U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

EFEITO BARREIRA DA RESTINGA DO ESTUÁRIO DO DOURO

RAFAEL ALEXANDRE LIMA SOUSA MONTEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE

Orientador: Doutor Paulo Avilez-Valente

OUTUBRO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. (+351) 22 508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. (+351) 22 508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil — 2024/2025 — Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Avós

The world produces waves, surf or drown, you decide

Virgil Abloh

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço imenso ao meu orientador, Professor Paulo Avilez-Valente, pelo acompanhamento, conhecimento transmitido, pela disponibilidade, pela paciência e apoio constante ao longo deste percurso da dissertação. Foi um privilégio tê-lo como orientador e agradeço a confiança.

Aos meus queridos pais, que são a base de tudo o que sou. Pelo amor incondicional, pela força, pela motivação e apoio constante em cada passo na minha jornada. Foram o meu alicerce em todas as fases deste curso e nunca deixaram que desistisse dos meus objetivos. Agradeço por sempre acreditarem nas minhas capacidades e por ensinarem o valor do trabalho, da honestidade e da perseverança. Um agradecimento especial ao meu pai, que serviu de um grande exemplo e inspiração para poder acabar este percurso, desde as conversas, a preocupação com a pontualidade, pelo apoio mesmo estando em baixo ou em cima, por todas as conversas, companheirismo de forma presencial ou a distância. Esta conquista também é vossa.

Aos meus avós, um agradecimento especial por todo o apoio, carinho, telefonemas, pelos valores essenciais transmitidos e pelo orgulho em cada conquista. Um agradecimento enorme ao meu avô, que, apesar de já não estar presente, teve um papel fundamental no meu percurso académico. Sempre acreditou em mim, mesmo quando eu próprio duvidava, e acompanhou de perto o meu esforço e dedicação. Infelizmente, não teve a oportunidade de ver esta etapa concluída, algo que tanto desejava. Ainda assim, esta conquista também é dele.

Agradeço, de forma muito especial, aos meus amigos. À Isa, que mesmo estando longe, sempre esteve pronta para ouvir os meus desabafos, incentivar em todos os assuntos e oferecer as melhores ideias com carinho (e às vezes julgar). Ao Sérgio, pelo companheirismo, foram imensas as vezes que saímos aos mais diversos lugares para focar nos estudos ou para fugir deles. À minha dupla de chamadas, Dayane e Silvia, por todo o trabalho que fizemos juntos nestes últimos meses com muita dedicação, carinho e esforço. À Adriane, pelo companheirismo e pelas diversas aventuras que tornaram este percurso mais leve. Ao Renato, um companheiro de longa data que me motivou e acompanhou sempre o meu esforço. À Ana M., que sempre esteve presente em todos os momentos críticos, embora confusa, sempre teve bons conselhos. Ao meu grupo Obonous, que, embora cada um tenha seguido rumos diferentes, sempre estiveram presentes neste percurso desde Cabo Verde a Portugal, com um agradecimento especial ao Naldo e ao Guilherme. Aos meus colegas cabo-verdianos, João, Dara e Ilsa, hoje sou eu, amanhã serão vocês, muita força nesta caminhada.

Aos meus colegas de curso, sinto uma gratidão enorme por terem caminhado comigo neste percurso e ter conhecido muitos guerreiros, especialmente pelo Martim e pela Isabel, que sempre estiveram comigo em todos os momentos em que precisei e sempre me apoiaram para todas as conquistas. Foi um prazer contar com a vossa ajuda e companheirismo. À Civil e aos up2018. Aos meus colegas das águas, que junto dividimos a sala de hidráulica, nos estudos, nas conversas e em momentos de repouso, agradecimento especial a Serro, Kenny e Chico.

Expresso um sincero agradecimento a todos, porque como diz Clint, o nosso maior erro é pensar que conseguimos fazer tudo sozinhos.

E mais importante, um agradecimento especial a mim. Porque lutei durante todo este percurso e não desisti. Se não fosse eu, quem seria? Porque cada qual sabe de si e vive como lhe apetece. Mas eu mantive a postura até ao fim, que embora muito foi difícil, houve com sucesso. Acordei todos os dias com duas frases na cabeça: “Os cavalos não param, eles continuam” e “Gotta ask yourself everyday how much do you really want it?”. Eu quis. Todos os dias, ámen.

RESUMO

Estudar o comportamento da restinga situada na foz do rio Douro, numa perspetiva hidro-morfodinâmica, foi o principal objetivo deste trabalho. Esta formação sedimentar desempenha um papel essencial na proteção das margens estuarinas e, em situações de cheia extrema, deve atuar como um "fusível natural", permitindo o escoamento das águas para o mar e mitigando os efeitos de inundações urbanas.

A metodologia desenvolvida baseou-se na utilização do modelo numérico HEC-RAS 6.6, integrando modelação hidrodinâmica e morfodinâmica em duas dimensões. A calibração do modelo foi realizada com base na batimetria de 1994 e nas descargas fluviais das barragens como condição fronteira a montante. A partir desta base, foram simulados quatro cenários de cheia: dois históricos (1909 e 1962) e dois eventos milenares hipotéticos com diferentes configurações de pico, com o objetivo de avaliar o desempenho atual da restinga sob diferentes regimes hidrológicos.

Os resultados permitiram identificar padrões de elevação da superfície livre, velocidades e profundidades do escoamento, bem como zonas críticas de erosão. Verificou-se que a atual configuração da restinga, reforçada pelas intervenções estruturais nos molhes, apresenta uma maior estabilidade física, mas tende a comprometer a sua função como mecanismo de alívio em eventos extremos. Em todos os cenários simulados, a permanência da restinga levou à retenção de maior volume de água no interior do estuário, contribuindo para a elevação dos níveis de cheia e agravando o risco de inundação nas áreas urbanas adjacentes.

Este trabalho fornece um contributo relevante para a compreensão do funcionamento da restinga e do estuário do Douro em contextos de cheia, oferecendo subsídios importantes para a gestão do risco e para o planeamento de intervenções que considerem a sua função fusível.

PALAVRAS-CHAVE: restinga, cheias, efeito fusível, modelação numérica, hidromorfodinâmica.

ABSTRACT

This study investigates the behaviour of the sandbar located at the mouth of the Douro River from a hydro-morphodynamic perspective. This sedimentary formation plays a critical role in protecting the estuarine margins and, during extreme flood events, is expected to act as a "natural fuse," allowing floodwaters to flow out to sea and mitigating urban flooding impacts.

The adopted methodology involved the use of the HEC-RAS 6.6 numerical model, combining two-dimensional hydrodynamic and morphodynamic simulations. Model calibration was based on the 1994 bathymetry, with the upstream boundary condition defined by controlled discharges from upstream dams. Based on this setup, four flood scenarios were simulated: two historical events (1909 and 1962) and two hypothetical millennial floods with distinct peak configurations, aiming to assess the current performance of the sandbar under different hydrological regimes.

Results revealed patterns of water surface elevation, flow velocity, and depth, as well as critical erosion zones. The current sandbar configuration, reinforced by the jetty structures, was found to be more physically stable but less effective in performing its natural relief function. In all simulated scenarios, the sandbar's persistence contributed to water retention within the estuary, leading to increased flood levels and greater inundation risk in adjacent urban areas.

This work contributes to a deeper understanding of the Douro estuary's behaviour under extreme events and provides valuable insights for flood risk management and the planning of coastal interventions that consider the sandbar's potential role as a safety mechanism.

KEYWORDS: sand spit, floods, fuse effect, numerical modelling, hydro-morphodynamics.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS ..... **V**
RESUMO ..... **VII**
ABSTRACT ..... **IX**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XV**
ÍNDICE DE TABELAS ..... **XIX**

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA **1**
1.2. OBJETIVOS A ATINGIR **2**
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO **3**

2. ESTADO DA ARTE 5
2.1. ESTUDO DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO **5**
2.1.1. DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO 5
2.1.2. O ESTUÁRIO DO RIO DOURO 7
2.1.2.1. Marés e Dinâmica Sedimentar 8
2.1.2.2. Salinidade e dinâmica sedimentar 8
2.1.3. IMPACTOS ANTROPOGÉNICOS NO ESTUÁRIO DO RIO DOURO 9
2.1.3.1. Urbanização 10
2.1.3.2. Dragagens 10
2.1.3.3. Barragens 11
2.2. COMPORTAMENTO MORFODINÂMICO DA RESTINGA DO ESTUÁRIO DO DOURO **11**
2.3. CHEIAS HISTÓRICAS NO DOURO **15**
2.3.1. CHEIA DE 1909 18
2.3.2. CHEIA DE 1962 21
2.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS **24**
2.5. MODELAÇÃO MORFO-HIDRODINÂMICA ESTUARINA **26**

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA 29
3.1. MODELO HEC-RAS **29**
3.1.1. MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA 29
3.1.1.1. Equações de Saint-Venant 30

3.1.1.2. Equação de Onda Difusiva 31

4. CASO DE ESTUDO 33

4.1. CARATERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO DOURO 33

4.2. TOPO-BATIMETRIA 34

4.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO 35

4.3.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS 37

4.3.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO 37

4.3.3. VALIDAÇÃO DO MODELO 39

4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 41

5. SIMULAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS 43

5.1. INTRODUÇÃO 43

5.2. BATIMETRIA 43

5.3. MALHA COMPUTACIONAL 43

5.4. CAUDAIS DE CHEIA NO ESTUÁRIO DO DOURO 44

5.5. CENÁRIO 1: CHEIA CENTENÁRIA DE 1909 46

5.5.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE 46

5.5.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE 47

5.5.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS 48

5.6. CENÁRIO 2: CHEIA CENTENÁRIA DE 1962 48

5.6.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE 48

5.6.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE 49

5.6.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS 49

5.7. CENÁRIO 3: CHEIA MILENAR COM UM PICO 50

5.7.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE 50

5.7.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE 50

5.7.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS 50

5.8. CENÁRIO 4: CHEIA MILENAR DOIS PICOS 50

5.8.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE 50

5.8.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE 51

5.8.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS 51

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS 53

6.1. CENÁRIO 1: CHEIA CENTENÁRIA DE 1909 53

6.1.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE 53
6.1.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO 54
6.1.3. PROFUNDIDADES 54
6.2. CENÁRIO 2: CHEIA CENTENÁRIA DE 1962 55
6.2.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE 55
6.2.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO 56
6.2.3. PROFUNDIDADES 56
6.3. CENÁRIO 3: CHEIA MILENAR COM UM PICO 58
6.3.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE 58
6.3.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO 59
6.3.3. PROFUNDIDADES 59
6.4. CENÁRIO 4: CHEIA MILENAR COM DOIS PICOS 60
6.4.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE 60
6.4.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO 61
6.4.3. PROFUNDIDADES 61
6.5. CONCLUSÕES PARA OS CENÁRIOS 63
6.6. SEDIMENTOLOGIA 63

7. BIBLIOGRAFIA 67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração dos estuários relativamente à sua geometria, salinidade e ligação ao mar (fonte: Potter et al., 2010). 6

Figura 2 - Regiões constituintes do estuário (fonte: Perillo, 1995). 6

Figura 3 – Enquadramento geográfico do estuário do rio Douro (fonte: Iglesias et al., 2021). 7

Figura 4 – Formação da cunha salina num estuário (fonte: Dyer, 1995). 9

Figura 5 – Transporte de sedimentos na zona costeira (fonte: Sánchez, 2020). 10

Figura 6 – Evolução da restinga ao longo do ano de 1910, após a cheia de Dezembro de 1909 (adaptado de Baptista, 2006). 12

Figura 7 – Evolução morfológica da restinga. Foto aérea de Novembro de 2008, com os contornos de 1982 e 1950. 1: muro Luís de Carvalho construído em 1820; 2: Baía de São Paio; 3: quebramar norte; 4: quebramar Sul; 5: acesso rodoviário (fonte: Bastos et al., 2012). 13

Figura 8 – Esquema das estruturas implantadas na embocadura do Douro (fonte: Gonçalves, 2021). 13

Figura 9 – Ação da descarga fluvial, vento e ondas nas quatro secções da restinga antes dos quebramares (fonte: Bastos et al., 2012). 14

Figura 10 – Ação da descarga fluvial, vento e ondas nas quatro secções da restinga após os quebramares (fonte: Bastos et al., 2012). 14

Figura 11 – Propagação da superfície frontal sobre a Península Ibérica, aquando da cheia do Douro em Dezembro de 2002 (fonte: Rodrigues et al., 2003). 15

Figura 12 – Níveis máximos de cheia, em relação ao ZH, registados ao longo dos anos no Douro (1739 a 2006) (fonte: Direção Municipal de Bombeiros e Proteção Civil de Vila Nova de Gaia). 16

Figura 13 – Cheia de 1909. Destruição na ribeira de Gaia (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 18

Figura 14 – Cheia de 1909. Senhora de Boa Passagem em Gaia completamente inundada (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 18

Figura 15 – Cheia de 1909. Nível da água atingido perto da Ponte Luís I (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 19

Figura 16 – Hidrograma da cheia de 1909 (adaptado: Vieira & Costa, 2014). 19

Figura 17 – Evolução da altura das águas na Régua (fonte: APA, 2016). 20

Figura 18 – Precipitação total de 22 de Dezembro 1909 (fonte: Pereira et al., 2016). 20

Figura 19 – Taxa de precipitação do dia 02/01/1962 às 18h00 (fonte: Santos, 2015). 21

Figura 20 - Hidrograma da cheia de Janeiro de 1962 na Régua (adaptado: Rodrigues et al., 2003). 21

Figura 21 – Hidrograma comparativo das cheias de 1909 e 1962 (fonte: Rodrigues et al., 2003). 22

Figura 22 – Pormenor das cheias de 1962, na zona da Alfândega Nova em Miragaia (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 23

Figura 23 – Aspeto da cheia de 1962 na cidade do Porto (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 23

Figura 24 – Aspeto da cheia de 1962 na cidade do Porto, vista do tabuleiro superior da ponte Luís I (fonte: Arquivo Municipal do Porto). 24

Figura 25 – Caudais médio diário na barragem de Crestuma (representado por linhas) e dragagens anuais na entrada do estuário (representadas pelas barras) no período de 1988 a 1966. (fonte: Portela, 2008). 25

Figura 26 – Simulação do transporte do caudal sólido para um caudal de 2036 m^3/s durante a enchente e a vazante, a 5 e a 18 km da embocadura (fonte: Portela, 2008). 25

Figura 27 - Batimetria do estuário em 1994. 34

Figura 28 – Localização dos pontos das medições no HEC-RAS. 35

Figura 29 – Hidrograma de caudais horários no período entre 17 de Setembro e 30 de Setembro de 1994. Tempo referido as 00h00 UTC+1 do dia 17 de Setembro de 1994. 37

Figura 30 - Nível da maré medida no marégrafo de Leixões no período entre 17 de Setembro e 30 de Setembro de 1994. Tempo referido as 00h00 UTC+1 do dia 17 de Setembro de 1994. 37

Figura 31 – Condição fronteira a montante: caudal fluvial. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 18 de Setembro de 1994. 38

Figura 32 – Condição fronteira a jusante: nível da maré medida no marégrafo de Leixões. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 18 de Setembro de 1994. 38

Figura 33 – Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 18 e 23 de Setembro de 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS. 39

Figura 34 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 18 e 23 de Setembro de 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS. 39

Figura 35 – Condição fronteira a montante: caudal fluvial. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 25 de Setembro de 1994. 40

Figura 36 – Condição fronteira a jusante: nível da maré medida no marégrafo de Leixões. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 25 de Setembro de 1994. 40

Figura 37 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 25 de Setembro e 30 de Setembro 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS..... 41

Figura 38 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 25 de Setembro e 30 de Setembro 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS..... 41

Figura 39 – Batimetria atual do estuário. 44

Figura 40 – Batimetria no domínio computacional. Localização do perfil longitudinal (——) e da ponte Luís I (●). 44

Figura 41 – Valor esperado dos caudais de cheia em Crestuma em função do período de retorno.... 46

Figura 42 – Relação entre os caudais QR e QP, incluindo a curva de melhor ajuste. 47

Figura 43 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, no período entre as 00h00 UTC de 17 de Dezembro de 1909 e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909. 47

Figura 44 - Condição fronteira a jusante: nível da maré astronómica obtido com o modelo TXPO 7.2, no período entre as 00h00 UTC 17 de Dezembro e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909. 48

Figura 45 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, no período entre as 00h00 UTC de 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC de 10 de Janeiro 1962. 49

Figura 46 - Condição fronteira a jusante: nível da maré astronómicas obtido com o modelo TXPO 7.2, no período entre as 00h00 UTC 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC 10 de Janeiro 1962. 49

Figura 47 - Hidrograma de cheia, para um período de retorno de 1000 anos, entre as 00h00 UTC de 17 de Dezembro de 1909 e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909. 50

Figura 48 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, para um período de retorno de 1000 anos, no período entre as 00h00 UTC de 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC de 10 de Janeiro 1962. 51

Figura 49 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 23Dez1909 09h00 (—); 24Dez1909 18h00 (—). 53

Figura 50 – Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909. 54

Figura 51 – Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909. 55

Figura 52 – Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909. 55

Figura 53 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 31Dez1961 12h00 (—); 03Jan1962 06h00 (—). 56

Figura 54 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962. 57

Figura 55 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962. 57

Figura 56 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962. 58

Figura 57 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 1000$ anos. Máxima (—); 23Dez1909 09h00 (—); 24Dez1909 18h00 (—). 58

Figura 58 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos. 59

Figura 59 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos. 60

Figura 60 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos. 60

Figura 61 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 31Dez1961 12h00 (—); 03Jan1962 06h00 (—). 61

Figura 62 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos. 62

Figura 63 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos. 62

Figura 64 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos. 63

Figura 65 – Curva granulométrica. 65

Figura 66 – Configuração do canal e estruturas de contenção. 65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caudais de ponta de cheia registados no rio Douro (fonte: APA, 2012). 17

Tabela 2 – Afluentes principais do Douro. 33

Tabela 3 – Infraestruturas hidroelétricas portuguesas no rio Douro Nacional. 34

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de medição. 36

Tabela 5 – Caudais de ponta de cheia referidos no Plano de Gestão do Região Hidrográfica do Douro (APA, 2012). 45

Tabela 6 – Caudais de ponta de cheia para o rio Douro em Crestuma. 45

Tabela 7 – Distribuição granulométrica do leito. 64

1
INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

A bacia hidrográfica do rio Douro cobre uma enorme extensão na Península Ibérica, totalizando uma área de 97 477 km^2, dos quais cerca de um terço em Portugal e os restantes dois terços em Espanha (APA, 2018). É caraterizada pelo seu regime hidrológico sazonal, em que a precipitação proveniente das massas de ar atlânticas e mediterrâneas e a presença de múltiplos aproveitamentos hidráulicos, como barragens destinadas à produção de energia hidroelétrica, ao abastecimento e à regularização de caudais ao longo do seu curso, influenciam esse comportamento. O rio Douro nasce em Espanha, na serra de Urbión, na Cordilheira Ibérica. Ao longo do seu percurso, é geometricamente caraterizado por longos meandros que lhe conferem um elevado índice sinuosidal e por fundos irregulares, já que os leitos são naturalmente rochosos. No seu leito principal do rio desaguam diversos afluentes, alguns em território espanhol e outros em território português, por fim chegando ao estuário mesotidal do Douro.

Os estuários são corpos aquáticos costeiros que representam uma zona de transição única onde o ambiente fluvial se encontra com o ambiente marinho e os estuários podem ser divididos em três zonas de acordo com a salinidade, nomeadamente a zona inferior, intermédia e superior (Perillo, 1995). Por isso, estão diretamente sujeitos à influência de parâmetros meteo-oceanográficos e geomorfológicos, tais como o vento, a precipitação, as ondas, os gradientes de temperatura, as correntes costeiras e estuarinas, os caudais fluviais e a própria configuração física do estuário, incluindo a batimetria e as formas das margens.

O estuário do Douro localiza-se na zona costeira ocidental de Portugal, entre os concelhos do Porto e de Vila Nova de Gaia. Desempenha diversas funções ecológicas, abriga uma grande diversidade de habitats, funções hidráulicas e urbanísticas. Insere-se numa área densamente povoada e com elevado valor económico. Desde o século XVIII têm sido construídas estruturas na foz do Douro com o objetivo de melhorar as condições de navegação e segurança da barra. Atualmente, encontra-se, a sul, um quebramar destacado, galgável e de baixa cota de coroamento, cuja face exterior é protegida por blocos de betão enriquecidos por minério de alta densidade. A norte, uma articulação foi construída com o existente molhe de Felgueiras, de forma a dar continuidade ao espaço urbano (Santos et al., 2010). No limite da zona do estuário desenvolve-se a restinga do Douro, que se encontra mais robusta após a construção daquelas obras.

A restinga do rio Douro é uma estrutura sedimentar extremamente dinâmica. A sua formação deve-se à acumulação de sedimentos transportados ao longo da bacia hidrográfica e depositados na zona adjacente à foz. A restinga encontra-se na margem esquerda do estuário e apresenta uma extensão média de cerca de 800 m na direção sul-norte. Funciona como uma barreira de proteção da barra do Douro e das margens do seu estuário ao efeito dos temporais, tem registado uma evolução morfológica devido à construção

dos molhes, agitação marítima e caudais fluviais, que induzem uma oscilação entre a erosão e acreção sedimentar, evidenciando um comportamento sazonal. Por outro lado, em caso de cheias, a restinga deverá funcionar como um fusível, permitindo com a sua rotura a saída para o mar das águas pluviais, evitando inundações.

Um estudo realizado por Rodrigues et al. (2003) utilizou a cidade de Peso da Régua como ponto de referência para as cheias e identificou o limiar do caudal de 10 000 m^3/s como uma cheia de elevada magnitude. Antes de 1970, uma cheia dessa ordem contava com um período de retorno de cerca de 16 anos, passando para 22 anos devido ao efeito das albufeiras espanholas. Antes da construção dos molhes, a restinga era completamente ou parcialmente destruída para caudais dessa ordem, aliviando a subida do nível de cheia no interior do estuário. A atual configuração tem diminuído a possibilidade de galgamento ou rotura durante as cheias, tornando-se um processo que contribui para o aumento do nível da água durante eventos de cheia, agravando consequentemente danos em infraestruturas e perdas económicas. Com base no histórico de cheias, vale a pena mencionar duas cheias de maior dimensão: as cheias de Dezembro de 1909 e de Janeiro de 1962. Estas contribuíram com um caudal de cheia próximo do caudal centenário e colocaram em risco os habitantes e a ponte Luís I. As cheias de 1989, 2001, 2002 e 2003 apresentaram caudais de ponta menos pronunciados.

As grandes cheias resultam da sobreposição de sucessivos sistemas frontais, com dois picos distintos, como em 1909 e 1962. Porém, as cheias são hoje menos frequentes devido ao controlo das barragens, mas os impactos são maiores devido à urbanização e ocupação indevida dos leitos de cheia, causando uma falsa segurança.

Torna-se essencial conhecer a hidrodinâmica que ocorre no estuário, que por norma afeta a restinga, de forma a prever os efeitos das alterações complexas antropogénicas e tornando necessário elaborar planos de prevenção e evacuação para eventos de cheia de forma a minimizar os impactos adversos. Utilizando a modelação numérica de uma forma técnica é possível determinar se uma cheia de valor crítico irá ativar o mecanismo de fusível. Uma cheia não atinge instantaneamente um determinado patamar e as condições de escoamento na bacia já não são naturais, fruto da intervenção humana. Por isso, é necessário recorrer à constante monitorização do meio (utilizando procedimentos regulares na descarga fluvial) para se poder prever atempadamente este tipo de evento extremo, uma vez que as duas últimas cheias foram bem monitorizadas e não comprometeram as condições naturais.

1.2. OBJETIVOS A ATINGIR

O objetivo principal desta dissertação é estudar, por intermédio de modelação numérica pormenorizada, de uma forma eficiente e minuciosa, o comportamento da restinga situada na foz do rio Douro, cuja forma e estabilidade são fortemente influenciados pelo regime dos padrões hidro-morfodinâmicos do rio e da agitação marítima. Pretende-se analisar o comportamento da restinga sedimentar na sua configuração atual, distinguida pelo fortalecimento resultante da construção dos novos molhes, que embora tenha fixado a sua posição, tornando-a mais robusta e compacta, poderá ter comprometido o seu efeito fusível.

Através da aplicação de um modelo numérico, será possível simular cenários de cheias históricas e extremas, tal como o evento que sucedeu em Dezembro de 1909, onde o caudal máximo foi de 16 700 m^3/s medido na Régua, tendo o nível das águas ficando a 0.80 m do tabuleiro inferior da ponte Luís I (Vieira & Costa, 2014). Esta cheia, associada a um período de retorno de 100 anos, causou uma vasta destruição nas zonas da ribeirinha. De forma a avaliar se nessas condições hidrológicas críticas, a restinga sofrerá rotura, com o objetivo de determinar se a restinga vai atuar como um fusível, permitindo

o escoamento das águas fluviais para o mar e mitigando o risco de inundações, ou se, pelo contrário, se comporta como uma barreira, agravando o risco para a população, infraestruturas e ecossistemas do estuário do Douro. Adicionalmente, investigar-se-á a evolução da batimetria ao longo do tempo, com especial atenção aos processos de erosão e acreção tanto no leito principal como na restinga.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos.

O primeiro capítulo corresponde à introdução ao tema, apresentando o enquadramento da problemática, os objetivos a atingir e a relevância do estudo para a gestão de riscos associados a cheias no estuário do Douro.

No segundo capítulo é desenvolvido o estado da arte, onde se procede à caracterização da bacia hidrográfica e do estuário do Douro, da restinga e da sua evolução morfodinâmica, das cheias históricas e do transporte de sedimentos, culminando com a revisão dos principais conceitos sobre modelação hidromorfodinâmica.

O terceiro capítulo descreve o modelo numérico utilizado, o HEC-RAS 6.0, incluindo as equações que governam os fenómenos simulados, a metodologia de simulação hidrodinâmica e hidromorfológica, e os parâmetros físicos definidos.

No quarto capítulo é apresentado o caso de estudo, onde se detalha a batimetria, os dados hidrológicos, os aproveitamentos hidroelétricos e as condições de fronteira. São ainda descritos os processos de calibração e validação do modelo.

O quinto capítulo refere-se à simulação de cenários de cheia, incluindo eventos históricos (1909 e 1962) e cheias milenares, com diferentes configurações de pico, permitindo analisar a resposta do sistema estuarino em diversas condições extremas.

Por fim, o sexto capítulo sintetiza as conclusões obtidas ao longo do trabalho, com especial enfoque na avaliação do comportamento da restinga enquanto elemento de alívio hidráulico, e propõe recomendações para estudos futuros.

2
ESTADO DA ARTE

2.1. ESTUDO DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO

2.1.1. DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO

Apesar das inúmeras tentativas ao longo dos anos, devido à sua complexidade, ainda não existe uma definição coerente e amplamente aceite do estuário. As definições propostas falham em englobar fatores como a morfologia e ecologia desse sistema, que são pilares fundamentais para a biodiversidade e ocupação humana.

A definição de um estuário proposta por Pritchard (1967), retrata-o como sendo uma massa de água costeira semifechada, com ligação livre ao mar aberto, onde ocorre a mistura de água salgada com água doce, formando um sistema dinâmico influenciado tanto pelas condições oceânicas quanto pelas fluviais. Embora esta definição seja adequada e amplamente reconhecida por ser uma forma eficaz de caraterizar estuários do hemisfério norte, apresenta algumas limitações para estuários existentes no hemisfério sul, como os estuários africanos (Day, 1980, 1981) e australianos (Hodgkin & Lenanton, 1981), devido às suas condições climáticas áridas e temperadas.

A Figura 1 ilustra as diferentes configurações de estuários e respetivos padrões de salinidade, integrando: (a) um estuário macrotidal, habitual no hemisfério norte enquanto as configurações (b-e) representam estuários do sudoeste australiano, caraterizados por uma entrada curta e estreita seguida de uma bacia larga e rasa, até alcançar o rio. Nestes últimos, a reduzida dimensão da desembocadura facilita o seu fecho por deposição sedimentar, enquanto a pequena profundidade e o clima árido favorecem a evaporação, especialmente em períodos de seca.

Estas caraterísticas levantaram questões sobre se tais sistemas deveriam ser considerados estuários, por isso um estudo foi realizado nos estuários do hemisfério sul, onde se notou que, especialmente durante longos períodos de seca ou hipersalinidade extrema, os habitats se tornavam inóspitos. Contudo, estudos posteriores em estuários da América Central e do Sul e do Mediterrâneo confirmam a existência de estuários completamente separados do oceano devido à formação de barras de areia causadas por deposição sedimentar e assim se tornando em hipersalinos. Desta forma, podem continuar a ser classificados como estuários (Potter et al., 2010).

A definição de Dionne (1963), adotada por Perillo (1995), descreve o estuário como uma reentrância do mar num vale fluvial que se estende até ao limite superior da propagação da maré. O autor propõe também um modelo do estuário dividido em três partes: o estuário inferior, com livre conexão com o mar aberto; o estuário intermédio, onde ocorre o encontro vigoroso entre a água doce e a água salgada; e o estuário superior, dominado pela água doce, mas ainda sujeito à influência da maré (ver Figura 2).

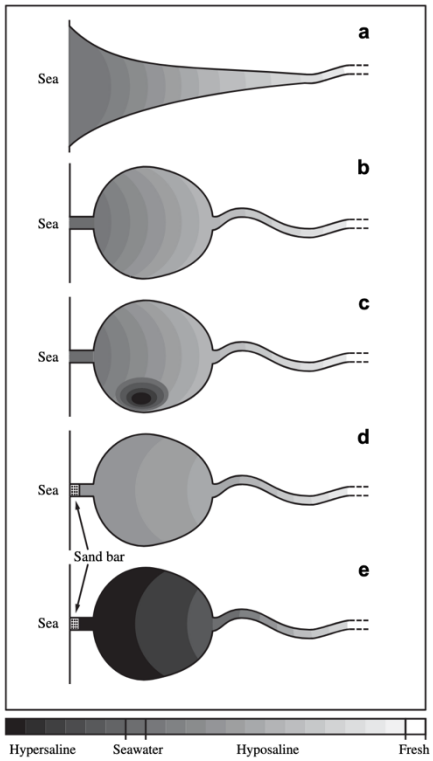

Figura 1 – Configuração dos estuários relativamente à sua geometria, salinidade e ligação ao mar (fonte: Potter et al., 2010).

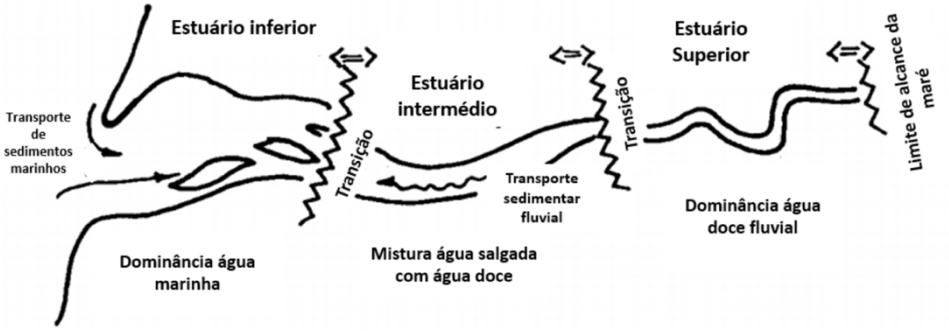

Figura 2 - Regiões constituintes do estuário (fonte: Perillo, 1995).

Esta abordagem feita por Dionne (1963) mostra-se especialmente aplicável ao estuário do rio Douro, que também pode ser segmentado com base nos gradientes de salinidade. No entanto, vale referir que esta definição não considera aspetos de natureza biológica, reduzindo a sua abrangência para classificações integradas.

Em última análise, Perillo (1995) oferece uma definição mais completa e abrangente, integrando os fatores biológicos. Ele descreve um estuário como um corpo costeiro semifechado, que se estende até ao limite efetivo da influência da maré, onde a água salgada entra por uma ou mais ligações ao oceano, e onde se mistura significativamente com água doce da drenagem terrestre, conseguindo sustentar espécies eurialinas, parcial ou totalmente. Esta abordagem distingue-se por incluir uma componente biológica relevante, porém, não aborda fenómenos importantes como o transporte de sedimentos.

É, de facto, desafiador encontrar uma definição universal de estuário, devido à sua variabilidade morfológica, hidrológica, de salinidade e ecológica. Silva (2000) amplia os critérios de classificação do estuário, propondo não só os aspetos físicos anteriormente mencionados, mas também critérios ambientais, como a qualidade da água ou até aspetos estéticos.

2.1.2. O ESTUÁRIO DO RIO DOURO

O rio Douro é um dos principais rios da Península Ibérica, onde desagua no oceano Atlântico através de um estuário de configuração estreita e afunilada, caraterizado por uma elevada dinâmica hidrossedimentar. Localiza-se entre as cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia. Devido à construção da barragem de Crestuma-Lever, a extensão do estuário ficou limitada a cerca de 21.6 km de comprimento e uma área aproximada de 9.8 km^2, delimitado a montante, como pode ser observado na Figura 3 (Iglesias et al., 2021).

Segundo Portela (2008), a dinâmica do estuário pode ser subdivida em três sectores distintos de acordo com a salinidade. O sector superior, com um segmento entre os km 21 e 9, para fins navegacionais e dependente de dragagem; sector médio desde os km 9 até ao km 3, caracterizado pela sua profundidade natural superior a 5 m; e finalmente o sector do estuário inferior, abrangendo os 3 km a partir da desembocadura, que inclui a restinga do Cabedelo e o banco arenoso exterior que se forma na maré vazante e que mostra a importância da dragagem para o acesso ao canal estuarino.

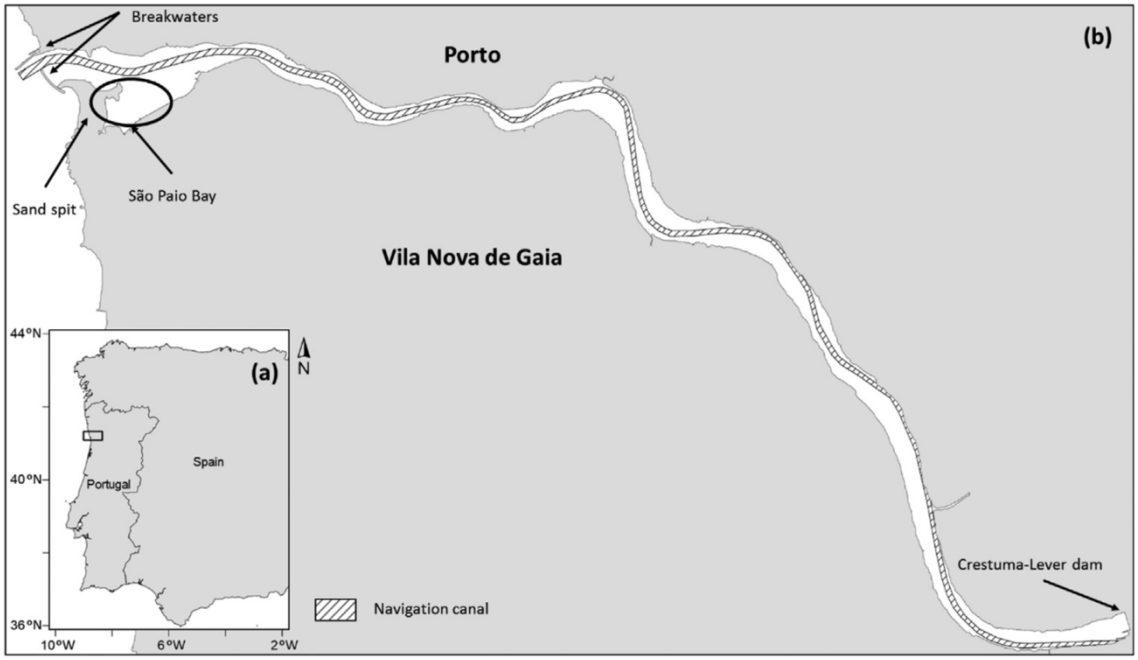

Figura 3 – Enquadramento geográfico do estuário do rio Douro (fonte: Iglesias et al., 2021).

O estuário apresenta uma largura média de aproximadamente 400 m, variando entre um mínimo de 135 m na zona da ribeirinha central do Porto (entre o km 6 e o km 7) e um máximo de 1300 m nas proximidades da embocadura, a montante da restinga do Cabedelo (km 1). As profundidades, referidas ao zero hidrográfico (ZH), situam-se geralmente entre 0 e 10 m, podendo atingir profundidades um

pouco superiores aos 28 m, associadas a secções mais contraídas no canal, curvas exteriores, e em antigos locais de extração de inertes (Portela, 2002).

A barragem de Crestuma-Lever, concluída em 1985, regula a afluência de água fluvial ao estuário, mas fez com que o caudal descarregado deixasse de ser contínuo. Trata-se de uma estrutura de betão com 25.5 m de altura sobre a fundação, 470 m de coroamento e capacidade para descargas máximas de 26 000 m^3/s. O caudal descarregado em Crestuma pode variar entre 0 m^3/s, no verão e picos na ordem de 13 000 m^3/s (caudal com um período de retorno de cerca de 20 anos), com uma média anual de cerca de 505 m^3/s (Azevedo et al., 2010).

Historicamente, antes da edificação da barragem, a influência da maré no estuário podia ser sentida até aproximadamente 35 km da embocadura. A morfologia do estuário, especialmente a presença da restinga arenosa na embocadura, condiciona significativamente os efeitos das marés e ondas, limitando a sua abertura para o oceano (Bastos et al., 2012). Esta região é caraterizada por uma elevada energia de ondas e marés. As ondas oriundas maioritariamente de noroeste e oeste, geram uma corrente de deriva de norte para sul, que se inverte na embocadura. Esta interação demonstra a variabilidade sazonal da restinga e é responsável pela sua existência (Bastos et al., 2012; Portela, 2008).

2.1.2.1. Marés e Dinâmica Sedimentar

No estuário do Douro, as marés resultam da combinação de duas componentes principais: a maré astronómica, com a "forma" de uma onda, provocada pelas interações gravitacionais entre o Sol, a Lua e a Terra, e a maré meteorológica, que resulta de fatores como variações na pressão atmosférica ou provocadas pela ação do vento no período de onda.

A cada quinzena, alternam-se marés vivas e marés mortas, determinadas pelas posições relativas do Sol e da Lua. Quando o Sol e a Lua estão em conjunção ou oposição, os seus efeitos somam-se, resultando na amplitude máxima da maré e na mobilização de maior volume de água. Por outro lado, nas marés mortas, os efeitos cruzam-se e anulam-se parcialmente, resultando na mínima amplitude de maré.

O regime semidiurno, com o período médio de 12,42 h, encontra-se presente no Douro, originando preia-mares e baixa-mares duas vezes por dia lunar. As medições na embocadura registam alturas médias de 3.3 m na preia-mar e 2.6 m na baixa-mar durante as marés vivas, e de 1.3 m e 0.7 m em marés mortas (Portela, 2008). Estes intervalos confirmam a classificação do estuário como mesotidal, apresentando uma variação de amplitude de maré entre 2 e 4 m, conforme indicado por Vieira & Bordalo (2000).

A morfodinâmica de um estuário é muito influenciada pelos caudais fluviais e pelas marés. A maré contribui para o transporte de sedimentos por arrastamento, tanto por arrastamento através da cunha salina, quanto por suspensão na entrada do estuário, com volumes superiores observados em maré viva. O transporte sedimentar no Douro é essencialmente dominado por processos fluviais (Portela, 2008).

2.1.2.2. Salinidade e dinâmica sedimentar

Em estuários parcialmente mistos, a diferença de densidade entre a água marinha e a água fluvial estabelece um regime de circulação bidirecional, com uma corrente de fundo orientada em direção a montante e um fluxo superficial dirigido a jusante. A interação entre estes escoamentos promove a ressuspensão de sedimentos, incrementando a turbidez da coluna de água. Durante a enchente, o fluxo inferior converge, gerando um ponto nulo de turbulência na extremidade da cunha salina, tal fenómeno é evidenciado na Figura 4.

Devido aos caudais fluviais médios baixos, inferiores a 800 m^3/s, o estuário do Douro é classificado como um estuário de cunha salina, ou estratificado, conforme concluído por Vieira & Bordalo (2000). Os registos diários do SNIRH entre 2000 e 2020, apresentam uma média anual de 505 m^3/s, abaixo do limiar crítico. Nesse período, verificou-se que 68 % dos dias ocorreram em regime de cunha salina.

A entrada de sedimentos em suspensão no estuário, provenientes do rio, é conduzida por uma ressuspensão acentuada devido à mistura energética da maré, resultando na redistribuição desses sedimentos entre as camadas de superfície e de fundo (Kostaschuk & Luternauer, 1989).

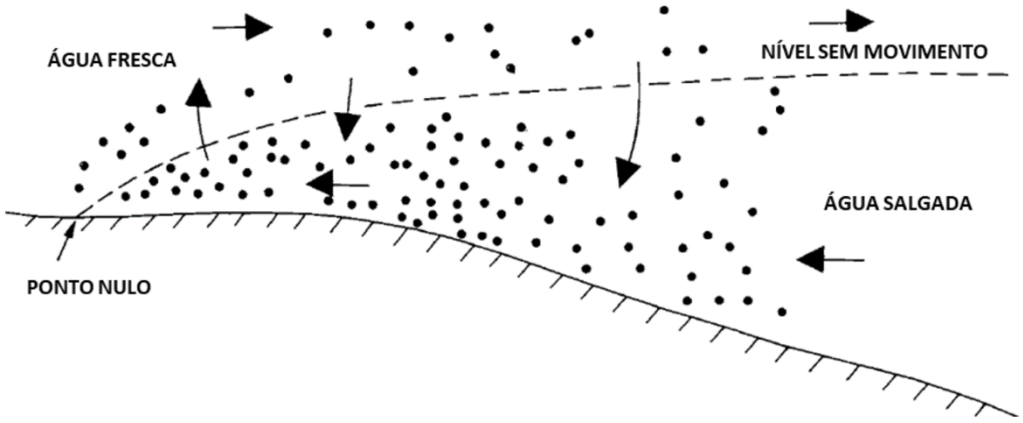

Figura 4 – Formação da cunha salina num estuário (fonte: Dyer, 1995).

Em situações de descarga muito elevada, o estuário torna-se predominantemente de água doce, expulsando totalmente a água marítima, mesmo durante a enchente de maré viva. Para caudais considerados intermédios, a cunha salina forma-se numa extensão mais curta, ocorrendo uma mistura vertical entre a água doce e a água salgada na zona intermédia do estuário. Já em condições fluviais de caudais mais reduzidos, a cunha salina pode avançar até à parte superior do estuário, por vezes atingindo cerca de 2/3 do comprimento do estuário. Nestas circunstâncias, a presença da cunha salina intensifica o transporte de sedimentos devido à turbulência gerada pela maré de enchente, pois as correntes conseguem erodir e manter partículas em suspensão. No entanto, no fluxo vazante os picos de corrente diminuem, reduzindo a capacidade de transporte e consequentemente, a possibilidade de reerosão e de manutenção dos sedimentos em suspensão (Vieira & Bordalo, 2000).

2.1.3. Impactos antropogénicos no Estuário do rio Douro

As atividades humanas nas zonas costeiras e estuarinas incluem navegação, dragagem e extração de areia e agregados, pesca e a aquicultura, extração de petróleo e gás e construção de parques eólicos, drenagem de águas residuais, extração de água, obras de segurança como defesas marítimas e proteção contra inundações, recreação, urbanização, instalação e proteção de cabos, canalizações e túneis, atividades militares e de investigação, podendo todas estas ações isoladas ou em conjunto, comprometer a conservação da natureza dos estuários e zonas costeiras (European Commission, 2011).

No contexto do estuário do Douro, os principais impactos ambientais das atividades humanas decorrem das operações de dragagem e respetivas manutenções, da construção de barragens e infraestruturas de proteção, como é o caso dos dois molhes, bem como do avanço da urbanização nas margens fluviais e na faixa costeira.

2.1.3.1. Urbanização

A intensificação da urbanização nas margens dos rios tende a afetar, de forma progressivamente negativa, o escoamento de sedimentos e de água, impactando os ecossistemas aquáticos. A impermeabilização dos solos resultante da construção urbana altera o regime hídrico, reduzindo os tempos de concentração e aumentando os caudais de cheia. A maioria das águas pluviais é direcionada para redes de coletores, sendo descarregada no meio recetor a um ritmo distinto do natural, distorcendo o escoamento original.

Outros impactos de origem humana, como práticas agrícolas inadequadas e desflorestação, podem, em certas secções, agravar o assoreamento e a erosão das rochas e solos nos rios. Pode verificar-se uma diminuição dos leitos e das albufeiras, o que em situações de caudais reduzidos, provoca uma diminuição do escoamento em caudais baixos e inundações em caudais elevados, devido ao estrangulamento da secção fluvial (APA, 2016).

A modificação biológica está relacionada com o aumento da concentração de poluentes, resultante da diminuição do caudal e das assimetrias intra-anuais no escoamento, comprometendo habitats e espécies aquáticas (APA, 2016).

O transporte sedimentar longitudinal ao longo da costa ao longo da costa desempenha um papel crucial na restauração das praias, em comparação com os transportes transversais ou eólicos, como se pode ver na Figura 5. A falta de sedimentos fluviais implica uma menor disponibilidade para o transporte longitudinal, reduzindo a quantidade de material para o efeito, e, por conseguinte, diminuindo a quantidade de sedimentos para reabastecer as praias e intensificando a erosão. Tal aumento a vulnerabilidade da população face a riscos como a subida do nível do mar, tempestades e cheias.

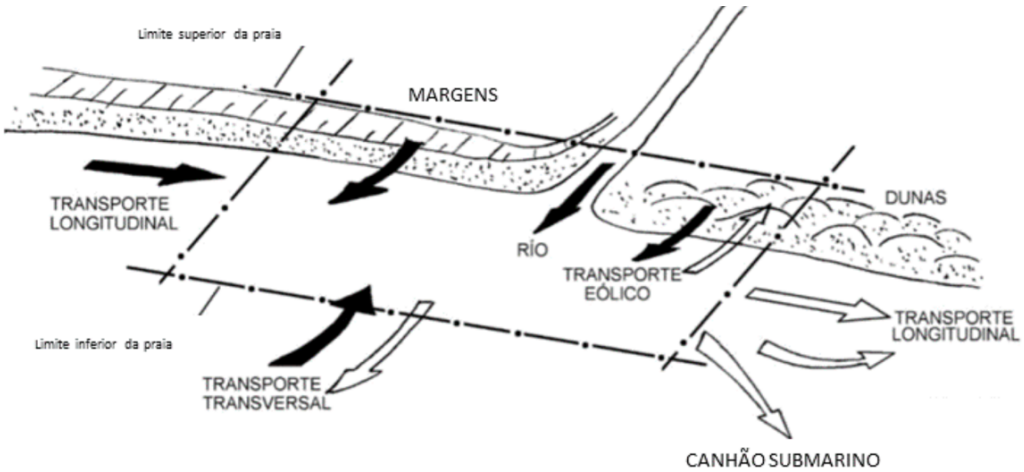

Figura 5 – Transporte de sedimentos na zona costeira (fonte: Sánchez, 2020).

2.1.3.2. Dragagens

As dragagens de estabelecimento e de manutenção, bem como o material dragado, impactam o equilíbrio do regime de escoamento, do transporte sedimentar e dos ecossistemas estuarinos (European Commission, 2011). A dragagem de manutenção é uma atividade periódica ou contínua, essencial para preservar a profundidade de navegação em estuários ou zonas costeiras. Por outro lado, a dragagem de estabelecimento refere-se à intervenção inicial destinada à definição do canal.

Nos últimos vinte anos, a abertura de um canal de navegação alterou consideravelmente a dinâmica do rio Douro e do seu estuário. A via navegável interior, com uma extensão de 200 km, resultou da construção de cinco barragens. Entre 1982 e 1986, com vista a permitir a navegação entre Crestuma e o mar, o estuário foi sujeito a dragagens ao longo dos seus 21 km (Portela, 2002). Desde 1987, têm sido executadas operações de dragagem de manutenção nas zonas inferiores e superiores do estuário (Portela, 2008).

De acordo com Portela (2002), as dragagens dependem do caudal. Em 1990, por exemplo, não foi necessária qualquer dragagem porque, no ano anterior, o caudal superou os 10 000 m^3/s. Por conseguinte, a intervenção para evitar inundações na foz tornou-se dispensável. No entanto, as cheias no estuário superior prejudicam o canal. Embora o transporte de sedimentos reponha praias e protege a costa, a maior parte do material não é reutilizada.

2.1.3.3. Barragens

Tal como a intensificação da urbanização e as dragagens, as barragens exercem um impacto antropogénico profundo, ao interromper o transporte natural de sedimentos, fragmentar a conectividade ecológica e alterar a dinâmica dos habitats aquáticos. O efeito regularizador das barragens, somado às captações de água para abastecimento, gera um desequilíbrio no escoamento fluvial (APA, 2016).

Embora ofereçam vantagens económicas e sustentáveis, os sistemas de barragens funcionam como uma barreira física que interrompe o regime de escoamento natural dos rios, nomeadamente o regime hidrodinâmico. Nas últimas décadas, a retenção sedimentar nas albufeiras tem contribuído significativamente para a alteração da dinâmica sedimentar na bacia do Douro, conjuntamente com a extração de sedimentos e a navegação intensiva no canal fluvial (APA, 2016). Desde os anos 1950, a construção de cerca de 60 barragens e da extração de areia e cascalho, fez com que o fornecimento de sedimentos ao estuário reduzisse (Rocha & Alves, 2002).

Do ponto de vista morfodinâmico, a retenção de material sólido afluente nas barragens contribui parcialmente para a redução do caudal sólido afluente ao estuário (APA, 2014). Magalhães (2001) quantifica a diminuição do fornecimento de sedimentos grosseiros do rio Douro que passou de 1.6 - 1.8 $\times 10^6$ m^3/ano no período pré-barragens para 0.25 - 0.3 $\times 10^6$ m^3/ano após a construção da Barragem de Crestuma-Lever. Embora estes valores expliquem a erosão costeira a sul do estuário, não se baseiam em evidências diretas.

2.2. COMPORTAMENTO MORFODINÂMICO DA RESTINGA DO ESTUÁRIO DO DOURO

A restinga na foz do rio Douro apresenta-se como uma estrutura sedimentar altamente dinâmica, exercendo função de barreira protetora da barra do Douro e das margens do estuário contra temporais. Estas formações recebem maior atenção quando se localizam em áreas com elevada densidade populacional, dada a necessidade de estabilizar a sua dinâmica natural. Qualquer alteração nessa dinâmica pode intensificar o risco de inundações e erosão na faixa costeira, levando por vezes a intervenções humanas.

A restinga, corpo sedimentar ancorado na margem esquerda do estuário em orientação perpendicular ao eixo principal, apresenta um comprimento médio de 800 m e uma largura média de 300 m, com uma área que varia normalmente entre 220 000 m^2 e 270 000 m^2. É constituído por sedimentos provenientes da bacia hidrográfica do Douro e areias provenientes da deriva litoral, que se depositam ao chegar ao estuário devido à ação combinada da maré e do rio (Santos et al., 2010). Por outro lado, em caso de

cheia, a restinga deve funcionar como um fusível, permitindo, com a sua rotura, a saída para o mar das águas pluviais, evitando inundações.

Os registos históricos comprovam que antes da construção dos molhes, para caudais superiores a 10 000 m^3/s, como o caso das cheias de 1909 e 1962, ocorreria a rotura ou destruição parcial da restinga, por ser muito sensível às descargas fluviais e a outros eventos extremos (Bastos et al., 2012). Após construção dos molhes, a restinga está mais robusta e fortalecida, não sendo ainda totalmente conhecido o seu comportamento perante uma cheia daquela ordem de grandeza, colocando em risco o seu efeito fusível.

Segundo Baptista (2006) e Santos (2014), a cheia de 1909 provocou alterações profundas na restinga, com um caudal máximo de 16 700 m^3/s na Régua, levando cerca de um ano a recuperar a sua forma original (ver Figura 6).

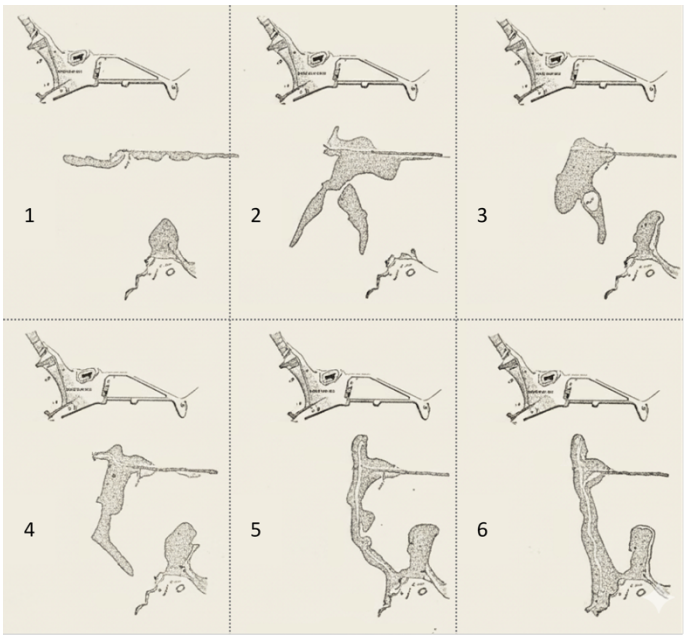

Figura 6 – Evolução da restinga ao longo do ano de 1910, após a cheia de Dezembro de 1909 (adaptado de Baptista, 2006).

Os molhes construídos na foz do rio Douro fixaram a posição da restinga, tornando-a menos vulnerável à agitação marítima, ao vento e aos caudais fluviais, embora o setor sudeste continue exposto a esses fenómenos, o que tem alterado a dinâmica da Baía de São Paio. O formato em "T" da restinga, com pequena projeção para norte, não compromete o canal de navegação, e o muro Luís Gomes de Carvalho cumpre o seu propósito original. No exterior do estuário, o banco arenoso que se encontra submerso e que em conjunto com a restinga deveria proteger as margens durante tempestades, deixa agora a margem direita desprotegida devido ao recuo da restinga para o interior (Bastos et al., 2012). Para mitigar o processo erosivo, proteger as margens e aprimorar as condições do canal de navegação, foram construídas, entre os séculos XIX e XXI, diversas obras principais de defesa costeira. A disposição das componentes e a evolução da restinga estão esquematizadas na Figura 7.

Figura 7 – Evolução morfológica da restinga. Foto aérea de Novembro de 2008, com os contornos de 1982 e 1950. 1: muro Luís de Carvalho construído em 1820; 2: Baía de São Paio; 3: quebramar norte; 4: quebramar Sul; 5: acesso rodoviário (fonte: Bastos et al., 2012).

O molhe Luís Gomes de Carvalho, concluído em 1820, estende-se por 600 m e separa a baía de São Paio do canal do estuário. A norte da embocadura do Douro ergueram-se, entre 1790 e 1886, os molhes do Touro e de Felgueiras, sendo neste último instalado um farolim. De forma a melhorar as condições de segurança das zonas ribeirinhas e do acesso à barra, bem como impedir ou reverter a erosão, foram projetados e construídos, entre 2004 e 2009, dois quebramares na zona da foz do rio Douro. Segundo Veloso-Gomes et al. (2009), o quebramar norte tem como função proteger o canal de acesso e o estuário da agitação marítima, atuando como uma barreira física, enquanto que, as estruturas localizadas a sul visam reforçar a restinga e limitar o assoreamento do canal, ao interromper o transporte de sedimentos para o interior do canal.

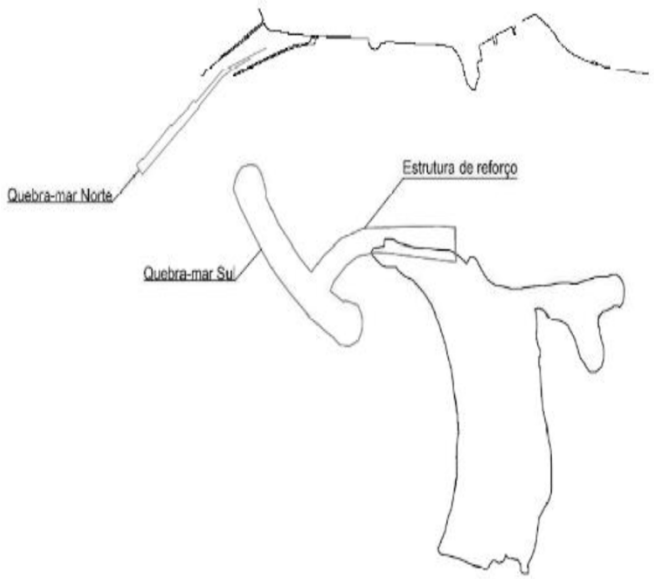

Figura 8 – Esquema das estruturas implantadas na embocadura do Douro (fonte: Gonçalves, 2021).

Na Figura 8, é possível ver os dois molhes. No lado sul da embocadura, ergue-se um quebramar destacado construído no início de março de 2005, galgável e de baixa cota de coroamento (+ 6 m Z.H.), com 450 m de extensão e protegido por blocos cúbicos Antífer de betão de alta densidade, provocando erosão. Foi ainda edificada uma estrutura adicional de reforço, quase perpendicular ao quebramar com uma extensão de 460 m. Entre 2004 e 2008, realizou-se no lado norte da embocadura do rio Douro e em articulação com o molhe de Felgueiras, a construção de um novo quebramar de 350 m de extensão e 200 m de enraizamento em terra, com o objetivo de prolongar o espaço pedonal da marginal, com uma cota de coroamento de + 7 m (ZH) (Teixeira, 2012). Voltou-se a registar acreção da linha de costa.

A forma e estabilidade da restinga dependem essencialmente dos padrões hidro-morfodinâmicos do rio Douro e da agitação marítima. A dinâmica da restinga era influenciada pelos caudais, pelo vento e pelas ondas antes da construção dos molhes, verificando acreção de sedimentos e a expansão da restinga no Norte, mas sem um padrão claro para cada secção. Para eventos extremos de descargas fluviais, a erosão era generalizada e para ventos e ondas extremas havia acreção nas secções de nordeste e sudoeste, com um aumento da área e do volume entre os níveis de + 1 e + 2 m ZH, respetivamente. Logo após a construção dos novos molhes, já mencionados, a ação combinada da agitação marítima, do vento e dos caudais descarregados já não parece impactar toda a extensão da restinga (Bastos et al., 2012). As Figura 9 e Figura 10 comparam os cenários pré e pós-construção dos molhes, respetivamente.

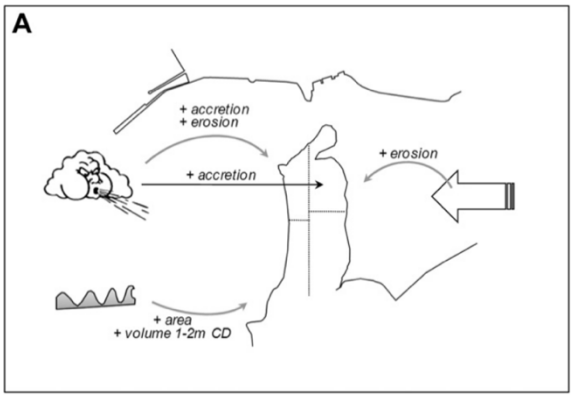

Figura 9 – Ação da descarga fluvial, vento e ondas nas quatro secções da restinga antes dos quebramares (fonte: Bastos et al., 2012).

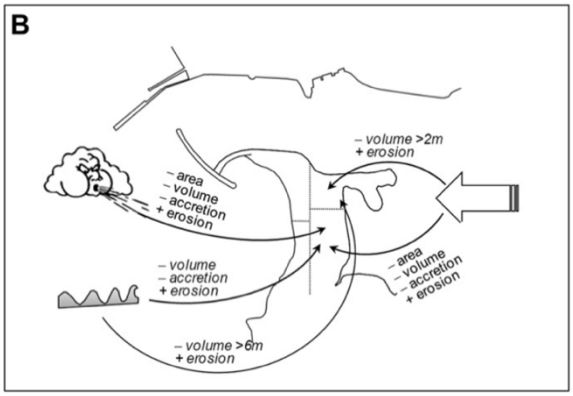

Figura 10 – Ação da descarga fluvial, vento e ondas nas quatro secções da restinga após os quebramares (fonte: Bastos et al., 2012).

De modo geral, a restinga apresenta-se atualmente menos vulnerável a eventos extremos, os quais já não parecem afetá-la na sua totalidade. No entanto, o fortalecimento progressivo desta estrutura pode criar um bloqueio ao escoamento de cheia, provocando inundações nas áreas adjacentes. Simulações realizadas por Iglesias et al. (2018) concluíram que a nova configuração dos molhes e o consequente reforço da restinga vão contribuir para um aumento dos níveis de água na área estuarina durante um evento de cheia extrema. Complementarmente, Santos et al. (2010) realizaram um estudo para aprimorar o conhecimento sobre as respostas da restinga aos ciclos naturais de evolução e à influência das atividades humanas, analisando a evolução da linha de costa e modelações morfológicas da restinga, recorrendo a métodos de interpolação numérica, permitindo estimar a sua dimensão.

2.3. CHEIAS HISTÓRICAS NO DOURO

Uma cheia pode ser entendida, em primeiro lugar, como o transbordamento temporário de água que excede a capacidade de escoamento do canal fluvial (Petrow & Merz, 2009). Do ponto de vista da gestão do risco, trata-se de um evento cuja probabilidade de ocorrência pode ser caraterizada estatisticamente e cujo impacto depende da vulnerabilidade das áreas inundadas (Apel et al., 2006).

As cheias naturais resultam de fenómenos meteorológicos como a precipitação, o derretimento de gelo e as tempestades tropicais, em conjunto com as caraterísticas da bacia hidrográfica, incluindo o relevo, a inclinação e o tipo de solo. Existem dois tipos principais de cheias fluviais: lentas e rápidas. Nas grandes bacias, as cheias lentas resultam de precipitações moderadas ou pontualmente intensas que se prolongam por vários dias ou semanas sobre áreas alargadas. Esse regime gera uma resposta hidrológica mais gradual, o que permite ativar planos de evacuação com base em previsões em tempo real, embora danos severos sejam possíveis se as medidas não forem adotadas a tempo. Já as cheias rápidas ocorrem devido a precipitações intensas e localizadas, com uma resposta hidrológica muito rápida, o que dificulta a implementação de planos de evacuação, uma vez que não é possível prever o evento em tempo real. São chuvas do tipo convectivo. Por fim, as inundações de origem humana decorrem geralmente da rotura de barragens ou diques (Peixoto, 2016). As cheias podem ainda ser classificadas quanto à sua génese, número de pontas de cheia, periodicidade, magnitude, recorrência, velocidade, severidade e índice de magnitude.

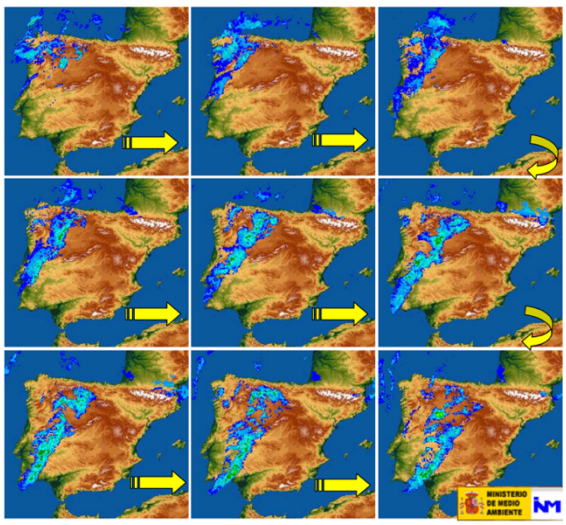

Figura 11 – Propagação da superfície frontal sobre a Península Ibérica, aquando da cheia do Douro em Dezembro de 2002 (fonte: Rodrigues et al., 2003).

Na Península Ibérica verifica-se a ocorrência de ambos os tipos de cheia. As superfícies frontais associadas a núcleos de baixa pressão formam-se no Oceano Atlântico e atravessam o território, sendo predominante a direção NO-SE. A interação destas massas de ar com as cadeias montanhosas intensifica a precipitação, como a que ocorreu em Dezembro de 2002 (ver Figura 11). Para além das superfícies frontais, ocorrem também fenómenos de origem convectiva, responsáveis por precipitações muito localizadas e de difícil previsão, devido à sua rápida evolução (Peixoto, 2016). A região norte caracteriza-se por valores elevados de precipitação anual e, consequentemente, as chuvadas são as principais causas das cheias.

Na foz do Douro, definem-se como cheias extraordinárias os eventos em que o nível de água ultrapassa a cota + 6 m junto à ponte Luís I, uma vez que a esta altitude o escoamento galga já o cais da Ribeira (margem direita) à cota de 5,90 m. Importa salientar que, nesse momento, a zona de Miragaia se encontra submersa a partir da cota + 4,19 m. Na Régua consideram-se extraordinárias as cheias que inundam a Avenida João Franco (cota + 58 m), o que implica uma elevação do nível fluvial em cerca de 13 m e corresponde, em média, a um caudal da ordem de 6000 m^3/s. A recolha e compilação de registos históricos de cheias constituem um alicerce fundamental para identificação de padrões de risco e para a compreensão da frequência e severidade dos desastres associados a inundações (Aires et al., 2000). Na Figura 12 encontram-se os registos dos níveis máximos de cheia registados desde 1739 até 2006 em Vila Nova de Gaia.

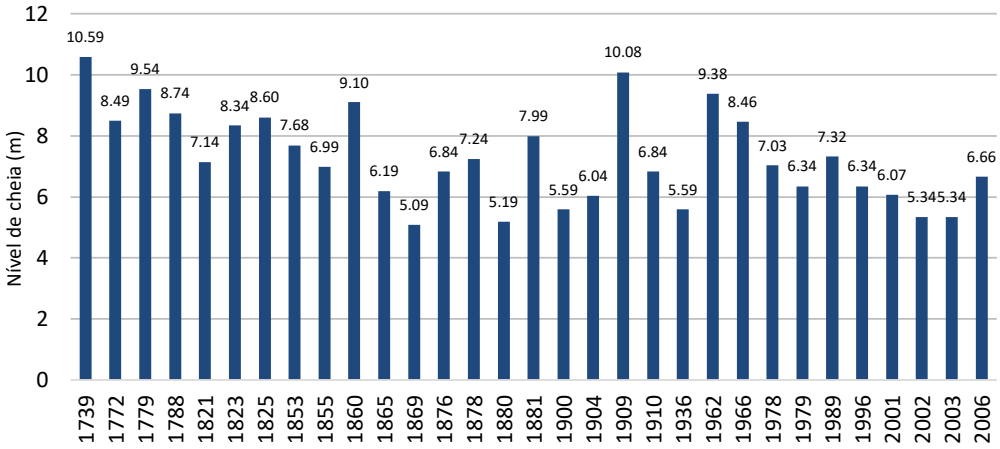

Figura 12 – Níveis máximos de cheia, em relação ao ZH, registados ao longo dos anos no Douro (1739 a 2006) (fonte: Direção Municipal de Bombeiros e Proteção Civil de Vila Nova de Gaia).

O rio Douro destaca-se por ser o mais caudaloso e aquele que drena a bacia mais extensa da Península Ibérica. O seu regime apresenta variação significativa, com um caudal que pode ser dez vezes maior em fevereiro do que em agosto. As ocorrências de cheias no Douro são irregulares, havendo períodos de mais de uma década sem registo de nenhuma (Daveau, 2000). De acordo com Daveau (2000), a maior cheia historicamente registada no rio Douro ocorreu em Dezembro de 1739, alcançando um caudal estimado de 19 000 m^3/s na cidade do Porto. Oliveira & Silva (2001) também validam que esta foi a maior cheia no Douro, embora apresentem um caudal ligeiramente diferente, para o mesmo evento, de 18 000 m^3/s. As cheias de maior caudal subsequentes foram as de Dezembro de 1909 e Janeiro de 1962, conforme documentado por Oliveira & Silva (2001). Ambas as cheias tiveram uma forte contribuição de chuvas drenadas na parte espanhola, que, num espaço de 3 dias, gerou uma cheia de 7000 m^3/s de pico, o que equivale a um período de retorno de 7 anos (Rodrigues et al., 2003).

No rio Douro existem 15 barragens, sete em Espanha e oito em Portugal (Bastos et al., 2012). Em princípio, a construção de barragens beneficia para a laminação de cheias, o que significa que uma parcela significativa do volume de água das cheias poderia ser armazenada nas albufeiras, reduzindo os seus picos. Contudo, no caso do rio Douro, observa-se que as barragens operam a fio-de-água, o que lhes confere uma capacidade útil limitada. Dessa forma, conseguem controlar apenas cheias com caudais até 9000 m^3/s (Araújo et al., 2002). A inclinação do canal desempenha um papel crucial em determinados troços, visto que o seu aumento acelera significativamente o escoamento, elevando a probabilidade de ocorrência de fenómenos de erosão e acreção. Nas margens próximas ao estuário, há uma escassez de zonas de retenção de água. Isso deve-se às ações antropogénicas, que promovem a impermeabilização do solo e, em conjunto com as grandes inclinações, favorecem o escoamento superficial, aumentando assim a possibilidade de inundações (Peixoto, 2016).

O plano de Gestão das Bacias Hidrográficas (PGBH) que integra a região hidrográfica (RH) do Douro (RH3) indica que as cheias registadas estão associadas a precipitações intensas e de longa duração, que afetaram extensas áreas. A maior contribuição da precipitação ocorre no terço final da bacia do rio Douro. Nas sub-bacias costeiras, de dimensão reduzida e forte declive, o regime hídrico é nitidamente torrencial. A proximidade do oceano e a resposta hidrológica rápida destes afluentes explicam subidas bruscas de nível mesmo quando os totais de precipitação são inferiores aos registados a montante (APA, 2012). Na Tabela 1 são apresentados os caudais de ponta de cheia registados em várias secções no curso principal do rio Douro.

Tabela 1 – Caudais de ponta de cheia registados no rio Douro (fonte: APA, 2012).

Local	Área da bacia (km^2)	Caudais de ponta de cheia (m^3/s)						
		1936	1939	1947	1948	1962	1966	1989
Miranda	63 665	3 740	6 960	4 450	3 210	7 300	5 872	3 377
Pocinho	81 005	6 440	7 250	6 420	6 420	10 720	8 450	7 620
Régua	91 119	8 600	8 650	7 150	9 630	15 720	12 500	11 800
Porto	97 173	11 980	12 220	11 080	12 060	17 000	14 600	13 484*

* valor referente à secção da barragem Crestuma-Lever. Os restantes valores do Porto são referidos à secção da estação hidrográfica de Atães, situada a cerca de 5 km a jusante da barragem.

Desde a cheia de 1989, com um caudal de 11 800 m^3/s, não se registam caudais iguais ou superiores a 10 000 m^3/s no Douro. Os episódios de cheias posteriores de 1996 (8900 m^3/s), 2001 (8550 m^3/s) e 2002-2003 (cerca de 7400 m^3/s) ficaram abaixo desse limiar e, além disso, não exibiram uma segunda componente de caudal, características das grandes cheias históricas. Por essa razão, estes eventos não podem ser incluídos entre os mais severos da série (Rodrigues et al., 2003).

A diminuição da magnitude deve-se, em grande parte, à existência da cascata de barragens portuguesas (Carrapatelo, Bagaúste, Valeira, Régua e Crestuma-Lever). A gestão dos volumes úteis permite laminar parte das pontas de cheia, reduzindo os picos de caudal, embora não seja suficiente para anular por completo um caudal da ordem de 12 000 a 14 000 m^3/s. Este facto confirma a necessidade de manter planos de emergência atualizados. A gestão dos volumes úteis leva a que as cheias hoje sejam menos frequentes.

2.3.1. CHEIA DE 1909

Na véspera do Natal, entre 17 e 25 de Dezembro de 1909, as populações da cidade do Porto e de Vila Nova de Gaia presenciaram uma das cheias mais destrutivas de que há memória. A subida progressiva das águas, provocada por precipitação intensa e persistente, galgou as margens do Douro e causou um rasto de destruição em ambas as margens que inclui edifícios nas zonas ribeirinhas, inúmeras habitações, infraestruturas e cerca de quarenta embarcações, provocando oito mortes. A violência da corrente conferiu ao rio um aspeto tumultuoso, com consequências severas, conforme observado nas Figura 13 e Figura 14. A intervenção de várias instituições do Estado foi indispensável nos trabalhos de socorro e reconstrução, deixando marcas profundas na memória coletiva dos portuenses (Vieira & Costa, 2014).

Classificado como cheia extraordinária, o evento atingiu na Régua, nos dias 23 e 25, um caudal máximo estimado de 16 700 m^3/s, valor apenas ultrapassado pela cheia de 1739 que terá atingido os 18 000 m^3/s de caudal. Gerada por sucessivas frentes atlânticas, apresentou dois picos de caudal, e o nível de água ficou a escassos 80 cm do tabuleiro inferior da Ponte Luís I, ilustrado na Figura 15. Os estragos produzidos na margem esquerda foram especialmente graves, onde uma corrente feroz dragou o leito até cerca de -3.5 m em relação ao ZH, assoreando toda a extensão do cais quase até à cota de preia-mar. A zona ribeirinha do Porto e de Gaia ficou praticamente arrasada, como documentam as várias marcas de nível ainda visíveis causadas pela cheia (Pereira et al., 2016; Vieira & Costa, 2014).

Figura 13 – Cheia de 1909. Destruição na ribeira de Gaia (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

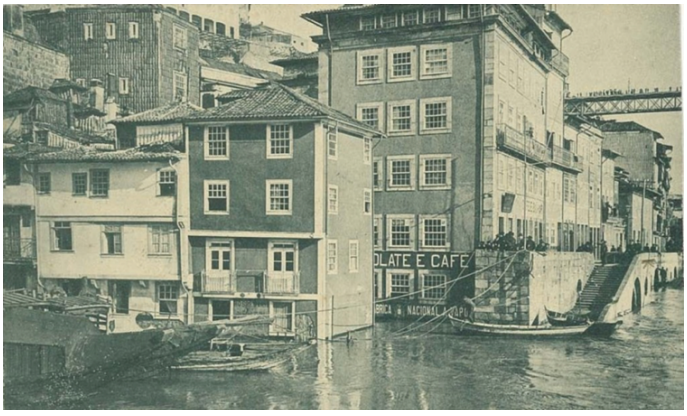

Figura 14 – Cheia de 1909. Senhora de Boa Passagem em Gaia completamente inundada (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

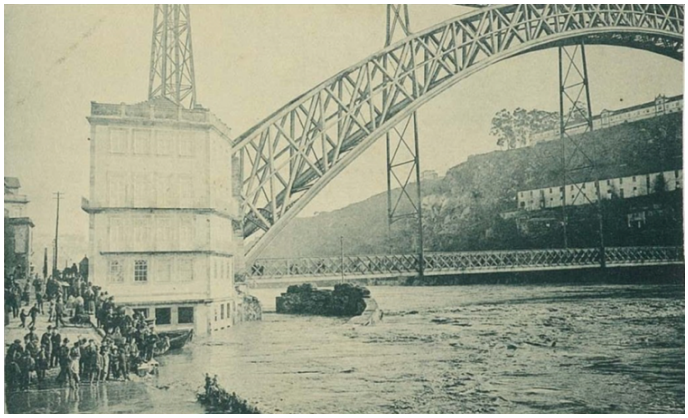

Figura 15 – Cheia de 1909. Nível da água atingido perto da Ponte Luís I (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

Os danos foram extensos. Registou-se, por exemplo, a abertura de um rombo de 14×11 m no muro de suporte do primeiro lanço da estrada da Circunvalação, imediatamente a jusante da Ponte Maria Pia, bem como a destruição de escadas, paredões, calçada e outras infraestruturas portuárias. Logo após a inundação, iniciaram-se trabalhos de reparação com o apoio de um destacamento de pontoneiros da Arma de Engenharia, responsáveis, entre outras intervenções, pela reconstrução do Cais da Estiva e das Escadas da Rainha. As obras abrangeram trabalhos em cantaria, carpintaria e remoção de areias e lodo, totalizando 8947.7 réis, verba integrada num orçamento global previsto de 16 000 réis (Pereira et al., 2016). A magnitude dos estragos físicos traduziu-se igualmente em impactos socioeconómicos significativos.

A cheia atingiu na Régua a cota de 26.30 m, superando os valores registados nas cheias de 1860 (24.46 m) e de 1910 (19.60 m). Estima-se que o nível máximo na foz tenha sido ainda mais elevado, já que a cheia intensificava à medida que alcançava o estuário. A Figura 16 mostra o hidrograma de cheia, entre os dias 23 e 25 de Dezembro, enquanto que a Figura 17 ilustra a evolução diária da altura da água entre 15 e 30 de Dezembro, segundo as leituras de Narciso Marques (Pereira et al., 2016; Rodrigues et al., 2003).

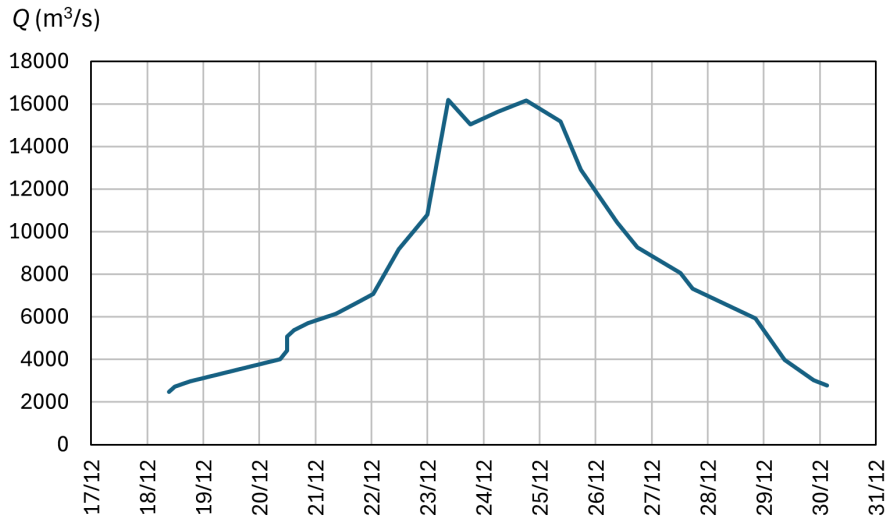

Figura 16 – Hidrograma da cheia de 1909 (adaptado: Vieira & Costa, 2014).

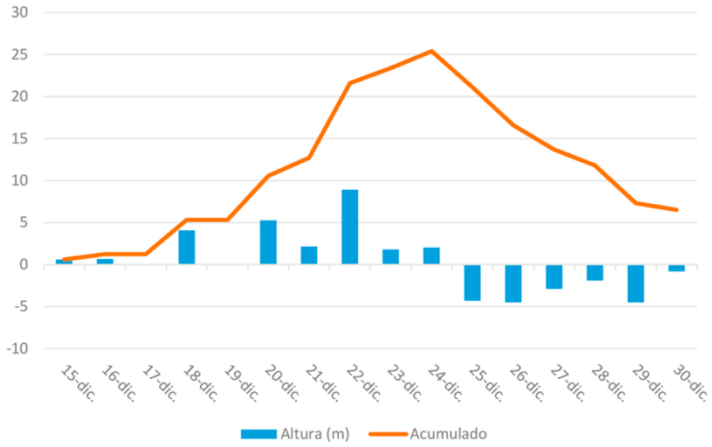

Figura 17 – Evolução da altura das águas na Régua (fonte: APA, 2016).

Segundo Pereira et al. (2016), o evento hidro-geomorfológico de 1909 destacou-se não só pelo maior número de episódios de cheia registados numa única semana, mas também pelo recorde de deslizamento de terras em Portugal, causando impactos significativos também em Espanha, sobretudo na bacia do Douro. Na Península Ibérica, este tipo de precipitação extrema que ocorre durante o inverno tem sido historicamente associado a inundações progressivas nos grandes rios e, pontualmente, a enxurradas rápidas e deslizamentos que geram fortes repercussões socioeconómicas. As condições sinópticas observadas no Nordeste da Península confirmam a presença de um rio atmosférico alongado, responsável por um fluxo contínuo de humidade que potenciou os acumulados de precipitação. Simultaneamente, a presença de um jato em altos níveis (250 hPa) e de um jato em baixos níveis (900 hPa), ambos orientados sudoeste para nordeste em direção à Península, juntamente com a divergência em altitude e convergência em baixos níveis, favoreceu precipitação em grande escala. No posto pluviométrico da Guarda houve um valor máximo diário de precipitação de 185.2 mm registado em 22 Dezembro 1909, correspondendo a um período de retorno de 141 anos, com um total atingido durante o evento extremo de 343.9 mm.

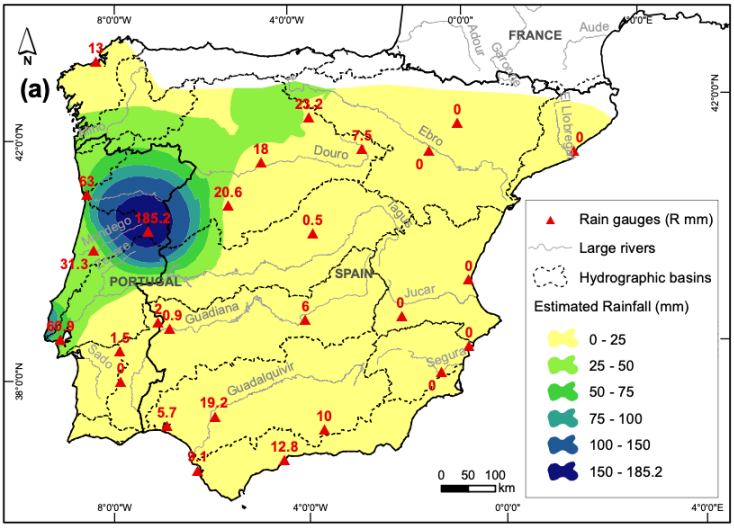

Figura 18 – Precipitação total de 22 de Dezembro 1909 (fonte: Pereira et al., 2016).

2.3.2. CHEIA DE 1962

A cheia de 1962 foi um evento hidrológico com período de retorno próximo de 100 anos e precipitação concentrada sobretudo no sector ocidental da bacia do Douro (Oliveira & Silva, 2001). Novamente a sucessão de sistemas frontais sobrepostos elevou o caudal até 15 720 m^3/s na estação da Régua, onde a cota atingiu 67.7 m, isto é, cerca de 23 m acima do leito do rio. No dia 2 de Janeiro de 1962, às 18h00, a taxa de precipitação horária no posto meteorológico do Porto ultrapassava 20-25 mm/dia, valor representativo do episódio pluvioso que afetou grande parte do país, evidenciado na Figura 19. Ainda assim, a magnitude hidráulica de 1962 ficou abaixo dos 16 700 m^3/s de 1909, como discutido anteriormente.

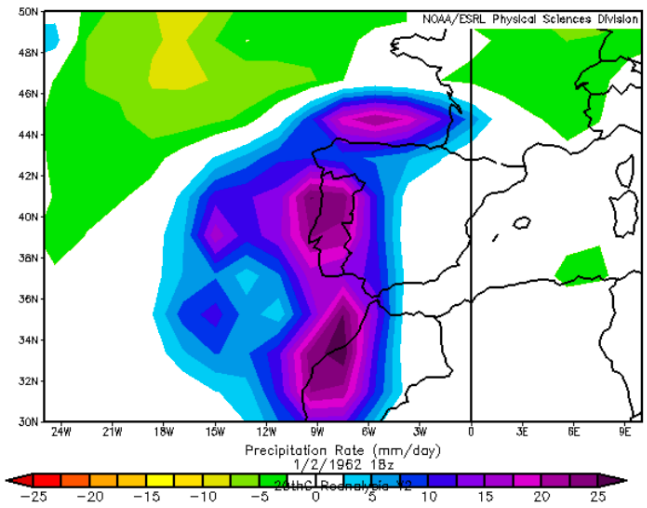

Figura 19 – Taxa de precipitação do dia 02/01/1962 às 18h00 (fonte: Santos, 2015).

O hidrograma da cheia foi construído com base na série de caudais horários registados na Régua, sendo ajustado de forma que o pico do caudal coincidisse com as 00h00 horas do dia 3 de Janeiro de 1962. Esta referência foi definida de acordo com o relato de Silva (2021).

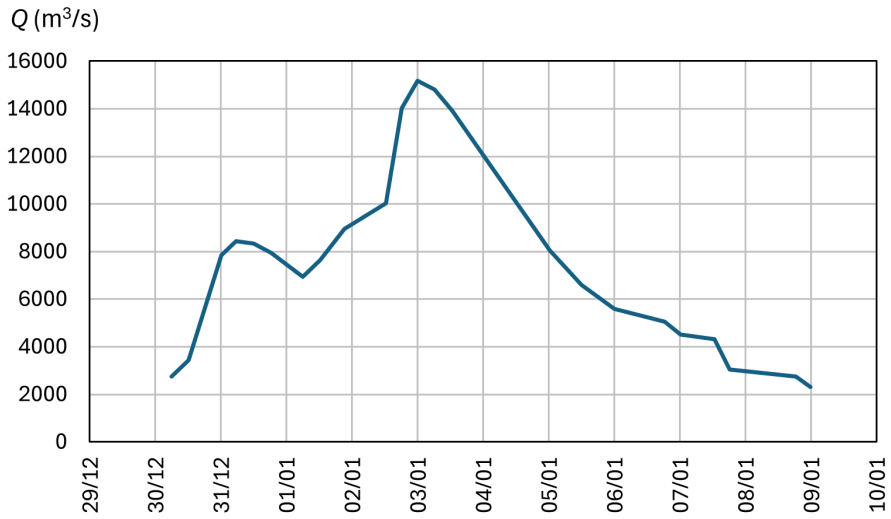

Figura 20 - Hidrograma da cheia de Janeiro de 1962 na Régua (adaptado: Rodrigues et al., 2003).

A Figura 21 permite comparar as cheias de 1909 e 1962, referenciando ao ano histórico 1909, ambas resultantes de sucessivas passagens frontais de origem atlântica. A análise do hidrograma evidencia quatro aspetos fundamentais:

- dois pulsos de precipitação – em 1909 observam-se duas cristas bem marcadas, a 23 e 25 de Dezembro, com pico máximo de 16 700 m^3/s; em 1962 o segundo pulso domina e atinge um máximo de 15 720 m^3/s;
- duração em regime extremo – a cheia de 1909 manteve caudais superiores a 10 000 m^3/s durante cerca de 3,5 dias, enquanto em 1962 essa duração não ultrapassou 2,5 dias. Esta diferença reflete a distribuição temporal da precipitação e, possivelmente, alguma laminação a montante em 1962;
- velocidade da subida – em 1962 o caudal aumentou rapidamente de 2000 para 8000 m^3/s em menos de 24 h, revelando resposta hidrológica mais brusca; em 1909 a subida foi mais gradual, mas culminou num pico mais elevado e prolongado, explicando danos mais extensos no Douro;
- persistência e declínio – a cheia de 1909 apresenta uma curvatura mais "pontiaguda", mas mantém vazões elevadas por mais tempo, sugerindo um evento mais persistente, enquanto que em 1962 a recessão foi mais linear, porém acelerada, com flutuações acentuadas após o pico.

Portanto, as grandes cheias no Douro geralmente têm origem na passagem sucessiva de sistemas frontais, com o sistema mais intenso ocorrendo no final dessa sequência. Essa dinâmica resulta num hidrograma de cheia bimodal, onde o segundo pico "monta" sobre a recessão do primeiro. Essa primeira recessão, por sua vez, pode apresentar um perfil cicloidal, que é a justaposição de picos menores (Rodrigues et al., 2003).

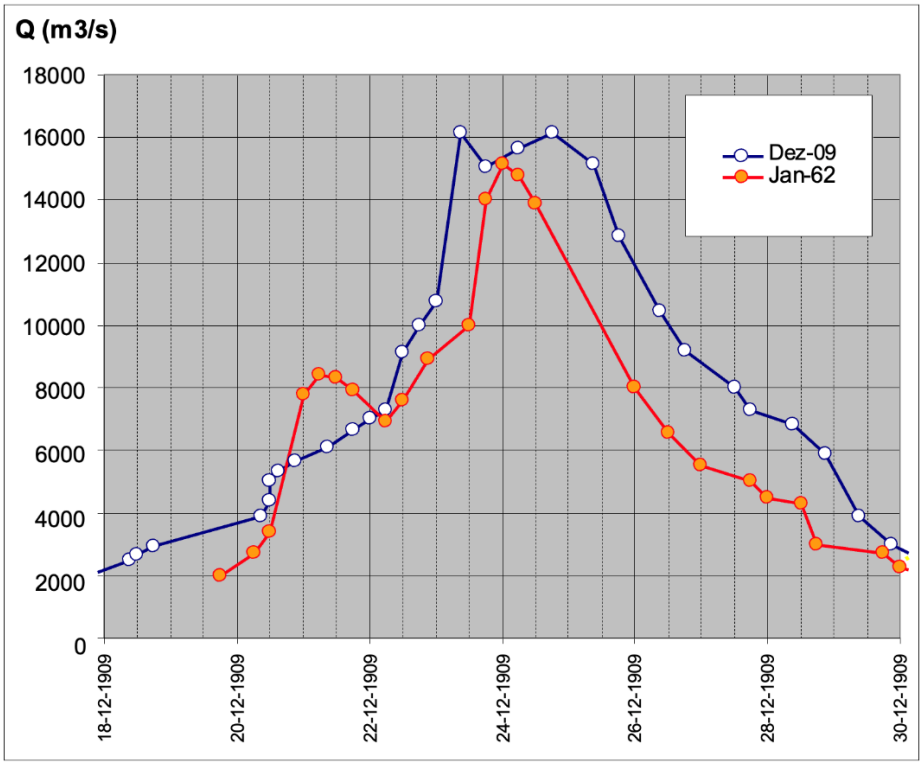

Figura 21 – Hidrograma comparativo das cheias de 1909 e 1962 (fonte: Rodrigues et al., 2003).

Segundo Silva (2021), logo na madrugada de 1 de Janeiro de 1962, soou o alerta de cheia no Porto quando, na Régua, o nível da água atingiu 12.8 m. Perante este sinal, as autoridades portuenses ligadas à navegação fluvial reforçaram as amarras dos barcos fundeados no Douro e ordenaram a evacuação das respetivas tripulações. Apesar do esforço, uma traineira que se encontrava no estaleiro do Areinho soltou-se, foi arrastada pela corrente, embateu em várias barcaças ao longo do rio e acabou por afundar cerca de meia centena destas. O colapso da navegação seria apenas o primeiro sinal da devastação que, horas depois, se abateu sobre as zonas ribeirinhas.

Na manhã de 2 de Janeiro na Régua, a situação agravou-se. Às 09h00, o nível já rondava 17 m e, perto da meia-noite, ultrapassou os 24 m. Nessa mesma noite ocorreu a primeira vítima mortal: o capitão do cargueiro espanhol *Puerto Alicante*, isolado a bordo e sem possibilidade de regressar em segurança à margem, lançou-se à água e desapareceu na forte corrente. As Figura 22, Figura 23 e Figura 24 captam o impacto causado pela cheia na cidade do Porto, mostrando o Cais da Estiva, a Ribeira e as margens de Gaia completamente submersas pelas águas às 13h00 do dia 3 de Dezembro (Silva, 2021).

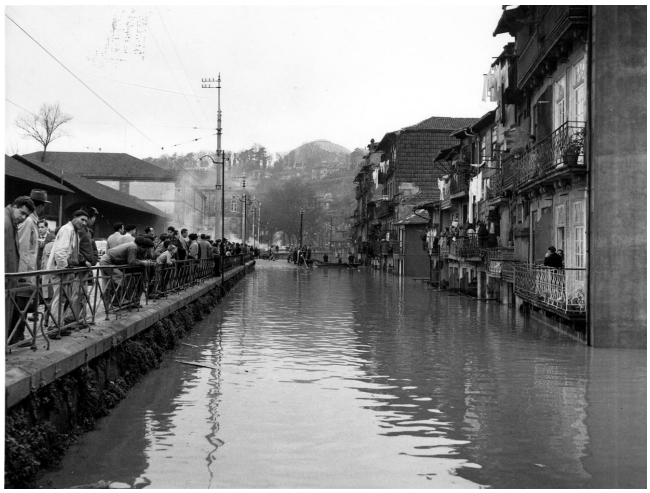

Figura 22 – Pormenor das cheias de 1962, na zona da Alfândega Nova em Miragaia (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

Figura 23 – Aspeto da cheia de 1962 na cidade do Porto (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

Figura 24 – Aspeto da cheia de 1962 na cidade do Porto, vista do tabuleiro superior da ponte Luís I (fonte: Arquivo Municipal do Porto).

2.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O substrato rochoso do estuário do Douro é composto por granito e por rochas metamórficas, sobretudo xisto (Mucha et al., 2003), estando localizado num vale estreito. As margens apresentam um forte declive e são formadas essencialmente por cascalho e areia (Portela, 2008).

A camada de sedimentos que recobre o substrato atinge cerca de 40 m de espessura (Portela, 2008). No estuário superior predominam sedimentos mais grossos, maioritariamente cascalho de areia ou areias com cascalho e com menos de 1 % de partículas finas. Seguindo-se a zona entre os 2 e os 9 km, os sedimentos tornam-se progressivamente mais finos, com presença de argilas e siltos, regressando à predominância de areias grosseiras já na embocadura (IPTM, 2003; Portela, 2008).

Durante as cheias, as partículas de menor granulometria são transportadas até à plataforma continental, sendo o rio Douro responsável por cerca de 79 % desse aporte (Araújo et al., 2002; Dias et al., 2002).

As intervenções de dragagem e extração de inertes no estuário do Douro têm longa data. Após a conclusão da barragem de Crestuma, a extração de agregados deixou de ocorrer no estuário, passando a realizar-se apenas na respetiva albufeira. Já as dragagens, que desde 1987 se limitam às zonas superiores e inferiores devido ao maior calado do estuário médio, totalizaram, entre 1987 e 2001, um volume médio anual de aproximadamente 0.4×10^6 m^3/ano (Portela, 2008).

Ao comparar os caudais médios diários descarregados em Crestuma com o volume dragado (ver Figura 25), verifica-se que, após descargas elevadas, não foram necessárias dragagens na entrada do estuário, o que indica que as cheias ou caudais altos asseguram a manutenção do canal de navegação. No estuário superior, porém, essa correlação não se confirma, sendo necessário recorrer a dragagens mesmo após grandes descargas (Portela, 2008).

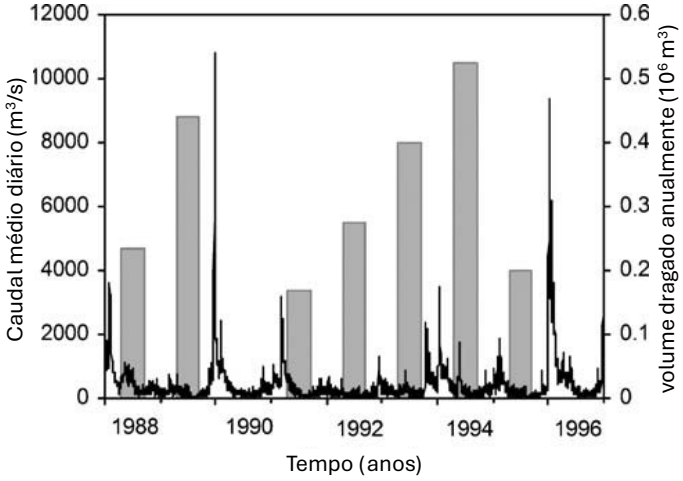

Figura 25 – Caudais médio diário na barragem de Crestuma (representado por linhas) e dragagens anuais na entrada do estuário (representadas pelas barras) no período de 1988 a 1966. (fonte: Portela, 2008).

A capacidade de transporte incrementa-se quando os grãos apresentam granulometria mais fina em comparação com os de maior porte. Nas proximidades da restinga observa-se um aumento da carga sedimentar e, consequentemente, da capacidade de transporte (Portela, 2008).

Por se tratar de um estuário mesotidal, seria previsível que a maré assumisse um papel relevante no transporte sólido. No entanto, o reduzido alargamento do estuário limita o prisma de maré, e a descarga de água em Crestuma revela-se significativa em certas circunstâncias, pelo que o transporte de sedimentos é controlado pelo rio (Portela, 2008). A influência da maré vai diminuindo de jusante para montante no estuário. Conforme a Figura 26, a 5 km da foz, em fase de enchente, a capacidade de transporte sólido torna-se insignificante, enquanto na vazante essa capacidade se eleva, dado a maré não exercer qualquer influência, seja em enchente ou em vazante (Portela, 2008).

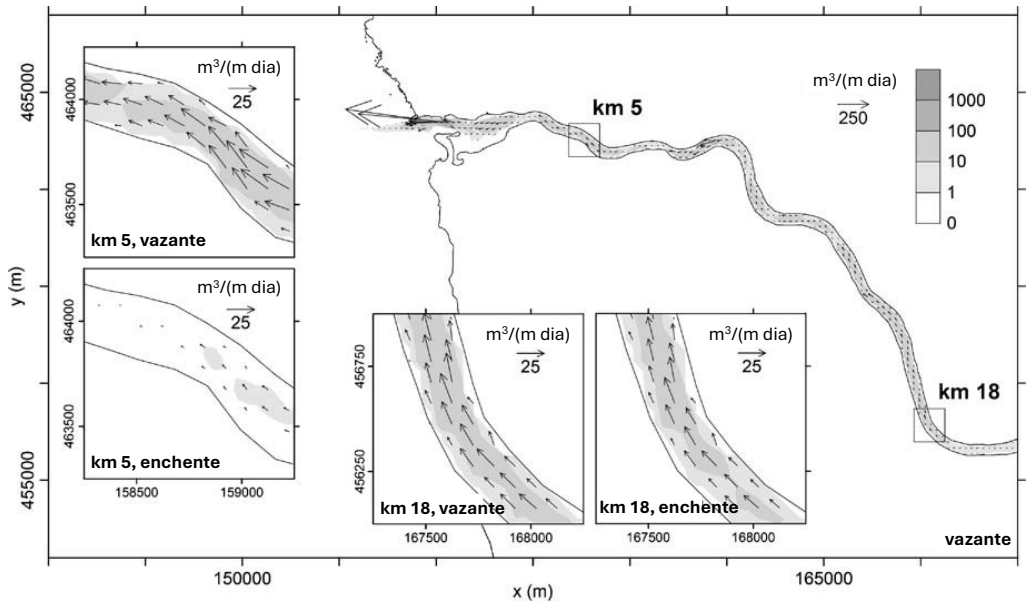

Figura 26 – Simulação do transporte do caudal sólido para um caudal de 2036 m³/s durante a enchente e a vazante, a 5 e a 18 km da embocadura (fonte: Portela, 2008).

2.5. MODELAÇÃO MORFO-HIDRODINÂMICA ESTUARINA

A modelação hidro-morfodinâmica pode recorrer a ensaios físicos em laboratório (por exemplo, Tambroni et al., 2005; Vera Cruz, 1969, 1968a, 1968b) ou recorrer a modelos numéricos. Estes últimos agrupam-se em três classes: empíricos, esquemáticos ou abstratos, e modelos orientados por processos.

Os modelos empíricos baseiam-se em técnicas experimentais e nas observações colhidas in situ (e.g. Larson et al., 2003; O'Brien, 1969), assumindo que o controlo das condições no espaço e no tempo é adequado.

Os modelos esquemáticos descrevem processos físicos isolados e são particularmente úteis para compreender a dinâmica dos sistemas estuarinos. Têm natureza indutiva, partindo de estados de equilíbrio entre o sistema e os seus forçamentos, e recorrem, em geral, a um número limitado de variáveis e relações (e.g. Huntley et al., 2004; Kragtwijk et al., 2004).

Já os modelos baseados em processos seguem uma abordagem dedutiva: representam matematicamente cada processo físico sem impor equilíbrios prévios. Costumam incluir um módulo de circulação (2DH ou 3D), um módulo de propagação de ondas e um módulo de transporte de sedimentos. Exemplos notáveis são o MIKE-21 (Warren & Bach, 1992), o OpenTELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2000), o ECOMSed (Hydroqual, 2002), o DELFT3D (Lesser et al., 2004) e o ROMS (Warner et al., 2008).

Aplicações recentes destes modelos numéricos abrangem a morfodinâmica fluvial (Villaret et al., 2013), o impacto de dragagens em estuários (Martelo et al., 2019), os efeitos de tempestade na morfodinâmica costeira (Cronin et al., 2007), a evolução de longo prazo da morfodinâmica estuarina (Dam et al., 2016; Thomas, 2002), a influência das marés no transporte de sedimentos (Brown & Davies, 2010) e o papel da batimetria nesse transporte (Robins & Davies, 2010).

Nos modelos hidro-morfodinâmicos, a discretização das equações diferenciais costuma ser feita por diferenças finitas em malhas estruturadas (MIKE-21, DELFT3D, ROMS, HEC-RAS), por volumes finitos em malhas não estruturadas (versões recentes do DELFT3D e do OpenTELEMAC-MASCARET) ou pelo método dos elementos finitos (OpenTELEMAC-MASCARET). Malhas não estruturadas exigem mais recursos computacionais, mas oferecem maior flexibilidade para representar estuários de geometria complexa.

Os resultados numéricos proporcionam uma compreensão detalhada de ambientes complexos, permitindo avaliar e prever os efeitos de eventos extremos, intervenções humanas ou alterações climáticas. Reproduzem também, com fidelidade, os padrões hidrodinâmicos estuarinos associados e as mudanças morfodinâmicas (Iglesias et al., 2019).

Almeida (2013) simulou a hidrodinâmica e morfodinâmica do estuário do Douro e verificou que as maiores velocidades de escoamento e de transporte sedimentar, dependentes do caudal fluvial, ocorrem na embocadura. Caudais elevados implicam rácios de acreção superiores à erosão. O autor constatou ainda que a concentração de sedimentos é mais alta no fluxo vazante entre os quebramares e que o eventual colapso dessas estruturas reduziria as velocidades de escoamento, os níveis de acreção ou erosão e as concentrações sedimentares face à situação atual.

Peixoto (2016) avaliou o impacto da construção dos quebramares na dinâmica de escoamento do estuário e concluiu que o reforço da restinga dificulta o escoamento durante grandes cheias, agravando as condições de inundação nas margens.

Sarmento (2021) concluiu que o transporte sedimentar só é significativo quando o caudal ultrapassa o valor de aproximado de 700 m^3/s, que as marés de águas-vivas amplificam ciclos alternados de erosão e acreção entre os quebramares, e que areias intermédias, D_{50} por volta dos 375 μm, e partículas menos

densas produzem os maiores caudais sólidos, fazendo do canal entre os quebramares o trecho mais instável do estuário.

Gonçalves et al. (2023) usaram SWAN acoplado ao XBeach para simular a tempestade Christina sob cenários de subida do nível médio do mar e conclui que, no cenário extremo SSP4-8.5 para 2100, o espraiamento ultrapassa o coroamento do quebramar sul, causando galgamento, e resultando em erosão na zona de rebentação e acreção logo abaixo da linha da costa.

Iglesias et al. (2022) criaram um super-ensemble de modelos para projetar cenários de 2050 e 2100 e verificam que, no Douro, as cheias extremas continuam dominadas pelo caudal fluvial, ao passo que a subida do mar tem impacto secundário na amplitude das inundações.

Cruz et al. (2023) avaliaram o potencial hidrocinético sob cenários de subida do nível médio do mar (SSP2-4,5 e 5-8,5) e demonstraram que, mesmo em 2100, a potência extraível decresce até 30 % porque a elevação do espelho de água diminui o gradiente de velocidades gerados pelo caudal.

Weber de Melo et al. (2025) desenvolveram um sistema de aviso prévio de cheias que combina redes LSTM para prever o caudal até 36 h antes, com um modelo hidrodinâmico 2DH, mostrando que o método antecipa cheias até 5000 m^3/s com erros reduzidos em nível de água ao longo de todo o estuário.

3
MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1. MODELO HEC-RAS

O modelo de análise fluvial HEC-RAS (Hydrologic Engineeering Center – River Analysis System) é um software de engenharia hidrológica de modelação hidrodinâmica e hidromorfológica desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers. Amplamente utilizado em diversas aplicações no domínio da engenharia de recursos hídricos, permitindo a simulação do escoamento de água e de sedimentos sólidos em zonas costeiras, rios e canais. Foi desenvolvido para utilização interativa e multitarefa em ambiente de rede.

O cálculo hidráulico fluvial de caudal não permanente, transporte de sedimentos em leito móvel de caudal quase permanente e totalmente permanente, evolução morfológica do leito fluvial, análise da temperatura da água, modelação generalizada da qualidade da água em sistemas fluviais e mapeamento de cheias são parâmetros que podem ser obtidos em virtude das suas capacidades de simulação hidrodinâmica unidimensional (1DH) e bidimensional (2DH).

Os modelos numéricos, como o HEC-RAS, permitem a reprodução de fenómenos que são descritos por um sistema de equações diferenciais e condições de fronteira. O modelo utiliza métodos numéricos explícitos ou implícitos, de forma a simular o escoamento superficial numa malha predefinida de acordo com o percurso de água. As condições de fronteira podem ser definidas e os dados batimétricos podem ser integrados utilizando uma poderosa interface gráfica, associado a um motor de cálculo vai gerar os resultados hidrodinâmicos (elevação do nível da água, velocidade, direção do caudal, profundidade, pressão, etc.) e hidromorfológicos (erosão, acreção e alteração no relevo do leito). Posteriormente, a mesma interface gráfica permite a visualização de resultados.

Apenas a simulação bidimensional foi aplicada neste estudo, tendo sido utilizada a opção "Onda Difusiva" (*Diffusion Wave*) para a resolução das equações do escoamento.

3.1.1. MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA

A modelação hidrodinâmica fundamenta-se nos princípios da conservação da massa e quantidade de movimento expressos pelas equações de Saint-Venant (1871) que se baseia na hipótese de distribuição hidrostática de pressões, de onde resulta a constância das velocidades horizontais na coluna de água.

3.1.1.1. Equações de Saint-Venant

As equações de Saint-Venant, na presença de gradientes horizontais de salinidade e temperatura podem ser escritas como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -g\cos^2\varphi\,\nabla\eta + \frac{1}{h}\nabla \cdot (h\,\nu_{\mathrm{T}}\,\nabla \boldsymbol{u}) - \frac{\tau}{\rho_m R}\frac{\cos\psi}{\cos\varphi}\frac{\boldsymbol{u}}{|\boldsymbol{u}|}\,, \tag{2}$$

onde η é a elevação da superfície livre acima do nível médio do mar (NMM), g é a aceleração da gravidade, $h = d + \eta$ é a profundidade total da água (sendo d a profundidade abaixo do NMM), $\boldsymbol{u} = (u, v)$ é o vetor velocidade média em profundidade, cujas componentes segundo x e y são respetivamente, u e v; ρ_m é a densidade da mistura água-sólido; τ é a tensão de atrito no fundo; R é o raio hidráulico; ψ é o ângulo de inclinação da direção da corrente e φ é o declive da superfície da água. Não foram considerados fatores como a salinidade, a temperatura e o parâmetro de Coriolis neste estudo. Nas equações acima, o segundo termo no lado direito representa a mistura horizontal devido à turbulência e, no caso de um fluxo de detritos, a mistura horizontal resultante das colisões entre partículas. A utilização da forma conservativa dos termos de mistura é fundamental para uma conservação rigorosa do momento. A tensão de atrito é calculada recorrendo ao coeficiente de rugosidade de Manning como:

$$\tau = \tau_b + \tau_{MD}\,, \tag{3}$$

onde τ_b é a tensão de atrito turbulento no fundo e τ_{MD} é a tensão de lama e detritos, que inclui todas as tensões não newtonianas. A tensão de atrito turbulento no fundo é calculada em função do coeficiente de Manning como:

$$\tau_b = \rho_m C_d\,, \tag{4}$$

$$C_d = \frac{g n^2}{R^{1/3}}\,, \tag{5}$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning. Quando a tensão não-newtoniana é zero e as funções cosseno (correções de declive) tomam o valor 1, as equações 2DH acima reduzem-se às equações de água limpa utilizadas no HEC-RAS.

Ao simular fluxos hiperconcentrados, as componentes longitudinal e transversal da viscosidade turbulenta dos vórtices são calculadas a partir da velocidade de corte obtida da tensão de atrito total (i.e., $u^* = \tau/\rho_m$). Não existe investigação existente sobre os valores adequados para os coeficientes de turbulência em fluxos hiperconcentrados. Contudo, testes mostraram que usar valores semelhantes aos de água limpa produz resultados razoáveis. Trata-se de um assunto que exige investigação adicional. A orientação atual é começar com os valores de água limpa para os coeficientes de turbulência e calibrá-los o melhor possível com base em medições.

3.1.1.2. Equação de Onda Difusiva

Na forma apresentada das equações, as caraterísticas hiperbólicas da equação da continuidade (presença somente de primeiras derivadas) sem qualquer termo dissipativo, torna-as extremamente suscetíveis a oscilações numéricas.

Para resolver esse problema, o HEC-RAS usa uma formulação de equação de onda difusiva para substituir a equação da continuidade (1), dessa forma garantindo uma solução numericamente estável. A equação de onda difusiva é:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla \eta) + q \,, \tag{6}$$

onde β é um coeficiente de difusão não linear que depende da tensão não newtoniana, τ_{MD}, e do atrito do fundo, quantificado pelo coeficiente de Manning, n, e onde q representa termos de sumidouro. O coeficiente de difusão não linear é dado por:

$$\beta = \cos^{1/2}\psi \ \cos\varphi \ \frac{K}{A} \ \frac{h}{|\nabla \eta|^{1/2}} \,, \tag{7}$$

em que

$$\frac{K}{A} = \left[\frac{n^2}{(R \ \cos\varphi)^{4/3}} + \frac{\tau_{MD}}{\gamma_m \ R \ \cos\varphi \ |\boldsymbol{u}|^2} \right]^{-1/2} . \tag{8}$$

Nas equações acima, K é a condutividade; A é a área vertical e γ_m é o peso específico da mistura água-sólido para misturas não newtonianas. A equação de onda difusiva foi modificada para declives acentuados seguindo uma abordagem semelhante à de Hergarten & Robl (2015). É de notar que, quando a tensão não-newtoniana é igual a zero (i.e. $\tau_{MD} = 0$) e as funções de cosseno (correção de declive) são unitárias, a equação de onda difusiva reduz-se à equação de continuidade de Saint-Venant.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. CARATERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO DOURO

O regime hidrológico do Douro depende essencialmente das precipitações atlânticas e mediterrâneas: as primeiras garantem a maior parte do caudal, mas a influência das segundas cresce rumo ao interior, gerando maior irregularidade de caudais e secas mais intensas do que na zona costeira (APA, 2016).

Os afluentes da margem direita costumam apresentar-se mais extensos do que os da margem esquerda. Todos têm a sua nascente nos sistemas montanhosos que delimitam a bacia. Os afluentes do lado direito desenvolvem-se, por norma, no eixo nordeste-sudoeste, enquanto os da margem esquerda seguem preferencialmente em sentido sudeste-noroeste (APA, 2016). Na Tabela 2 encontram-se os principais afluentes do rio Douro, uns na zona espanhola, outros ao longo da fronteira, e outros na parte portuguesa.

Tabela 2 – Afluentes principais do Douro.

Rio	Foz	País
Esgueva	Valladolid	Espanha
Pisuerga	Valladolid	
Valderaduey	Zamora	
Esla	Zamora	
Riaza	Burgos	
Duraton	Valladolid	
Cega	Valladolid	
Adaja	Valladolid	
Guarena	Zamora	
Tormes	Zamora	Douro Internacional
Águeda	Figueira de Castelo Rodrigo	
Sabor	Torre de Moncorvo	Portugal
Tua	Carrazeda de Ansiães	
Corgo	Peso da Régua	
Tâmega	Penafiel	
Sousa	Mealhada	
Côa	Vila Nova de Foz Côa	
Távora	Tabuaço	
Paiva	Castelo de Paiva	

O aproveitamento da energia hidráulica para gerar eletricidade só se tornou possível a nível mundial por volta do século XIX. Em Portugal, essa inovação começou por servir a iluminação pública e pequenas indústrias, evoluindo depois para projetos de maior dimensão, como os aproveitamentos hidroelétricos ao longo do troço nacional do rio Douro, sendo os três primeiros localizados na linha de fronteira luso-espanhola (ver Tabela 3) (Peixoto, 2016).

Tabela 3 – Infraestruturas hidroelétricas portuguesas no rio Douro Nacional.

Aproveitamento Hidroelétrico	Concelho	Território
Miranda	Mirando do Douro	Douro Internacional
Picote	Mirando do Douro	
Bemposta	Mogadouro	
Pocinho	Vila Nova de Foz de Côa	Portugal
Valeira	São João da Pesqueira	
Régua	Peso da Régua	
Carrapatelo	Marco de Canaveses	
Crestuma-Lever	Vila Nova de Gaia e Gondomar	

4.2. TOPO-BATIMETRIA

No seguimento da descrição dos aproveitamentos hidroelétricos, procedeu-se à calibração e validação do caso de estudo, recorrendo às descargas das barragens e à batimetria resultante do levantamento de 1994 fornecido pelo Instituto de Navegabilidade do Douro. A topografia dos limites da margem foi extraída do DEM da NASA (OpenTopography, 2021). A Figura 27 apresenta a topo-batimetria local.

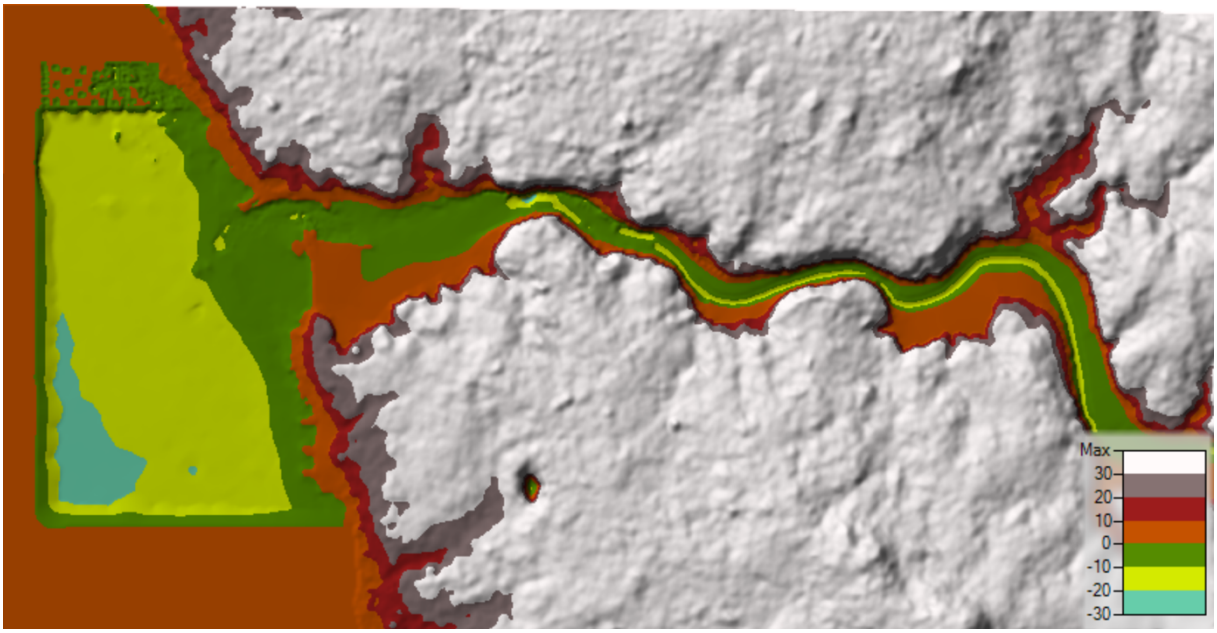

Figura 27 - Batimetria do estuário em 1994.

4.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

De forma a garantir a fiabilidade dos resultados numéricos, são realizados dois procedimentos críticos para garantir a qualidade da simulação: calibração e validação. A calibração é o processo de afinação sucessiva dos parâmetros físicos e numéricos até que os resultados do modelo correspondam aos dados recolhidos *in-situ* apresentando discrepâncias mínimas num determinado período. A validação é a repetição da simulação para um outro intervalo de tempo com os parâmetros físicos e numéricos adotados na calibração e verificação da bondade dos resultados.

Com o objetivo de otimizar o modelo 2DH do estuário do Douro, foi realizada uma série de simulações no sentido de calibrar os parâmetros e obter os melhores resultados possíveis. Nesse sentido, foi criada uma malha com células de 20 × 20 m. A malha computacional contém um total de 45 078 células quadriláteras (quads), com uma extensão de 11 382 m no sentido W-E e de 4276 m no sentido S-N.

Os dados recolhidos para a comparação com os resultados obtidos pelo HEC-RAS foram feitos em diferentes localizações e com diferentes instrumentos. Foram utilizadas medições obtidas como parte de uma Campanha Hidromorfológica para o estudo do Douro, efetuada a pedido da Administração dos Portos do Douro e Leixões (APDL). A campanha ocorreu entre Setembro e Outubro de 1994 e teve como principal objetivo obter dados para o projeto dos molhes sul e norte.

Conforme ilustrado na Figura 28, destacam-se dois pontos assinalados a fúcsia, correspondentes aos locais dos marégrafos utilizados para monitorizar as flutuações do nível da maré. O marégrafo da Cantareira é o que se encontra mais próximo da restinga do Cabedelo e o marégrafo de Cais da Estiva é o mais a montante, localizado junto aos cais da Ribeira. Existe um terceiro marégrafo, usado como o estabelecimento da condição fronteira oceânica (jusante), instalado no interior do Porto de Leixões. Este é composto por dois sistemas: um marégrafo analógico de flutuador e contrapeso, com registo analógico e um marégrafo de registo digital (Almeida et al., 2009). O princípio de funcionamento do marégrafo de flutuador baseia-se no movimento vertical de uma bóia à superfície, transmitido por um sistema mecânico de contrapesos para registar as variações da maré.

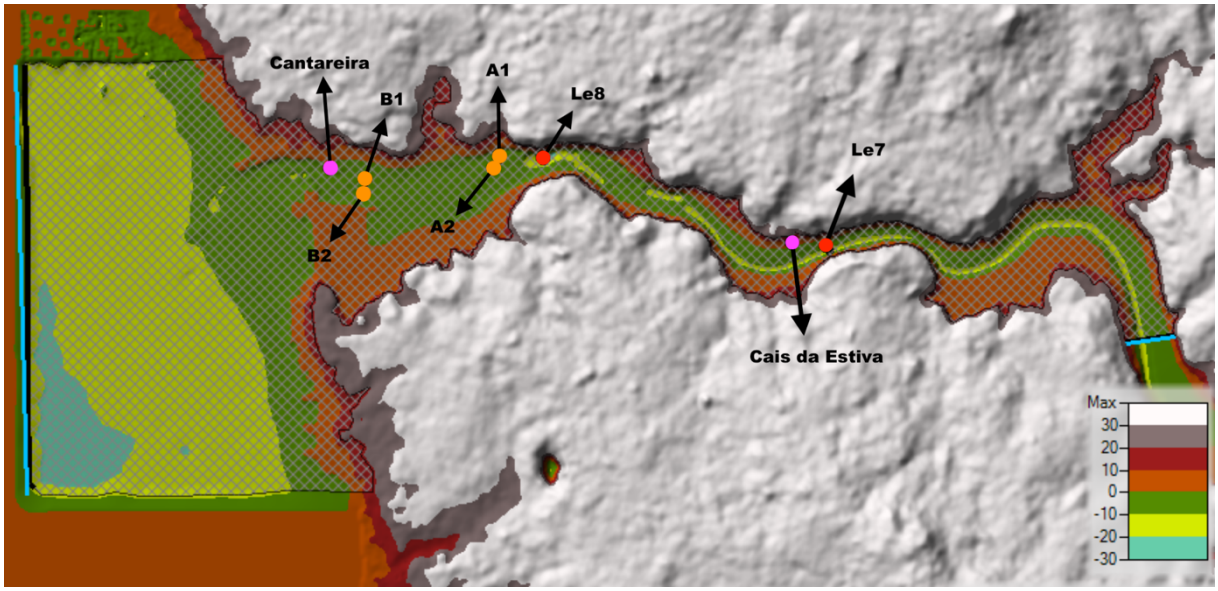

Figura 28 – Localização dos pontos das medições no HEC-RAS.

Na mesma Campanha, foram instalados correntómetros nos pontos Le7 e Le8, assinalados a vermelho, com intensidade e direção da corrente medidas em dois pontos de coluna de água. Foram também instalados correntómetros nos pontos A1, A2, B1 e B2, identificados a laranja, com medições semelhantes efetuadas em três níveis da coluna de água.

Na Tabela 4 indicam-se as coordenadas dos pontos de medição, no datum ETRS89/PT-TM06, usado em Portugal Continental.

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de medição.

Localização	Coordenadas	
	PT-TM06 (ETRS89)	
	X (m)	Y (m)
Leixões	- 45 564.61	164 525.68
Cantareira	- 44 798.52	164 279.26
Cais da Estiva	- 40 324.72	163 548.35
A1	- 43 152.61	164 384.79
A2	- 43 211.74	164 269.98
B1	- 44 451.96	164 167.50
B2	- 44 474.45	164 020.88
Le7	- 39 971.61	163 484.33
Le8	- 42 712.65	164 364.44

As simulações efetuadas no âmbito da calibração e da validação abrangeram dois períodos distintos: o primeiro decorreu entre as 00h00 do dia 17 de Setembro e as 00h00 de 23 de Setembro de 1994; o segundo entre as 00h00 de 24 de Setembro e as 00h00 de 30 de Setembro de 1994. Ambos os períodos totalizaram uma duração de 144 horas, com as primeiras 24 horas de cada um servindo como uma rampa (*warm up*). Foi adotado um *time step* de 10 min tanto para o *Mapping Output Interval* como para o *Computation Interval*, com o intuito de obter resultados relativos à elevação da superfície livre, à velocidade média e à profundidade do leito. Foi utilizada a fórmula de *diffusion wave*.

A definição das condições de fronteira no HEC-RAS constitui um passo fundamental para o controlo do comportamento hidráulico do modelo. Para tal, foram utilizados dados do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) relativos aos caudais a montante, com o intuito de projetar o hidrograma de cheia. A jusante, recorreu-se à maré medidos no marégrafo de Leixões, com os dados obtidos da Campanha Hidromorfológica para o Estudo da Barra do Douro, realizada entre Setembro e Outubro de 1994, pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa. Os gráficos dos caudais e das marés encontram-se, respetivamente, na Figura 29 e Figura 30.

O caudal horário foi obtido a partir do caudal médio diário fornecido pelo SNIRH. Admitiu-se que a descarga da barragem ocorria apenas por turbinagem com caudal constante no período entre as 10h00 e as 14h00 e entre as 19h00 e as 23h00, ao fim de semana (Sábado e Domingo). Nos dias úteis considerou-se que a turbinagem ocorria entre 07h00 e as 23h00, também com caudal constante.

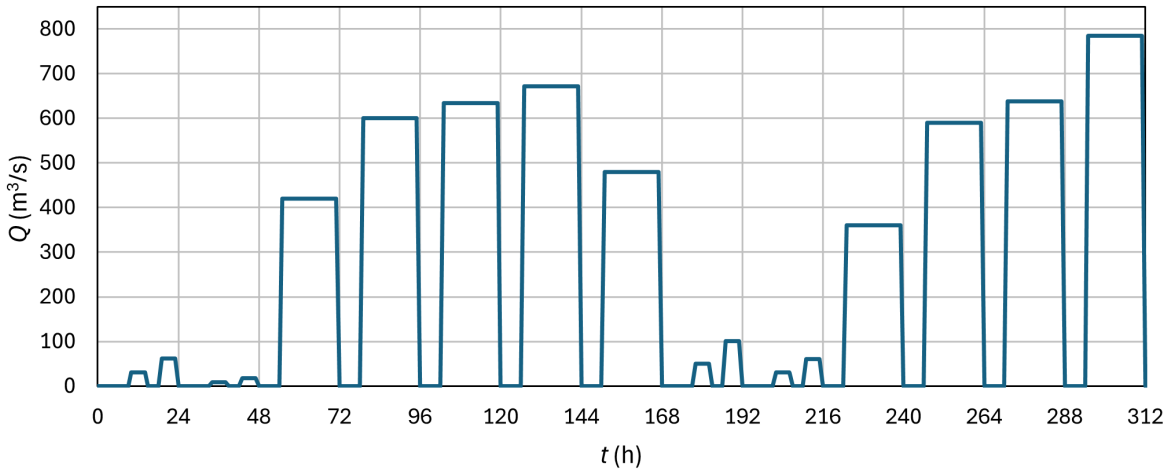

Figura 29 – Hidrograma de caudais horários no período entre 17 de Setembro e 30 de Setembro de 1994. Tempo referido as 00h00 UTC+1 do dia 17 de Setembro de 1994.

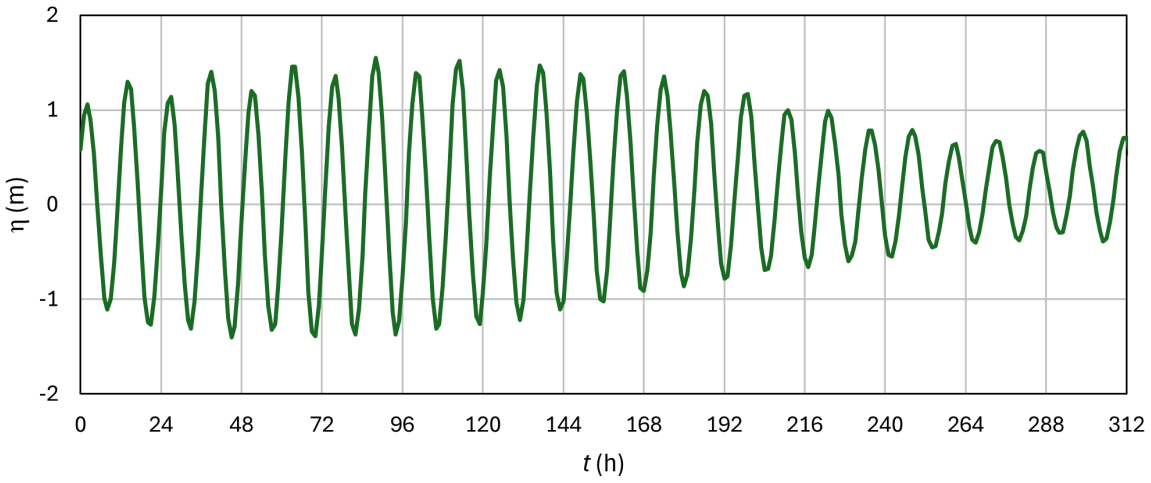

Figura 30 - Nível da maré medida no marégrafo de Leixões no período entre 17 de Setembro e 30 de Setembro de 1994. Tempo referido as 00h00 UTC+1 do dia 17 de Setembro de 1994.

4.3.1. Condição fronteira nas fronteiras laterais

Nas fronteiras norte e sul do domínio computacional marítimo, considerou-se uma condição fronteira de parede com reflexão total.

4.3.2. Calibração do Modelo

A calibração da elevação da superfície livre com uma simulação do primeiro período, na qual foi incorporado a rampa de 24 h na condição fronteira, com início as 00h00 do dia 17 de Setembro de 1994. Os dados de condição fronteira foram inseridos em intervalos de 10 min, de modo a obter resultados mais consistentes. A elevação da superfície livre foi medida em duas estações: Cais da Estiva e

Cantareira. A Figura 31 e Figura 32 apresentam a evolução das diferentes condições fronteira ao longo do tempo.

Os resultados obtidos pelo modelo HEC-RAS e pelos dois marégrafos referentes à simulação hidrodinâmica realizada entre as 00:00 h do dia 18 de Setembro e as 00:00 h do dia 23 de Setembro, são comparados na Figura 33 e Figura 34, permitindo avaliar detalhadamente as variações da elevação da superfície livre ao longo de todo o período de análise.

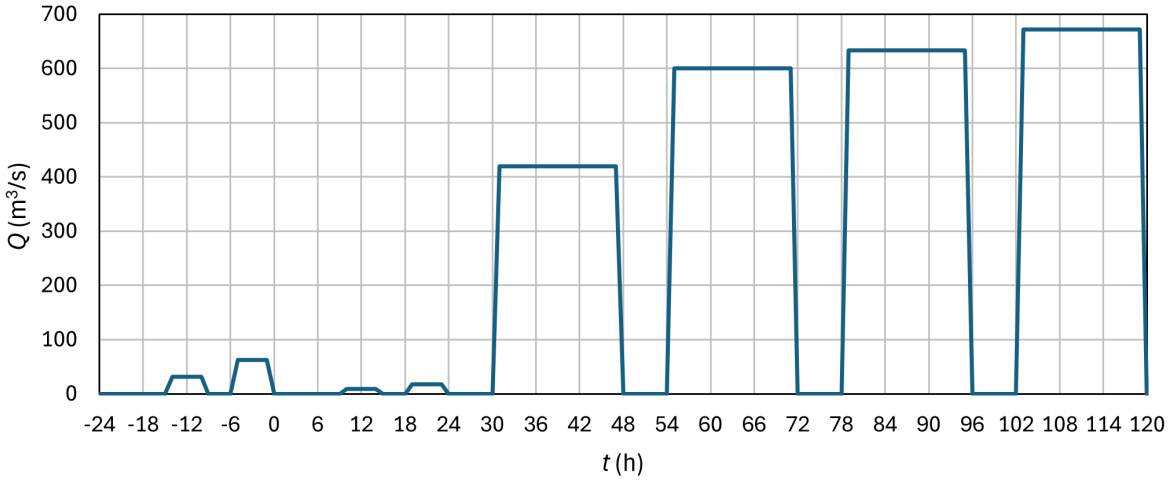

Figura 31 – Condição fronteira a montante: caudal fluvial. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 18 de Setembro de 1994.

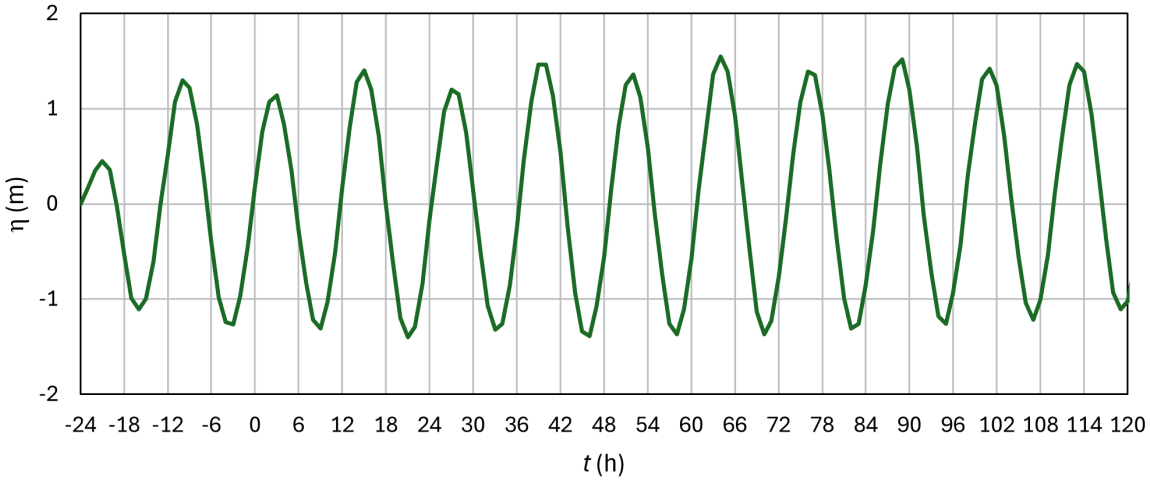

Figura 32 – Condição fronteira a jusante: nível da maré medida no marégrafo de Leixões. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 18 de Setembro de 1994.

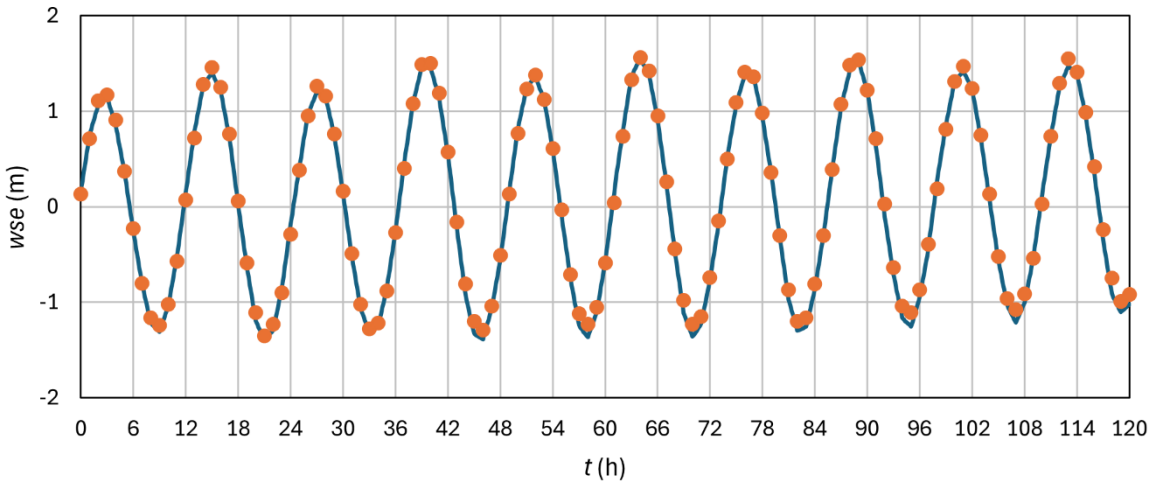

Figura 33 – Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 18 e 23 de Setembro de 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS.

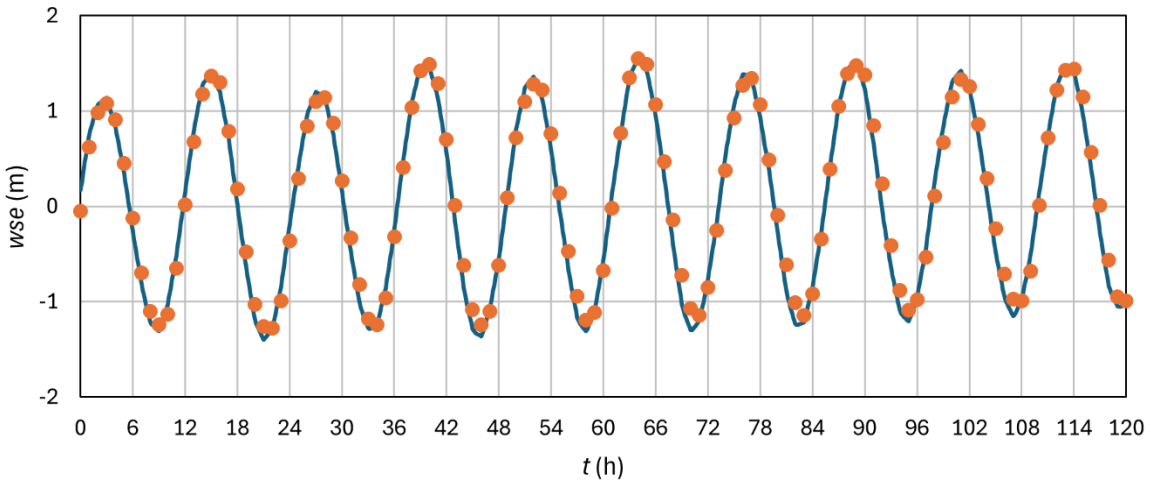

Figura 34 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 18 e 23 de Setembro de 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS.

O modelo foi testado com vários valores do coeficiente de Manning, no intervalo [0.025; 0.045] $m^{-1/3}\cdot s$. Os erros registados entre as medições *in-situ* e resultados do HEC-RAS foram minimizados para $n = 0.035\ m^{-1/3}\cdot s$.

4.3.3. Validação do Modelo

A validação da elevação da superfície livre foi realizada para o segundo período, com início à 00h00 UTC+1 de 24 de Setembro de 1994 e término às 00h00 de 30 de Setembro.

Nessas simulações foi utilizado o mesmo *time step* de 10 min e a rampa de 24 h. Foi utilizado o coeficiente de Manning $n = 0.035$ m$^{-1/3}$·s obtido na calibração. As Figura 35 e Figura 36 representam graficamente a evolução das condições fronteira para o segundo período.

Entre as 00:00 h de 25 de Setembro e as 00:00 h de 30 de Setembro, a Figura 37 e Figura 38 confrontam os resultados do modelo HEC-RAS com os dados dos marégrafos de Cantareira e Cais da Estiva.

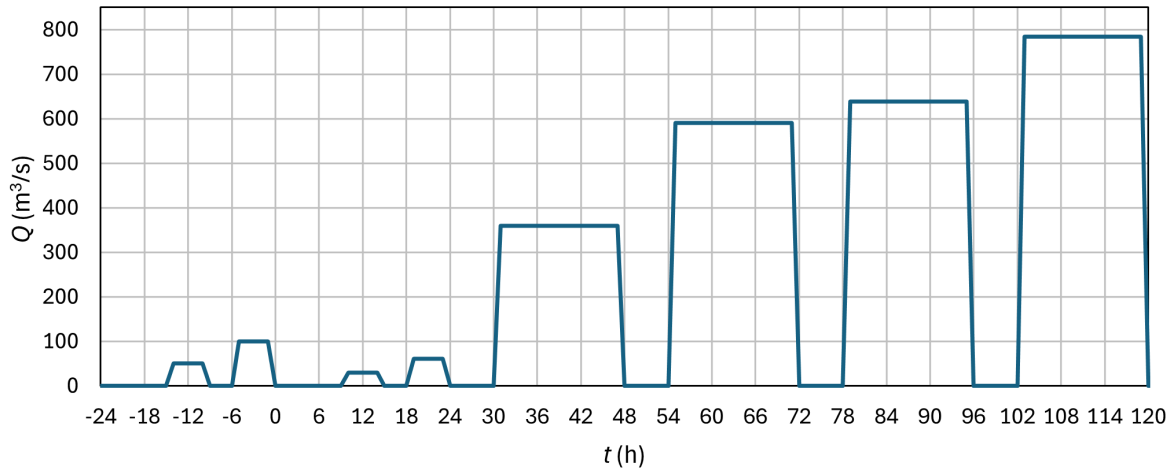

Figura 35 – Condição fronteira a montante: caudal fluvial. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 25 de Setembro de 1994.

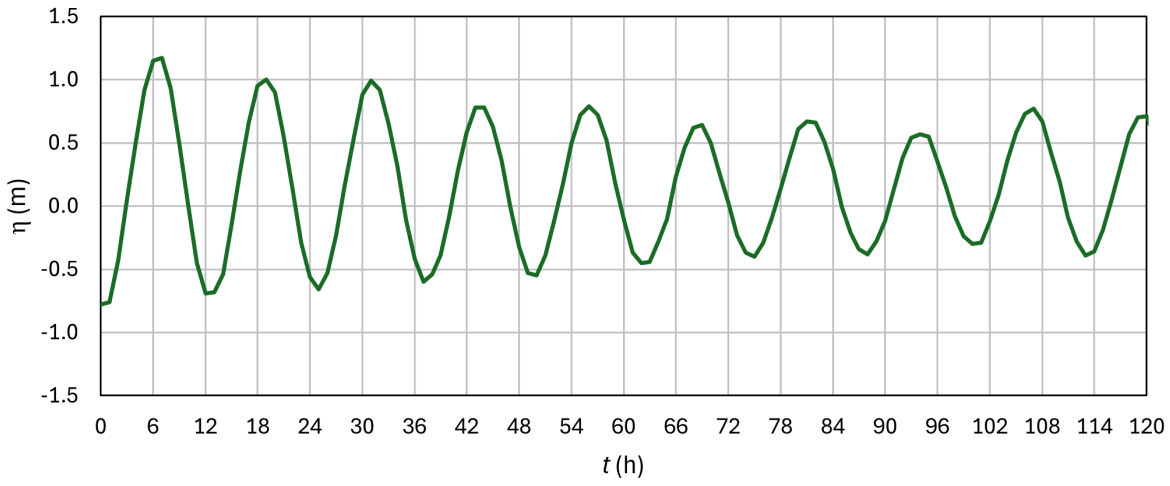

Figura 36 – Condição fronteira a jusante: nível da maré medida no marégrafo de Leixões. Tempo referido às 00h00 UTC+1 do dia 25 de Setembro de 1994.

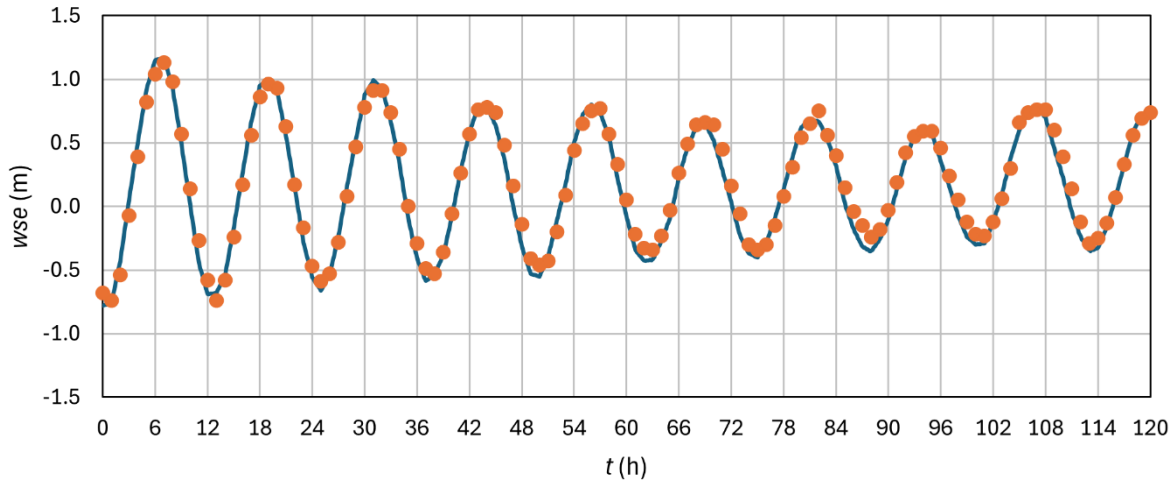

Figura 37 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 25 de Setembro e 30 de Setembro 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS.

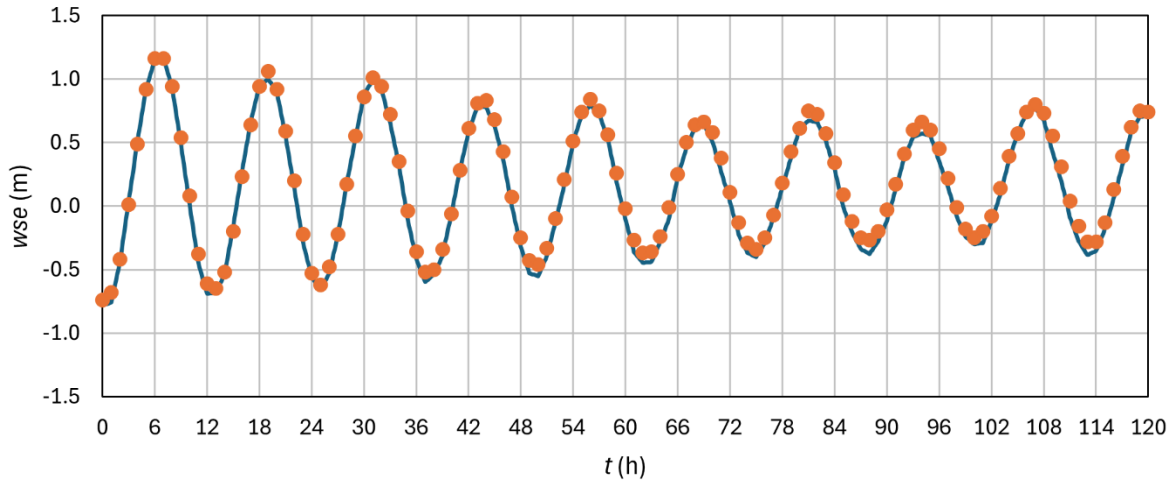

Figura 38 - Comparação da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 25 de Setembro e 30 de Setembro 1994. (●) in situ; (——) simulação HEC-RAS.

4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como resultado da calibração efetuada, adotou-se um coeficiente de atrito de Manning $n = 0.035$ $m^{-1/3} \cdot s$, para todo o domínio computacional. O valor do coeficiente de atrito de Manning nos modelos numéricos é, no entanto, dependente das condições de escoamento. A calibração e a validação foram realizadas em situações de caudal fluvial muito baixas. Alguns autores mostraram que no Douro os valores do coeficiente de Manning para caudais de cheia são mais baixos do que para caudais de estio (Iglesias et al., 2019). Neste trabalho, não foi realizada nenhuma tentativa de calibração em situações de cheia.

Ao comparar a elevação da superfície livre simulada pelo HEC-RAS com as medições realizadas *in situ*, verifica-se um excelente grau de concordância em amplitude, apesar de apresentar um ligeiro desfasamento temporal nos picos máximos e mínimos. Este pequeno desfasamento poderá resultar de fatores como a discretização temporal do modelo, incertezas na calibração hidráulica ou pequenas variações batimétricas não corretamente reproduzidas no modelo. Este desfasamento pode ainda ser devido à imposição da fronteira de montante ser no Freixo e não em Crestuma, podendo haver uma ligeira reflexão da maré no Freixo.

5

SIMULAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS

5.1. INTRODUÇÃO

Foram realizados simulações de eventos extremos para dois cenários: situação atual, pós-construção dos molhes, com uma batimetria atualizada e situação histórica pré-molhes batimetria de 1994.

5.2. BATIMETRIA

Considera-se a batimetria atual, após a construção dos molhes do Douro (ver Figura 39). Os dados batimétricos resultaram de seis levantamentos diferentes: 1. para o estuário intermédio e superior, foi utilizado um levantamento hidrográfico de 2002, realizado para o Instituto de Navegabilidade do Douro; 2. para a zona oceânica, os dados foram extraídos da base de dados batimétricos EMODnet 2016, após reamostragem e filtragem, e referenciados ao NMM; 3. na zona do estuário inferior, a batimetria resulta do levantamento realizado pelo Instituto Hidrográfico (IH) para a APDL em 2019; 4. para a topobatimetria costeira recorreu-se ao MDT nacional por LIDAR de 2011; 5. o levantamento CIIMAR/FCUP (Julho de 2011) foi utilizado para a topografia da restinga; 6. o MDT costeiro da DGT (2014) foi utilizado para as margens do estuário inferior. Definidos como galgáveis, os molhes foram adicionados ao modelo batimétrico com coroamento a + 4 m acima do NMM para o molhe sul e + 5.50 m acima do NMM para o molhe norte.

Foi adotado um coeficiente de atrito de Manning $n = 0.035$ m$^{-1/3}$·s, conforme indicado pela calibração efetuada, admitindo-se que este não terá variado com a introdução dos molhes.

5.3. MALHA COMPUTACIONAL

O domínio de cálculo estende-se por cerca de 12 km na direção W–E e um pouco mais de 6 km na direção S–N. A malha computacional tem 67004 células quadriláteras (quads), cada uma com uma dimensão de cerca de 20 m × 20 m. Definiu-se também um perfil longitudinal ao longo do rio, com 11380 m de extensão para análise da variação da superfície livre durante as cheias (ver Figura 40).

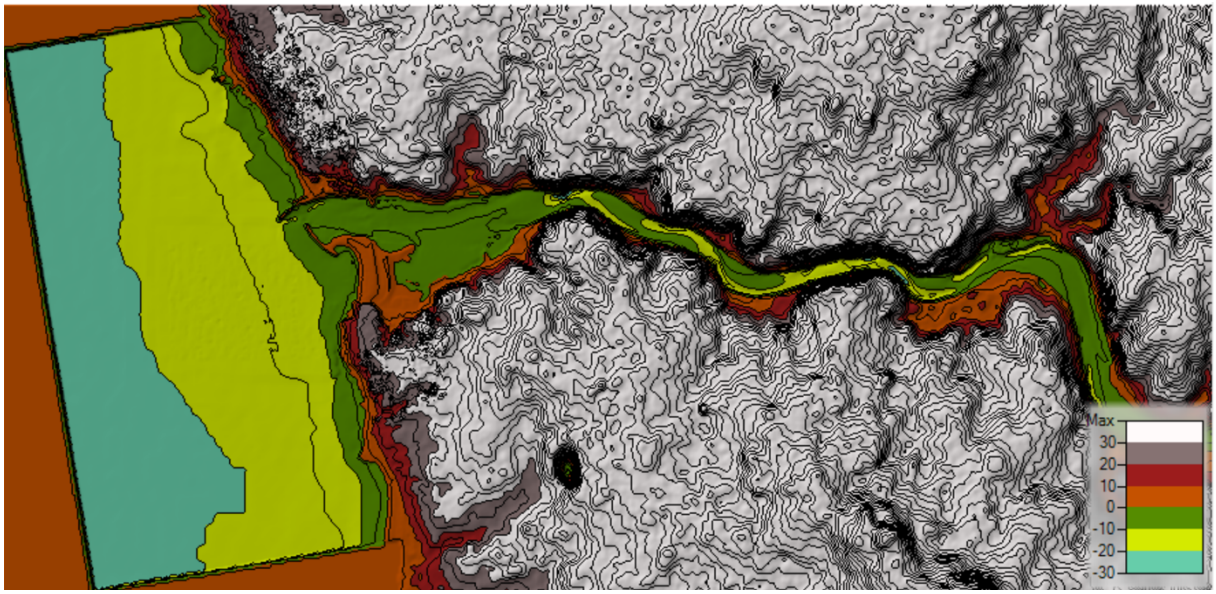

Figura 39 – Batimetria atual do estuário.

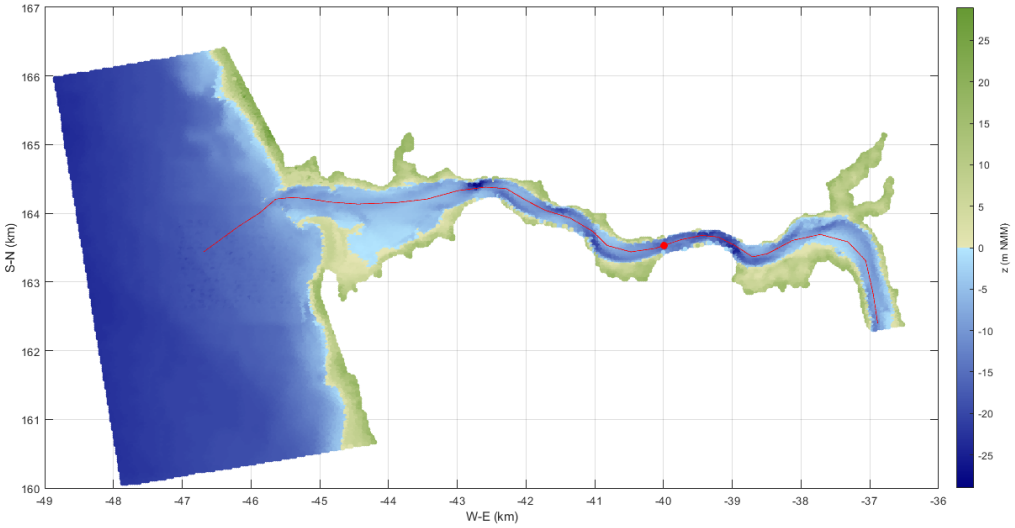

Figura 40 – Batimetria no domínio computacional. Localização do perfil longitudinal (——) e da ponte Luís I (●).

5.4. CAUDAIS DE CHEIA NO ESTUÁRIO DO DOURO

Embora as séries históricas de caudais máximos anuais em Crestuma e a jusante da barragem não estejam publicamente disponíveis, em APA (2012), página 40, são disponibilizados nas secções correspondentes às barragens do Douro nacional os caudais de cheia esperados para períodos de retorno entre 2.33 e 100 anos (ver Tabela 5). Os valores ali indicados sugerem ter sido realizada uma análise estatística prévia dos registos hidrométricos com ajuste de uma lei de extremos de Gumbel.

Com base nessa hipótese, foram estimados os caudais de cheia esperados na secção de Crestuma para períodos de retorno de 20, 100, 200, 500 e 1000 anos (ver Tabela 6 e Figura 41). Não foram consideradas variações futuras nos caudais de ponta de cheia devido às mudanças climáticas ou alterações na operação das estruturas.

Tabela 5 – Caudais de ponta de cheia referidos no Plano de Gestão do Região Hidrográfica do Douro (APA, 2012).

Local	**Área da bacia (km²)**	**Q (m³/s)**			
		$T = 2.33$ anos	**$T = 10$ anos**	**$T = 50$ anos**	**$T = 100$ anos**
Crestuma	96 504	5 441	10 510	15 517	17 634
Carrapatelo	92 045	4 388	8 807	13 173	15 019
Régua	91 119	4 086	8 400	12 662	14 463
Valeira	85 327	3 622	7 502	11 336	12 957
Pocinho	81 005	2 987	6 022	9 020	10 288
Miranda	63 665	2 194	4 294	6 310	7 175

Tabela 6 – Caudais de ponta de cheia para o rio Douro em Crestuma.

Período de Retorno	**Caudal de cheia**
T (anos)	**Q (m³/s)**
20	12 692
100	17 634
200	19 743
500	22 526
1000	24 629

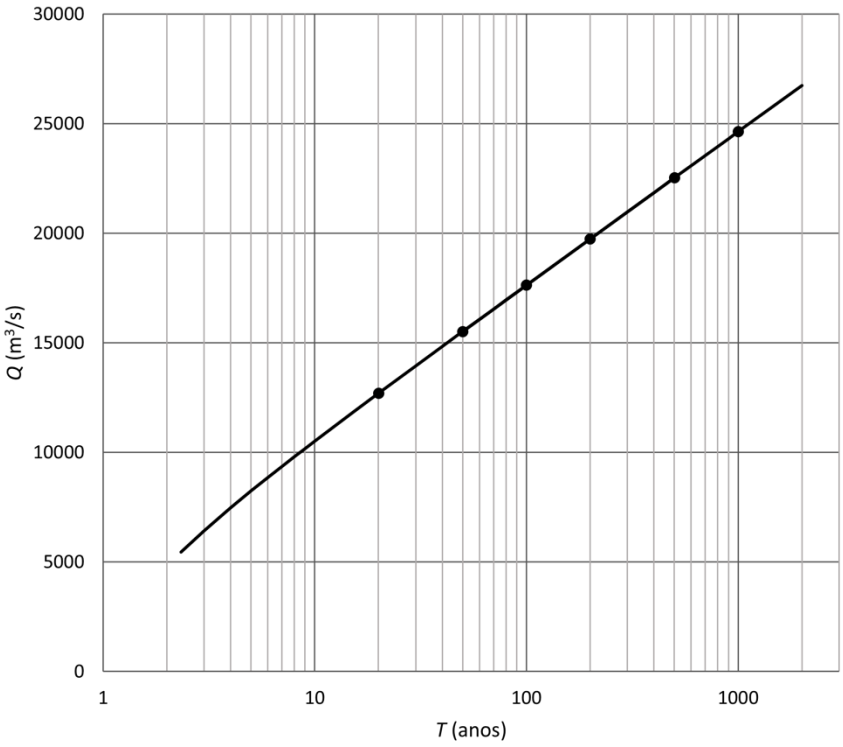

Figura 41 – Valor esperado dos caudais de cheia em Crestuma em função do período de retorno.

5.5. CENÁRIO 1: CHEIA CENTENÁRIA DE 1909

5.5.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE

A cheia extraordinária de Dezembro de 1909 foi um dos acontecimentos mais marcantes na história do Porto. A chuva persistente elevou o caudal a níveis extremos, transbordando para as margens e alagando por completo a zona ribeirinha e destruindo por completo a restinga. Causou graves danos em pontes, cais e diversas casas ficaram submersas afetando os negócios que aí estavam. A destruição foi sentida durante o seu percurso obrigando a fortes investimentos.

Não sendo conhecido o caudal máximo de cheia no Porto para a cheia de 1909, este foi estimado por correlação com o caudal máximo medido na Régua. Com base nos caudais máximos registados na Régua, Q_R, e no Porto, Q_p, em outras cheias históricas (ver Tabela 1), verificou-se que estas duas séries podem ser relacionadas através da equação:

$$\frac{Q_P}{Q_R} - 1 = A\left(\frac{Q_R}{1000}\right)^B, \tag{9}$$

a qual foi ajustada às observações, resultando nos parâmetros: $A = 79.40$ e $B = -2.496$ (quando os caudais estão expressos em m^3/s), com um coeficiente de determinação $R^2 = 0.97$ (ver Figura 42). Desta forma o caudal máximo estimado para Atães/Porto na cheia de 1909 foi de 17 880 m^3/s. Este caudal é da mesma ordem de grandeza do caudal de cheia centenária, $Q_{100} = 17\,634$ m^3/s.

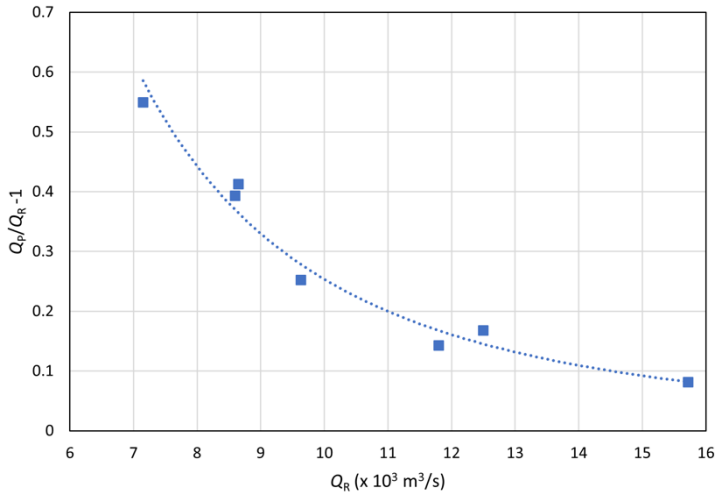

Figura 42 – Relação entre os caudais Q_R e Q_P, incluindo a curva de melhor ajuste.

A montante, o hidrograma de caudais foi obtido multiplicando o caudal observado na Régua (ver Figura 16) por um fator igual a Q_P/Q_R e atrasando em 6 h a chegada do caudal máximo.

A cheia de Dezembro de 1909 teve uma duração superior a 12 dias. A janela temporal adotada na simulação foi de 14 dias, i.e. 336 h, com início às 00h00 UTC de 17 de Dezembro e prolongando-se até às 00h00 de 31 de Dezembro de 1909 (ver Figura 43).

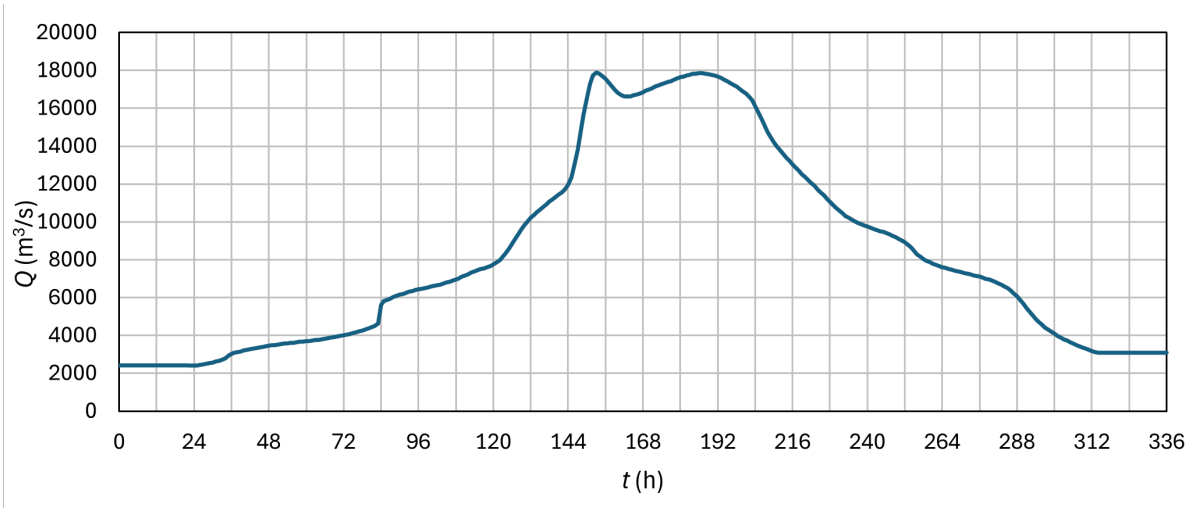

Figura 43 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, no período entre as 00h00 UTC de 17 de Dezembro de 1909 e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909.

5.5.2. Condição fronteira de Jusante

Foi extraída uma série temporal para a maré astronómica através do modelo global TXPO 7.2 (Egbert et al., 1994), para um ponto ao largo da barra do Douro, com as coordenadas 41.141 ºN, 8.710 ºW, para o período entre as 00h00 UTC de 17 de Dezembro e as 00:00 h UTC de 31 de Dezembro de 1909 (ver Figura 44). Esta serie é utilizada como condição fronteira de jusante.

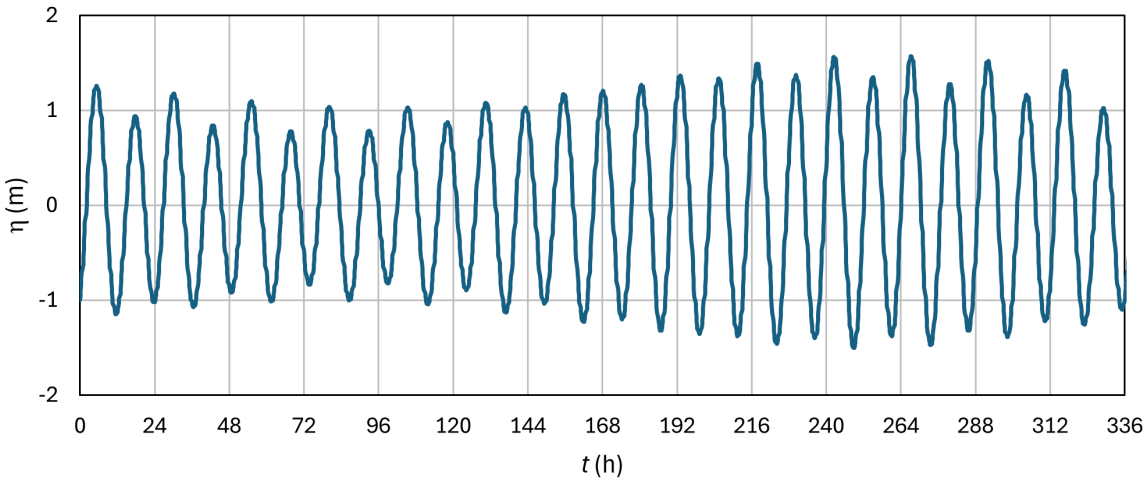

Figura 44 - Condição fronteira a jusante: nível da maré astronómica obtido com o modelo TXPO 7.2, no período entre as 00h00 UTC 17 de Dezembro e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909.

5.5.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS

Nas fronteiras norte e sul do domínio computacional marítimo, considerou-se uma condição fronteira de parede com reflexão total.

5.6. CENÁRIO 2: CHEIA CENTENÁRIA DE 1962

5.6.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE

A cheia extraordinária de Janeiro de 1962 foi outro dos eventos hidrológicos mais significativos na história do Porto. Chuvas persistentes elevaram o caudal do Douro a níveis excecionais, galgando novamente as margens e inundando completamente a zona ribeirinha, levando à ruína da restinga. Os impactos refletiram-se em danos severos em pontes, cais e edifícios residenciais e comerciais junto ao rio, exigindo grandes investimentos em obras de reparação e reforço das defesas marginais.

Para a cheia de 1962, adotou-se o valor do caudal máximo de 17 000 m^3/s, observado em Atães/Porto conforme a Tabela 1. O hidrograma de caudais foi obtido multiplicando o caudal observado na Régua (ver Figura 20) por um fator igual a Q_P/Q_R e atrasando em 6 h a chegada do caudal máximo.

A cheia de 1962 teve uma duração superior a 10 dias. A janela temporal adotada na simulação foi de 12 dias, i.e. 288 h, com início às 00h00 UTC de 29 de Dezembro de 1961, e prolongando-se até às 00h00 UTC de 10 de Janeiro 1962 (ver Figura 45).

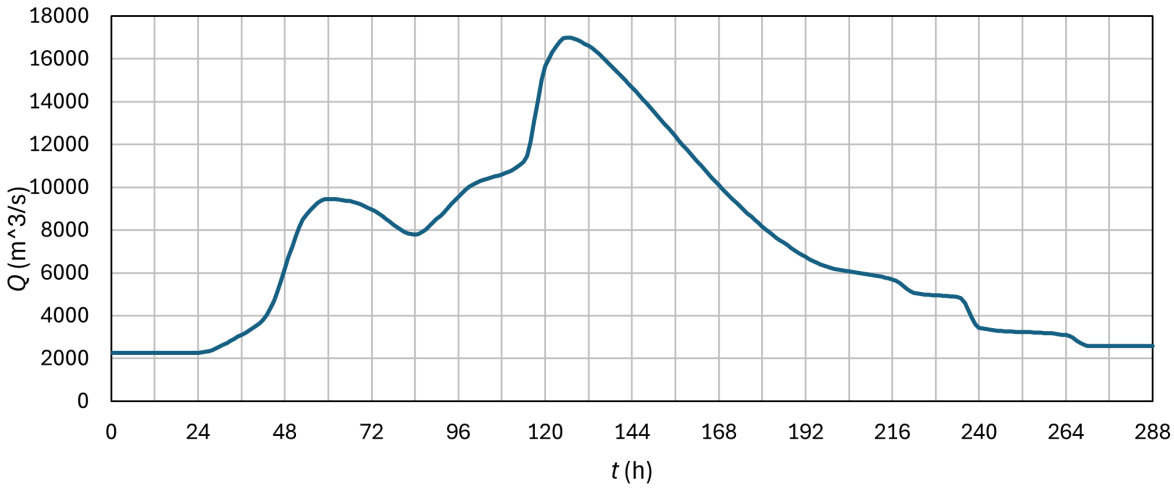

Figura 45 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, no período entre as 00h00 UTC de 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC de 10 de Janeiro 1962.

5.6.2. Condição fronteira de Jusante

Foi extraída uma série temporal para a maré astronómica através do modelo global TXPO 7.2 (Egbert et al., 1994), para um ponto ao largo da barra do Douro, com as coordenadas 41.141 ºN, 8.710 ºW, para o período entre as 00:00 h UTC de 29 de Dezembro 1961 e as 00:00 h UTC de 10 de Janeiro 1962 (ver Figura 46). Esta serie é utilizada como condição fronteira de jusante.

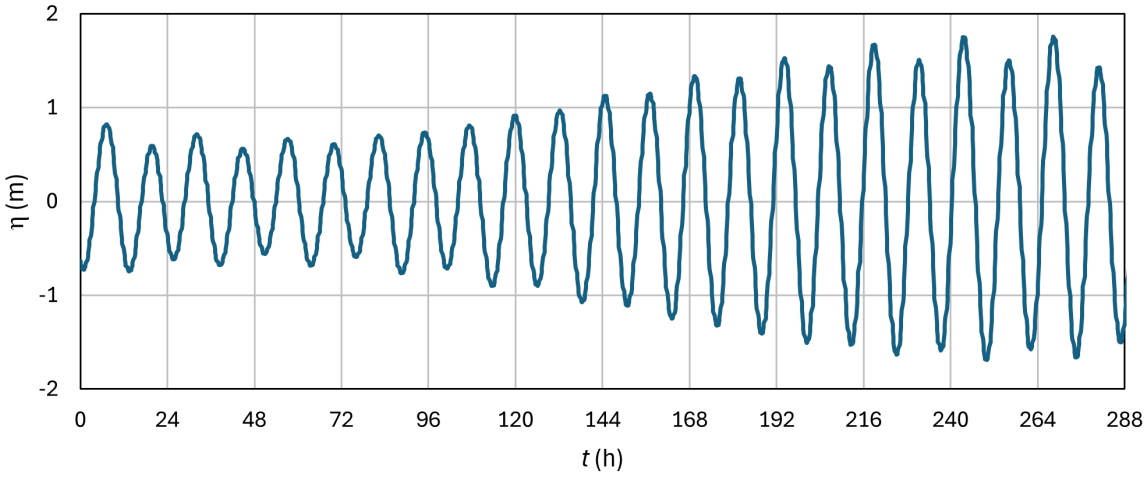

Figura 46 - Condição fronteira a jusante: nível da maré astronómicas obtido com o modelo TXPO 7.2, no período entre as 00h00 UTC 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC 10 de Janeiro 1962.

5.6.3. Condição fronteira nas fronteiras laterais

Nas fronteiras norte e sul do domínio computacional marítimo, considerou-se uma condição fronteira de parede com reflexão total.

5.7. CENÁRIO 3: CHEIA MILENAR COM UM PICO

5.7.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE

O histograma para o cenário 3, ilustrado na Figura 47, descreve uma série temporal em que o caudal de ponta é o caudal com o período de retorno de 1000 anos, $Q_{1000} = 24\,630$ m^3/s. Para este evento adotou-se o hidrograma similar ao da cheia de 1909, escalado pelo fator igual à razão entre o caudal Q_{1000} e o caudal máximo da cheia de 1909. Mantém-se a forma temporal do hidrograma do cenário 1, em termos de duração e de rampas de subida e de recessão, alterando apenas a sua magnitude.

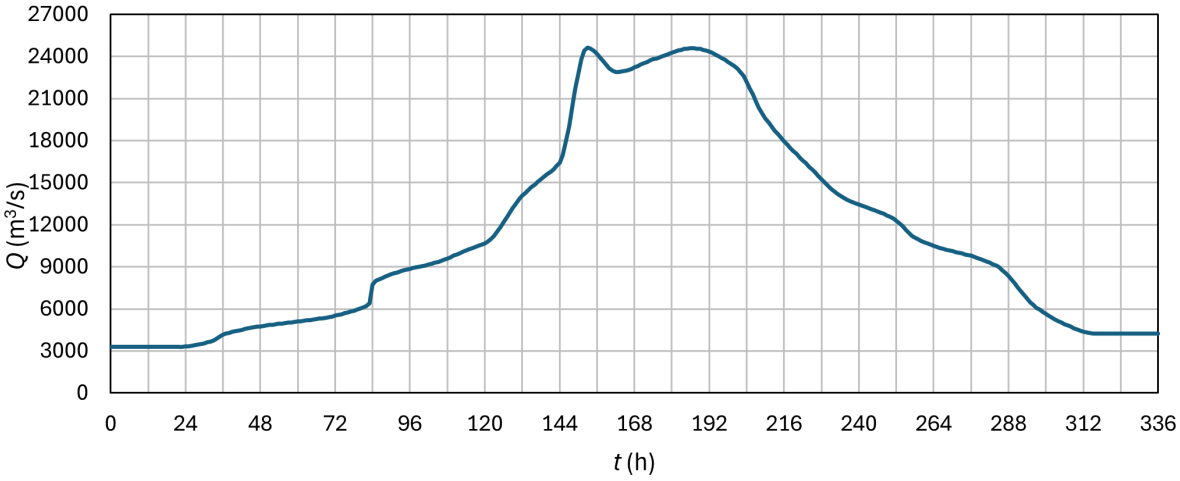

Figura 47 - Hidrograma de cheia, para um período de retorno de 1000 anos, entre as 00h00 UTC de 17 de Dezembro de 1909 e as 00h00 UTC de 31 de Dezembro de 1909.

5.7.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE

Para o cenário 3, foi adotada como condição fronteira a jusante a mesma configuração de marés astronómicas utilizada no cenário 1, permitindo reproduzir as mesmas condições no mar (ver Figura 44).

5.7.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS

Nas fronteiras norte e sul do domínio computacional marítimo, considerou-se uma condição fronteira de parede com reflexão total.

5.8. CENÁRIO 4: CHEIA MILENAR DOIS PICOS

5.8.1. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE MONTANTE

O histograma para o cenário 4, ilustrado na Figura 48, descreve uma série temporal em que o caudal de ponta é o caudal com o período de retorno de 1000 anos, $Q_{1000} = 24\,630$ m^3/s. Para este evento adotou-se o hidrograma similar ao da cheia de 1962, escalado pelo fator igual à razão entre o caudal Q_{1000} e o caudal máximo da cheia de 1962. Mantém-se a forma temporal do hidrograma do cenário 2, em termos de duração e de rampas de subida e de recessão, alterando apenas a sua magnitude.

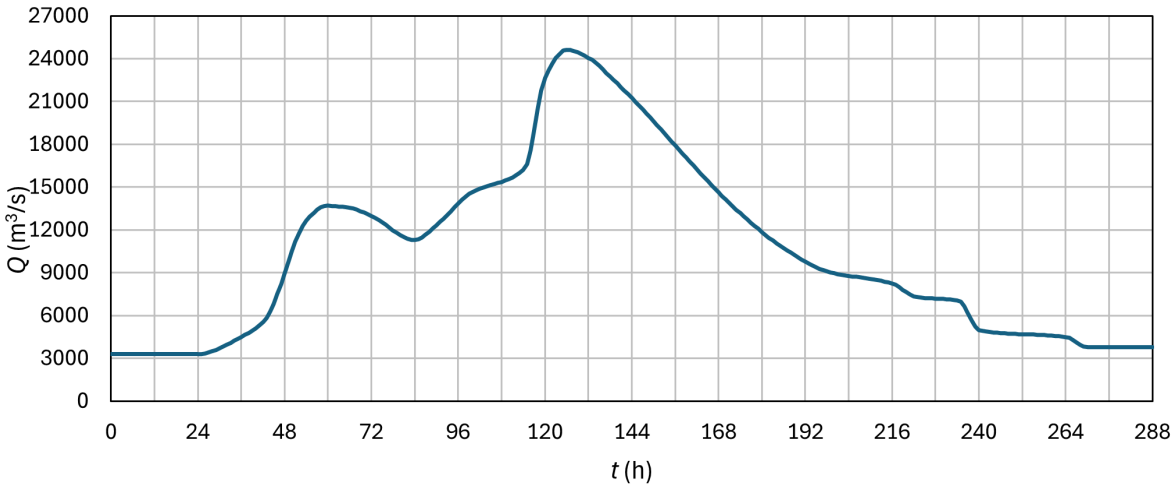

Figura 48 - Condição fronteira a montante: hidrograma de cheia, para um período de retorno de 1000 anos, no período entre as 00h00 UTC de 29 de Dezembro 1961 e as 00h00 UTC de 10 de Janeiro 1962.

5.8.2. CONDIÇÃO FRONTEIRA DE JUSANTE

Para o cenário 4, foi adotada como condição fronteira a jusante a mesma configuração de marés astronímicas utilizada no cenário 2, permitindo reproduzir as mesmas condições no mar (ver Figura 46).

5.8.3. CONDIÇÃO FRONTEIRA NAS FRONTEIRAS LATERAIS

Nas fronteiras norte e sul do domínio computacional marítimo, considerou-se uma condição fronteira de parede com reflexão total.

6
DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. CENÁRIO 1: CHEIA CENTENÁRIA DE 1909

6.1.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

A Figura 50 apresenta o mapa de elevação da superfície livre, as 09h00 no dia 23 de Dezembro, com o caudal máximo de 17 880 m^3/s, resultante da simulação do evento extremo da cheia centenário ocorrido em Dezembro 1909. A inundação evidencia uma elevação máxima da lâmina de água próxima de 10 m na zona da ribeirinha e Vila Nova de Gaia, o que são semelhantes com os registos históricos apresentado na Figura 12. A superfície livre se manteve elevada junto à barra e ao longo do estuário superior e intermédio, com valores de 8.50 m acima do NMM registado na ponte do Freixo, 7.48 m registados Ponte Luís I, e diminuindo gradualmente até à foz e não galgando a restinga (ver Figura 49). O valor calculado sob a Ponte Luís I é bastante inferior ao registado durante a cheia centenária de Dezembro de 1909, quando o nível máximo terá ficado cerca de 0.80 m abaixo do tabuleiro da ponte, portanto a um nível de cerca de 11 m. A distribuição é coerente com a morfologia e com mecanismos de propagação da cheia, confirmando a sua consistência dos resultados do modelo.

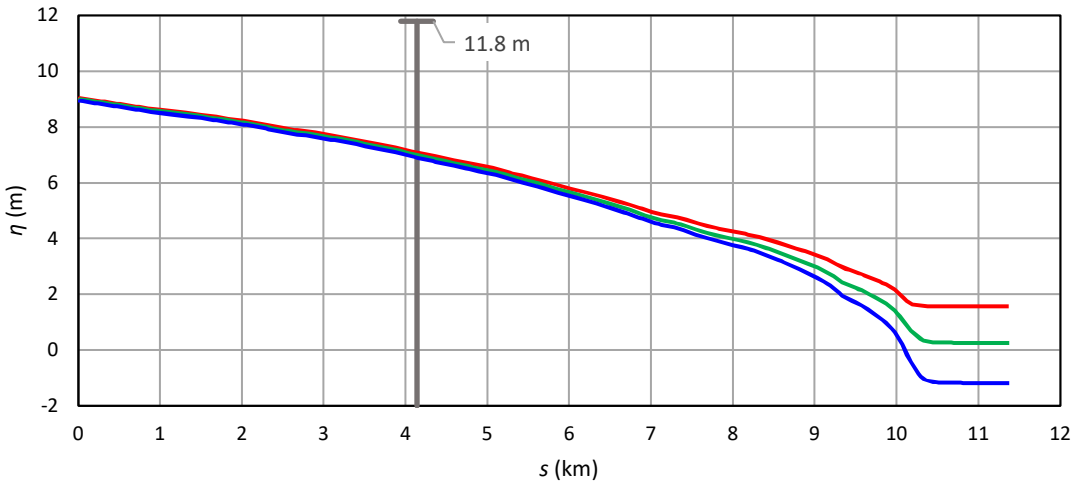

Figura 49 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 23Dez1909 09h00 (—); 24Dez1909 18h00 (—).

6.1.2. Velocidade do escoamento

O campo de velocidade revela zonas de aceleração pronunciada em torno das curvas do leito, onde os valores máximos da velocidade ultrapassam 15 m/s. Na confluência junto a Ponte da Arrábida, identifica-se um jato de caudal muito concentrado que incide sobre a margem sul, potencialmente responsável por erosão localizada. Ao longo do estuário superior e intermédio, a velocidade tende a diminuir a jusante das contrações, alcançando valores de 7.51 m/s na Ponte D. Luís I, e mantem-se acima de 7 m/s até perto do estuário inferior, indicando fluxo rápido que reforça a capacidade de arraste de sedimentos. É possível notar na embocadura, devido ao estreitamento do canal, o aumento da velocidade.

6.1.3. Profundidades

O mapa de profundidades mostra que, sob a cheia de 1909, a lamina de água atinge valores máximos na ordem de 15 m, sobretudo no canal principal e nas zonas de calha natural mais funda. Nas margens alagadas, as profundidades oscilam entre 2 e 5 m, suficiente para submergir infraestruturas ribeirinhas. O perfil transversal mostra maiores profundidades em meandros acentuados.

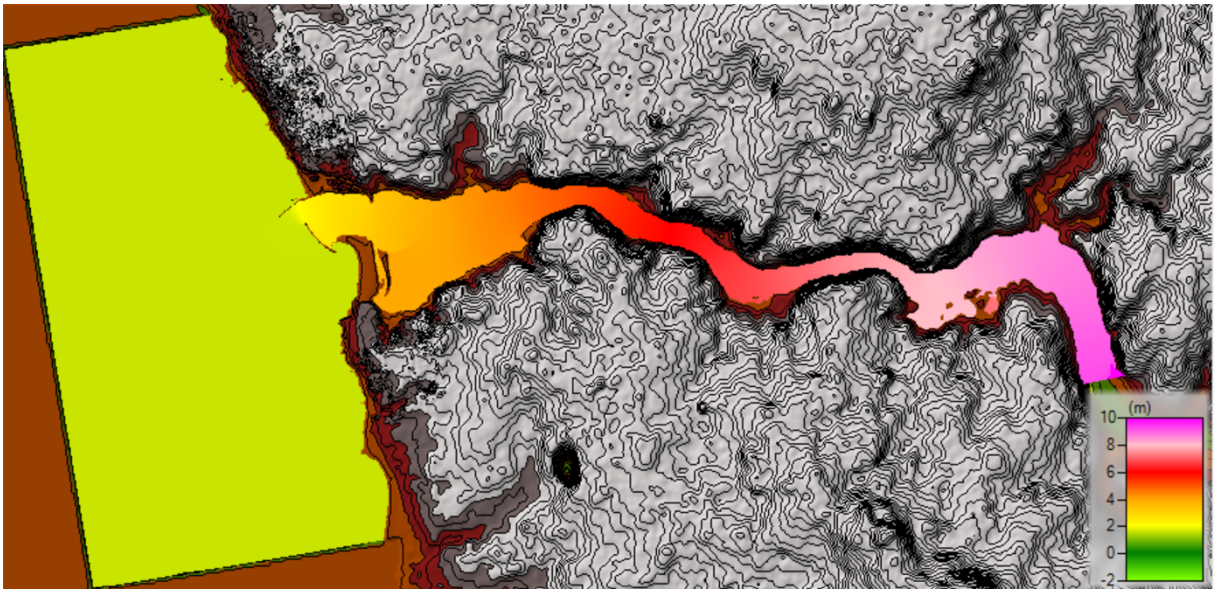

Figura 50 – Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909.

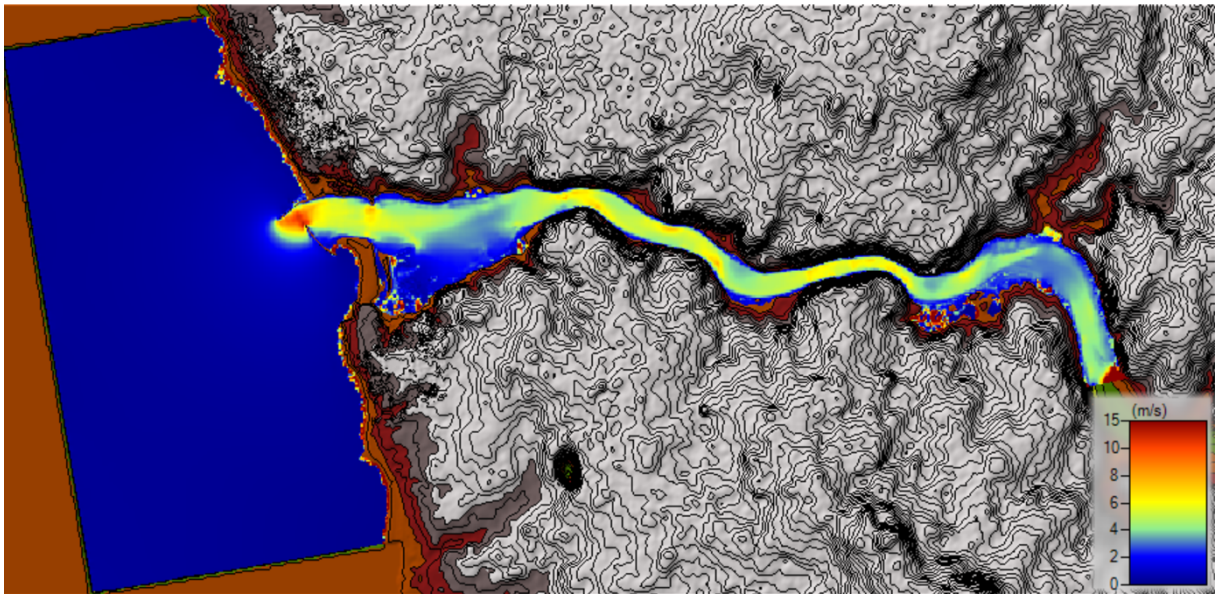

Figura 51 – Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909.

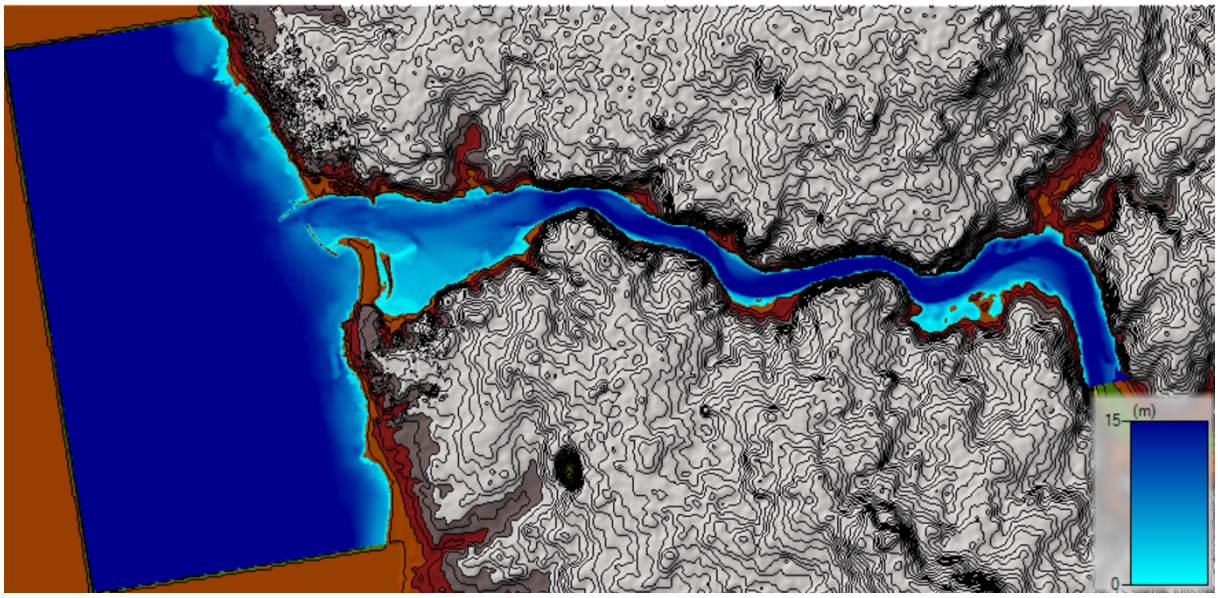

Figura 52 – Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1909.

6.2. CENÁRIO 2: CHEIA CENTENÁRIA DE 1962

6.2.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

A Figura 54 apresenta o mapa de elevação da superfície livre, as 06:00 no dia 03 de Janeiro, com o caudal máximo de 17 000 m^3/s, resultante da simulação do evento extremo da cheia centenário ocorrido em Janeiro 1962. A inundação evidencia uma elevação máxima da lâmina de água próxima de 9 m na zona da ribeirinha e Vila Nova de Gaia, o que são semelhantes com os registos históricos apresentado na Figura 12. A superfície livre se manteve elevada junto à barra e ao longo do estuário superior e intermédio, com valores de 8.30 m acima do NMM registado na ponte do Freixo, 6.75 m registados Ponte D. Luís I, e diminuindo gradualmente até a foz e não galgando a restinga (ver Figura 53). A

distribuição é coerente com a morfologia e com mecanismos de propagação da cheia, confirmando a sua consistência dos resultados do modelo.

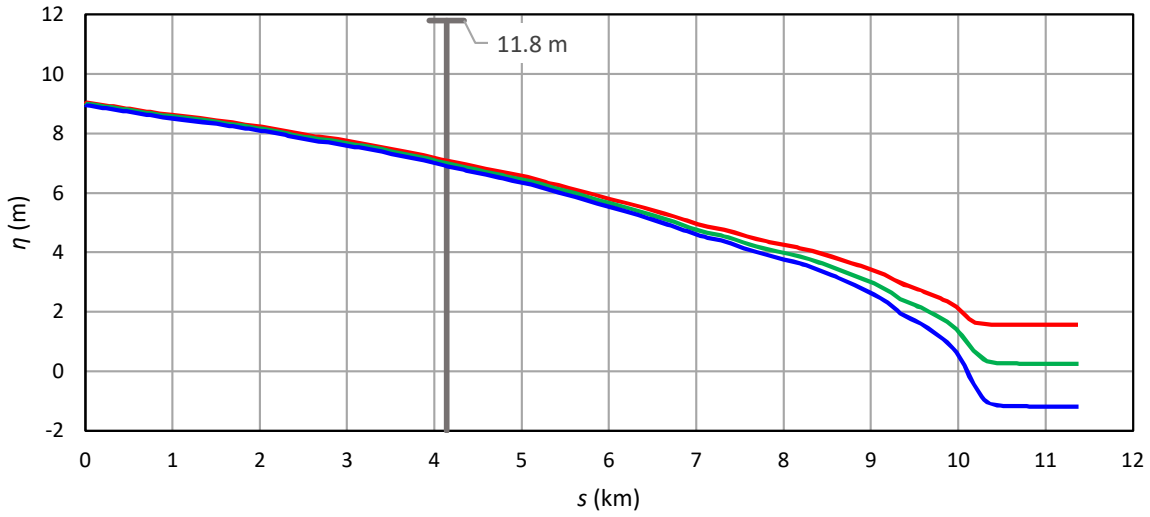

Figura 53 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 31Dez1961 12h00 (—); 03Jan1962 06h00 (—).

6.2.2. Velocidade do escoamento

O campo de velocidade revela zonas de aceleração pronunciada em torno das curvas do leito, onde os valores máximos da velocidade ultrapassam 15 m/s. Na confluência junto a Ponte da Arrábida, identifica-se um jato de caudal muito concentrado que incide sobre a margem sul, potencialmente responsável por erosão localizada. Ao longo do estuário superior e intermédio, a velocidade tende a diminuir a jusante das contrações, alcançando valores de 5.97 m/s na Ponte D. Luís I, e mantem-se acima de 6 m/s até perto do estuário inferior, indicando fluxo rápido que reforça a capacidade de arraste de sedimentos. É possível notar na embocadura, devido ao estreitamento do canal, o aumento da velocidade.

6.2.3. Profundidades

O mapa de profundidades mostra que, sob a cheia de 1962, a lamina de água atinge valores máximos na ordem de 15 m, sobretudo no canal principal e nas zonas de calha natural mais funda. Nas margens alagadas, as profundidades oscilam entre 2 e 5 m, suficiente para submergir infraestruturas ribeirinhas. O perfil transversal mostra maiores profundidades em meandros acentuados.

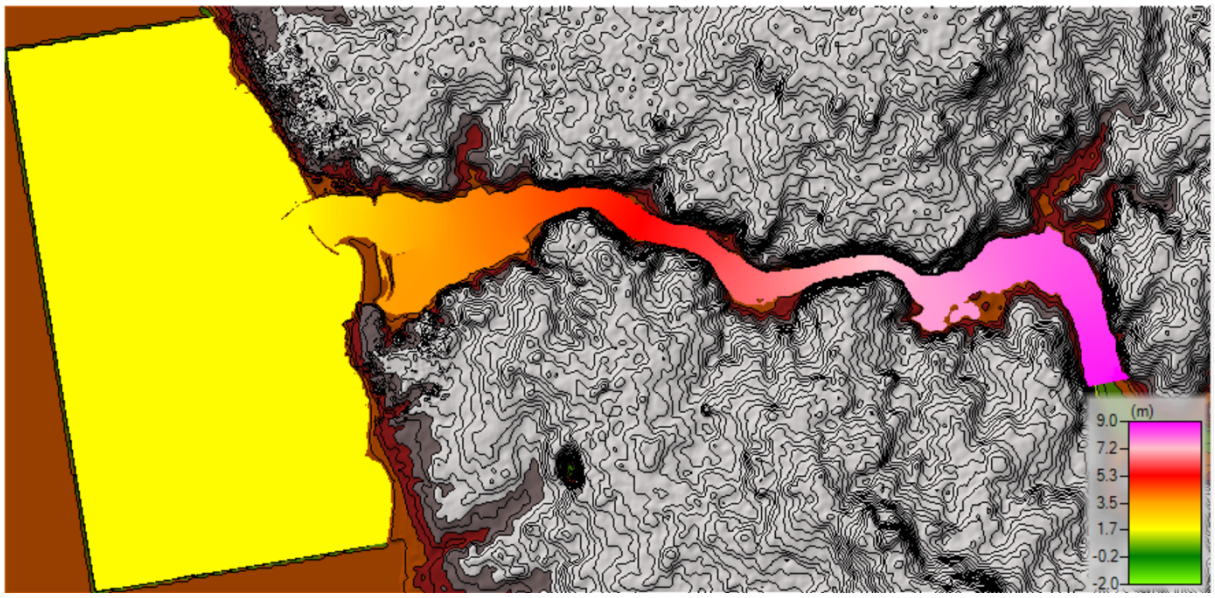

Figura 54 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962.

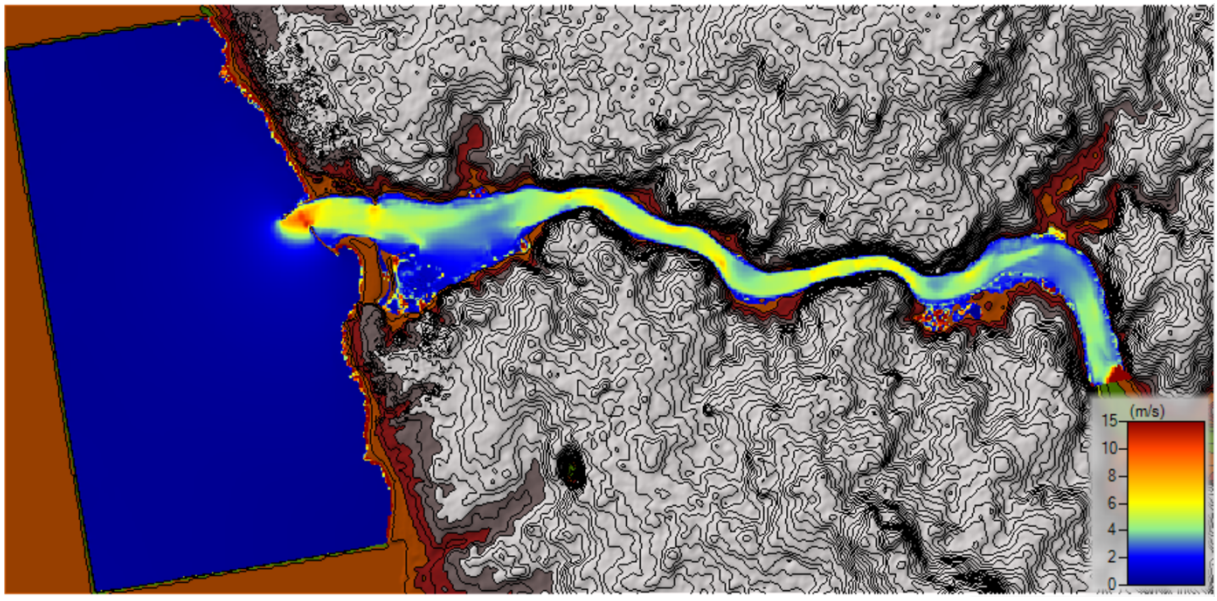

Figura 55 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962.

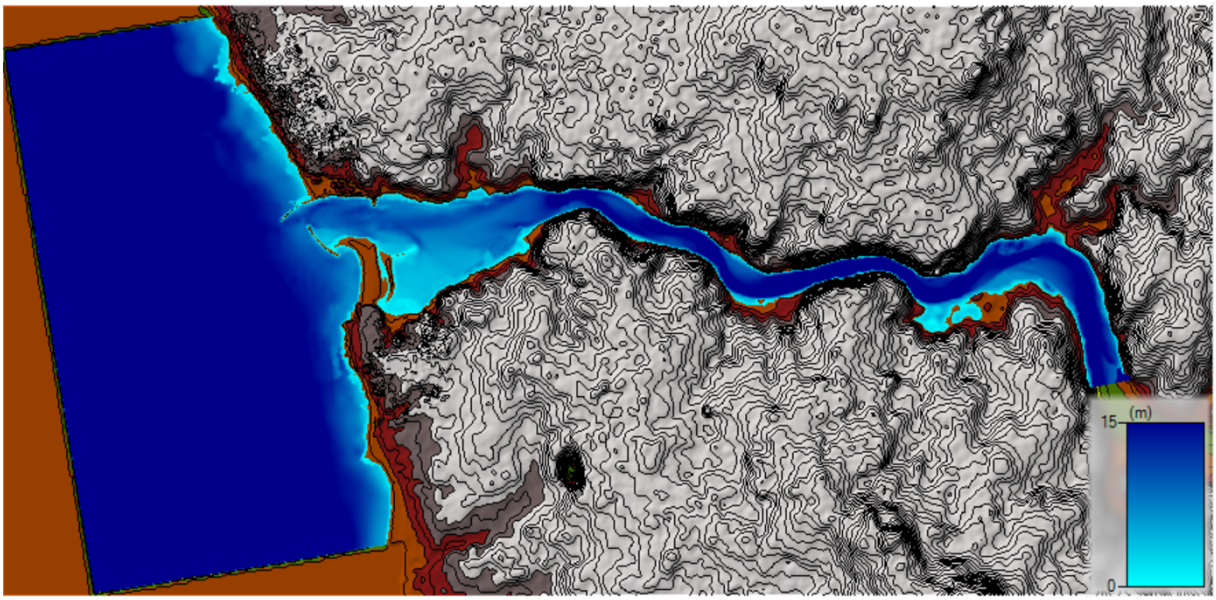

Figura 56 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia de 1962.

6.3. CENÁRIO 3: CHEIA MILENAR COM UM PICO

6.3.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

A Figura 58 apresenta o mapa de elevação da superfície livre, as 09:00 no dia 23 de Dezembro, com o caudal máximo de 24 630 m^3/s, resultante da simulação do evento extremo da cheia milenar com um pico. A superfície livre se manteve elevada junto à barra e ao longo do estuário superior e intermédio, com valores de 10.82 m acima do NMM registado na ponte do Freixo, 9.29 m registados Ponte Luís I, e diminuindo gradualmente até à foz e não galgando a restinga (ver Figura 57). O valor calculado sob a Ponte Luís I é bastante inferior ao registado durante a cheia centenária de Dezembro de 1909, quando o nível máximo terá ficado cerca de 0.80 m abaixo do tabuleiro da ponte, portanto a um nível de cerca de 11 m. A distribuição é coerente com a morfologia e com mecanismos de propagação da cheia, confirmando a sua consistência dos resultados do modelo.

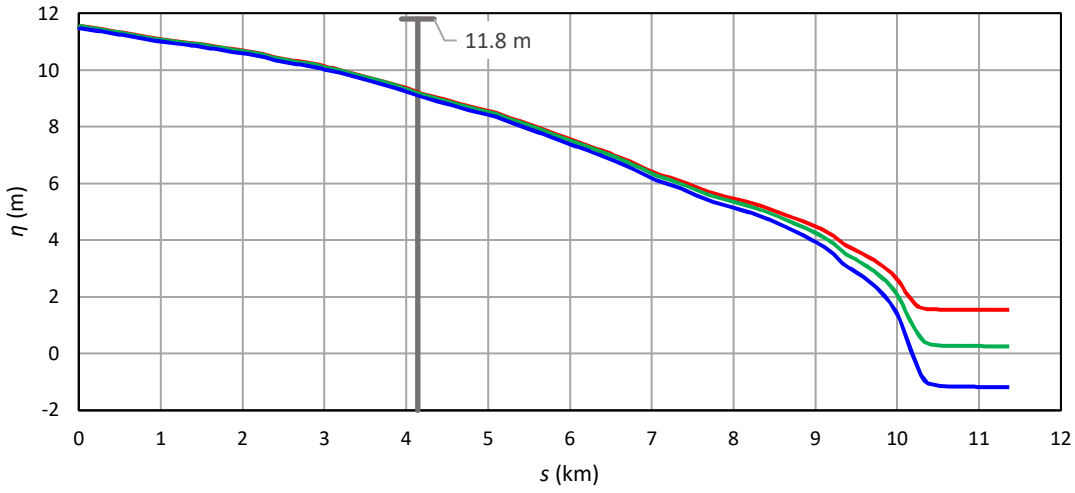

Figura 57 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 1000$ anos. Máxima (—); 23Dez1909 09h00 (—); 24Dez1909 18h00 (—).

6.3.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO

O campo de velocidade revela zonas de aceleração (ver Figura 59), pronunciada em torno das curvas do leito, onde os valores máximos da velocidade ultrapassam 15 m/s. Na confluência junto a Ponte da Arrábida, identifica-se um jato de caudal muito concentrado que incide sobre a margem sul, potencialmente responsável por erosão localizada. Ao longo do estuário superior e intermédio, a velocidade tende a diminuir a jusante das contrações, alcançando valores de 7.70 m/s na Ponte D. Luís I, e mantem-se acima de 7 m/s até perto do estuário inferior, indicando fluxo rápido que reforça a capacidade de arraste de sedimentos. É possível notar na embocadura, devido ao estreitamento do canal, o aumento da velocidade.

6.3.3. PROFUNDIDADES

O mapa de profundidades (ver Figura 60), mostra que, sob a cheia com um pico, a lamina de água atinge valores máximos na ordem de 15 m, sobretudo no canal principal e nas zonas de calha natural mais funda. Nas margens alagadas, as profundidades oscilam entre 2 e 7 m, suficiente para submergir infraestruturas ribeirinhas. O perfil transversal mostra maiores profundidades em meandros acentuados.

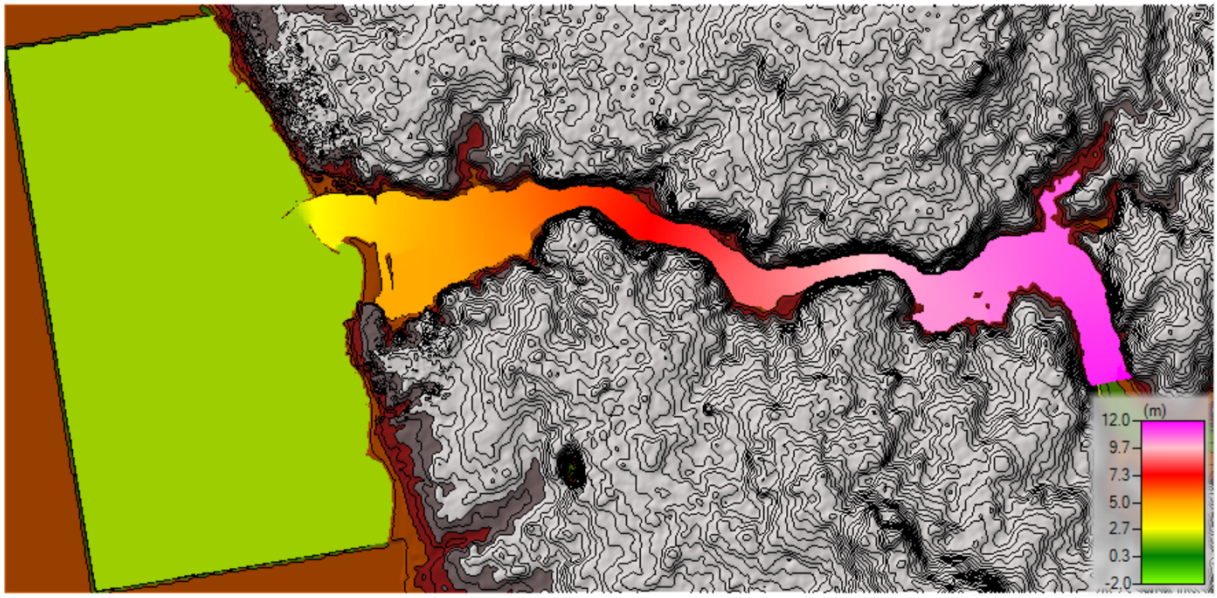

Figura 58 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos.

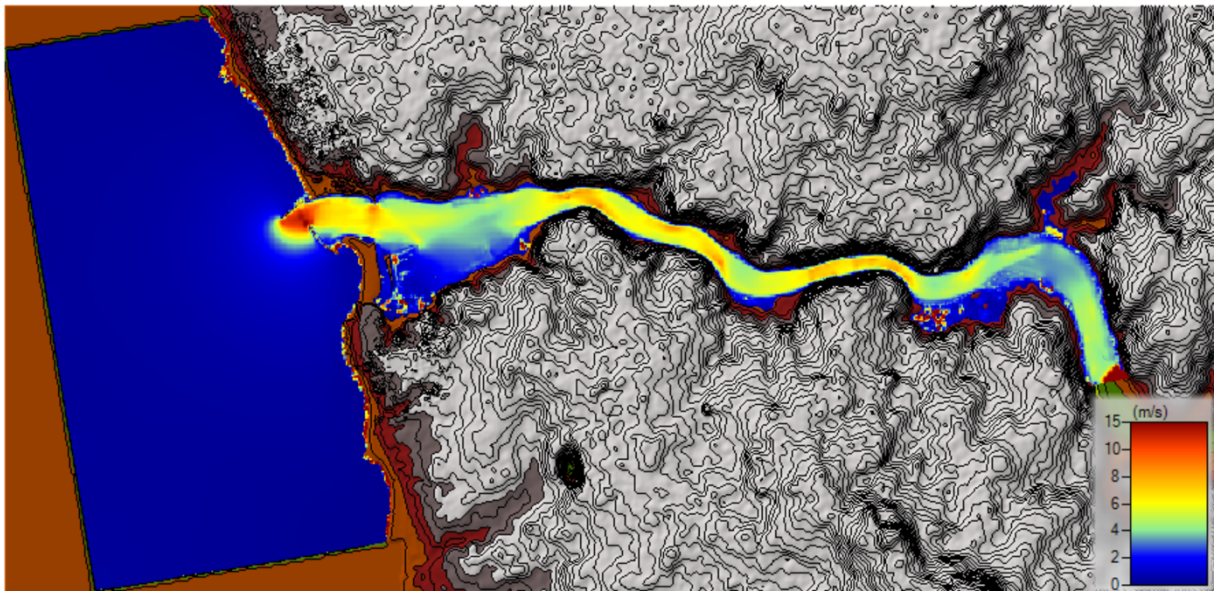

Figura 59 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos.

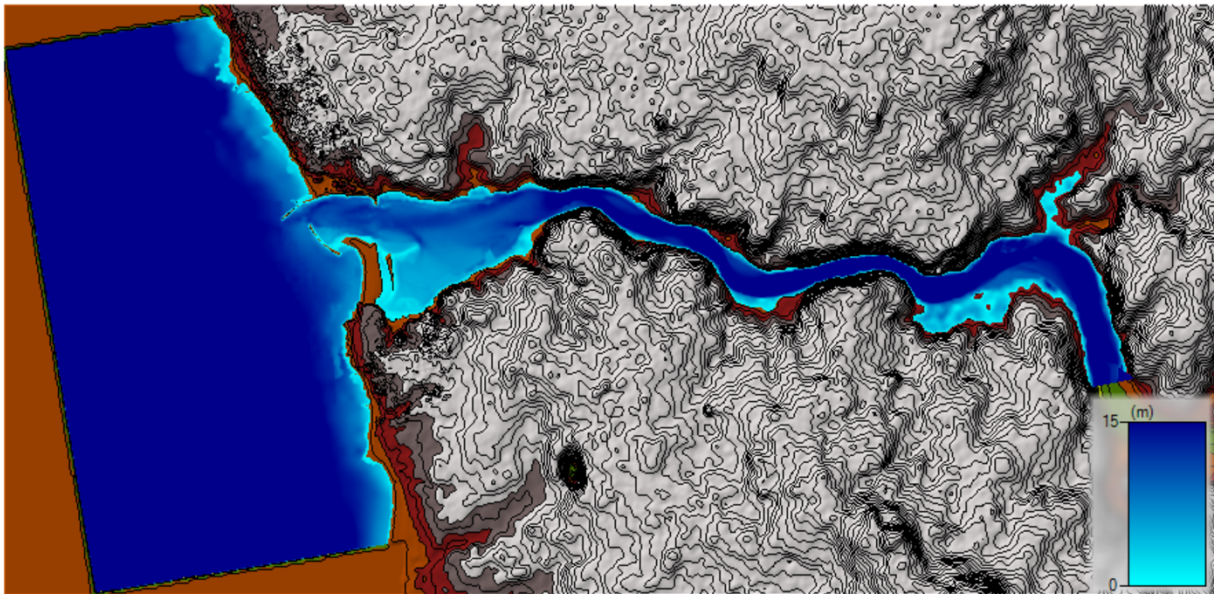

Figura 60 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com um pico, para um período de retorno de 1000 anos.

6.4. CENÁRIO 4: CHEIA MILENAR COM DOIS PICOS

6.4.1. ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

A Figura 62 apresenta o mapa de elevação da superfície livre, as 06:00 h no dia 03 de Janeiro, com o caudal máximo de 24 630 m^3/s, resultante da simulação do evento extremo da cheia milenar com dois picos. A inundação evidencia uma elevação máxima da lâmina de água próxima de 12 m na zona da ribeirinha e Vila Nova de Gaia. A superfície livre se manteve elevada junto à barra e ao longo do estuário superior e intermédio, com valores de 10.75 m acima do NMM registado na ponte do Freixo, 9.13 m

registados Ponte D. Luís I, e diminuindo gradualmente até à foz e não galgando a restinga (ver Figura 61). A distribuição é coerente com a morfologia e com mecanismos de propagação da cheia, confirmando a sua consistência dos resultados do modelo.

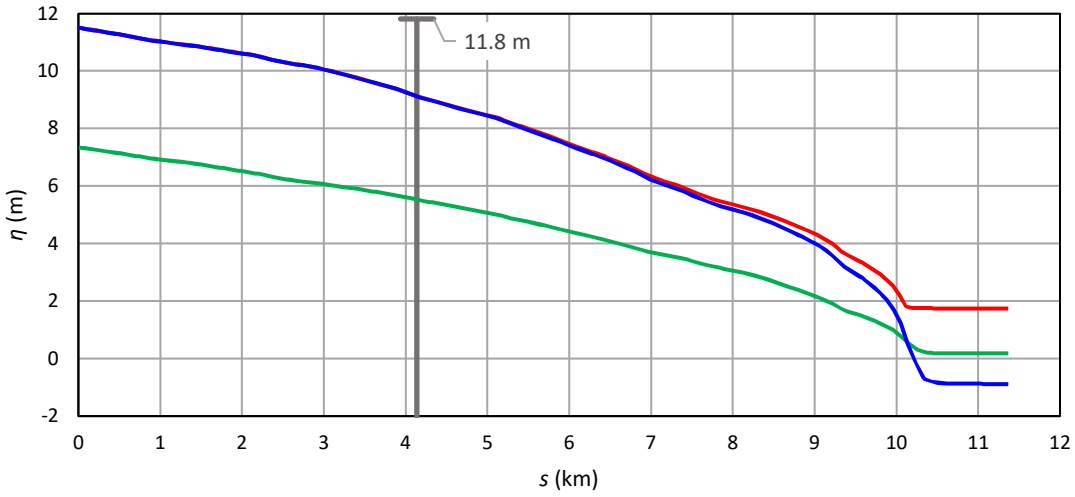

Figura 61 – Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para $T = 100$ anos. Máxima (—); 31Dez1961 12h00 (—); 03Jan1962 06h00 (—).

6.4.2. VELOCIDADE DO ESCOAMENTO

O campo de velocidade (ver Figura 63), revela zonas de aceleração pronunciada em torno das curvas do leito, onde os valores máximos da velocidade ultrapassam 15 m/s. Na confluência junto a Ponte da Arrábida, identifica-se um jato de caudal muito concentrado que incide sobre a margem sul, potencialmente responsável por erosão localizada. Ao longo do estuário superior e intermédio, a velocidade tende a diminuir a jusante das contrações, alcançando valores de 7.88 m/s na Ponte D. Luís I, e mantem-se acima de 7.5 m/s até perto do estuário inferior, indicando fluxo rápido que reforça a capacidade de arraste de sedimentos. É possível notar na embocadura, devido ao estreitamento do canal, o aumento da velocidade.

6.4.3. PROFUNDIDADES

O mapa de profundidades (ver Figura 64), mostra que a cheia de dois picos, a lamina de água atinge valores máximos na ordem de 15 m, sobretudo no canal principal e nas zonas de calha natural mais funda. Nas margens alagadas, as profundidades oscilam entre 2 e 7 m, suficiente para submergir infraestruturas ribeirinhas. O perfil transversal mostra maiores profundidades em meandros acentuados.

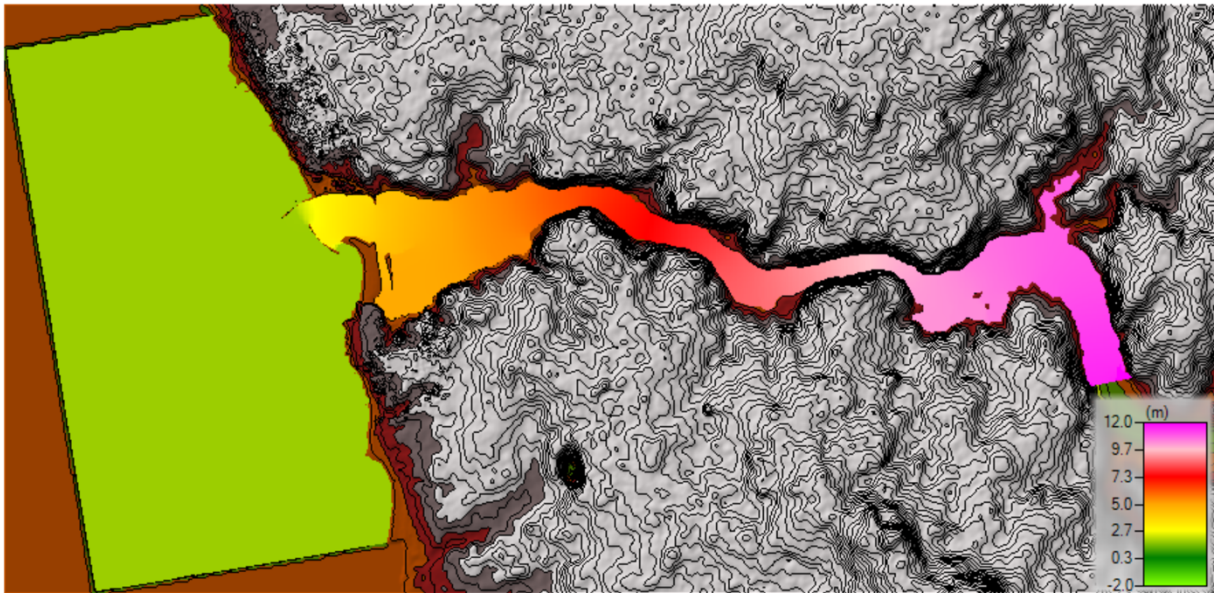

Figura 62 - Elevação da superfície livre no instante de caudal máximo simulado para cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos.

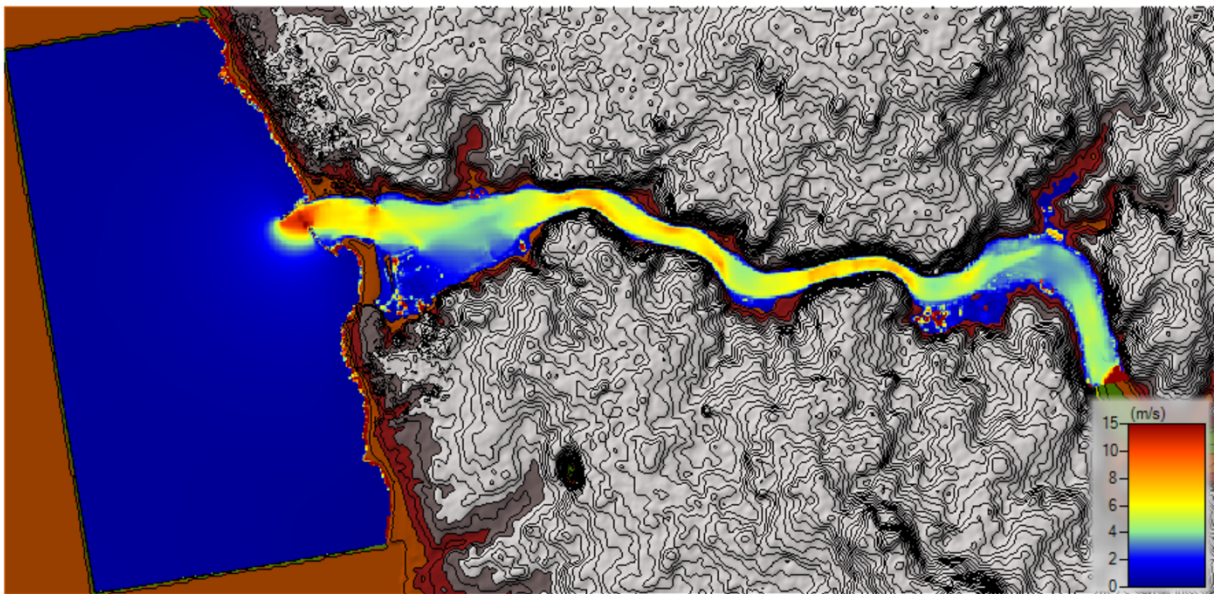

Figura 63 - Velocidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos.

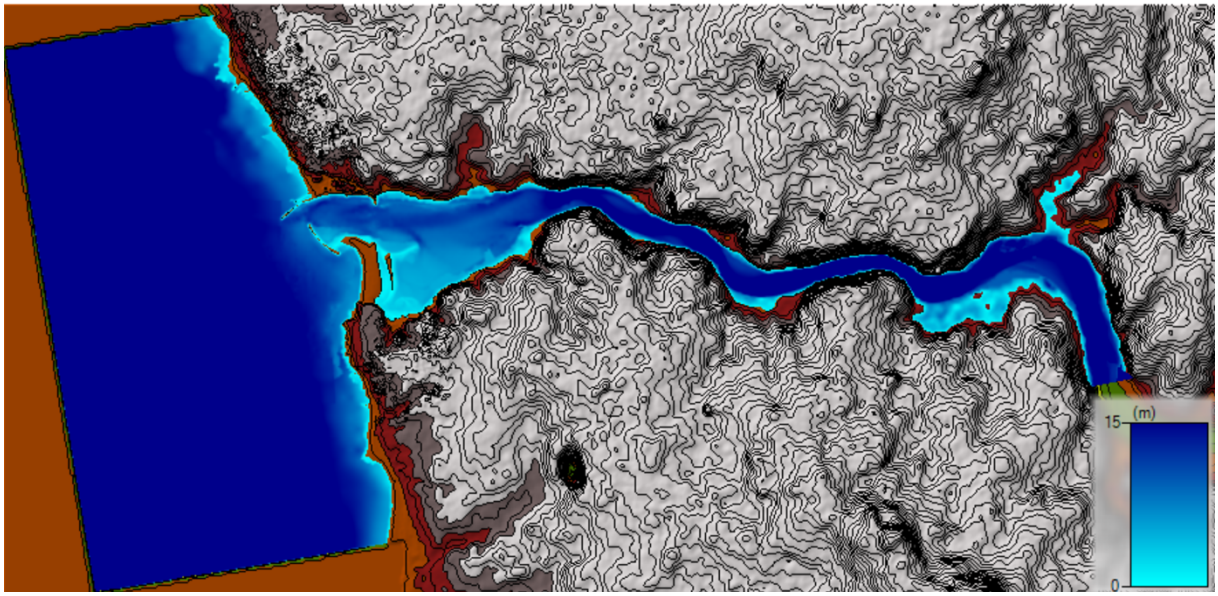

Figura 64 - Profundidade do escoamento no instante de caudal máximo simulado para a cheia milenar com dois picos, para um período de retorno de 1000 anos.

6.5. CONCLUSÕES PARA OS CENÁRIOS

A análise dos quatro cenários simulados, que incluíram dois eventos históricos (1909 e 1962) e duas cheias milenares com diferentes configurações de pico, permitiu uma avaliação abrangente do comportamento da restinga do Douro sob diferentes regimes hidrológicos.

Os resultados demonstram que, mesmo perante caudais extremos superiores a 16 000 m³/s, a restinga não foi galgada nem sofreu roturas significativas. A hidrodinâmica do escoamento revelou velocidades elevadas ao longo do canal principal, mas estas não foram suficientes para comprometer a integridade estrutural da restinga na sua configuração atual. A elevação da superfície livre, embora acentuada nas zonas ribeirinhas, manteve-se abaixo da cota crítica para o galgamento do corpo sedimentar, em grande parte devido ao reforço proporcionado pelos molhes.

Nos cenários milenares, com picos de cheia mais abruptos e intensos, o comportamento manteve-se idêntico. A restinga continuou a funcionar como uma barreira física, impedindo o escoamento direto para o mar e provocando a retenção de caudais no interior do estuário. Esta situação confirma que a função fusível, anteriormente observada em cheias históricas, está atualmente comprometida.

Conclui-se, portanto, que a restinga, na sua configuração atual, não ativa o seu efeito fusível mesmo em condições de cheia severa. Embora essa estabilidade contribua para a proteção costeira, acentua o risco de inundação nas margens urbanas, uma vez que limita a capacidade de descarga do estuário. A avaliação futura do risco de cheia deverá considerar este bloqueio potencial, integrando a morfologia atual da restinga no planeamento de resposta a eventos extremos.

6.6. SEDIMENTOLOGIA

Na análise sedimentológica do estuário, o canal principal foi considerado erodível, permitindo avaliar os processos de transporte imobilização de sedimentos. Em contraste, foram configuradas duas zonas como não erodíveis, correspondentes aos molhes Norte e Sul (ver Figura 66).

Para a caraterização do fundo, foi definido o *bed gradation* com base nos diferentes sedimentos identificados, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Distribuição granulométrica do leito.

	Classe	D (mm)		% da Classe
1	Clay	0.002	0.004	2
2	VFM	0.004	0.008	2.9
3	FM	0.008	0.016	4.4
4	MM	0.016	0.031	5.8
5	CM	0.0313	0.0625	7
6	VFS	0.0625	0.125	8.7
7	FS	0.125	0.25	10.3
8	MS	0.25	0.5	14.6
9	CS	0.5	1	26.4
10	VCS	1	2	51.2
11	VFG	2	4	74.1
12	FG	4	8	88.3
13	MG	8	16	96.4
14	CG	16	32	99.7
15	VCG	32	64	100

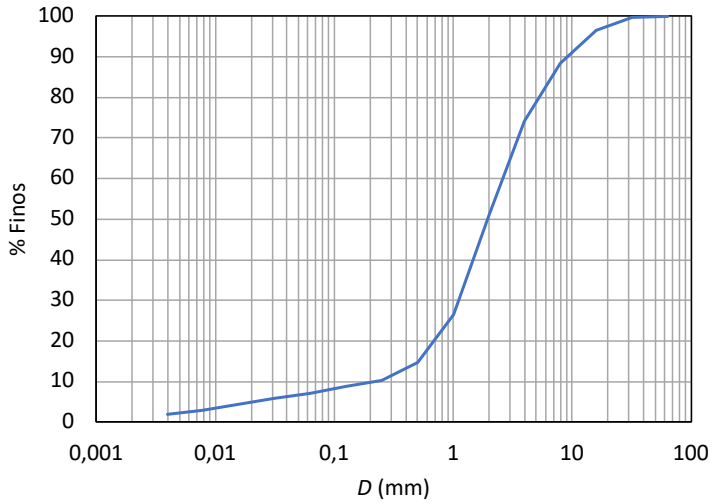

Figura 65 – Curva granulométrica.

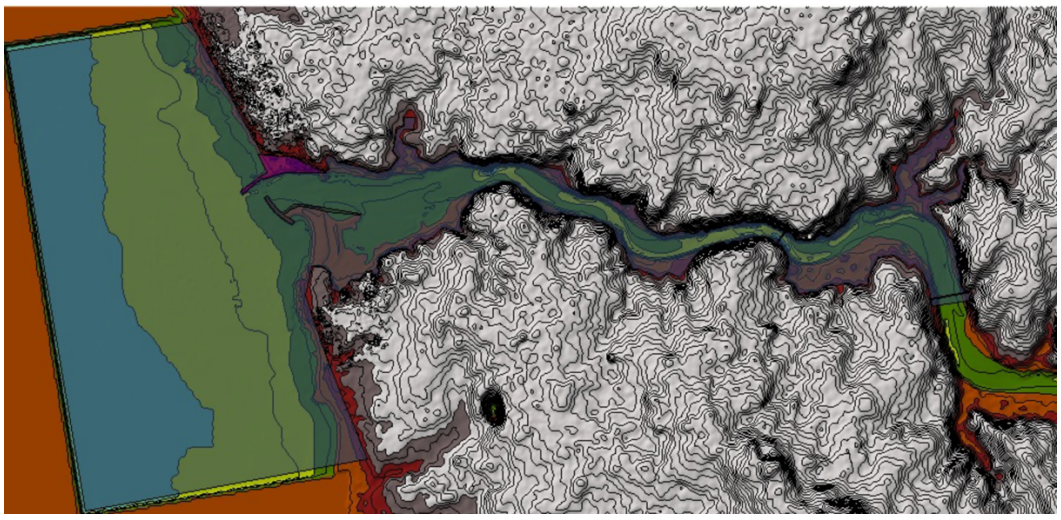

Figura 66 – Configuração do canal e estruturas de contenção.

BIBLIOGRAFIA

Aires, C., Pereira, D., & Azevedo, T. (2000). *Inundações do rio Douro: Dados históricos e hidrológicos. Jornadas do Quaternário da APEQ, FLUP. Porto.*

Almeida, A., Pinto, F. T., Gomes, F. V., & Paredes, G. M. (2009). *Análise das marés meteorológicas em Leixões. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. 8 e 9 de Outubro de 2009, Funchal.*

Almeida, J. F. F. (2013). *Modelação da Hidrodinâmica e da Dinâmica Sedimentar do Estuário do Douro.* Tese de Mestrado, Universidade do Minho.

APA. (2012). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro (RH3). Relatório de Base. Parte 2 — Caracterização e Diagnóstico da Região Hidrográfica. Agência Portuguesa do Ambiente.*

APA. (2014). *Questões Significativas da Gestão da Água (QSiGA). Região Hidrográfica do Douro (RH3). Agência Portuguesa do Ambiente.*

APA. (2016). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica. Parte 2 — Caracterização e Diagnóstico. Região Hidrográfica Do Douro (RH3). Agência Portuguesa do Ambiente.*

APA. (2018). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica. Parte 2 — Caracterização e Diagnóstico. Região Hidrográfica do Douro — RH3*.

Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., & Blöschl, G. (2006). A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. *Natural Hazards*, *38*(1–2), 79–100. https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7

Araújo, M. F., Jouanneau, J.-M., Valério, P., Barbosa, T., Gouveia, A., Weber, O., Oliveira, A., Rodrigues, A., & Dias, J. M. A. (2002). Geochemical tracers of northern Portuguese estuarine sediments on the shelf. *Progress in Oceanography*, *52*(2), 277–297. https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00011-3

Azevedo, I. C., Bordalo, A. A., & Duarte, P. M. (2010). Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). *Water Research*, *44*(10), 3133–3146. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.03.011

Baptista, P. (2006). *O sistema de Posicionamento Global Aplicado ao Estudo de Litorais Arenosos.* Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

Bastos, L., Bio, A., Pinho, J. L. S., Granja, H., & Jorge da Silva, A. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *109*, 53–69. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017

Brown, J. M., & Davies, A. G. (2010). Flood/ebb tidal asymmetry in a shallow sandy estuary and the impact on net sand transport. *Geomorphology*, *114*(3), 431–439. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.08.006

Cronin, K. M., Devoy, R. J. N., & Gault, J. (2007). Modelling Estuarine Morphodynamics on the South Coast of Ireland. *Journal of Coastal Research*, *50*(sp1). https://doi.org/10.2112/JCR-SI50-091.1

Cruz, M., Henriques, R., Pinho, J. L., Avilez-Valente, P., Bio, A., & Iglesias, I. (2023). Assessment of the potential for hydrokinetic energy production in the Douro river estuary under sea level rise scenarios. *Energy*, *271*, 126960. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126960

Dam, G., Van Der Wegen, M., Labeur, R. J., & Roelvink, D. (2016). Modeling centuries of estuarine morphodynamics in the Western Scheldt estuary. *Geophysical Research Letters*, *43*(8), 3839–3847. https://doi.org/10.1002/2015GL066725

Daveau, S. (2000). *Portugal Geográfico. Lisboa.*

Day, J. H. (1980). *What is an estuary? South African Journal of Science 76, 198.*

Dias, J. M. A., Gonzalez, R., Garcia, C., & Diaz-del-Rio, V. (2002). Sediment distribution patterns on the Galicia-Minho continental shelf. *Progress in Oceanography*, *52*(2–4), 215–231. https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00007-1

Dionne, J. C. (1963). *Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. Zeitschrift fuer Geomorphologie 7.* 36–44.

Dyer, K. R. (1995). Sediment Transport Processes in Estuaries. Em G. M. E. Perillo (Ed.), *Developments in Sedimentology* (Vol. 53, pp. 423–449). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80034-2

Egbert, G. D., Bennett, A. F., & Foreman, M. G. G. (1994). TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *99*(C12), 24821–24852. https://doi.org/10.1029/94JC01894

European Commission. (2011). *Guidelines on the Implementation of the Birds and Habitats Directives in Estuaries and Coastal Zones. Publications Office of the European Union.*

Gonçalves, F. (2022). *Efeito das alterações climáticas na dinâmica sedimentar da restinga do rio Douro*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Gonçalves, F., Bio, A., Iglesias, I., & Avilez-Valente, P. (2023). Sea Level Rise Effects on the Sedimentary Dynamics of the Douro Estuary Sandspit (Portugal). *Water*, *15*(15), 2841. https://doi.org/10.3390/w15152841

Hergarten, S., & Robl, J. (2015). Modelling rapid mass movements using the shallow water equations in Cartesian coordinates. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *15*(3), 671–685. https://doi.org/10.5194/nhess-15-671-2015

Hodgkin, E. P., & Lenanton, R. C. (1981). Estuaries and Coastal Lagoons of South Western Australia. Em B. J. Neilson & L. E. Cronin (Eds.), *Estuaries and Nutrients* (pp. 307–321). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5826-1_14

Huntley, D. A., Coco, G., & O'Hare, T. J. (2004). *Abstracted modelling as a tool for understanding and predicting coastal morphodynamics. Journal of Coastal Research, Special Issue 39, 21–27.*

Hydroqual. (2002). *Users Manual, Version 1.3. HydroQual, Inc, Mahwah, NJ, USA.*

Iglesias, I., Bio, A., Bastos, L., & Avilez-Valente, P. (2021). Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: The Douro estuary case study. *Energy*, *222*, 119972. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119972

Iglesias, I., Bio, A., Melo, W., Avilez-Valente, P., Pinho, J., Cruz, M., Gomes, A., Vieira, J., Bastos, L., & Veloso-Gomes, F. (2022). Hydrodynamic model ensembles for climate Change projections in estuarine regions. *Water*, *14*(12), 1966. https://doi.org/10.3390/w14121966

Iglesias, I., Pinho, J. L., Venâncio, S., Avilez-Valente, P., Peixoto, R., & Vieira, J. M. (2018). Simulação de níveis de cheia no estuário do rio Douro, antes e após a construção dos molhes. *Revista Recursos Hídricos*, *39*(1), 21–30. https://doi.org/10.5894/rh39n1-cti1

Iglesias, I., Venâncio, S., Pinho, J. L., Avilez-Valente, P., & Vieira, J. M. P. (2019). Two models solutions for the Douro estuary: Flood risk assessment and breakwater effects. *Estuaries and Coasts*, *42*(2), 348–364. https://doi.org/10.1007/s12237-018-0477-5

IPTM. (2003). *Estudo de Impacte Ambiental das Obras de Melhoria de Acessibilidade e Segurança da Barra do Douro. Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos*.

Kostaschuk, R. A., & Luternauer, J. L. (1989). The role of the salt-wedge in sediment resuspension and deposition: Fraser river estuary, Canada. *Journal of Coastal Research*, *5*(1), 93–101.

Kragtwijk, N. G., de Vries, M. B., Stive, M. J. F., & Wang, Z. B. (2004). *Morphological response of tidal basins to human interventions. Coastal Engineering, 51(3), 207-221*.

Larson, M., Kraus, N. C., & Hanson, H. (2003). Simulation of Regional Longshore Sediment Transport and Coastal Evolution – The «Cascade» Model. *Coastal Engineering 2002*, 2612–2624. https://doi.org/10.1142/9789812791306_0218

Lesser, G. R., Roelvink, J. A., Van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, *51*(8–9), 883–915. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014

Magalhães, F. (2001). *Os Sedimentos da Plataforma Continental Portuguesa: Contrastes Espaciais, Perpspectiva Temporal, Potencialidades Económicas. Instituto Hidrográfico, Lisboa.* Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.

Martelo, A. F., Trombetta, T. B., Lopes, B. V., Marques, W. C., & Möller, O. O. (2019). Impacts of dredging on the hydromorphodynamics of the Patos Lagoon estuary, southern Brazil. *Ocean Engineering*, *188*, 106325. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106325

Mucha, A. P., Vasconcelos, M. T. S. D., & Bordalo, A. A. (2003). Macrobenthic community in the Douro estuary: Relations with trace metals and natural sediment characteristics. *Environmental Pollution*, *121*(2), 169–180. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00229-4

O'Brien, M. P. (1969). Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. Journal of the Waterways and Harbors Division, 95. *Coastal Engineering Proceedings*, *10*, 43-52. https://doi.org/10.9753/icce.v10.38

Oliveira, M., & Silva, J. (2001). *As cheias na parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Douro.* HIDRORUMO — Projecto e Gestão, S.A.

OpenTopography. (2021). *NASADEM Global 1 arc-second Digital Elevation Model*. OpenTopography. https://doi.org/10.5069/G93T9FD9

Peixoto, R. (2016). *Modelacão Hidrodinâmica do Estuário do Douro: Cenários de Cheia e a Influência dos Novos Molhes*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Pereira, S., Ramos, A. M., Zêzere, J. L., Trigo, R. M., & Vaquero, J. M. (2016). Spatial impact and triggering conditions of the exceptional hydro-geomorphological event of December 1909 in Iberia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*(2), 371–390. https://doi.org/10.5194/nhess-16-371-2016

Perillo, G. M. E. (1995). Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. Em G. M. E. Perillo (Ed.), *Developments in Sedimentology* (Vol. 53, pp. 17–47). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(05)80022-6

Petrow, T., & Merz, B. (2009). Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology*, *371*(1), 129–141. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.024

Portela, L. I. (2002). *Plano Específico de Extração de Inertes do Rio Douro: Caracterização Morfodinâmica do Estuário do Rio Douro. Relatório 215/02-NEC, LNEC, Lisboa.*

Portela, L. I. (2008). Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters*, *28*(2), 77–86. https://doi.org/10.1007/s00367-007-0091-1

Potter, I. C., Chuwen, B. M., Hoeksema, S. D., & Elliott, M. (2010). The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *87*(3), 497–500. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.021

Pritchard, D. W. (1967). *What Is an Estuary: Physical Viewpoint. In G. H. Lauff (Ed.), Estuaries (AAAS Publication No. 83, pp. 3-5). American Association for the Advancement of Science. Washington, D.C.*

Robins, P. E., & Davies, A. G. (2010). Morphological controls in sandy estuaries: The influence of tidal flats and bathymetry on sediment transport. *Ocean Dynamics*, *60*(3), 503–517. https://doi.org/10.1007/s10236-010-0268-4

Rocha, J. S., & Alves, E. (2002). *Plano Específico Preliminar de Extracção de Inertes na Albufeira de Crestuma-Lever, Rio Douro. Relatório 186/ 02-NHE, LNEC, Lisboa.*

Rodrigues, R., Brandão, C., & Costa, J. P. da. (2003). *As cheias no Douro ontem, hoje e amanhã*. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Instituto da Água.

Saint-Venant, A. J. C. B. (1871). *Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, 73, 147-154, 237-240. Paris: Gauthier-Villars.*

Sánchez, J. F. (2020). *Estrategias y planes de protección de la costa española para el control de la erosión y la adaptación al cambio climático. Conferência Ibérica sobre Adaptação às Alterações Climáticas, Agência Portuguesa do Ambiente.*

Santos, C. (2014). *Evolução Morfodinâmica da Restinga do Douro a Várias Escalas Temporais.* Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Santos, I., Teodoro, A. C., & Pinto, F. (2010). *Análise da evolução morfológica da restinga do Rio Douro / Analisys of Morphological Evolution of Douro River Sand Spit*.

Santos, M. (2015). *Análise hidro-meteorológica de cheias na região Norte de Portugal*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa.

Sarmento, M. (2021). *Impacto Hidrodinâmico e Morfodinâmico das Alterações Climáticas no Estuário do Rio Douro*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Silva, G. (2021). *A cheia de 1962. Porto Editora.*

Silva, M. (2000). Estuários—Critérios para uma classificação ambiental. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, *5*(1), 23–35. https://doi.org/10.21168/rbrh.v5n1.p23-35

Tambroni, N., Bolla Pittaluga, M., & Seminara, G. (2005). Laboratory observations of the morphodynamic evolution of tidal channels and tidal inlets. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *110*(F4), 2004JF000243. https://doi.org/10.1029/2004JF000243

Teixeira, R. (2012). *Quebramares Portugueses. Inventário e Análise Comparativa de Soluções*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto.

Thomas, C. (2002). *The application of historical data and computational methods for investigating causes of long-term morphological change in estuaries: A case study.* Tese de Doutoramento, Universidade de Southampton.

Veloso-Gomes, F. M., Taveira-Pinto, F. de A., & Paredes, G. M. (2009). *Estudo da Evolução da Fisiografia da Restinga do Rio Douro desde 2002. In 4as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*

Vera Cruz, D. (1969). *Praia de Copacabana. Estudo em Modelo Reduzido. Processo Misto Programado de Alimentação. Relatório Técnico. LNEC.*

Vera Cruz, D. (1968b). *Praia de Copacabana. Estudo do Alargamento em Modelo Reduzido. Alimentação Submarina. Relatório Técnico. LNEC.*

Vera Cruz, D. (1968a). *Praia de Copacabana. Estudo Em Modelo Reduzido. Relatório Técnico. LNEC.*

Vieira, A., & Costa, F. (2014). *A cheia do Douro de 1909: Consequências e medidas de recuperação nas áreas ribeirinhas do Porto e Gaia*. 890–898.

Vieira, M. E. C., & Bordalo, A. A. (2000). The Douro estuary (Portugal): A mesotidal salt wedge. *Oceanologica Acta*, *23*(5), 585–594. https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01107-5

Villaret, C., Hervouet, J.-M., Kopmann, R., Merkel, U., & Davies, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Computers & Geosciences*, *53*, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.004

Warner, J. C., Sherwood, C. R., Signell, R. P., Harris, C. K., & Arango, H. G. (2008). Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, *34*(10), 1284–1306. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.02.012

Warren, I. R., & Bach, H. K. (1992). MIKE 21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, *7*(4), 229–240. https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-P

Weber de Melo, W., Iglesias, I., & Pinho, J. (2025). Early warning system for floods at estuarine areas: Combining artificial intelligence with process-based models. *Natural Hazards*, *121*(4), 4615–4638. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06957-8