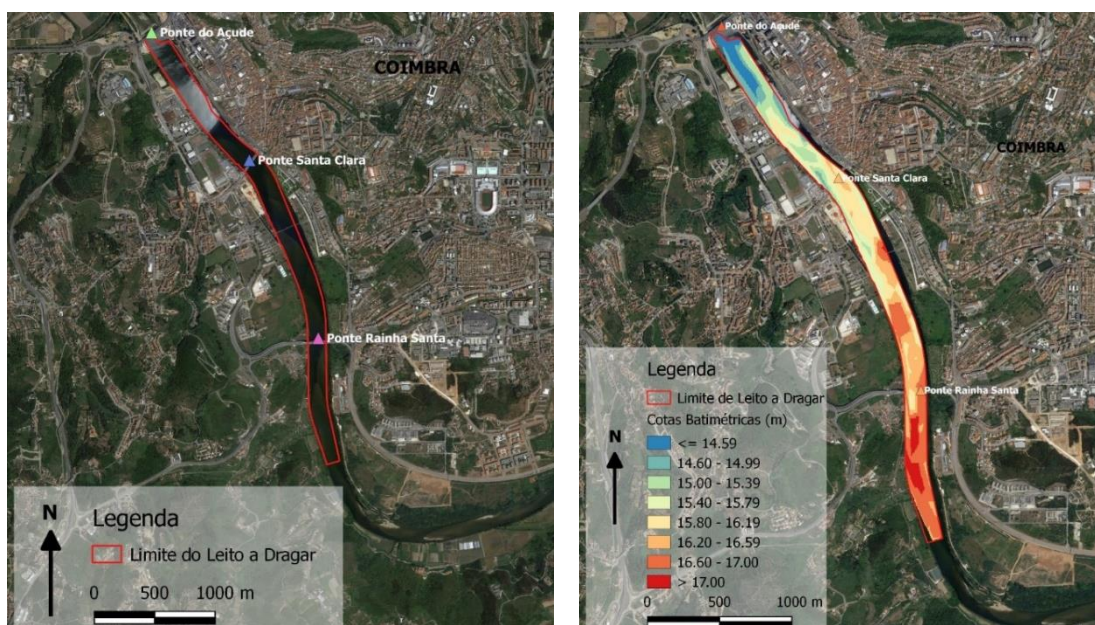


Figura 4.2 – Identificação do trecho a ser desassoreado (à esquerda) e batimetria do rio Mondego correspondente ao ano de 2016 modelada pela Undersee (à direita) (Canilho et al., 2016).

Em 2017 o Município de Coimbra anunciou a adjudicação da obra de desassoreamento do rio Mondego à Mota-Engil, num investimento de aproximadamente quatro milhões de euros, onde é prevista a remoção de 700 000 m<sup>3</sup> de inertes através de dragagens, a serem posteriormente



---

depositados em zonas erodidas a jusante do Açude-Ponte. As inundações causadas pelas cheias em 2016 levaram à aceleração do processo (Câmara Municipal de Coimbra, 2017).

A confirmarem-se as tendências de afluência dos caudais sólidos e os fenómenos de erosão e deposição registados nas análises a dados do passado no troço do rio Mondego a montante do Açude-Ponte, que apontam para uma acumulação de 52 500 m<sup>3</sup>/ano, será necessário repetir a intervenção de desassoreamento de 14 em 14 anos (Freire e Antunes do Carmo, 2020).

#### **4.2.4 Soluções alternativas**

Uma vez que as ações de dragagem ao longo de 3 km do leito do rio têm um custo económico e ambiental muito elevado para o intervalo de tempo em que se estimam úteis, sugere-se uma solução alternativa. Esta solução passa por reter a maior parte do caudal sólido afluente a Coimbra, no rio Mondego, a montante da Ponte da Portela, através da construção de uma bacia de sedimentação, com capacidade para armazenar aproximadamente 100 000 m<sup>3</sup> de material sólido.

As bacias de sedimentação são constituídas por pequenos açudes e com uma geometria que permite a passagem do escoamento (caudal líquido), com baixas ou mesmo nulas concentrações de sedimentos. Para que estas bacias desempenhem o objetivo da sua construção, devem ser desassoreadas regularmente. Assim, é conveniente garantir que a localização destas infraestruturas tenha bons acessos, ou estes devem ser também projetados. Devem também ser previstos em projeto os equipamentos necessários para extrair regularmente os sedimentos acumulados (Freire e Antunes do Carmo, 2020).

Esta solução deve ser alvo de estudos mais rigorosos, no entanto, as características do rio Mondego a montante da Ponte da Portela parecem ser adequadas à implementação de uma bacia de sedimentação com cerca de 100 000 m<sup>3</sup> de volume disponível para a retenção de sedimentos; deste modo seria necessário realizar o desassoreamento a cada dois anos. Na Figura 4.3 encontra-se indicada a sugestão da localização da bacia de sedimentação no rio Mondego.



Figura 4.3 – Localização da bacia de sedimentação (assinalada a vermelho) no rio Mondego a montante da Ponte da Portela (Adaptada de Google Earth, 2020).

De modo a complementar a primeira bacia de retenção de sedimentos no rio Mondego, deverá ser adicionada uma segunda bacia de retenção no rio Ceira, a montante da sua confluência com o rio Mondego, como se pode ver na Figura 4.4. Esta bacia teria menor capacidade uma vez que as aflúências do rio Ceira representam, em termos de caudais líquidos, entre 10 a 30% do caudal do rio Mondego afluente ao Açude-Ponte. Se aplicarmos a mesma razão aos afluentes sólidos, considerando o valor intermédio de 20%, a bacia de sedimentação no rio Ceira deverá ter capacidade para acumular cerca de 20 000 m<sup>3</sup> de sedimentos, igualmente com desassoreamento de dois em dois anos.



Figura 4.4 – Localização das duas bacias de sedimentação; bacia no rio Ceira representada a azul, a montante da confluência com o rio Mondego (Adaptada de Google Earth, 2020).

A contribuição do caudal do rio Ceira para o caudal do rio Mondego afluente ao Açude-Ponte foi determinada com base nos caudais médios (líquidos) afluentes registados no Açude-Ponte e os caudais médios (determinados através das curvas de vazão em função da altura hidrométrica) na Ponte da Conraria (no rio Ceira) durante o evento de cheia de 2019, uma vez que o transporte sedimentar aumenta com o escoamento fluvial, como se pode ver no Quadro 4.1. Com efeito, é durante fenómenos extremos que se atingem valores mais elevados de transporte sólido para jusante, e são estas as condições que devem ser utilizadas no dimensionamento de bacias de sedimentação.

Quadro 4.1 – Contribuição do caudal do rio Ceira para o rio Mondego durante o evento de cheia de 2019 (SNIRH, 2020).

|            | Caudal afluente médio diário Açude-Ponte (m <sup>3</sup> /s) | Caudal médio diário Ponte Conraria (rio Ceira) (m <sup>3</sup> /s) | Contribuição de caudal do rio Ceira para o rio Mondego |
|------------|--|--|--|
| 13/12/2019 | 192.77   | 36.10  | 19%  |
| 14/12/2019 | 243.71   | 37.26  | 15%  |
| 15/12/2019 | 224.32   | 25.29  | 11%  |
| 16/12/2019 | 302.34   | 89.39  | 30%  |
| 17/12/2019 | 481.61   | 99.72  | 21%  |
| 18/12/2019 | 586.93   | 69.53  | 12%  |
| 19/12/2019 | 781.09   | 140.37   | 18%  |
| 20/12/2019 | 1151.25  | 294.98   | 26%  |
| 21/12/2019 | 1892.56  | 355.82   | 19%  |
| 22/12/2019 | 1604.11  | 259.13   | 16%  |
| 23/12/2019 | 776.77   | 121.04   | 16%  |
| 24/12/2019 | 607.26   | 85.75  | 14%  |

## 5. CONCLUSÕES

As consequências associadas a eventos de precipitação intensa vão muito além das inundações fluviais. Os mecanismos hidrodinâmicos potenciados pelo elevado escoamento superficial podem causar danos em estruturas existentes nos leitos dos rios, como pontes e margens artificiais, ou inviabilizar a utilização de estruturas de proteção contra cheias.

O previsível aumento da frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos adversos, em consequência das alterações climáticas, deve alertar as entidades associadas à gestão de riscos naturais para a urgência em adotar medidas preventivas e mitigadoras. Neste sentido, o presente estudo, ao incidir sobre eventos de cheia e realçando as lições aprendidas de eventos passados, sugere algumas recomendações, concretamente na bacia do rio Mondego:

- a) valorização da floresta, uma vez que a presença de vegetação no solo aumenta a sua capacidade de permeabilização e conseqüentemente é gerado menor escoamento superficial na respetiva bacia hidrográfica;
- b) reforço e atualização dos sistemas de previsão e monitorização das bacias hidrográficas (de salientar a quase inexistência de estações udométricas e hidrométricas na sub-bacia do rio Ceira, sendo por isso uma zona a necessitar de especial atenção), esta alteração resultaria em mais tempo de resposta para reagir a uma situação de crise;
- c) garantia de bom funcionamento das estruturas hidráulicas através de regulares inspeções, obras de melhoria e monitorização dos caudais sólidos e líquidos, de modo a permitir uma resposta adequada das estruturas durante períodos de grande escoamento;
- d) consciencialização das comunidades residentes em zonas ribeirinhas e em leitos de cheia para o risco a que estão expostas, reduzindo a falsa sensação de segurança criada pela construção de obras hidráulicas de proteção contra cheias;
- e) proibição de construções ou reabilitações de edifícios em zonas historicamente inundáveis; e,
- f) estudo de soluções que diminuam o impacte causado por cheias.

Neste contexto, foi analisada a solução de gestão de sedimentos do rio Mondego em Coimbra e apresentada uma solução alternativa com maior viabilidade económica e ambiental a longo prazo. A monitorização e gestão adequadas de sedimentos pode revelar-se numa mais valia na

---

mitigação de impactes causados por cheias, melhorando as condições de escoamento, potenciando o aproveitamento dos sedimentos e criando maior capacidade em albufeiras.

Contudo, apesar da presente dissertação incidir particularmente na bacia hidrográfica do rio Mondego, as medidas sugeridas podem ser aplicadas à gestão do território em geral, com o fim de evitar graves consequências decorrentes de acidentes semelhantes aos estudados.

Na presente dissertação ficou demonstrada a importância da dinâmica sedimentar nas intervenções humanas realizadas em meios fluviais, através do estudo de casos específicos, como a queda da Ponte Hintze-Ribeiro e as cheias do rio Mondego, mas também pela análise de conceitos teóricos que ajudam a compreender os fenómenos morfodinâmicos característicos dos sistemas fluviais.

Como sugestão para estudos futuros, propõe-se a construção de uma bacia de sedimentação no rio Mondego, a montante da Ponte da Portela, com recurso a dados batimétricos mais recentes e suficientemente precisos (não disponíveis aquando da realização da presente dissertação). Os impactes ambientais e os custos de construção e manutenção ao longo da vida útil, bem como o formato (geometria) e a capacidade exata de acumulação de material sólido, são aspetos relevantes a ter em conta no estudo. É também de grande relevância analisar soluções semelhantes que se encontrem em funcionamento, de modo a compreender quais os pontos que podem ser melhorados e quais as intervenções ou aspetos que devem ser evitados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente@ (2020). [https://apambiente.pt/\\_zdata/Apresentacoes/2020/SVAR-Web/Avaliacao\\_Cheias2019.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/Apresentacoes/2020/SVAR-Web/Avaliacao_Cheias2019.pdf) . "Implementação da Diretiva de Gestão dos Riscos de Inundações. Sessão temática - Inundações". Agência Portuguesa do Ambiente (página de internet oficial), consultado em outubro de 2020.
- Antunes do Carmo, J. S. (2004). "Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente". Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Antunes do Carmo, J. S. (2005). "Experimental study on local scour around bridge piers in rivers". Em *River Basin Management III*.
- Antunes do Carmo, J. S. (2013). "Grandes barragens: vulnerabilidades e riscos". *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, pp. 441–461. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Antunes do Carmo, J. S. (2017). "Natural responses to changes in morphodynamic processes caused by human action in watercourses: A contribution to support management". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 24, pp. 109–118.
- Antunes do Carmo, J. S. (2019). "Riscos inerentes à construção civil". *Catástrofes Antrópicas: Uma Aproximação Integral*, pp. 103. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Antunes do Carmo, J. S. (2020). "Numerical modelling and its physical modelling support in Civil Engineering". *Research, Society and Development*, Vol. 9, Issue 10.
- Antunes do Carmo, J. S., e Bravo, N. (2004). "Intervenção de Desassoreamento no Rio Mondego a Montante da Ponte Açude". CCDRC.
- Antunes do Carmo, J. S., e Carreiras, J. L. (2002). "Hydrodynamics around coastal structures". *Proceedings of the HYDROSOFT IX Conference, Montreal, Canadá*.
- ARH Centro. (2010). "Desassoreamento da Albufeira do Açude Ponte de Coimbra". *Estudo de Impacte Ambiental, Resumo Não Técnico*.

- 
- Autoridade Nacional da Proteção Civil. (2016). "Gestão do Risco de Inundação - Documento de Apoio a Boas Práticas".
- Autoridade Nacional da Proteção Civil@ (2020). [https://apambiente.pt/\\_zdata/Apresentacoes/2020/SVAR-Web/ProtecaoCivil\\_Analise\\_Cheias2019.pdf](https://apambiente.pt/_zdata/Apresentacoes/2020/SVAR-Web/ProtecaoCivil_Analise_Cheias2019.pdf) . "Cheias de 2019 Baixo Mondego - Gestão da Crise". Autoridade Nacional de Proteção Civil, consultado em outubro de 2020.
- Câmara Municipal de Coimbra@ (2017). <https://www.coimbra.pt/2017/08/desassoreamento-do-rio-mondego-arrancou-hoje/> . "Desassoreamento do Rio Mondego arrancou hoje". Câmara Municipal de Coimbra (página de internet oficial), consultado em outubro de 2020.
- Canilho, S., Vieira, J., Trancoso, L., e Mantas, V. (2016). "As Cheias do Rio Mondego e o Necessário Desassoreamento". Proceedings of GISDAY 2016, Condeixa-a-Nova.
- Chamoun, S. (2017). "Venting of Turbidity Currents: When To Act ?". Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Vol. 6865, Issue 1, pp. 1027–1036.
- Chamoun, S., De Cesare, G., e Schleiss, A. J. (2016). "Experimental investigation on turbidity current venting under restrained outflow discharges". River Flow 2016, pp. 1435–1440.
- CM@ (2016). [https://www.cmjornal.pt/sociedade/detalhe/mosteiro\\_de\\_santa\\_clara\\_a\\_velha\\_fechado\\_durante\\_meses](https://www.cmjornal.pt/sociedade/detalhe/mosteiro_de_santa_clara_a_velha_fechado_durante_meses) . "Mosteiro de Santa Clara-a- Velha fechado «durante meses»". Jornal Correio da Manhã (página de internet oficial), consultado em setembro de 2020.
- Costa, F. da S. (2013). "O tema das cheias e inundações na obra de Fernando Rebelo". Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo, pp. 81–87. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Cunha, P. P. (2002). "Vulnerabilidade e risco resultante da ocupação de uma planície aluvial - o exemplo das cheias do rio Mondego (Portugal central), no inverno de 2000/2001". Territorium, Issue 9, pp. 13–35.
- ESA@ (2019). [https://twitter.com/copernicuseu?fbclid=IwAR1\\_Wxbku8Y351YGufZxIeu1LG1BoY4-1cwZ3LVEenw2YigtRdt-Z2kLPM0](https://twitter.com/copernicuseu?fbclid=IwAR1_Wxbku8Y351YGufZxIeu1LG1BoY4-1cwZ3LVEenw2YigtRdt-Z2kLPM0) . "Programa Copernicus". Agência Espacial Europeia (página de internet oficial), consultado em setembro de 2020.
- Freire, D. F. A., e Antunes do Carmo, J. S. (2020). "Contribuição para uma gestão ambiental e economicamente sustentável do rio Mondego em Coimbra". Proceedings of the V Congresso Internacional de Riscos - Contributos da ciência para a redução do risco. Agir hoje para proteger o amanhã, Coimbra.
- Google Earth. (2020). localização.
-

- 
- JN@ (2016). <https://www.jn.pt/local/noticias/coimbra/coimbra/cheias-em-coimbra-afetam-as-duas-margens-do-mondego-4974385.html> . "Cheias em Coimbra afetam as duas margens do Mondego". *Jornal de Notícias* (página de internet oficial), consultado em setembro de 2020.
- Kondolf, G. M. (1997). "Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels". *Environmental Management*, Vol. 21, Issue 4, pp. 533–551.
- LNEC. (2012). "Estudo das inundações do Rio Mondego a jusante da confluência do Rio Ceira". Lisboa.
- Martin, J. L., e McCutcheon, S. C. (1999). "Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling" (S. Wood & S. Alfieri, Eds.). Florida: CRC Press, Inc.
- Observador. (2020). <https://observador.pt/2020/01/27/dono-de-terreno-invadido-por-areia-nas-cheias-do-mondego-critica-silencio-da-tutela/> . "Dono de terreno invadido por areia nas cheias do Mondego critica silêncio da tutela". *Jornal Observador* (página de internet oficial), consultado em outubro de 2020.
- Ordem dos Engenheiros. (2016). "Caracterização das condições de escoamento do Rio Mondego que deram origem às inundações em Coimbra em Janeiro de 2016". Lisboa.
- Ordem dos Engenheiros@ (2019). <https://www.ordemengenheiros.pt/pt/atualidade/noticias/ev-entos-meteorologicos-infraestruturas-afetadas-bacia-do-mondego/> . "Eventos meteorológicos - Bacia do Mondego". *Ordem dos Engenheiros* (página de internet oficial), consultado em setembro de 2020.
- Peteuil, C. (2018). "Sustainable Management of Sediment Fluxes in the Rhône River Cascade". *HydroLink*, Issue 4, pp. 112–114.
- Pina, R. D., Simões, T. M. N., Sá Marques, J. A., Temido, J. L. S. S., e Sousa, J. J. O. (2010). "A Gestão dos Sistemas de Drenagem da Cidade de Coimbra - O Plano Geral de Drenagem". *Proceedings of the 14º Encontro Nacional de Saneamento Básico Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Público@ (2019). <https://www.publico.pt/2019/12/22/fotogaleria/cheias-distrito-coimbra-imagens-399246> . "As cheias no centro do País em imagens". *Jornal Público* (página de internet oficial), consultado em setembro de 2020.
- Quercus@ (2018). <https://www.quercus.pt/comunicados/2018/julho/5644-quercus-considera-construcao-de-aterro-no-rio-mondego-um-absurdo-e-alerta-para-o-risco-de-cheia> . "Quercus considera construção de aterro no rio Mondego um absurdo e alerta para o risco de cheia". Consultado em outubro de 2020.
- Rebello, F. (2010). "Geografia Física e Riscos Naturais". *Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra*.
-



- 
- Rodrigues, R., Brandão, C., e Pinto da Costa, J. (2001). "Hidrologia das cheias do Mondego de 26 e 27 de Janeiro de 2001". Relatório do INAG.
- Sá Marques, J. A., Mendes, P. A., e Seabra Santos, F. (2005). "Cheias em áreas urbanas: a zona de intervenção do programa polis em Coimbra". *Territorium*, Issue 12, pp. 29–53.
- Sá Marques, J. A., Seabra Santos, F., Simões, N., e Amado Mendes, P. (2013). "Modelação numérica de cheias fluviais e urbanas na bacia do Mondego". *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, pp. 463–479. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sá Marques, J. A., Vieira, J., Seabra Santos, F., Venâncio, S., Simões, N., Pinho, J., e Vieira, L. (2018). "Application of Hydroinformatic Tools for Reservoirs Discharges Rules Assessment During a Flood Event". *EPiC Series in Engineering*, Vol. 3, pp. 1672–1681.
- Sclafani, P., Nygaard, C., e Thorne, C. (2017). "Applying geomorphological principles and engineering science to develop a phased Sediment Management Plan for Mount St Helens , Washington". *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Sequeira, J. (2015). "Análise Computacional da Evolução da Hidromorfologia do Baixo Mondego em Resultado da Subida do Nível do Mar". Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- SNIRH@ (2020). <https://snirh.apambiente.pt/> . Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Consultado em outubro de 2020.
- Soromenho Rocha, J., Antunes do Carmo, J. S., Lemos, L., Dias da Silva, V., e Rebelo, C. (2008). "Pontes Construídas Sobre Fundos Aluvionares: O Colapso da Ponte Hintze Ribeiro". *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 29.
- Sumi, T., e Kantoush, S. A. (2018). "Innovative Strategies for Managing Reservoir Sedimentation in Japan". *HydroLink*, Issue 4, pp. 100–104.
- Teixeira, P. (2011). "A Ponte de Portugal". Gaiense.
- Viseu, M. T. (2013). "O risco e as barragens". *Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo*, pp. 425–440. Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Wang, C., Yu, X., e Liang, F. (2017). "A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures". *Natural Hazards*, Vol. 87, Issue 3, pp. 1881–1906.
- Wang, H., e Kuo, W. (2018). "Reservoir Sedimentation Management in Taiwan". *HydroLink*, Issue 4, pp. 108–112.
-