

ESTUDO DE NOVAS SOLUÇÕES PARA A ESTABILIZAÇÃO DA RESTINGA DE ESPOSENDE

INÊS OLIVEIRA CÂNDIDO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Doutor Engenheiro José Victor Ramos Castro

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@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

Fax +351-22-508 1440

✉ 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 Integrado em *Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

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.

Ao meu Avô

“O mar não é um obstáculo: é um caminho”

Amyr Klink

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto, pelos conhecimentos transmitidos, críticas construtivas e conselhos, essenciais para a elaboração desta dissertação.

Ao meu coorientador, Doutor Engenheiro José Victor Ramos Castro, por todo o conhecimento e auxílio com o software Delft3D, pelos conselhos e pelo encorajamento no decorrer deste projeto.

À Polis Litoral Norte por ter facultado os dados batimétricos do caso de estudo desta dissertação e dos projetos das intervenções realizadas na última década.

Aos meus colegas de curso, pela disponibilidade, partilha de conhecimentos e sugestões por forma a clarificar as minhas ideias. Também aos meus amigos, que sempre mostraram interesse no meu trabalho e pela motivação oferecida.

Por último, agradeço aos meus pais, irmãos e namorado por toda a paciência, por garantirem as condições necessárias para trabalhar e pelo incentivo ao longo da elaboração da dissertação, e durante todo o percurso académico, principalmente nos momentos menos positivos.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

RESUMO

A restinga de Esposende é um sistema dunar natural, sensível, cuja forma e tamanho são controlados por um intenso transporte sedimentar, que resulta de uma combinação não linear de diferentes processos costeiros como a agitação marítima, os ventos e as descargas do rio Cávado. Como consequência, grande parte do transporte sedimentar presente no canal de navegação provém dos sedimentos deslocados da restinga para o interior do canal, reduzindo a acessibilidade aos portos locais. Adicionalmente, as ocorrências de eventos extremos podem provocar a rutura da restinga, aumentando o risco de inundações na frente urbana da cidade de Esposende.

Tendo em consideração as questões apresentadas, a presente dissertação tem como objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico na restinga de Esposende, considerando a inclusão de soluções de proteção costeira. Este estudo considera duas propostas: a primeira, composta por dois quebramares destacados a Oeste da restinga; a segunda, composta pelos mesmos quebramares destacados e, adicionalmente, por uma estrutura longitudinal a sotamar da restinga.

Para este propósito, o presente estudo foi realizado utilizando o modelo numérico Delft3D, que é um modelo costeiro livre de diferenças finitas. As condições hidrodinâmicas e morfológicas foram determinadas para diferentes cenários, associadas aos efeitos do nível do mar, da agitação marítima e das descargas fluviais. Neste contexto, foram selecionados doze cenários e, posteriormente, procedeu-se a uma análise comparativa qualitativa entre a situação atual e a situação que inclui a proposta da intervenção.

Através deste estudo, concluiu-se que para caudais extremos o estuário é predominantemente controlado pelos escoamentos fluviais, sentindo-se pouca ou nenhuma influência das marés. Para caudais mais recorrentes, na situação atual verificou-se que os sedimentos são transportados em direção à margem direita do estuário, afunilando as correntes de refluxo para a margem esquerda. A construção de quebramares destacados permite encaminhar os sedimentos do interior do estuário para sul, em direção à restinga. Já a inclusão da estrutura longitudinal, ao afunilar a largura do canal de navegação, intensifica a circulação dos sedimentos no final do mesmo. A análise das alturas de onda significativas mostra que na situação atual, a foz do rio Cávado e a restinga estão altamente expostos, especialmente para os níveis de maré alta. A inclusão dos quebramares destacados permite minimizar a energia das ondas que incidem na extremidade Norte da restinga. Relativamente às variações de erosão/acreção, verificou-se que no estado atual a embocadura do rio Cávado tem tendência a sofrer erosão, formando um banco de areia a Oeste. Além disso, o canal de navegação sofre uma significativa deposição sedimentar. Por oposição, a extremidade Norte da restinga é significativamente erodível. A construção dos quebramares destacados promove a diminuição da deposição de sedimentos na foz e aumenta a alimentação natural na extremidade Norte da Restinga.

PALAVRAS-CHAVE: modelação numérica - Delft3D, proteção costeira, quebramares destacados, restinga de Esposende.

ABSTRACT

The Esposende sandspit is a natural dune system, whose shape and size is controlled by an intense sediment transport, which results from the non-linear combination of different coastal processes such as wave and wind conditions as well as the fresh water discharges of river Cávado. In consequence, an important sediment transport is present in the region, in which part of the sediments accumulated in the sandspit are driven towards the main navigation channel, reducing the accessibility of local ports. Besides, extreme events may cause the rupture of the sandspit, increasing significantly the flood risk at the urban front of the city of Esposende.

Taking into account the aforementioned issues, this dissertation aims to analyze the hydrodynamic and morphodynamic conditions in the sandspit of Esposende and its behavior considering the inclusion of coastal protection solutions. This study considers two proposals: the first one, composed of two detached breakwaters, located West of the sandspit; the second one, composed of the same detached breakwaters and, additionally, by a longitudinal structure placed behind the sandspit.

For this purpose, the present study was carried out by using the Delft3D numerical model, which is an open-source finite difference coastal model. Therefore, the wave, hydrodynamic and morphodynamic conditions were determined for different scenarios, associated with the effects of tides, waves and river discharges. In this context, twelve scenarios were selected and a qualitative comparative analysis between the current situation and the situation including the proposed interventions was subsequently performed.

Throughout this study, it was concluded that for extreme flows, the estuary is predominantly controlled by river flows, with the tides showing little to no influence in the hydrodynamics of the region. Conversely for lower river discharges, it was found that sediments are transported towards the right margin of the estuary, funnelling the flow within the left margin of the estuary. The construction of detached breakwaters drives the sediments from the interior of the estuary to the south, towards the sandspit. The inclusion of the longitudinal structure intensifies the circulation of sediments at the end of the channel, by narrowing the width of the navigation channel. The analysis of the significant wave heights shows that in the current situation, the mouth of the estuary and the sandspit are highly exposed, especially for high tide levels. The inclusion of the detached breakwaters allows minimizing the energy of the waves that fall on the north end of the sandspit. Regarding the erosion/accretion variations, it was verified that in the current state, the mouth of Cávado river tends to suffer erosion, forming a sandbank to the West. Additionally, the navigation channel suffers a significant sediment deposition. In contrast, the northern end of the sandspit is significantly subject to be eroded. The construction of the detached breakwaters promotes the decrease of sediment deposition at the mouth and increases the natural feeding at the northern end of the sandspit.

KEYWORDS: numerical modelling - Delft3D, coastal protection, detached breakwaters, Esposende sandspit.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. INTERAÇÃO OCEANO-ESTUÁRIO	5
2.1 FENÓMENOS DE INTERAÇÃO OCEANO-ESTUÁRIO	5
2.2 CORRENTES DE MARÉ	8
2.3 TRANSPORTE SEDIMENTAR E O FENÓMENO DE EROÇÃO NAS EMBOCADURAS	9
2.4 FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE ACUMULAÇÕES SEDIMENTARES	11
2.5 EMBOCADURAS SIMILARES	13
2.5.1 RIA DE AVEIRO	14
2.5.2 CABEDELLO, ESTUÁRIO DO DOURO	15
2.5.3 RIA FORMOSA, ALGARVE	17
2.5.4 BANCO DE O'BRIL, ESTUÁRIO DO GUADIANA	18
2.5.5 LAGOA DE PATOS, BRASIL	19
2.6 SOLUÇÕES DE FIXAÇÃO DE EMBOCADURAS	19
2.6.1 QUEBRAMARES OU MOLHES	20
2.6.2 QUEBRAMARES DESTACADOS	22
2.6.3 DRAGAGENS	23
2.7 EVOLUÇÃO LOCAL	25
3. PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO PARA A RESTINGA DE ESPOSENDE	31
3.1 O RIO CÁVADO	31
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO	32
3.2.1 CAUDAIS	36

3.2.2	AGITAÇÃO MARÍTIMA.....	39
3.2.3	MARÉS.....	41
3.2.4	CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS.....	42
3.3	ESTUDOS REALIZADOS.....	44
3.3.1	PROJETO DE MELHORIA DA BARRA DO CÁVADO.....	45
3.3.2	MODELAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DINÂMICA SEDIMENTAR NO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO... ..	46
3.3.3	CARACTERÍSTICAS DO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO	48
3.4	INTERVENÇÕES REALIZADAS APÓS 2015.....	49
3.4.1	COLOCAÇÃO DE GEOCILINDROS NA RESTINGA DE OFIR	49
3.4.2	REABILITAÇÃO DO MOLHE NORTE DA EMBOCADURA DO RIO CÁVADO – 1ª FASE	52
3.4.3	ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DAS PRAIAS ADJACENTES À FOZ DO CÁVADO	55
3.4.4	REABILITAÇÃO DO MOLHE NORTE DA EMBOCADURA DO RIO CÁVADO – 2ª FASE	56
3.5	NOVAS SOLUÇÕES PARA PROTEÇÃO DA RESTINGA	57
4.	MODELAÇÃO NUMÉRICA	63
4.1	MODELO NUMÉRICO DELFT3D.....	63
4.2	DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS MÓDULOS DO DELFT3D	64
4.2.1	MÓDULO DELFT3D-FLOW.....	64
4.2.2	MÓDULO DELFT3D-WAVE	65
4.2.3	MÓDULO DELFT3D-MORPHOLOGY	66
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DOS MÓDULOS DELFT3D.....	67
4.3.1	DEFT3D-FLOW.....	67
4.3.2	DEFT3D-WAVE.....	73
4.4	VALIDAÇÃO DO MODELO	76
4.5	CONDIÇÕES DE TESTE E CENÁRIOS A SIMULAR	80
4.6	ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.6.1	CENÁRIOS DAS FASES 1 E 2.1.....	82
4.6.1.1	Análise das alturas de onda significativas.....	82
4.6.1.2	Análise das velocidades junto ao fundo	87
4.6.1.3	Análise das tendências gerais de erosão/deposição	90
4.6.2	CENÁRIOS DAS FASES 1 E 2.2.....	92
4.6.2.1	Análise das alturas de onda significativas.....	92
4.6.2.2	Análise das velocidades junto ao fundo	93

4.6.2.3	Análise das tendências gerais de erosão/deposição	94
4.7	ANÁLISE DE RESULTADOS PARA UMA MALHA MAIS REFINADA.....	96
4.7.1	ANÁLISE DAS VELOCIDADES JUNTO AO FUNDO	96
4.7.2	ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS GERAIS DE EROÇÃO/DEPOSIÇÃO	97
5.	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXO A.....	i
	ANEXO B.....	v

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Distribuição dos processos físicos num estuário proposto por Dalrymple <i>et al.</i> (1992) com base em Dionne (1963), adaptado de Perillo (1995).	6
Fig. 2 - Classificação dos estuários de Hayes (1975): a) Microtidais; b) Mesotidais; c) Macrotidais.	7
Fig. 3 - Classificação dos estuários segundo Dalrymple <i>et al.</i> (1992): A) domínio da agitação marítima; B) domínio das marés, adaptado de Perillo (1995).	8
Fig. 4 - Modelos dos processos de circulação das correntes de maré, adaptado de Hayes (1975).	9
Fig. 5 - Representação esquemática dos constituintes de um sistema sedimentar (Tabajara <i>et al.</i> , 2013).	12
Fig. 6 - Vegetação na margem interior da restinga de Ofir.	13
Fig. 7 - Vista panorâmica do corpo dunar de Ofir.	13
Fig. 8 - Evolução da zona costeira de Aveiro (LIRA, 2020).	14
Fig. 9 - Canal de entrada para a Ria de Aveiro: à esquerda, em 1865, antes da construção dos quebra-mares, e à direita, em 1988, após a última extensão de quebra-mares (Silva <i>et al.</i> , 2001).	15
Fig. 10 - Fotografia aérea da ria de Aveiro, 2010: 1) quebramar norte; 2) quebramar sul; 3) porto de Aveiro, (Aveiro, 2019) (<i>Google Earth</i>).	15
Fig. 11 - Fotografia aérea da embocadura do rio Douro: 1) molhe de Felgueiras; 2) molhe do Touro; 3) molhe Norte; 4) quebramar destacado; 5) cabedelo (Cristino, 2020).	16
Fig. 12 - Evolução da embocadura do rio Douro antes e após a colocação do molhe Norte e do quebramar destacado. Imagens de satélite (<i>Google Earth</i>).	16
Fig. 13 - Caracterização do sistema de ilhas barreira da ria Formosa: penínsulas, ilhas barreiras e entradas, adaptado de (Ceia <i>et al.</i> , 2010).	17
Fig. 14 - Embocadura do rio Guadiana, 2019: 1) molhe de poente; 2) Banco de O'Bril (<i>Google Earth</i>).	18
Fig. 15 - Lagoa de Patos (Brasil) e localização dos molhes convergentes (<i>Google Earth</i>).	19
Fig. 16 - Quebramares: a) Porto de Leixões; b) Porto da Figueira da Foz (Consulmar; Oliveira, 2016).	20
Fig. 17 - Exemplo de uma embocadura com um quebramar a Norte, Viana do Castelo, Portugal (<i>Google Earth</i>).	21
Fig. 18 - Velocidades de escoamento das correntes em quebramares paralelos, adaptado de Militello <i>et al.</i> (2000).	22
Fig. 19 - Quebramar destacado da embocadura do rio Douro (Cavaco, 2020).	22
Fig. 20 - Exemplo de quebramar submerso (<i>Google</i>).	23
Fig. 21 - Exemplos de dragagens: a), b) e d) (APA, 2018); c) (Martins <i>et al.</i> , 2011).	24
Fig. 22 - Esposende antiga: a) vila de Fão e estuário do rio Cávado; b) frota marítima em 1915, (Neiva, 2012).	25

Fig. 23 - Esposende antiga: estado de degradação do paredão da foz (Neiva, 2012).....	26
Fig. 24 - Planta da Barra de Esposende, 1883. 1) Restinga de Ofir; 2) Cidade de Esposende; a) Paredão da foz do rio Cávado; b) Dique provisório (Neiva, 2012).....	26
Fig. 25 - Evolução da Restinga de Ofir entre 2003 e 2018 (<i>Google Earth</i>).	28
Fig. 26 - Evolução da Restinga de Ofir ente maio de 2019 e julho de 2019 (<i>Google Earth</i>).	29
Fig. 27 - Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2).	31
Fig. 28 - Localização da zona de estudo (<i>Google Earth</i>).	32
Fig. 29 - Caracterização do estado atual da embocadura do rio Cávado e obras costeiras existentes: A) molhe Norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique. s) sentido da deriva litoral (<i>Google Earth</i> , 2019).	33
Fig. 30 - Estado atual das infraestruturas costeiras: A) molhe Norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique.	33
Fig. 31 - Bancos de areia no interior do estuário.	34
Fig. 32 - Sapal entre o dique e a linha da costa da marginal de Esposende: A) baixa mar; B) preia mar.....	34
Fig. 33 - Foz do rio Cávado (maio de 2020). a) extremidade Norte da restinga de Ofir; 1) delta de vazante; 3) canal principal; 4) canal secundário.	35
Fig. 34 - Foz do rio Cávado (fevereiro de 2020). D) dique; a) extremidade Norte da restinga de Ofir; 2) bancos de areia de enchente; 3) canal principal.....	35
Fig. 35 - Nº de registos por ano do caudal médio diário da estação hidrométrica de Barcelos.	36
Fig. 36 - Percentis dos caudais médios diários registados na estação de Barcelos no período 1978 – 2002.....	37
Fig. 37 - Série temporal da altura de onda significativa no período 1993-2007 (Silva <i>et al.</i> , 2008).	39
Fig. 38 - Localização geográfica dos pontos de amostragem (<i>Google Earth</i>).	44
Fig. 39 - Características das alternativas apresentadas no projeto, adaptado de NEMUS (2003).	45
Fig. 40 - Localização da área de estudo: Foz do rio Cávado, a Oeste, e Açude do Angelino, a Este, adaptado de Pinho (2005).	46
Fig. 41 - Modelo hidrodinâmico local: velocidades máximas da corrente na enchente e na vazante para os dois tipos de maré analisados (Pinho, 2005).	47
Fig. 42 - Batimetria inicial local (Pinho, 2005).	47
Fig. 43 - Modelo local de transporte sedimentar: deposição de sedimentos para diferentes condições de maré (Pinho, 2005).	48
Fig. 44 - Localização das cinco estações de amostragem ao longo do estuário do rio Cávado: E1, E2 e E3 nas margens e E1a e E3a no canal, adaptado de Carvalho <i>et al.</i> (2013).	48
Fig. 45 - Cronograma temporal das intervenções realizadas na foz do rio Cávado.	49
Fig. 46 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do mar, A (Palma, 2016).....	50

Fig. 47 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do rio, B (Palma, 2016).....	51
Fig. 48 - Estado do fim da obra e exemplos de problemas encontrados nos geocilindros face aos fenómenos marítimo e fluvial, no início de 2016: a) aspeto da restinga no final da obra de reforço; b) rutura de um geocilindro no lado do rio da restinga; c) migrações de areia no interior do geocilindro, Palma (2016).....	52
Fig. 49 - Molhe Norte da embocadura do rio Cávado, estado atual.	53
Fig. 50 - Fotografias do molhe Norte da embocadura do rio Cávado evidenciando o estado de degradação da estrutura de enrocamento: a) falhas na estrutura (vista Norte), b) destruição na seção da cabeça (vista Norte), (PLN, 2016b).....	53
Fig. 51 - Planta geral do projeto de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado (PLN, 2016b).	54
Fig. 52 - Talude de enrocamento do quebramar Norte, maio de 2020.....	55
Fig. 53 - Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado: a) fase de execução da intervenção no molhe Norte; b) molhe Norte após execução da intervenção e farolim (PLN, 2020)... ..	55
Fig. 54 - Origem dos sedimentos dragados na embocadura do rio Cávado e alimentação artificial da praia de Suave-Mar e da restinga de Ofir adaptado de (Polis, 2016).....	56
Fig. 55 - Intervenção no dique da foz do rio Cávado: a) resultado do galgamento devido às marés e inundações associadas a períodos de agitação marítima intensa na seção entre o dique e o muro da marginal de Esposende; b) obras de intervenção no dique (PLN, 2020).	57
Fig. 56 - Estado atual dos troços do Dique.	57
Fig. 57 - Evolução morfológica da Restinga de Ofir.....	58
Fig. 58 - Proposta integral da intervenção na foz do Cávado: A – alternativa 1; B – alternativa 2. 1 – quebramar destacado 1; 2 – quebramar destacado 2; 3 – estrutura longitudinal; 4 – aumento do quebramar Norte; 5 – alimentação artificial.	60
Fig. 59 - Perfis tipo das estruturas propostas.	61
Fig. 60 - Propostas de intervenção a simular no modelo numérico.	62
Fig. 61 - Perfil transversal: lado do mar da restinga.	62
Fig. 62 - Perfil transversal: lado do rio da restinga.....	62
Fig. 63 - Esquema da metodologia aplicada para análise dos cenários selecionados.	63
Fig. 64 - Janela principal do FLOW-GUI.	68
Fig. 65 - Aspeto visual da malha 40x40 para análise do Delft3D-FLOW.	69
Fig. 66 - Batimetria da linha de costa de Esposende e estuário do Cávado: Carta Náutica, 2020.	70
Fig. 67 - Detalhe da batimetria na restinga de Ofir e no canal de navegação da foz do rio Cávado: Carta Náutica, 2020.	70
Fig. 68 - Aspeto visual da malha e da batimetria após a interpolação.	71
Fig. 69 - Condições Fronteira.....	72
Fig. 70 - Aspeto visual da malha 80x80 e da batimetria para análise do Delft3D-WAVE.	74

Fig. 71 - Localização das estruturas no módulo Delft3D-WAVE.....	75
Fig. 72 - Localização geográfica dos pontos da campanha de (Silva, 2006).....	76
Fig. 73 - Série temporal da altura de onda significativa.	77
Fig. 74 - Série temporal da altura de onda significativa.	77
Fig. 75 - Série temporal da direção da onda.	78
Fig. 76 - Resultados da validação do modelo na Marina de Esposende.	79
Fig. 77 - Resultados da validação do modelo na Ponte de Fão.	79
Fig. 78 - Localização adotada para os pontos de monitorização.	81
Fig. 79 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.	82
Fig. 80 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e $H_s = 5.0$ m.	83
Fig. 81 - Pormenor nos quebramares destacados: cenários com H_s de 1.5 e 5.0 m.	83
Fig. 82 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.	84
Fig. 83 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 5.0$ m.	84
Fig. 84 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 6.	86
Fig. 85 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 8.	86
Fig. 86 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 10.	86
Fig. 87 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 1.5$ m.	88
Fig. 88 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 5.0$ m.	88
Fig. 89 - Parâmetros das simulações: Q1, PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.....	88
Fig. 90 - Parâmetros das simulações: Q2, BMAV.	89
Fig. 91 - Parâmetros das simulações: Q2, PMAV+SS 1.5 m.	90
Fig. 92 - Parâmetros das simulações: Q2, PMAV+SS e $H_s = 5.0$ m.....	90
Fig. 93 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 1.5$ m.	91
Fig. 94 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 5.0$ m.	91
Fig. 95 - Parâmetros das simulações: Q2, BMAV e $H_s = 1.5$ m.	92
Fig. 96 - Parâmetros das simulações: Q1, PMAV e $H_s = 1.5$ m.	92
Fig. 97 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.	94
Fig. 98 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.	94
Fig. 99 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.	95
Fig. 100 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 5.0$ m.	95
Fig. 101 - Simulações com a malha 20x20: Q2, BMAV.	97
Fig. 102 - Simulações com a malha 20x20: Q2, PMAV+SS.	97
Fig. 103 - Simulações com a malha 20x20: Q2, BMAV e $H_s = 1.5$ m.....	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Análise dos percentis da estação de Barcelos.	37
Tabela 2 – Caudais para diferentes períodos de retorno de acordo com a Distribuição de <i>Gumbel</i> ... 38	38
Tabela 3 – Caudais Máximos Anuais registados na Estação de Barcelos, (SNIRH).	38
Tabela 4 - Caudais para diferentes períodos de retorno com base nos registos diretos do SNIRH.	38
Tabela 5 – Qualidade do ajuste da função de distribuição de <i>Gumbel</i> para diferentes posições gráficas (<i>Silva et al.</i> , 2008).	40
Tabela 6 – Alturas de onda significativas associadas aos períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos (<i>Silva et al.</i> , 2008).	40
Tabela 7 – Características das marés para Esposende no 1º trimestre de 2020 (Marés, 2020).	41
Tabela 8 – Características das marés para o Porto de Viana do Castelo em 2015 (PLN, 2016b).	41
Tabela 9 – Recolha de sedimentos no estuário do Cávado e resultados obtidos.	43
Tabela 10 – Caracterização dos sedimentos na foz do rio Cávado.	44
Tabela 11 – Velocidades máximas das correntes para os dois tipos de maré analisados, obtidas através do modelo hidrodinâmico local (Pinho, 2005).	46
Tabela 12 – Dragagens efetuadas na foz do rio Cávado (<i>Gomes et al.</i> , 2011).	50
Tabela 13 – Volume de sedimentos utilizado no reforço dunar da restinga de Ofir.	51
Tabela 14 – Características dos perfis tipo da intervenção de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado (PLN, 2016b).	54
Tabela 15 – Componentes da maré nas fronteiras do modelo.	72
Tabela 16 - Caudais adotados para as simulações.	73
Tabela 17 - Parâmetros dos quebramares destacados 1 e 2.	76
Tabela 18 – Recolhas de dados (<i>Silva</i> , 2006).	77
Tabela 19 – Resultados da calibração do modelo.	78
Tabela 20 – Parâmetros admitidos nos cenários.	80
Tabela 21 – Cenários efetuados para as Fases 1 e 2.	81
Tabela 22 – H_s para os pontos de monitorização P5 a P11: Fase 1 e 2.1.	85
Tabela 23 – Coeficientes de Redução da H_s entre as Fases 1 e 2.1 (%).	85
Tabela 24 – Coeficiente de transmissão entre os pontos P5-P6, P8-P9, P10-P11 na fase 2.1 (%).	87
Tabela 25 - Resultados das H_s para os pontos de monitorização P5 a P11: Fases 1, 2.1 e 2.2.	93

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

C_{3D}	Coeficiente de 3D-Chézy [$m^{1/2}/s$]
C	Rugosidade de Chézy [$m^{1/2}/s$]
c	Concentração em massa da fração sedimentar [kg/m^3]
c_b	Concentração média de sedimentos no fundo da camada computacional
D	Fluxo de deposição [$kg/(m^2s)$]
D_{50}	Diâmetro médio dos sedimentos [m]
E	Fluxo de erosão [$kg/(m^2s)$]
E_s	Efeito do escoamento em espiral
f	Parâmetro de Coriolis [$1/s$]
F_x	Gradiente das tensões de radiação na direção x
F_y	Gradiente das tensões de radiação na direção y
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
H	Profundidade da água [m]
H_s	Altura de onda significativa [m]
i	Número de valores da amostra tais que $x \leq X_i$
I_s	Intensidade do escoamento secundário
M	Parâmetro de erosão
N	Número total de valores da amostra
p	Pressão hidrostática
S	Máxima profundidade da fossa de erosão
S_{xx}	Tensor das tensões de radiação na direção x em relação ao eixo x
S_{xy}	Tensor das tensões de radiação na direção x em relação ao eixo y
S_{yx}	Tensor das tensões de radiação na direção y em relação ao eixo x
S_{yy}	Tensor das tensões de radiação na direção y em relação ao eixo y
ks	Rugosidade do fundo [m]
T_p	Período de pico [s]
U	Velocidade característica [m/s]
u	Componente da velocidade Euleriana na direção x [m/s]
v	Componente da velocidade Euleriana na direção y [m/s]
ν_{3D}	Fração de viscosidade circular associada à turbulência 3D [m^2/s]
ν_H	Coeficiente de viscosidade da turbulência horizontal [m^2/s]

ν_H^{back}	Coeficiente de difusividade da turbulência horizontal não resolvida na mistura [m ² /s]
ν_{SGS}	Escala da grelha da difusividade da turbulência horizontal [m ² /s]
ν_V	Coeficiente de difusividade da turbulência vertical [m ² /s]
z	Direção vertical [m]
ρ_w	Massa volúmica da água do mar [kg/m ³]
n	Coeficiente de Manning [$sm^{0,33}$]
$\epsilon_{s,x}$	Coeficiente de difusão dos sedimentos na direção x [m ² /s]
$\epsilon_{s,y}$	Coeficiente de difusão dos sedimentos na direção y [m ² /s]
$\epsilon_{s,z}$	Coeficiente de difusão dos sedimentos na direção z [m ² /s]
$\vec{u}_b$	Velocidade horizontal na camada inferior [m/s]
$\vec{\tau}_b$	Tensão de arrastamento tangencial [N/m ²]
$\tau_{sr,e}$	Tensão de arrastamento crítica de erosão [N/m ²]
$\tau_{sr,d}$	Tensão de arrastamento crítica de deposição [N/m ²]
τ_{cw}	Tensão máxima de arrastamento no fundo do mar devido às correntes e ondas [N/m ²]
ω	Velocidade do escoamento em direção z [m/s]
ω_s	Velocidade de queda do sedimento [m/s]
ζ	Elevação da superfície livre da água do mar [m]
δ_{zb}	Distância vertical medida desde o fundo do mar ao ponto da grelha computacional mais próximo
$\frac{\delta}{\delta t} N$	Taxa local da variação da densidade da ação no tempo
$\frac{\delta}{\delta x} c_x N$	Fator de propagação da ação no espaço cartesiano, com velocidade de propagação na direção x de c_x .
$\frac{\delta}{\delta y} c_y N$	Fator de propagação da ação no espaço cartesiano, com velocidade de propagação na direção y de c_y .
$\frac{\delta}{\delta \sigma} c_\sigma N$	Alteração da frequência relativa devido a variações de profundidades correntes, com velocidade de propagação de c_σ no espaço σ .
$\frac{\delta}{\delta \theta} c_\theta N$	Refração induzida pela profundidade e pela corrente, com velocidade de propagação de c_θ no espaço θ .

ACRÓNIMOS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
BMAV	Baixa Mar de Águas Vivas

BMAM	Baixa Mar de Águas Mortas
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
N	Norte
NM	Nível Médio da água do mar
NW	Noroeste
PMAV	Preia Mar de Águas Vivas
PMAV+SS	Preia Mar de Águas Vivas com Sobrelevação do nível do mar
PMAM	Preia Mar de Águas Mortas
S	Sul
SW	Sudoeste
W	Oeste
WNW	Oeste-Noroeste
WSW	Oeste-Sudoeste
ZH	Zero Hidrográfico

ABREVIATURAS

h	Horas [h]
m	Metro [m]
s	Segundos [s]

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O litoral português constitui um dos ambientes naturais de maior dinamismo e interesse socioeconómico. Este fator fomentou, ao longo dos anos, a migração das populações das regiões interiores para as zonas costeiras em busca de melhor qualidade de vida. Já no século XX, os fluxos turísticos nos períodos balneares, tornaram-se o principal responsável pela utilização e ocupação do litoral e das zonas costeiras, com um crescendo aumento nas últimas décadas (Dinis, 2016).

A dinâmica litoral da zona costeira portuguesa, isto é, o avanço e recuo da linha da costa, que se caracteriza por um regime hidrodinâmico muito energético, motivado tanto por causas naturais como antropogénicas, tem contribuído fortemente para o fenómeno da erosão costeira. Para além dos agentes erosivos naturais já conhecidos (tais como a agitação marítima, marés astronómicas e meteorológicas, vento, etc.), associam-se outras causas antropogénicas como as dragagens de barras e/ou de margens e estuários, a redução do caudal sólido transportado pelos rios devido à construção de barragens, a degradação de dunas ou ao uso do solo, etc. A subida do nível médio da água do mar, bem como o esgotamento das fontes sedimentares da plataforma terrestre, ou as alterações induzidas pela ocupação das zonas costeiras com a consequente destruição de estruturas naturais, promovem a rápida degradação das zonas costeiras. A estes fatores juntam-se ainda, por exemplo, a construção de estruturas portuárias e de defesa costeira. Estes processos, agindo individualmente ou em conjunto, contribuem para alterar o processo natural de transporte de areias, suscitando assim preocupação para as populações que sentem a sua segurança ameaçada (Porto, 2013).

Adicionalmente, a zona litoral está sujeita a um conjunto de outros riscos naturais, como a inundação das margens e de zonas baixas e o galgamento dos sistemas dunares. Estas causas originam um problema de magnitude crescente que necessita de uma monitorização e acompanhamento eficazes, em particular, para um país com uma elevada exposição litoral como Portugal.

Relativamente ao caso em estudo, a cidade de Esposende, a sua localização geográfica privilegiada é um elemento diferenciador, uma vez que é banhada pelo oceano Atlântico e pelo rio Cávado. Esposende apresenta um binómio Rio/Mar, estando integrada na bacia hidrográfica do Rio Cávado, fazendo uso desta, ora enquanto via navegável ora como zona de construção naval, constituindo também uma zona de forte interesse agrícola e piscatório. O estuário do rio Cávado constitui uma via de comunicação marítima que permite fazer a ligação do litoral com o interior. No entanto, historicamente, foram inúmeros os problemas que surgiram na sua navegabilidade, muitos destes ainda existem atualmente. Através da análise documental histórica, desde o séc. XVIII, verifica-se que ocorreram assoreamentos rápidos e descontrolados com origem em vários acontecimentos, nomeadamente: mudanças climáticas relacionadas com a intensidade dos ventos; invasão das areias vindas do mar; e a seca de vários cursos

de água. Neste sentido, os primeiros projetos a fim de garantir a navegabilidade no rio Cávado contemplaram a implantação de vários açudes com eclusas. Estas eclusas permitiam garantir a passagem dos barcos e aumentar o seu calado nos períodos de estiagem. Face à instabilidade persistente na entrada da barra de Esposende, no final do séc. XVIII, implementou-se uma estrutura de defesa costeira do tipo convencional, designadamente o molhe na margem direita do Cávado, por forma a impedir o assoreamento da barra e encaminhar o escoamento do rio em direção a Sul. Posteriormente, em meados de 1880, construiu-se um dique com ligação ao molhe já existente com o objetivo de guiar as correntes e avaliar o seu rumo e magnitude entre o canal de navegação e a foz. Estas soluções conduzem frequentemente a impactos negativos a sotamar, zonas que estão normalmente desprotegidas (Gomes *et al.*, 2011; Neiva, 2012).

De forma a proteger a cidade de Esposende, face à ocorrência de temporais, é fundamental garantir a estabilidade da Restinga de Ofir, uma vez que esta localiza-se na frente urbana da cidade e constitui uma proteção natural do estuário contra a agitação marítima. Ainda assim, e devido à sua localização, esta corre o risco de romper e deixar de desempenhar esta função de proteção, expondo a população e as estruturas urbanas existentes. A ocorrência de tempestades e cheias tem uma grande influência na barra, não só por induzir uma dinâmica de avanços e recuos na restinga, mas também por poder modificar a sua posição, direção e altura (Gomes *et al.*, 2011; PLN, 2016b; Porto, 2013).

Algumas intervenções mais recentes como a aplicação de geossintéticos na praia de Ofir e na restinga, em 2015, não mostraram ser muito eficazes no impedimento do recuo da linha da costa. Em 2016, foi efetuada uma alimentação artificial das praias adjacentes à foz do rio Cávado, nomeadamente Suave Mar e restinga de Esposende, a norte e a sul da embocadura do rio Cávado, respetivamente. Esta intervenção, foi essencial uma vez que ambas as praias apresentavam um défice sedimentar agravado que necessitava de uma intervenção imediata. Os sedimentos usados provinham das areias do canal de navegação, junto à barra. De modo a fazer face aos índices de rutura do molhe norte e do dique paralelo à marginal de Esposende, foi ainda proposto o reperfilamento da estrutura existente, reforçando o manto, de maneira a evitar o galgamento da mesma nos períodos de preia-mar e de tempestade (PLN, 2016b).

É, neste contexto, importante garantir o equilíbrio da evolução da Restinga de Esposende, integrada no estuário do rio Cávado, visto que esta geoforma costeira protege a cidade de Esposende da invasão do mar. Assegurar a manutenção sustentada desta zona litoral e a conservação dos ecossistemas, torna permente o estudo de novas soluções que respondam aos problemas identificados e que promovam menos impactos ambientais e socioeconómicos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é estudar propostas de intervenção costeira que permitam a redução dos problemas identificados na foz do rio Cávado, nomeadamente a redução da energia das ondas incidentes e a estabilização da volumetria da restinga de Esposende. Este estudo é baseado na análise do comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico antes e após a inclusão de estruturas de proteção costeira através de simulações efetuadas com o modelo numérico Delft3D.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos nomeadamente:

No primeiro capítulo – “Introdução” – apresenta-se um enquadramento histórico do estuário e foz do rio Cávado, contextualizando a sua importância e os problemas existentes. Enuncia-se, ainda, a

relevância do sistema dunar integrado no estuário. Por fim, são enumerados os objetivos da Dissertação e a metodologia associada ao seu desenvolvimento.

No segundo capítulo – “Interação Oceano-Estuário” – é efetuada uma caracterização geral dos estuários, nomeadamente são descritos os fenómenos de interação oceano-estuário, as correntes de marés, o transporte sedimentar e o fenómeno de erosão nas embocaduras. Abordam-se a formação e a evolução das restingas. Ainda são referidas embocaduras similares e diferentes soluções de fixação de embocadura possível de implementar numa foz semelhante ao caso de estudo.

No terceiro capítulo – “Propostas de intervenção para a restinga de Esposende” – é realizada uma descrição das características gerais da bacia hidrográfica do rio Cávado, com maior destaque para o estuário. Como complemento também foram analisadas as descargas fluviais, as condições de agitação marítima, os níveis das marés e as características dos sedimentos na foz rio Cávado e na restinga de Esposende. Realiza-se ainda uma análise teórica dos estudos anteriormente efetuados na zona de estudo e dos projetos de intervenção efetuados desde 2015 até 2020. Por último, são referidas novas soluções para a proteção da restinga de Esposende.

O quarto capítulo – “Modelação Numérica” – contempla a descrição geral do funcionamento do *software* Delft3D e dos respetivos módulos utilizados: FLOW, WAVE e MORPHOLOGY. Este capítulo apresenta a metodologia seguida na implementação de cada módulo a nível computacional. Ainda é referido o processo de seleção dos cenários a testar e os resultados obtidos das simulações realizadas. Por fim, é efetuada uma análise comparativa qualitativa entre os resultados das simulações do estado atual e as simulações que consideram a inclusão de estruturas de proteção costeira.

No quinto e último capítulo da Dissertação – “Conclusões” – é efetuada uma síntese do trabalho desenvolvido, são apresentadas as principais conclusões da Dissertação, bem como recomendações para trabalhos a desenvolver no futuro.

2

INTERAÇÃO OCEANO-ESTUÁRIO

2.1 FENÓMENOS DE INTERAÇÃO OCEANO-ESTUÁRIO

São várias as características singulares apresentadas pelas zonas costeiras que vão desde os processos físicos de interação, à geologia até às ações antrópicas nelas existentes. Cada estuário é único, uma vez que sua morfologia é influenciada por vários fenômenos como as marés, a intensidade da agitação marítima, as correntes de maré, a precipitação e o volume de sedimentos em circulação. Assim, torna-se muito difícil estabelecer uma única definição que contemple todos os tipos de estuários (Hayes, 1975; Woodroffe, 2003).

Perillo (1995) apresenta uma lista de definições de “estuário” que tem em consideração diversos parâmetros tais como elementos fisiográficos (geomorfologia e hidrologia), biológicos e químicos. Neste sentido, Pritchard (1967) refere que: *"Os estuários são corpos de água costeira semifechados que têm uma ligação livre com o mar aberto e dentro dos quais a água do mar é mensuravelmente diluída com água doce proveniente da drenagem continental"*.

Todavia, esta definição não considera a influência da maré e do rio, fatores cruciais num sistema estuarino. A ação da maré é relevante para os processos relacionados com a salinidade, a erosão, circulação e deposição de sedimentos. A subida e descida do nível da água do mar desencadeia alterações nas características do transporte de sedimentos fluvial, bem como nas condições para a vida biótica estuarina. Isto significa que a geomorfologia e as condições biológicas de um estuário são fortemente dependentes da dinâmica das marés. Importa referir que estas definições surgiram com base em estuários localizados nas regiões da América Central, Austrália, África do Sul e Mediterrâneo, não podendo assim ser generalizados para todos os ambientes costeiros (Dalrymple *et al.*, 1992).

Na definição de Perillo (1995) um estuário é um corpo de água costeiro semifechado com uma ligação ao mar onde ocorre a diluição da água salgada com a água doce proveniente da drenagem terrestre. O estuário estende-se desde montante, a partir do limite da influência da maré, até jusante, dentro do qual a água doce comunica com a água salgada através de uma ou mais ligações provenientes do rio. A dinâmica de ligação entre os dois corpos de água apresenta variações, de ocorrência diária, principalmente influenciadas pela maré, a salinidade e o nível da água. Em resumo, a comunicação oceano-estuário é garantida através da agitação marítima, das correntes de maré e dos caudais fluviais (Loureiro, 2007).

De acordo com o balanço existente entre o transporte de sedimentos de origem fluvial ou da deriva litoral, pode-se distinguir as zonas estuarinas de acordo com o regime predominante. A Fig. 1 apresenta a distribuição dos processos físicos num estuário (Perillo, 1995; Woodroffe, 2003).

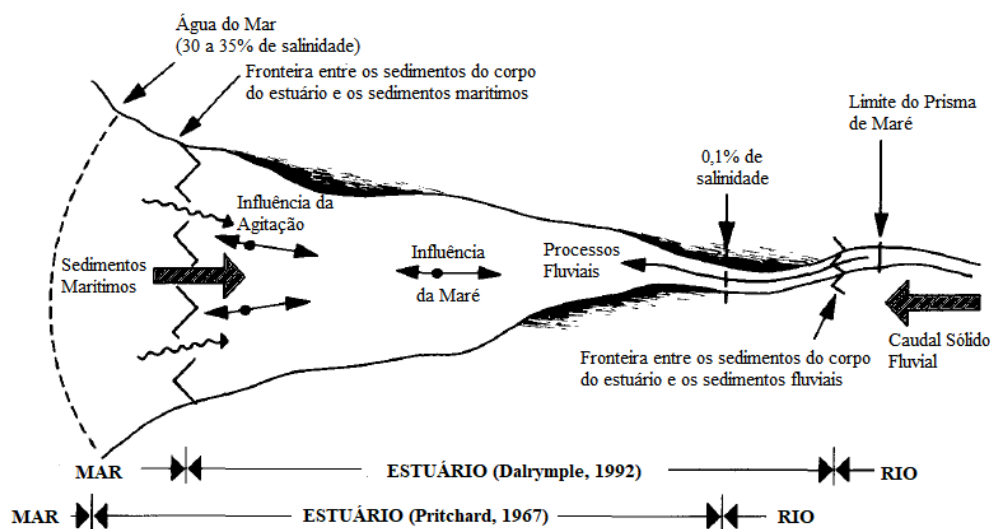


Fig. 1 - Distribuição dos processos físicos num estuário proposto por Dalrymple *et al.* (1992) com base em Dionne (1963), adaptado de Perillo (1995).

A zona interior do estuário, a montante, é dominada pelo regime fluvial e caracterizada pela predominância de água doce que sofre a ação da maré. Na zona central ocorre a mistura da água doce e da água salgada. Por fim, a zona marinha do estuário caracteriza-se pela ligação livre com o mar aberto e é dominada pelos processos marinhos, ou seja, a agitação marítima e as marés. Adicionalmente, um sistema estuarino é também constituído por embocaduras que são aberturas na linha de costa que limitam a jusante as interações entre o oceano e o estuário. Estas, são sistemas complexos uma vez que a sua morfologia é alterada consoante a magnitude e frequência de fatores tais como a subida do nível médio das águas do mar, a sedimentação, a intensidade da corrente de maré e da agitação marítima, a geologia, a precipitação, etc. A deposição de sedimentos ao longo do estuário, origina baixios, diminuindo as correntes de maré.

Por outro lado, também o prisma de maré – quantidade de água salgada que entra e sai do estuário em cada maré – vai diminuindo, acelerando o processo de sedimentação. Com o tempo, e em alguns casos, o estuário evolui e dá origem a um delta. Investigadores como Davies (1964) e Hayes (1975) realizaram vários estudos com o intuito de analisar a morfologia destes corpos de areia através da interação de inúmeros processos físicos, acima mencionados. Nesta classificação o fator predominante no controlo da distribuição e forma das deposições dos corpos de areia é a amplitude da maré. A Fig. 2 apresenta a classificação dos estuários segundo Hayes (1975), sendo os estuários: a) Microtidais, de amplitude inferior a 2 m; b) Mesotidais, com amplitude entre 2 e 4 m; e, c) Macrotidais, com amplitude superior a 4 m.

Os estuários microtidais apresentam formas de deposição do tipo deltas de inundação, características da ação predominante do vento e das ondas. Os estuários mesotidais são o tipo de estuário mais comum. Diferem dos microtidais na medida em que os sedimentos depositados pelas correntes das marés começam a predominar sobre outros agentes marinhos, fluviais ou climáticos. Caracterizam-se por canais de maré meandrizados atrás da ilha barreira com depósitos de areia gerados pelas correntes de maré. Os deltas formados podem ser distinguidos em delta de vazante ou de maré baixa (acumulação de sedimentos a barlar da entrada do canal, depositados por correntes de maré baixa) e delta de enchente ou de maré cheia (acumulação de sedimentos que se desenvolve na bacia, no interior da embocadura,

devido às correntes de maré cheia). O estuário do tipo macrotidal é dominado pelas correntes de maré. São estuários normalmente com a embocadura larga e afunilada. A deposição de areia é normalmente concentrada no centro do estuário, longe da costa. Os corpos de areia são longos e paralelos às correntes das marés.

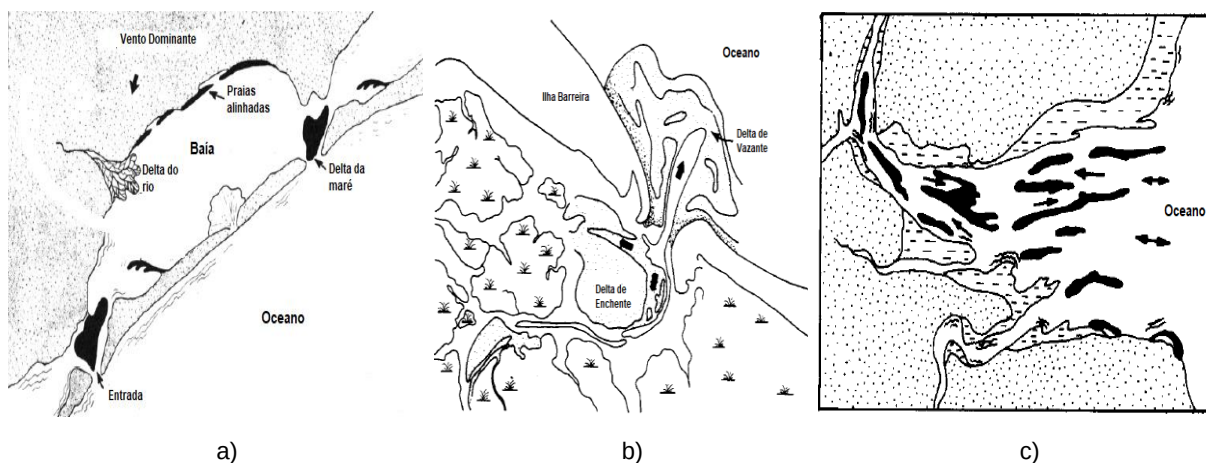


Fig. 2 - Classificação dos estuários de Hayes (1975): a) Microtidais; b) Mesotidais; c) Macrotidais.

Esta classificação tem por base casos localizados na costa leste da América do Norte, não podendo, assim, generalizar-se a outros locais do mundo. No entanto, Dalrymple *et al.* (1992) apresentaram uma classificação estuarina, com base na de Hayes, que tem em consideração a vazão do rio, a agitação marítima e as marés. Esta divide os estuários em duas categorias (Fig. 3): os estuários dominados pela agitação marítima e os dominados pelas marés (Perillo, 1995).

Os estuários dominados pela agitação marítima originam um transporte litoral na embocadura desenvolvendo-se frequentemente uma barreira de areia formada através da ação das ondas, ao longo da linha da costa, que a fecha parcialmente. Na entrada da barreira e áreas adjacentes, podem-se encontrar deltas de enchente. As características destes estuários são semelhantes às do tipo microtidal, da classificação anterior. Possuem canais pouco profundos, com inúmeras zonas de acumulação de areia de pequena dimensão. A formação das barreiras nas embocaduras permite geralmente diminuir a energia das ondas que penetram no estuário (Gibeatu *et al.*, 1993; Perillo, 1995; Woodroffe, 2003).

Os estuários dominados pela maré caracterizam-se, de um modo geral, por possuir uma forma afunilada com uma entrada larga e um estreitamento para montante do estuário. A estes associa-se a formação de corpos de areia ao longo dos canais sob efeito das correntes de refluxo e de enchente. Os bancos de areia podem atingir alturas tais que estes corpos ficam à superfície, comprometendo as condições de navegabilidade. Geralmente, o transporte sedimentar no interior do estuário é dominado pelas correntes de enchente sendo que na linha de costa dominam as correntes de refluxo e/ou de deriva litoral.

A contribuição das marés caracteriza-os como sendo estuários bem misturados, possuindo trocas entre a água salgada e a água doce. Estes estuários podem ser divididos em três zonas, segundo o regime dominante, ou seja, marítimo, fluvial ou misto (Fig. 3a) (Harris *et al.*, 1992; Perillo, 1995; Woodroffe, 2003).

Em resumo, a classificação de Dalrymple *et al.* (1992) é muito útil para estabelecer a correlação espacial e temporal entre a ação do caudal fluvial, da agitação marítima e das marés, classificando a morfologia estuarina do mesmo ponto de vista que a abordagem de Hayes (1975).

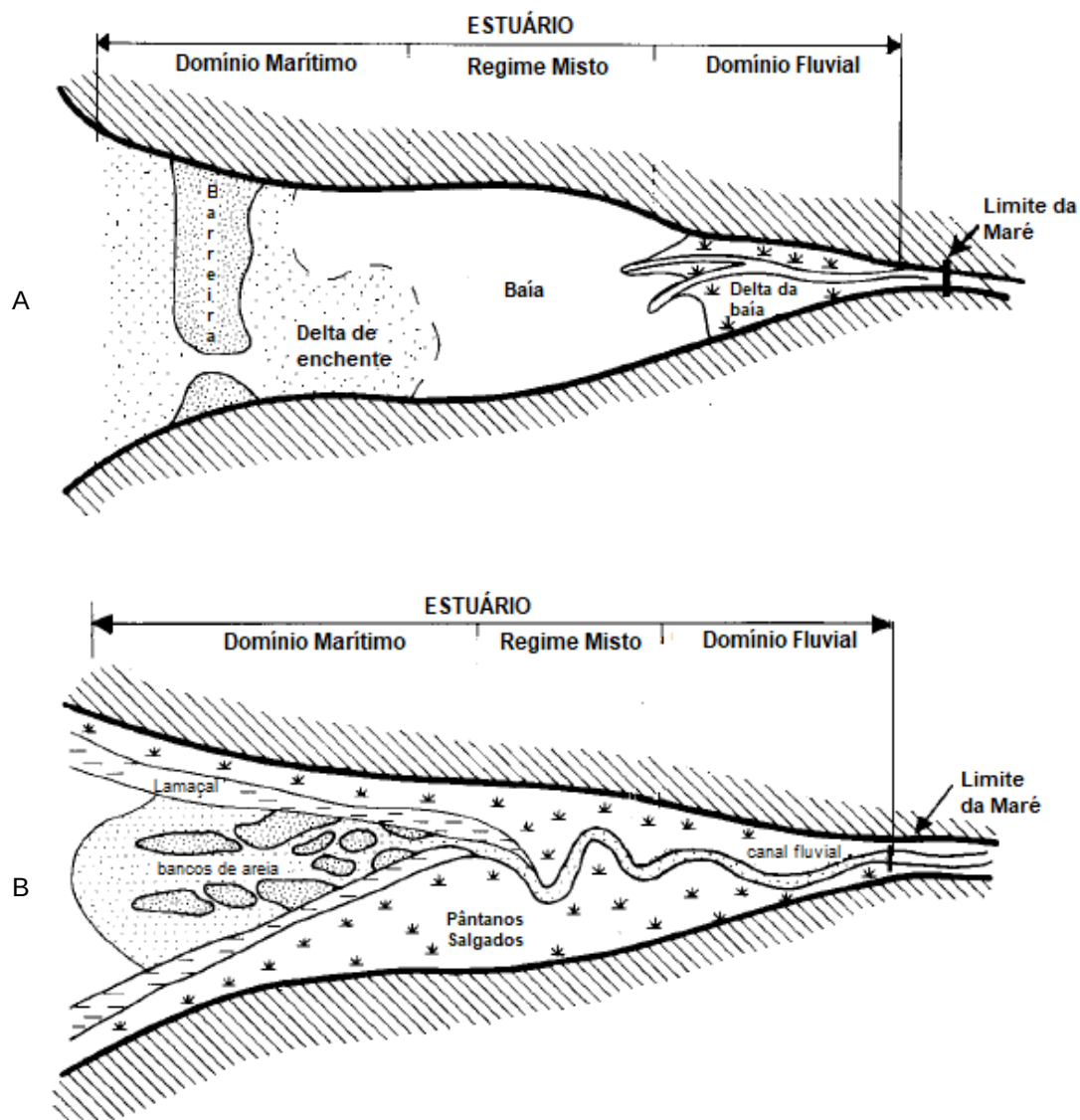


Fig. 3 - Classificação dos estuários segundo Dalrymple *et al.* (1992): A) domínio da agitação marítima; B) domínio das marés, adaptado de Perillo (1995).

2.2 CORRENTES DE MARÉ

A compreensão das correntes, de vazante e de enchente, permite adquirir uma melhor percepção do desenvolvimento dos fenómenos de erosão costeira nas embocaduras. Adicionalmente, a existência das correntes de deriva longitudinal auxilia o fornecimento de sedimentos nas praias adjacentes, podendo, contudo, regredir com a erosão local da linha da costa. Atendendo aos mecanismos de circulação das correntes de maré, da qual é exemplo a Fig. 4, em cada embocadura são desenvolvidos mecanismos específicos de acordo com as suas características, tais como a amplitude da maré, o escoamento fluvial, a ação dos ventos, a batimetria, a geometria da bacia e a existência e configuração de estruturas de defesa costeira (Hayes, 1975; Pinheiro, 2008; Pinho, 2005).

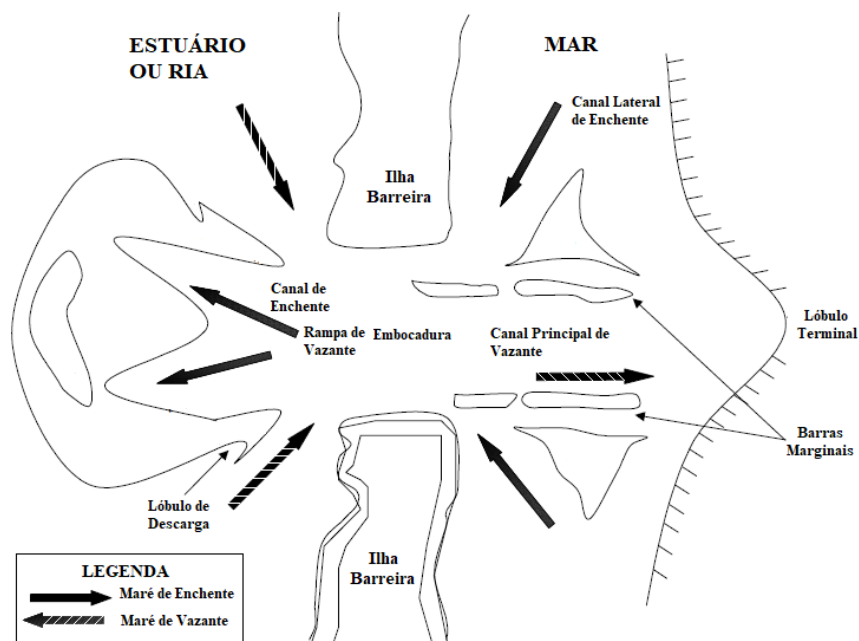


Fig. 4 - Modelos dos processos de circulação das correntes de maré, adaptado de Hayes (1975).

A entrada da embocadura é a região com a menor área em secção transversal e que por isso nesse local as correntes apresentam maiores velocidades. As correntes de enchente formam canais de ambos os lados da entrada da embocadura. À medida que a água se direciona para o interior da embocadura, sofre uma diminuição de velocidade devido à transição entre a secção da entrada, mais estreita, e a secção da bacia, mais larga. Este decrescimento da velocidade leva à deposição dos sedimentos transportados, originando o delta de enchente, forma esta que se mantém assimétrica e com a direção da enchente. Na descida da maré, a direção do escoamento reverte. As correntes de vazante transportam para o oceano os sedimentos do banco de areia de enchente, dos bancos de areia marginais e dos canais da embocadura. Ao saírem da embocadura sob a forma de jato divergente, diminuem a sua velocidade até se depositarem no delta de vazante. O efeito da deposição de sedimentos no delta de vazante é controlado tanto pela amplitude da maré como pela mistura de água doce que provém do estuário. Uma vez que as correntes máximas de vazante ocorrem em águas pouco profundas, ou seja, no final da maré vaza, no início da enchente a água entra na embocadura pelos canais laterais, menos resistentes, provocando correntes de refluxo. Só mais tarde é que se propaga por toda a largura do delta de vazante. Os canais laterais são sobretudo formados com a evolução das correntes de vazante, ainda que possam ser modificadas pela corrente de enchente. De facto, as correntes de maré tendem a formar canais no fundo e no delta com posições particulares de acordo com a hidrodinâmica local. No caso dos sedimentos transportados pelas correntes de deriva, são encaminhados ao longo das barras de montante ou em direção aos bancos marginais do delta e através dos canais de enchente laterais. Já os sedimentos que alcançam o canal principal, ou são depositados no delta de enchente do estuário, ou depositados nos bancos externos do delta de vazante (Hayes, 1975; Militello *et al.*, 2000).

2.3 TRANSPORTE SEDIMENTAR E O FENÓMENO DE EROSÃO NAS EMBOCADURAS

As embocaduras são zonas marinhas dinâmicas e energéticas, não só pela transição do regime fluvial-oceano, como também pelos movimentos dos fundos marinhos, devido às correntes fluviais, correntes de maré e da agitação marítima, que conduzem a um aumento ou diminuição da capacidade de transporte

de areias nessa zona. Quanto maior é o escoamento, maior é a intensidade de turbulência gerada e maior será a capacidade de movimentar os sedimentos do fundo, transportando não só as partículas em suspensão, como também as areias de maior dimensão. De referir que são os rios umas das principais fontes de transporte sedimentar, promovendo a acreção de sedimentos no litoral. Por outro lado, no oceano, a rebentação das ondas provoca a suspensão desses sedimentos e consequente transporte (Pinheiro, 2008).

A variação do transporte litoral deve-se à oscilação entre os períodos de maior e menor agitação marítima. Isto porque as ondas nos períodos mais energéticos transportam as areias da linha da costa para o oceano, formando bancos arenosos submersos e, nos períodos de menor agitação, transportam os sedimentos aí depositados para a costa. No entanto, face à obliquidade de propagação das ondas, os sedimentos são acumulados na linha da costa, em geral num local distinto daquele de onde foram retirados, dando assim origem à deriva litoral. Os sedimentos provenientes da zona a barlar da embocadura, são acumulados no banco de vazante ou encaminhados para o interior da embocadura através do transporte litoral. As ondas refratadas no delta de vazante diminuem a energia das ondas que chegam a sotamar, associando a este fenómeno o reduzido transporte sedimentar que alcança o litoral nesta zona. Em alguns casos, a propagação da agitação marítima com uma orientação distinta da predominante pode levar ao transporte de sedimentos para o interior da embocadura através de correntes provenientes de sul. Assim, fica claro que o transporte de deriva litoral, as correntes de maré e a ação da agitação marítima são os principais fenómenos que potenciam a alteração morfológica das embocaduras. Estas variações dão origem a instabilidades na entrada dos estuários, manifestando-se, de um modo geral, pela perda de profundidade devido ao assoreamento ou até mesmo à migração do canal. As variações morfológicas das embocaduras são agravadas quando o corpo estuarino está limitado por um sistema dunar. Isto porque esta geoforma está sujeita a fenómenos de erosão a uma escala temporal a longo prazo (anos, décadas, séculos...) segundo as condições hidrodinâmicas correntes. No entanto, estes corpos costeiros também estão expostos ao eventos de tempestade repentinos, com uma probabilidade de ocorrência baixa e a curto prazo (horas, dias...) mas que origina consequências devastadoras, levando por vezes à sua rutura (Pinheiro, 2008).

Face à necessidade de implementar estruturas de defesa costeira nas embocaduras, é pertinente ter em conta um conjunto de considerações. Isto porque estas estruturas serão integradas no meio natural marinho e provocarão alterações no sistema estuarino. Neste sentido, é fundamental implementar estruturas que permitam fixar a seção das embocaduras, assim como controlar o transporte sedimentar de modo a garantir a profundidade mínima nos canais de navegação. Além disso, é importante que estas estruturas mitiguem a erosão e potenciem a acreção ao longo das praias adjacentes. Ainda importa referir que o transporte de sedimentos em excesso na vizinhança destas estruturas pode colocar em risco a sua estabilidade, causando deslocamentos e queda de blocos, ou, em último caso, a rutura da obra marítima.

A construção de um quebramar pode permitir que o transporte dos sedimentos seja desviado para profundidades maiores, afastando-os da linha da costa e do sistema litoral e aumentando o grau de erosão a sotamar, uma vez que as areias têm dificuldade em serem depositadas junto à costa. É de salientar que a seção mais vulnerável destas estruturas é normalmente a zona da cabeça, uma vez que a esta se acrescenta a exposição direta do impacto da rebentação das ondas, em particular aquando é do tipo mergulhante. Quando as ondas incidentes rebentam na cabeça da estrutura, estas são parcialmente refletidas e difratadas para a zona abrigada do quebramar. Importa também referir que as correntes de vazante, através do estreitamento do canal e mudança de direção da embocadura, são defletidas pelos quebramares que por sua vez, aumenta a aceleração junto dos quebramares e intensifica as correntes. Este fenómeno resulta em erosões na base do talude do quebramar, que poderá levar ao colapso da estrutura. Além disso, também provoca a deposição dos sedimentos na zona central da entrada do canal.

Quanto a estas consequências, elas podem ser minimizadas com as características da estrutura implementada, nomeadamente da sua seção e do tipo de blocos de proteção. Um quebramar vertical de betão será sujeito a abaixamento superior a por exemplo, um quebramar com seção trapezoidal e com uma cabeça arredondada (Militello *et al.*, 2000).

2.4 FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE ACUMULAÇÕES SEDIMENTARES

Os fenómenos de acreção e erosão costeira são controlados por processos sedimentares complexos, influenciados, por sua vez, por processos hidrodinâmicos de interação entre os processos fluviais e marinhos e pelas ações antrópicas associadas (retenção de sedimentos pelos aproveitamentos hidroelétricos e exploração de inertes).

Os estuários não são a única forma costeira que possibilita a comunicação de um rio com o mar. Para além destes, existem os sistemas lagunares. Estes sistemas caracterizam-se por serem constituídos por uma barreira arenosa ao longo do litoral em que a ligação estuário-oceano é realizada através de uma ou mais entradas restritas através da barreira. Estes sistemas apresentam uma variedade morfológica influenciada por vários fatores hidrodinâmicos, tais como: a agitação marítima, devido à sua magnitude e orientação com a possibilidade de galgar a barreira costeira, penetrando no estuário; pela maré, devido à sua amplitude, ao limite do prisma de maré e ao transporte de sedimentos associado a este fenómeno; pelos rios, com a contribuição do caudal fluvial e o seu transporte sedimentar e, pelo vento. Os ventos permitem transportar grande parte dos sedimentos suspensos e de menor dimensão em direção à barreira. A acumulação de sedimentos sobre os depósitos lagunares ocorridos ao longo de séculos faz com que estes evoluam de tal modo que esses ecossistemas são transformados em sistemas dunares. É fundamental compreender a hidrodinâmica deste tipo de geoformas de modo a compreender a origem da sua formação e de que forma se pode assegurar a sua preservação e manutenção uma vez que são corpos naturais de defesa costeira, extremamente frágeis, que impedem a progressão do mar para o interior. Além disso, são ecossistemas com grande diversidade biológica que necessitam de um equilíbrio natural para garantir o seu valor cultural e paisagístico (Antiqueira *et al.*, 2004; Neves, 2001; Woodroffe, 2003).

Uma vez que os sistemas dunares representam uma área significativa da zona de estudo, é importante analisar o seu processo de evolução. As definições para os vários elementos que constituem os corpos dunares foram sendo revistos ao longo dos tempos. As formas dos corpos sedimentares são identificadas a partir da análise comparativa de levantamentos topo-hidrográficos ou através da visualização do comportamento do sistema ao longo do tempo em condições naturais e em condições excecionais. No entanto, é frequentemente difícil distinguir a composição dos corpos dunares devido ao seu ajustamento às alterações promovidas pelas ações costeiras a que estão expostos (Neves, 2001).

Segundo Gomes *et al.* (2002), a análise de elementos de um segmento costeiro refere que estes sistemas são alimentados pelas areias da praia transportadas pelo vento. Esta evolução dá-se em várias fases, designadamente a deposição de sedimentos de maiores dimensões que ficam retidos na praia baixa, e a movimentação para o interior dos sedimentos de menor dimensão. A deposição dos sedimentos varia com a sua granulometria, a ação do vento e a ação do atrito com a superfície da praia, dando origem a acumulações de areia móvel que tendem a deslocar-se para o interior. No entanto, esta análise não pode ser aplicada em situações em que se reconhece que os vários elementos de um segmento costeiro têm idades de deposição diferentes, uma vez que as dunas que atualmente se observam podem ter sido construídas em épocas distintas, como é o caso de Esposende.

As correntes de maré têm grande influência no areal, nomeadamente entre a maré baixa e o nível máximo de preia-mar, de tal modo que esta zona, denominada de berma ou face da praia (Fig. 5), não possui qualquer vegetação. Assim, esta camada dunar apresenta volumes sedimentares variáveis e pouca vegetação, uma vez que possui períodos em que está inundada e/ou em erosão, nomeadamente nos períodos de maré cheia e na ocorrência de tempestades. A partir de uma determinada distância e com auxílio dos ventos para depositar as areias no fundo da praia, surgem condições ambientais suficientes para emergirem ecossistemas vegetais, formando assim as primeiras cristas das praias. As plantas que surgem no sistema dunar fixam as areias, prevenindo a erosão da costa provocada pela agitação marítima, pelos ventos e pela precipitação. Com o crescimento destes seres vivos é possível desenvolver dunas em altura, o que favorece a estabilização da faixa costeira (Gomes *et al.*, 2002; Hesp *et al.*, 2005).

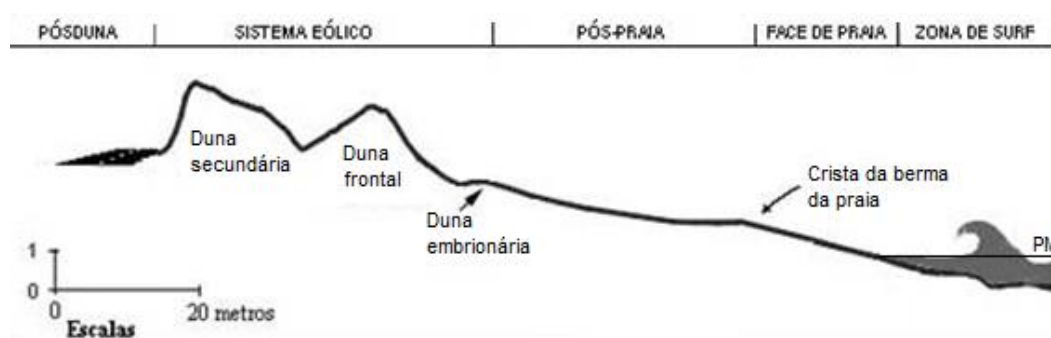


Fig. 5 - Representação esquemática dos constituintes de um sistema sedimentar (Tabajara *et al.*, 2013).

A *Elymus farctus* é uma das espécies vegetais que cresce nas dunas embrionárias. Estas dunas caracterizam-se por possuírem povoamentos faunísticos densos e contínuos. Os sistemas de dunas embrionárias formam-se em praias onde o fornecimento de areia é constante. Constituem a primeira linha de defesa costeira uma vez que estão permanentemente expostas aos agentes marítimos. Muitas vezes, o efeito da erosão é de tal modo intenso que as dunas embrionárias podem ser quase extintas. O volume sedimentar que alcança a frente da linha de costa, acumula-se até originar uma duna frontal, isto é, um segmento costeiro de idade mais recente e estabilizado nas zonas intertidais, que pode estender-se por vários quilómetros. Na retaguarda da duna frontal vão-se formando diferentes cristas dunares, as dunas secundárias. A sua formação mais distante do oceano confere-lhes características mais favoráveis ao crescimento e reprodução das comunidades faunísticas. Além de se abrigarem do vento, existe uma maior acumulação de água e matéria orgânica no solo (Hesp *et al.*, 2005; Otvos, 2000).

Entre os vários fatores responsáveis pela degradação destes ecossistemas costeiros destacam-se a erosão propriamente dita, as intervenções costeiras, a circulação de pessoas e de veículos. Estes impactes, em grande parte dos casos, desencadeiam a destruição da vegetação facilitando o transporte de areias finas, que anteriormente estavam fixas. Por isso, os sistemas dunares são considerados ambientes sensíveis, uma vez que facilmente perdem resiliência, podendo entrar em colapso. Além disso, a estabilização do sistema dunar pode também entrar em rutura caso os fatores da dinâmica costeira perturbem a sua evolução, através de tempestades, subida do nível médio da água do mar ou até por défice de areia na alimentação das praias por interrupção da deriva litoral (Gomes *et al.*, 2002).

No caso da região litoral da cidade de Esposende, por um lado, o molhe existente a Norte da embocadura da foz do rio Cávado influencia o fenómeno da erosão do litoral de modo que, atualmente, a duna embrionária quase não é visível. Existe apenas uma duna frontal, que é notória entre Cepães (Norte), Praia do Belinho e Foz do Neiva, que está permanentemente exposta à agitação marítima, provocando rapidamente o recuo da arriba e a migração das praias (avanço do mar para o interior). Por oposição, a

embocadura do rio Cávado sofre alterações morfológicas periódicas, devido à constante mobilidade da restinga de Ofir. A sua adaptação face aos fatores a que está exposta é demonstrada através das variações morfológicas que vai incorporando ao longo dos anos (Gomes *et al.*, 2002).

A Fig. 6 e a Fig. 7 ilustram a morfologia atual do sistema dunar de Ofir, que se caracteriza por uma vegetação robusta na margem Este da restinga, no interior do estuário. Do lado do oceano, as espécies arbustivas estão enraizadas ao longo das dunas, apresentando um crescimento menos acentuado. Realça-se a presença dos passadiços implementados ao longo da restinga, de modo a mitigar as destruições provocadas pela ação humana.



Fig. 6 - Vegetação na margem interior da restinga de Ofir.

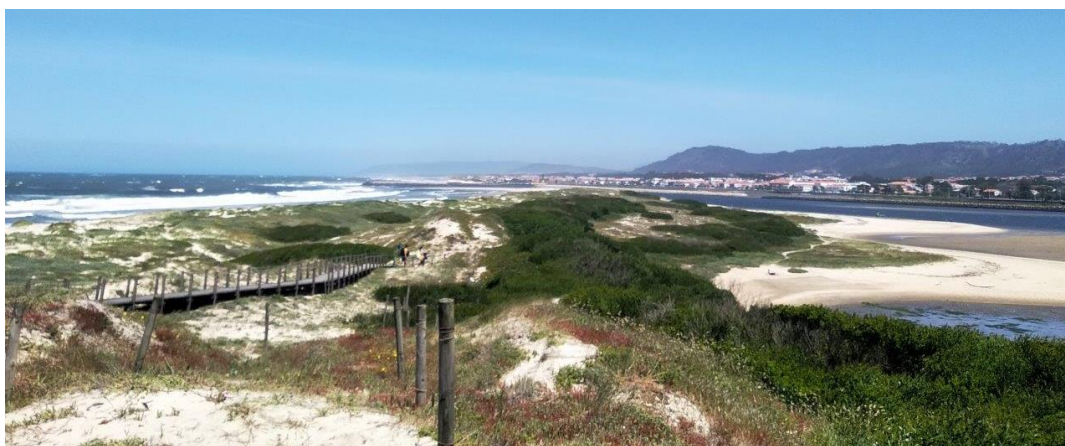


Fig. 7 - Vista panorâmica do corpo dunar de Ofir.

2.5 EMBOCADURAS SIMILARES

As zonas costeiras apresentam inúmeras morfologias e hidrodinâmicas, consequência das condições climáticas, fluviais, marinhas, sedimentológicas e topográficas únicas locais. As adaptações dos ambientes costeiros face às pressões ambientais e antropológicas, constantemente em mudança, são fundamentais para assegurar a proteção dos ecossistemas litorais. Por forma a melhorar o conhecimento

para a definição de possíveis intervenções futuras serão apresentados, neste sub-capítulo, exemplos nacionais e internacionais de embocaduras semelhantes ao caso de estudo.

2.5.1 RIA DE AVEIRO

A zona costeira de Aveiro sofreu grandes evoluções morfológicas ao longo dos séculos. Em consequência da atividade agrícola da zona entre o rio Minho e o rio Douro, procedeu-se a grandes desflorestações que deixaram o solo menos protegido, originando um incremento significativo no fornecimento sedimentar ao litoral. O sentido N-S da deriva litoral na costa oeste de Portugal, permitiu que os sedimentos fossem deslocados para sul. A Fig. 8 retrata a evolução do cordão dunar, paralelo à linha de costa. Atualmente, a zona costeira da ria de Aveiro é constituída por um sistema dunar que se desenvolve ao longo de 100 km, com orientação NNE-SSW, desde Espinho até ao Cabo Mondego. A lagoa de Aveiro apresenta uma geometria complexa, com grandes áreas lodaçais e pântanos salgados que são atravessados por canais estreitos de navegação.

Esta estrutura barreira separa a lagoa de Aveiro do oceano Atlântico e a sua ligação só é possível através do canal estreito de entrada, com 350 m de largura, 1,3 km de comprimento e 20 m de profundidade. É através deste canal artificial que todo o sistema fica sujeito à ação das marés, acompanhando assim uma variação de área da lagoa desde 66 a 83 km². A profundidade média é de 1 m, com a exceção dos canais de navegação onde está compreendida entre os 5 e os 10 m. Para garantir essa profundidade, é necessário recorrer a dragagens periódicas que assegurem estas condições. A dinâmica fluvial deriva dos dois rios a montante, Vouga e Antuã. Na ria de Aveiro, as características das marés e da agitação marítima são semelhantes a uma onda progressiva amortecida, ou seja, ao longo da propagação pelo canal a amplitude diminui e o atraso da fase aumenta (Dias *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2006; LIRA, 2020).

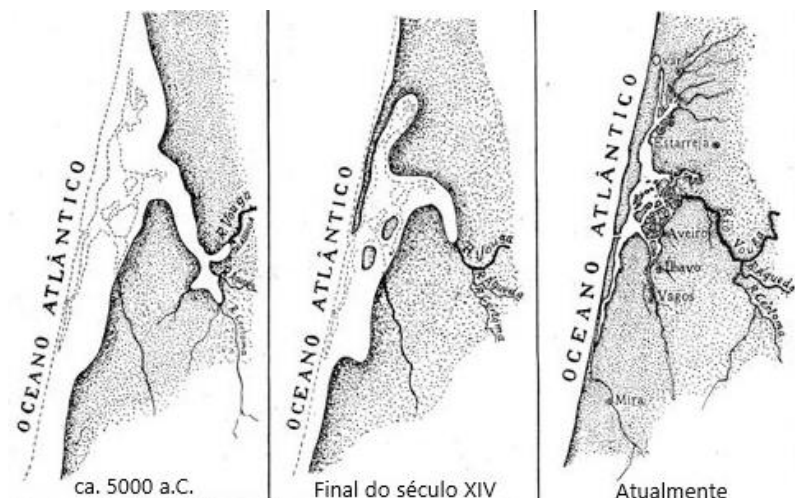


Fig. 8 - Evolução da zona costeira de Aveiro (LIRA, 2020).

Por forma a melhorar as condições de acesso ao porto de Aveiro e proteger da ação direta das ondas a ria, foram construídos dois quebra-mares com conversão Oeste, em ambos os lados do canal, na primeira metade do séc. XX. Na década de 80, procedeu-se à extensão do quebramar do Norte, afetando significativamente a alimentação sedimentar na costa a sotamar do quebramar sul. A Fig. 9 e a Fig. 10 ilustram, a disposição dos quebra-mares construídos e a evolução da ria no final do séc XX e no início do séc XXI.

A frente litoral a sul da barra contempla molhes, com o objetivo de atenuar o processo de erosão. Adicionalmente, são realizadas alimentações artificiais com os materiais dragados do canal de navegação a fim de controlar o volume sedimentar. Na zona próxima da costa, as ondas vão diminuindo à medida que se aproximam das águas menos profundas, gerando um sistema dunar paralelo à linha da costa. Sendo a profundidade de água muito pequena, com canais estreitos e uma superfície da água extensa, é provável que face às alterações climáticas o nível do mar suba e os efeitos nesta zona possam ser agravados, nomeadamente nas características da progressão das marés, no fenómeno de erosão e na ocorrência de inundações (Dias *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2001).

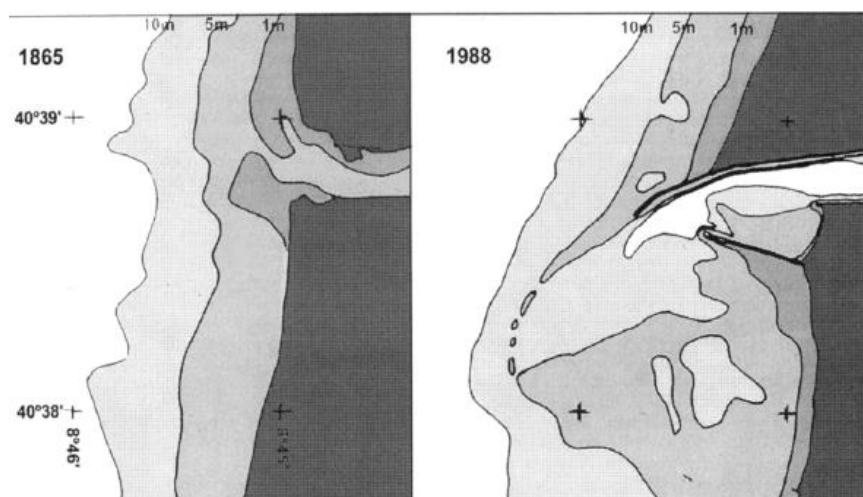


Fig. 9 - Canal de entrada para a Ria de Aveiro: à esquerda, em 1865, antes da construção dos quebra-mares, e à direita, em 1988, após a última extensão de quebra-mares (Silva *et al.*, 2001).



Fig. 10 - Fotografia aérea da ria de Aveiro, 2010: 1) quebramar norte; 2) quebramar sul; 3) porto de Aveiro, (Aveiro, 2019) (Google Earth).

2.5.2 CABEDELLO, ESTUÁRIO DO DOURO

A restinga do Douro, denominada de Cabedelo, é um corpo arenoso enraizado na margem esquerda da embocadura do estuário do rio Douro com uma extensão média de aproximadamente 800 m. O corpo costeiro natural formou-se devido à acumulação de areias e material provenientes da bacia hidrográfica

do rio Douro, que no seu transporte até ao mar, se acumularam junto à foz. Ao longo dos anos, a sua morfologia tem sofrido alterações, avanços e recuos para o interior do estuário. Com o objetivo de impedir o processo erosivo na restinga, proteger as margens e melhorar as condições do canal de navegação construíram-se, nos séculos XIX e XXI, várias obras principais de defesa costeira.

Atualmente, o estuário do Douro possui o seguinte conjunto de obras costeiras (Fig. 11): a Norte, os molhes do Touro e de Felgueiras – as infraestruturas mais antigas deste sistema, construídas entre 1790 e 1886 - e o molhe Norte, que está enraizado no antigo molhe do Touro, estendendo-se com uma orientação NE-SW; e, a Sul, um quebramar destacado, com cerca de 450 m de comprimento e de baixa cota de coroamento, possibilitando o seu galgamento em períodos de tempestade. O molhe Norte e o quebramar destacado foram construídos entre 2004 e 2009. A Fig. 12 apresenta a evolução das infraestruturas marítimas na embocadura do rio Douro (Teodoro *et al.*, 2011).



Fig. 11 - Fotografia aérea da embocadura do rio Douro: 1) molhe de Felgueiras; 2) molhe do Touro; 3) molhe Norte; 4) quebramar destacado; 5) cabedelo (Cristino, 2020).



Fig. 12 - Evolução da embocadura do rio Douro antes e após a colocação do molhe Norte e do quebramar destacado. Imagens de satélite (Google Earth).

A área do cabedelo apresenta valores superiores no verão e menores no inverno. Isto deve-se aos caudais fluviais no Verão serem inferiores, reduzindo a velocidade de escoamento de tal modo que se verifica uma sedimentação no cabedelo superior nesse período do ano. O recuo da linha da costa no sentido Este já era visível antes da construção dos molhes. A construção do quebramar destacado permitiu que se fixasse a posição da restinga e aumentasse a sua volumetria através dos sedimentos provenientes do interior do estuário e da deriva litoral. A ação direta da agitação marítima também foi minorada em grande parte da restinga e os eventos extremos tornaram-se menos suscetíveis (Peixoto, 2016; Teodoro *et al.*, 2014).

2.5.3 RIA FORMOSA, ALGARVE

A ria Formosa é um sistema de ilhas barreira localizado no Sul de Portugal, no Algarve. Este sistema é composto por duas penínsulas (Ancão a Oeste e Cacela a Leste) e cinco ilhas barreira (Barreta, Culatra, Armona, Tavira e Cabanas) (Fig. 13). Estende-se por 50 km da costa e possui seis entradas (Ancão, Faro-Olhão, Armona, Fuzeta, Tavira e Lacém) responsáveis pelos processos de interação entre os sistemas lagunares e o mar Atlântico Norte. Importa referir que as entradas de Faro-Olhão e Tavira foram criadas artificialmente por ação humana, através da construção de molhes (Ceia *et al.*, 2010; Vila-Concejo *et al.*, 2006).

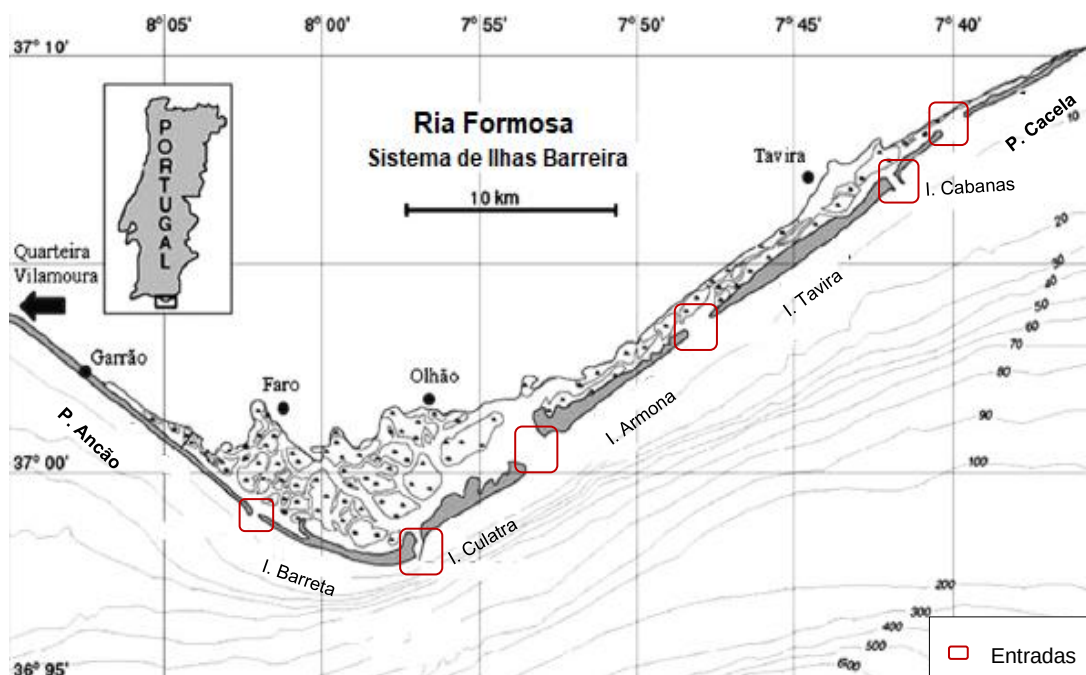


Fig. 13 - Caracterização do sistema de ilhas barreira da ria Formosa: penínsulas, ilhas barreiras e entradas, adaptado de (Ceia *et al.*, 2010).

A morfodinâmica das ilhas barreira é muito variável em função da ação da agitação marítima e da amplitude das marés. A subida do nível do mar origina uma migração dos sistemas dunares em direção a terra. As marés são mesotidais, apresentando amplitudes pico-a-pico máximas superiores a 3 m. A influência da agitação marítima é mais intensa no lado Oeste (de Ancão), com ondulação predominante de W-SW. Por oposição, o lado de Este (Cacela), apresenta condições de agitação marítima mais amenas. Estas geoformas estão diretamente expostas à subida do nível do mar e às tempestades, causas estas que fazem oscilar o grau de erosão ao longo dos tempos (Ceia *et al.*, 2010).

Adicionalmente, a ocupação humana veio agravar os fenómenos erosivos no sistema dunar, uma vez que as suas características bióticas, outrora robustas, foram perdendo a sua resiliência e tornaram o solo cada vez mais instável. Esta principiou-se no final do século XIX, por pequenas comunidades pesqueiras. No entanto, a colonização e o interesse turístico intensificaram-se e tornaram estas ilhas cada vez mais vulneráveis. Salienta-se que as construções das entradas artificiais tiveram como objetivo assegurar as profundidades nos canais de navegação para dar acesso a algumas das principais zonas turísticas da região. Em contrapartida, após a sua construção e devido a eventos de tempestade, a entrada Tavira sofreu assoreamentos de tal modo que necessitou de várias intervenções de dragagem para manter as condições de navegabilidade (Vila-Concejoa *et al.*, 2006).

2.5.4 BANCO DE O'BRIL, ESTUÁRIO DO GUADIANA

A foz do rio Guadiana situa-se no sudeste do Algarve na fronteira marítima entre Portugal (Vila Real de Santo António) e Espanha (Ayamonte). Diversas foram as morfologias do estuário marinho ao longo dos anos, desenvolvendo-se em grandes planícies de sapais. A jusante da embocadura existe um corpo sedimentar robusto, denominado de banco de O'Bril que sofre alterações em função da agitação marítima e do caudal fluvial. A agitação marítima proveniente do quadrante W e SW resulta em correntes de deriva litoral para E. O banco de O'Bril, ilustrado na Fig. 14, apresenta de um modo geral um comportamento idêntico ao das barras da costa Algarvia, isto é, a embocadura está orientada a oeste. A migração evolui para nascente até um limite que posteriormente sofre uma rotação, desencadeando numa intensa acumulação sedimentar no lado Este, da margem Espanhola. A acreção da margem foi crescendo ao longo das décadas, embora com algumas flutuações.



Fig. 14 - Embocadura do rio Guadiana, 2019: 1) molhe de poente; 2) Banco de O'Bril (Google Earth).

Neste sentido, por forma a mitigar os problemas associados à navegação no canal principal, foram contruídos dois molhes, um em cada lado da embocadura: o molhe poente, com 2040 m de comprimento, e o molhe nascente, submerso e com 900 m de comprimento. A acumulação arenosa da deriva litoral progradou a Oeste do molhe poente. Esta estrutura permitiu alterar o padrão sedimentar na embocadura, sendo o fator predominante da deposição sedimentar na margem Este o caudal fluvial do rio. No entanto, a construção de barragens diminuiu tanto o volume e a velocidade do escoamento fluvial, como o transporte sedimentar, que por sua vez provocou a erosão na margem Este. Além disso, o grau de

exposição litoral do molhe poente saturou as suas capacidades de armazenamento de tal modo que os sedimentos litorais alcançam continuamente a embocadura. Desta forma, a predominância da agitação marítima vai conduzir à migração para nascente do rio tanto dos sedimentos litorais como do banco de O'Bril (Carvalho *et al.*, 2000).

2.5.5 LAGOA DE PATOS, BRASIL

A Lagoa dos Patos está localizada na costa sul do Brasil (entre 30° - 32° S) e está limitada por uma ilha barreira com um comprimento de cerca de 250 km, uma largura de 40 m, uma profundidade média de 5 m e uma área de aproximadamente 10.360 km² (Fig. 15). O sistema lagunar apresenta uma orientação NW-SE e uma morfologia delimitada por uma barreira arenosa constituída por depósitos sedimentares terciários e quaternários.

Embora seja considerada um estuário do tipo microtidal, em períodos de tempestade as amplitudes de maré podem chegar aos 2 m. Nos períodos chuvosos o escoamento da água doce também é significativo, podendo atingir cerca de 10.000 m³/s. Neste sentido, a evolução morfológica neste estuário é predominantemente devido à ação fluvial e dos ventos. Enquanto os ventos de NE favorecem o escoamento fluvial, os de SE e SW geram um fluxo orientado para o interior da lagoa, aumentando o nível da água.

Os fenómenos mencionados foram os principais fatores responsáveis pela evolução progressiva da barreira costeira ao longo dos tempos. Atualmente, a ligação entre a lagoa de Patos e o Oceano Atlântico só é possível através de um canal com cerca de 700 m de largura e 22 km de comprimento. A estabilização da embocadura do estuário foi garantida com a construção de dois molhes convergentes. No entanto, as alterações morfológicas ainda estão presentes ao longo da barreira nas proximidades do molhe Este (Antiqueira *et al.*, 2004).

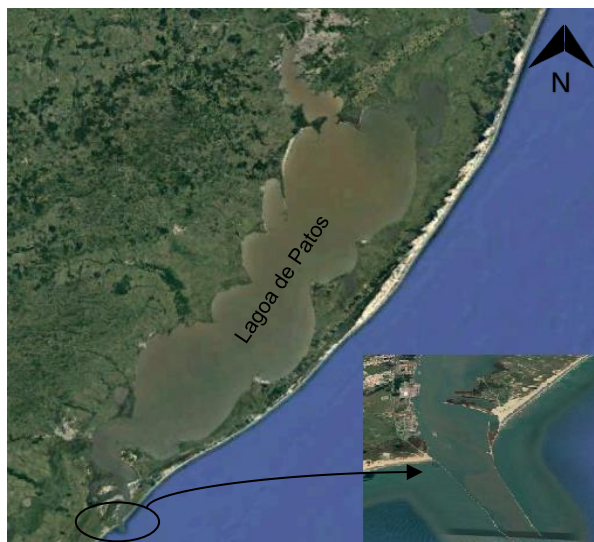


Fig. 15 - Lagoa de Patos (Brasil) e localização dos molhes convergentes (Google Earth).

2.6 SOLUÇÕES DE FIXAÇÃO DE EMBOCADURAS

De seguida, são apresentados diferentes tipos de estruturas que permitem a fixação de embocaduras, fazendo referência às suas potencialidades e inconvenientes locais e na zona de influência, relativamente à sua geometria e aos mecanismos da agitação marítima, das correntes e do transporte de sedimentos.

Os ambientes costeiros arenosos são considerados os mais variáveis temporal e espacialmente, tendo frequentes transformações morfológicas ao longo do tempo. Nas últimas décadas o crescimento populacional, bem como as atividades recreativas de lazer e socioeconómicas, têm contribuído com a erosão nas zonas costeiras. Adicionalmente, a maior frequência de episódios associados às alterações climáticas nomeadamente a subida do nível médio da água do mar e inundações nas cidades costeiras, devido ao acréscimo da agitação marítima, têm posto em causa o equilíbrio destas zonas costeiras. Sendo inevitável a exposição das frentes marítimas a estes fenómenos antropogénicos e naturais, torna-se fundamental o estudo de soluções de defesa costeira que garantam o controlo da linha da costa, minimizando os impactes negativos provocados no ambiente marítimo pela sua implementação (Castelle *et al.*, 2018).

O objetivo de um projeto de intervenção numa embocadura prende-se fundamentalmente com o assegurar das condições de navegabilidade, mantendo a largura da seção do canal de navegação e as profundidades mínimas. Dada a complexidade dos fenómenos que ocorrem numa embocadura, os critérios de dimensionamento de uma intervenção têm de incluir os aspetos relativos não só à navegação, como também os aspetos hidráulicos e sedimentológicos. Porém, na maior parte dos casos, a execução deste tipo de projetos é muito difícil ou até impossível, devido às restrições económicas e aos agentes naturais que ultrapassam as capacidades humanas (Gomes *et al.*, 2011; Hughes *et al.*, 1998).

2.6.1 QUEBRAMARES OU MOLHES

Os quebramares ou molhes são utilizados para a estabilização de embocaduras e dos canais de navegação, garantindo proteção não só das infraestruturas portuárias como também a proteção das embarcações face à agitação marítima incidente, principalmente em períodos de tempestade. Permitem ainda desviar os sedimentos transportados pela corrente de deriva litoral, depositando-os em zonas mais profundas e afastadas da entrada da embocadura. Os quebramares possuem diversas configurações, podendo destacar-se os quebramares de taludes, os verticais e os mistos. A sua posição de implementação, por forma a fixar as embocaduras, é estratégica e pode apresentar várias soluções como: um quebramar único a barlar, um quebramar único a sotamar ou nos dois lados da embocadura. Teoricamente, são estruturas com orientação perpendicular à linha da costa, com início no areal e que se estendem em direção ao oceano embora, em certos casos, a solução mais estável apresente uma ligeira curvatura no final da estrutura.

A combinação destes parâmetros deve ser considerada nas soluções propostas ao longo da elaboração de um projeto de intervenção. Isto porque as alterações morfológicas na linha da costa são inevitáveis com a implementação de um quebramar, uma vez que estas estruturas interferem com a direção das correntes das marés, com a agitação marítima e com os processos de circulação e deposição dos sedimentos marinhos e fluviais (Carvalho *et al.*, 2000; Fitri *et al.*, 2019).



Fig. 16 - Quebramares: a) Porto de Leixões; b) Porto da Figueira da Foz (Consulmar; Oliveira, 2016).

Tendo em consideração a costa Oeste portuguesa, esta possui uma predominância de agitação marítima de NW-SE e um transporte de sedimentos de deriva litoral Norte-Sul. A construção de um quebramar único a Sul da embocadura tem em princípio impactos negativos, uma vez que o transporte sedimentar de deriva litoral é acumulado ao longo do canal de navegação. Além dos efeitos das correntes de circulação, a evolução do delta de vazante pela adição dos sedimentos de origem litoral é muito significativa, diminuindo as profundidades ao longo da barra. Neste sentido, a construção de um quebramar nesta localização só faz sentido numa zona costeira em que a predominância da agitação marítima e da deriva litoral se proceda de Sul para Norte. No caso da costa portuguesa, a opção de construir um quebramar a Norte da embocadura é mais favorável não sendo, no entanto, a ideal (Fig. 17). Neste caso, a estrutura provoca acreção de areia na praia adjacente a Norte, com crescimento em direção à estrutura e, pelo contrário, uma erosão na praia a sotamar. Adicionalmente, a estrutura, por si só, não evita o assoreamento do canal, apenas reduzindo a acumulação de sedimentos no delta de vazante, por comparação com o quebramar posicionado a sotamar (Fitri *et al.*, 2019).

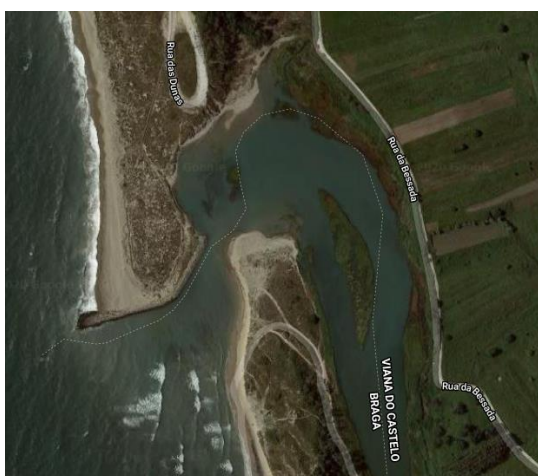


Fig. 17 - Exemplo de uma embocadura com um quebramar a Norte, Viana do Castelo, Portugal (Google Earth).

Vários estudos mostram que as embocaduras com quebramares paralelos em ambos os lados são as mais estáveis, no entanto, o seu custo acaba por limitar a dimensão das obras, acabando por, na maioria das vezes, se optar pela construção apenas do quebramar a Norte. A circulação das correntes e do transporte sedimentar é variável consoante as características dos quebramares, nomeadamente se ambos têm o mesmo comprimento ou comprimentos diferentes.

Os quebramares de igual comprimento, representados na Fig. 18a., levam a escoamentos simétricos, impedindo a tendência da corrente se acentuar de um dos lados da embocadura. Durante a corrente de enchente, o escoamento entra na embocadura com uma distribuição espacial de igual modo em cada lado da entrada, direcionando grande parte da corrente ao longo da linha central do canal, diminuindo a mesma para as extremidades. No interior da embocadura, o escoamento é reduzido pois o jacto de enchente diminui a velocidade do escoamento na zona central e provoca a sua dispersão pelo canal. Quando os molhes possuem comprimentos diferentes (Fig. 18b.), a corrente de enchente entra na embocadura numa zona preferencial, aumentando a corrente do lado do quebramar mais curto. No interior da embocadura a corrente vai-se deslocando em direção ao lado oposto em que entrou até equilibrar na zona central dos quebramares (Militello *et al.*, 2000).

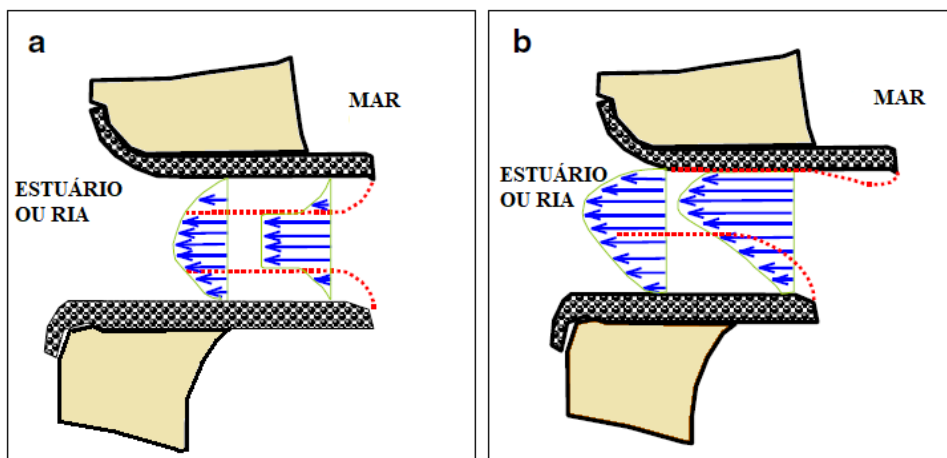


Fig. 18 - Velocidades de escoamento das correntes em quebra-mares paralelos, adaptado de Militello *et al.* (2000).

2.6.2 QUEBRAMARES DESTACADOS

Os quebra-mares destacados são estruturas de defesa costeira não enraizadas à costa (offshore), que protegem a frente marítima promovendo a pré-rebentação das ondas, bem como das correntes e das tempestades. A sua construção permite reduzir a intensidade das correntes e das ondas incidentes, bem como garantir abrigo às operações de dragagem. Além disso, promovem a acumulação de sedimentos nas áreas a sotamar do quebra-mar, tendendo a um acréscimo sedimentar na linha de costa, que sem esta estrutura estaria a ser erodida (Fitri *et al.*, 2019; Hughes *et al.*, 1998; Taveira-Pinto *et al.*, 2004).

É de notar que quando se realiza um projeto com um quebra-mar desta tipologia, é necessário ter em consideração que a sua implementação vai desenvolver alterações da hidrodinâmica local, levando a alterações morfológicas da linha de costa. A resposta da linha da costa vai depender de vários fatores tais como a batimetria, as condições de agitação marítima, as amplitudes de maré, as correntes e o volume de transporte e respetiva granulometria. Assim, estas estruturas possuem uma orientação, forma, comprimento e cota de coroamento definidas em função da zona que se pretende proteger, por forma a criar uma solução equilibrada e sustentada. É certo que, caso o quebra-mar esteja muito distante da costa, face à influência dos fenómenos mencionados, não ocorrerá a formação de um tómbolo de modo a favorecer a acreção litoral. A Fig. 19 ilustra como este tipo de estruturas pode também ser uma solução viável para fixar embocaduras (Fitri *et al.*, 2019; Teodoro *et al.*, 2011).



Fig. 19 - Quebra-mar destacado da embocadura do rio Douro (Cavaco, 2020).

Os quebramares destacados podem ser de dois tipos: emersos e submersos. Os quebramares destacados emersos, Fig. 19, como o próprio nome indica, são estruturas cuja cota do coroamento está acima do nível da preia-mar e permitem atenuar a ação direta das ondas, reduzindo a erosão da linha da costa. No entanto, estas estruturas podem ser dimensionadas por forma a que nos períodos de maré cheia ou de intensa agitação marítima sejam galgadas e funcionem como recifes naturais e, nos períodos de maré baixa estejam à superfície. Caso o quebramar esteja totalmente emerso e com a sua implementação as correntes sejam muito reduzidas a sotamar da estrutura, tal pode causar a estagnação da água e consequentemente problemas relacionados com a qualidade da água da praia, pondo, por exemplo, a sua utilização recreativa em causa.

Os quebramares destacados submersos (Fig. 20) caracterizam-se por possuir uma cota de coroamento inferior a um nível do mar especificado no projeto. Ao serem submersos, são equiparados aos recifes artificiais. A sua existência permite uma pré-rebentação das ondas incidentes na estrutura, de tal modo que as ondas que se aproximam da linha de costa possuem uma energia reduzida. Além disso, o galgamento da estrutura faz com que seja possível transportar os sedimentos para sotamar, garantindo uma alimentação sedimentar à praia por ela abrigada. Salienta-se que a utilização de quebramares submersos tem algumas vantagens, em particular ao nível paisagístico, permitindo também a criação de novos habitats. Ao apresentarem cotas de coroamento mais baixas que os quebramares imersos, estão menos sujeitos à ação das ondas e a sua construção é menos dispendiosa. No entanto, são um fator de risco tanto para as embarcações, nas proximidades dos portos, como para os banhistas (Palma, 2016; Taveira-Pinto *et al.*, 2004).



Fig. 20 - Exemplo de quebramar submerso (Google).

2.6.3 DRAGAGENS

As dragagens são uma intervenção de extração de sedimentos e podem ser executadas tanto em estuários como em rios. O recurso a esta atividade pode estar associado a vários fins. Nas embocaduras e estuários esta intervenção é utilizada para o desassoreamento e a manutenção das profundidades de água mínimas necessárias para assegurar a navegabilidade, porque a deposição de sedimentos tende a progredir com a ação das correntes de maré e do transporte fluvial. No que concerne ao controlo de sedimentos numa embocadura, os objetivos principais são: o de remover os sedimentos acumulados colocando o material com qualidade para alimentação de praias a sotamar; diminuir a meandrização do canal; e otimizar a profundidade do canal de navegação proporcionando as profundidades mínimas requeridas pelos navios (APA, 2018; Pinheiro, 2008).

Por outro lado, as dragagens podem ser utilizadas nos portos marítimos para auxiliar na manutenção das cotas dos fundos, contrariando a deposição de sedimentos, para a expansão das infraestruturas dos portos

ou aprofundamento dos canais de navegação de entrada e saída de embarcações. Isto é feito de modo a garantir o normal funcionamento e desenvolvimento do comércio marítimo. Importa referir que os portos situados em zonas costeiras estão expostos às ações da agitação marítima, das marés, das correntes estuarinas e das correntes de deriva litoral.

As dragagens estão ainda associadas à alimentação artificial de praias e dunas que estejam em perigo de erosão. Estas permitem regenerar o perfil das praias, preservando o seu estado natural e potencializando as suas capacidades balneares. Permite, adicionalmente, reforçar os fundos marinhos próximos de modo a favorecer a pré-rebentação e fortalecer o perfil das dunas, tornando-as mais robustas do ponto de vista volumétrico e altimétrico (Martins *et al.*, 2011).

O tipo de intervenção a realizar está dependente das características locais (volume sedimentar, granulometria dos sedimentos, existência de obras de defesa costeira e variações de acreção/erosão da linha da costa) e dos fenómenos naturais associados, tais como as ações das marés, da agitação marítima, do transporte sedimentar e dos períodos de tempestade. A estas condicionantes ainda se adicionam as de âmbito logístico, operacional e financeiro. A fase operacional pode ser realizada com recurso a vários tipos de equipamentos de dragagem que realizam o corte, a remoção e/ou a deposição dos sedimentos. Dos existentes, ilustram-se na Fig. 21 os seguintes: a) dragagens diretas por pipeline; b) dragagens de repulsão direta; c) dragagens por repulsão com batelão; e, d) dragagem terrestre (APA, 2018; Martins *et al.*, 2011).

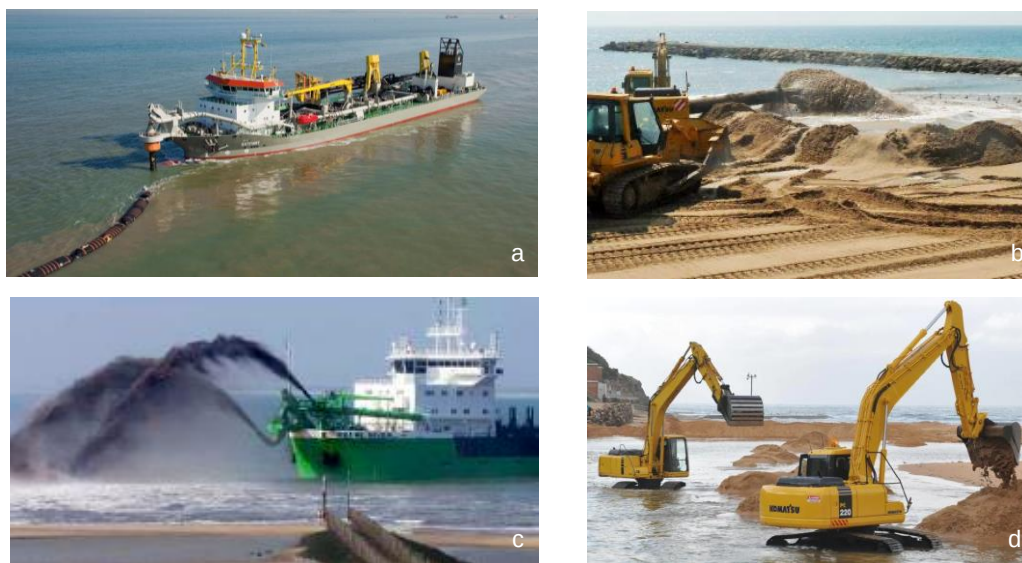


Fig. 21 - Exemplos de dragagens: a), b) e d) (APA, 2018); c) (Martins *et al.*, 2011).

As características do material dragado a utilizar numa intervenção de alimentação artificial de praias ou de reforço dunar deve, sempre que possível, ser igual ou semelhante às características do material já existente no local. Apesar de por si só ser uma atividade dispendiosa, é necessário estudar as características dos sedimentos dragados uma vez que estes poderão ser um fator de contaminação aos sedimentos existentes no local a alimentar. Neste sentido, o grau de contaminação é um fator muito relevante na seleção dos sedimentos e, atualmente, opta-se por manter o material dragado no mesmo sistema sedimentar que lhe deu origem. Do ponto de vista ambiental, o material depositado no mesmo sistema sedimentar permite preservar as comunidades biológicas, comunidades estas que por si só já apresentam resiliência devido às condições ambientais presentes neste tipo de habitats. Neste contexto, realça-se que o processo de desassoreamento e alimentação artificial nunca são realizados numa única

intervenção. Ou seja, estes procedimentos necessitam de intervenções e manutenção periódicas, uma vez que o ambiente costeiro tende a progredir para o seu equilíbrio natural e origina ciclicamente erosões costeiras. Embora seja imprevisível o número de intervenções de alimentação artificial face aos fenómenos hidrodinâmicos locais e aos eventos extremos, é essencial avaliar a periodicidade destas atividades e os custos associados (APA, 2018; Silva, 2016).

2.7 EVOLUÇÃO LOCAL

A cidade de Esposende apresenta uma zona costeira de dinâmica complexa devido à sua localização geográfica junto ao Oceano Atlântico, na foz do Rio Cávado. A vila de Fão, ilustrada na Fig. 22a, localizada na margem esquerda da foz do Cávado e integrada no cordão dunar, foi um dos maiores centros salineiros do país durante o período medieval. No entanto, o assoreamento da barra foi aumentando consideravelmente, levando ao decréscimo da navegabilidade e, consequentemente, à perda da importância do rio Cávado na comercialização. Entre as causas que potenciaram o assoreamento descontrolado do Cávado estão: o abaixamento do nível da água do mar, como consequências do *Little Ice Age* entre o séc. XVI e o séc. XVIII, originando a seca de vários cursos de água ao longo do rio Cávado; a intensidade dos ventos e a invasão de areia vindas do mar. O abaixamento do nível da água do mar e a intensidade dos ventos fomentaram o transporte de uma elevada quantidade de inertes para o interior do estuário. O assoreamento crescente no sistema estuarino limitou a dimensão da frota marítima, exemplificado na Fig. 22b, de tal modo que só conseguiam atravessar a barra os barcos de pequeno calado (Almeida, 1979; Neiva, 2012).

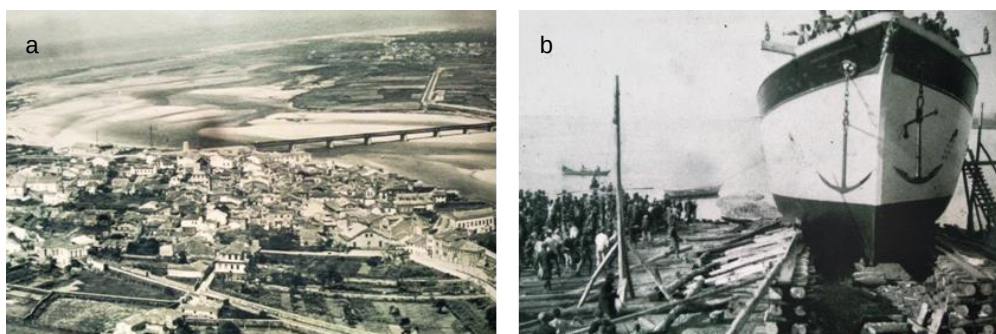


Fig. 22 - Esposende antiga: a) vila de Fão e estuário do rio Cávado; b) frota marítima em 1915, (Neiva, 2012).

No final do séc. XVIII, o Tenente do Corpo Real de Engenharia, José Vilas Boas, apresentou um projeto para a melhoria da navegabilidade do rio Cávado e da sua barra. O projeto incluía: o encanamento do traçado do rio Cávado de maneira a que durante a baixa-mar houvesse uma vazante significativa dos depósitos de areia no leito; a melhoria da navegabilidade, impedindo o assoreamento da barra com a construção de um molhe, de forma a evitar o desvio do rio para norte obrigando-o a desaguar segundo o rumo Este-Oeste (E-W); e a instalação de 8 eclusas por forma a amortecer a corrente fluvial. Apesar do projeto ter sido aprovado em 1795, a obra acabou por não ser realizada (Neiva, 2012).

Com o passar dos anos, a navegabilidade e a entrada/saída de embarcações tornou-se perigosa, não só pela altura de água, mas pelo volume de enrocamento que se foi acumulando devido ao desmoronamento das obras que foram sendo construídas. Alguns molhes e eclusas nem sequer tinham sido executadas na sua totalidade, tornando-os mais fragilizados às condições envolventes (Fig. 23). Em meados de 1860, o Capitão Engenheiro João Luís Lopes propôs a instalação de um sistema de represas móveis para a melhoria da navegabilidade no rio e da barra de Esposende. Porém, em 1879, deu-se continuidade ao

“Plano de Melhoramento do Porto e Barra de Esposende”. As obras consistiam na remoção e extração dos blocos caídos, ao longo do antigo paredão, e na reconstrução do mesmo reutilizando as pedras removidas, argamassa e alvenaria hidráulica (Neiva, 2012).



Fig. 23 - Esposende antiga: estado de degradação do paredão da foz (Neiva, 2012).

Em 1881, surge um projeto suplementar dividido em duas fases construtivas. A primeira fase consistia em alterar certos aspetos do projeto inicial do molhe, com o objetivo de promover que as deposições exteriores à restinga se formassem o mais longe possível, de modo a aumentar a profundidade da água e, ainda, iniciar a construção de um dique provisório, entre o cais e o paredão, com o objetivo de avaliar o efeito e direção das correntes. Numa segunda fase, procedeu-se a dragagens no canal, por forma a contrariar a tendência de a restinga crescer para norte e estabelecer uma entrada no canal segura. A Fig. 24 apresenta a morfologia da barra de Esposende e a disposição das infraestruturas de defesa costeira, no ano de 1883 (Neiva, 2012).

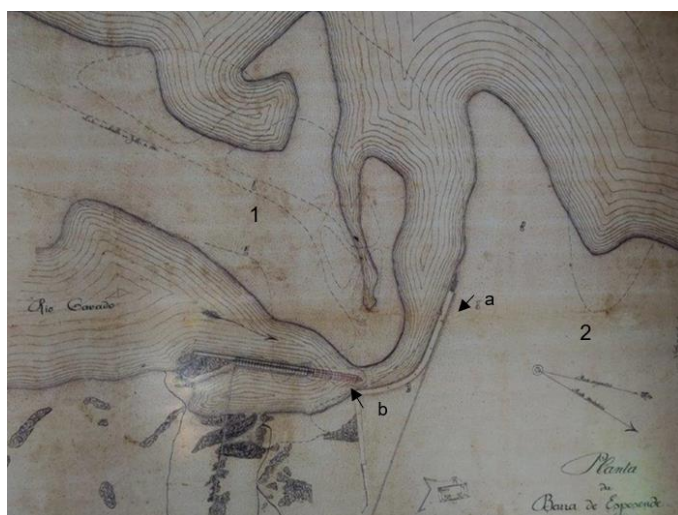


Fig. 24 - Planta da Barra de Esposende, 1883. 1) Restinga de Ofir; 2) Cidade de Esposende; a) Paredão da foz do rio Cávado; b) Dique provisório (Neiva, 2012).

Em 1884, o “Projeto de Melhoramento do Porto e Barra de Esposende e encanamento do rio Cávado”, elaborado pelo Engenheiro Abel Maria Mota, contemplava a construção de dois molhes, um em cada margem da abertura da barra, no entanto, esses nunca chegaram a ser executados (Neiva, 2012).

Em 1908, foi proposta a alteração do material do dique provisório, substituindo as partes em madeira por betão. Foi também projetada uma ligação do dique ao molhe e a reparação da cabeça do molhe. Em 1935, é apresentado um projeto de reconstrução do paredão e molhe da barra do porto de Esposende. Este previa a ampliação da estrutura em cerca de 69 m, com uma parte realizada em alvenaria e argamassa e a restante em blocos artificiais. No decurso do séc. XX vários foram os estudos, projetos e obras propostos, no entanto, nenhum deu resposta aos problemas conhecidos que ocorriam e ocorrem na barra. A emigração da população e a perda da atividade marítima tornaram Esposende uma cidade menos habitada (Neiva, 2012).

A fragilidade da barra face à exposição marítima e fluvial levou a uma grande migração sedimentar no canal, de uma dimensão tal que por vezes nenhuma embarcação conseguia sair do estuário. As dragagens efetuadas, apesar de serem essenciais para garantir condições mínimas de navegabilidade, não tiveram capacidade de mitigar a médio/longo prazo os problemas crónicos da Barra e Restinga do Cávado (Neiva, 2012).

A restinga, nomeadamente a sua extremidade Norte, sofre galgamentos na duna frontal aquando da ocorrência de forte agitação marítima, principalmente quando esta coincide com marés vivas. Além disso, a ocorrência de cheias fluviais intensifica as correntes de vazante na foz do estuário, levando consecutivamente à rutura da restinga. As Fig. 25 e Fig. 26 apresentam a evolução da restinga, desde o início da década de 2000 até à atualidade. É evidente a variação morfológica intensa e problemática deste corpo arenoso ocorrido em menos de duas décadas. Salienta-se o emagrecimento do corpo da restinga, a perda de sedimentos nomeadamente na sua extremidade e consequente estreitamento do canal.

Nos anos de 2001/2002 e 2005/2006 foram realizadas alimentações artificiais na extremidade da restinga com areia dragada do estuário. No entanto, os invernos rigorosos associados a fortes agitações marítimas e tempestades com direção W-SW provocaram novamente ruturas na restinga. Estas operações de alimentação artificial e posterior rutura são o resultado da hidrodinâmica complexa existente nesta zona litoral. Em 2015, surgiu outra solução para combater a instabilidade da barra. A Polis Litoral Norte, entidade responsável pela conservação e preservação da restinga de Ofir, concretizou uma intervenção a fim de reforçar o cordão dunar da restinga. Essa obra foi realizada com recurso à construção de uma duna artificial contornando a cabeça da restinga, tanto do lado do mar como do rio, através da aplicação de cilindros geossintéticos. O material dragado na restinga provinha dos sedimentos recolhidos da barra, nomeadamente na zona terminal do canal de navegação. No entanto, os resultados não foram os esperados, levando não só à rutura da restinga como também à rutura dos geossintéticos introduzidos para proteção da mesma. De acordo com o estado atual da foz do rio Cávado, apresentado na Fig. 26, a cabeça da restinga sofreu vários episódios de rutura, de tal modo que essa falha evoluiu para um canal secundário. Além disso, é notável a evolução da acumulação sedimentar a Norte, ao longo do dique.

A forte erosão que este sistema dunar tem vindo a sofrer desde os relatos históricos até à atualidade, demonstram as repercussões existentes na localidade ao nível económico, ambiental e social. A realização de dragagens e consequente deposição nas praias adjacentes não são por si só suficientes para manter estável a linha da costa.

É neste contexto que se insere a presente dissertação, que visa estudar novas soluções de proteção costeira através da realização de simulações numéricas, que permitam minimizar a energia das ondas incidentes, controlar o transporte sedimentar fluvial, bem como aumentar a volumetria da restinga e garantir as condições de segurança e de navegabilidade.



Fig. 25 - Evolução da Restinga de Ofir entre 2003 e 2018 (Google Earth).



Fig. 26 - Evolução da Restinga de Ofir ente maio de 2019 e julho de 2019 (Google Earth).

3

PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO PARA A RESTINGA DE ESPOSENDE

3.1 O RIO CÁVADO

O rio Cávado nasce no Norte de Portugal, na serra do Larouco, e desagua em Esposende, apresentando uma extensão de aproximadamente 129 km.

Os principais afluentes são o rio Homem, localizado na margem direita, com um comprimento de 45 km, que nasce na serra do Gerês e drena uma área de 256 km² (15% do total da área da bacia do rio Cávado); e, na margem esquerda, o rio Rabagão, com um comprimento de 37 km, que nasce entre as Serras do Barroso e Larouco e drena uma área de 248 km² (14.6% do total da área da bacia do rio Cávado). A área total da bacia hidrográfica do rio Cávado é de 1699 km² e esta é limitada, a Norte, pela bacia hidrográfica dos rios Neiva e Lima e, a Este e a Sul, pelas bacias do rio Douro e do rio Ave. O rio Cávado estende-se por várias povoações, sendo que os municípios que têm uma maior influência sobre o estuário são Amares, Barcelos, Braga, Esposende e Vila Verde (Ambiente, 2016).

A bacia do Cávado pertence à região hidrográfica do Cávado, Ave e Leça – RH2, com uma área total de 3 585 km². A Fig. 27 apresenta a azul o limite da área referente à RH2 e a cores, a bacia hidrográfica do rio Cávado. As bacias hidrográficas costeiras entre o rio Neiva e o rio Douro também fazem parte da RH2 (Ambiente, 2016).

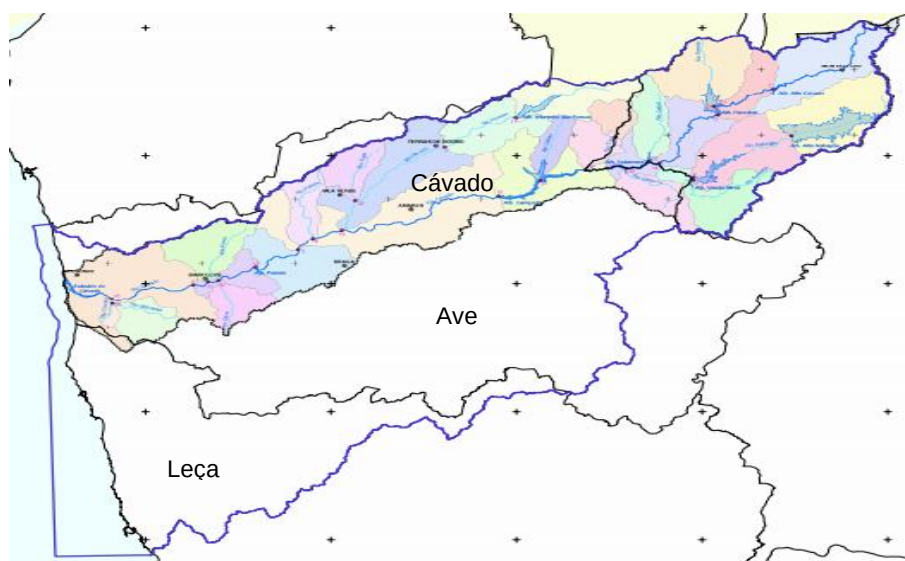


Fig. 27 - Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2).

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO

A foz do estuário do rio Cávado (41°32'20.92"N; 8°47'31.65"W) situa-se no litoral de Esposende, no distrito de Braga a NW de Portugal (Fig. 28, representado a laranja) e está inserida no programa "Polis Litoral Norte - Operação Integrada de Requalificação e Valorização do Litoral Norte", que abrange uma área de 8887 ha, desde a foz do rio Neiva e a zona da Apúlia, numa extensão de aproximadamente 16 km (Gomes *et al.*, 2011; Pinho, 2005).



Fig. 28 - Localização da zona de estudo (Google Earth).

A foz do rio Cávado está limitada por um molhe, a Norte, e por um sistema arenoso que separa o rio do mar, a Sul, denominado de restinga de Ofir. A restinga (Fig. 28, a amarelo) é uma defesa costeira natural e fundamental para a proteção da cidade de Esposende contra a invasão do mar. Neste estudo, o limite da dinâmica fluvial é delimitado pelo Açude de Barcelinhos, estando a sua localização apresentada na Fig. 28 (Gomes *et al.*, 2011; Pinho, 2005).

A foz do rio Cávado caracteriza-se por ter uma costa aplanada - de praias arenosas - e por um extenso ambiente dunar. As praias arenosas da restinga e as arribas limitam o areal da duna frontal. Na costa a Sul da embocadura, destaca-se a existência de aglomerados rochosos orientados para NW-SE, os rochedos de Furado e os Cavalos de Fão, que induzem a formação de recifes naturais e potenciam alguma estabilidade na linha da costa. A Fig. 29 ilustra espacialmente as três obras costeiras existentes na zona que permitem o controlo da evolução da linha da costa. São elas, o molhe da margem direita da embocadura (A), que retém sedimentos para a praia a Norte da embocadura; o esporão da restinga (B), de forma curvilínea, com cerca de 250 m de comprimento, de orientação SW e localizado aproximadamente a meio do comprimento da restinga; e, o esporão de Ofir, orientado para Oeste (C). O molhe Norte apresenta um farolim. Além disso, o dique paralelo à marginal de Esposende (D), é uma proteção fundamental para assegurar o amortecimento das condições de agitação marítima extremas que atingem a frente urbana. Este apresenta um comprimento de cerca de 865 m e tem um perfil em taludes de enrocamento. No seu tardoz desenvolve-se uma zona de sapal, que ultimamente tem vindo a sofrer assoreamentos acentuados. Este fenómeno deve-se ao transporte de sedimentos através da corrente fluvial e pelos sedimentos provenientes do mar. O grau de exposição da estrutura tem sido o principal

fator para a sua degradação, diminuindo a cota de coroamento e, conseqüentemente, favorecendo a ocorrência de galgamentos durante a preia-mar. Em períodos de tempestade, as ondas que alcançam o interior do estuário por vezes incidem no muro da marginal, provocando inundações na frente urbana (Gomes *et al.*, 2011; NEMUS, 2003; PLN, 2016b).

A Fig. 30 retrata o estado atual das infraestruturas costeiras mencionadas anteriormente, numa visita ao local, a 20 de maio de 2020.



Fig. 29 - Caracterização do estado atual da embocadura do rio Cávado e obras costeiras existentes: A) molhe Norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique. s) sentido da deriva litoral (Google Earth, 2019).

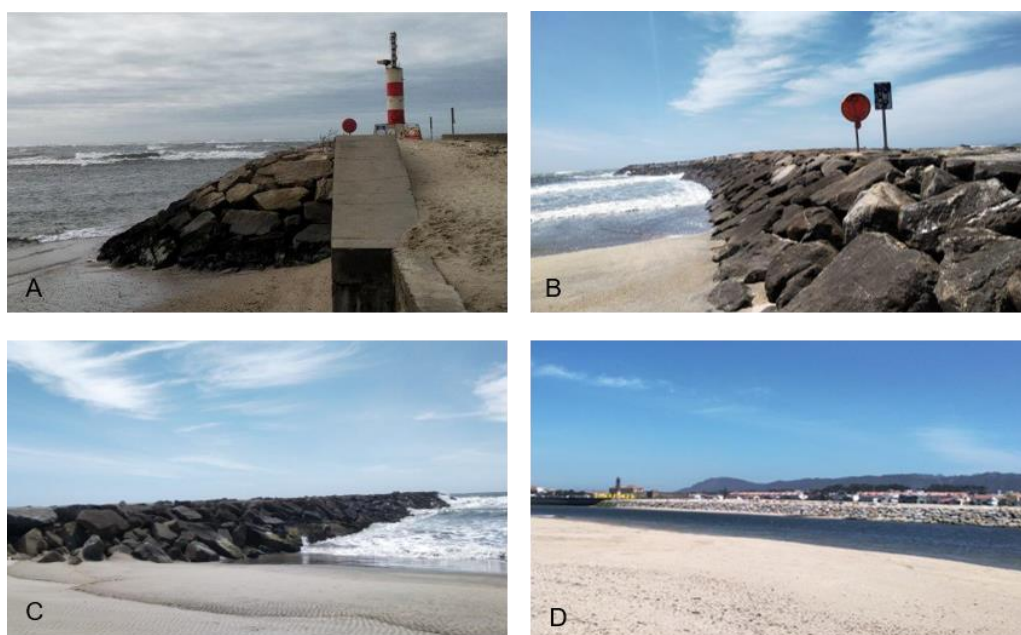


Fig. 30 - Estado atual das infraestruturas costeiras: A) molhe Norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique.

Na frente ribeirinha da cidade de Esposende, a margem direita do estuário do Cávado, é ocupada com infraestruturas portuárias, pesqueiras, de construção naval e recreativas que potenciam a economia local da cidade. Além disso, na margem esquerda também existe o aglomerado de Fão, embora mais disperso e mais afastado das margens do rio. De acordo com o referido no PDM de Esposende, no que respeita a condicionantes ao uso do solo, verifica-se que grande parte do extremo jusante da margem esquerda pertence à Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) (Carvalho *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2011).

O leito do rio possui bancos de areia, pequenas ilhas e uma extensa área de sapal (Fig. 31 e Fig. 32), que o dividem em diversos canais de baixa profundidade. A influência fluvial atinge a foz do rio Cávado com uma orientação predominante SE-NW (Carvalho *et al.*, 2000; Pinho, 2005).

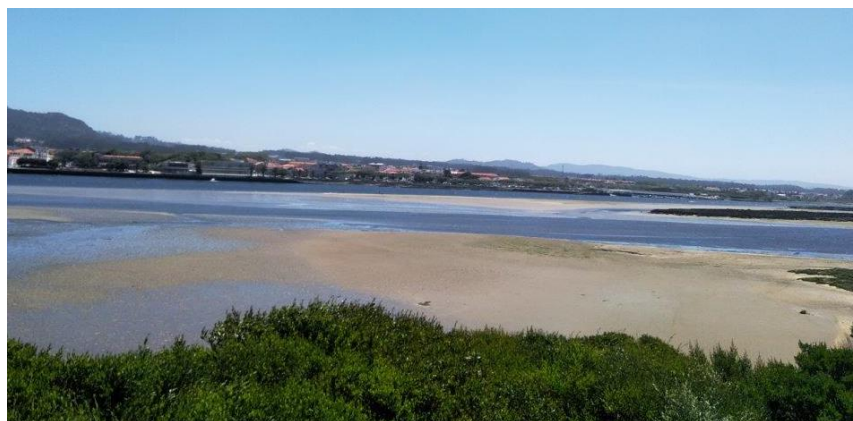


Fig. 31 - Bancos de areia no interior do estuário.



Fig. 32 - Sapal entre o dique e a linha da costa da marginal de Esposende: A) baixa mar; B) preia mar.

A embocadura do rio Cávado apresenta uma curvatura acentuada em direção ao oceano Atlântico, tem uma largura de aproximadamente 40 m (N-S) e uma profundidade de água reduzida, que varia entre 1 e 3 m, facto este que impossibilita atualmente uma navegação segura na barra. Nos períodos de baixa mar, a foz do rio Cávado apresenta várias unidades morfológicas que podem ser observadas nas Fig. 33 e Fig. 34. Analisando no sentido do mar para o interior do estuário estão presentes: 1) o delta de vazante, na entrada da embocadura e orientado segundo o fluxo dominante da corrente de vazante; 2) o delta de maré enchente, com um banco arenoso que se desenvolve na parte mais interna da embocadura; 3) o canal principal com profundidade variável; e, 4) o canal secundário, mais estreito (Loureiro, 2007; Pinho, 2005).

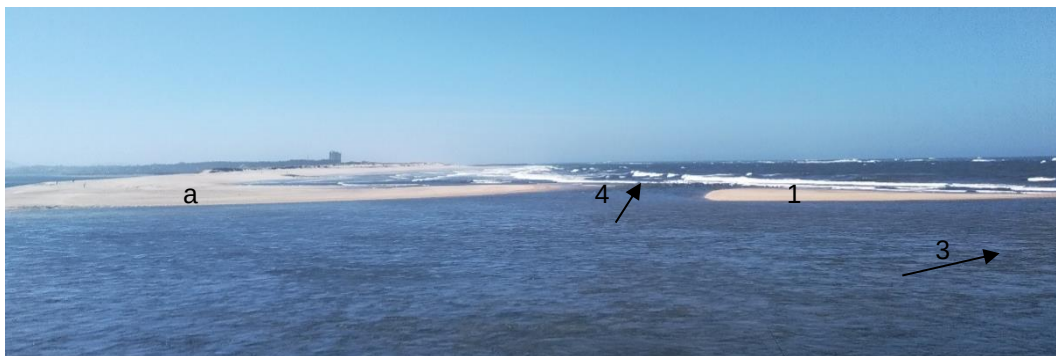


Fig. 33 - Foz do rio Cávado (maio de 2020). a) extremidade Norte da restinga de Ofir; 1) delta de vazante; 3) canal principal; 4) canal secundário.



Fig. 34 - Foz do rio Cávado (fevereiro de 2020). D) dique; a) extremidade Norte da restinga de Ofir; 2) bancos de areia de enchente; 3) canal principal.

Numa visita ao local, em fevereiro de 2020, e analisando visualmente, a foz do rio Cávado apresentava um aumento dos bancos de areia do delta de enchente na parte terminal do estuário, junto ao molhe e ao dique. A seção entre o dique e a margem de Esposende caracterizava-se por um extenso banco de areia. As acumulações sedimentares extensas e visíveis nestas zonas devem-se, essencialmente, às alterações hidrodinâmicas que lhes estão associadas.

Contudo, a morfologia da embocadura do rio Cávado sofre modificações extremas aquando da ocorrência de tempestades coincidentes com situações de cheia do rio Cávado. Estes eventos provocam um aumento global da erosão na extremidade da restinga e galgamento no dique. Além disso, a estas ações adiciona-se o acréscimo do volume sedimentar de origem fluvial transportado para o oceano e para as praias adjacentes.

A restinga é uma formação geológica natural, a Sul da embocadura do rio Cávado, que defende a zona costeira da cidade de Esposende. Tem um comprimento de cerca de 2100 m e a sua morfologia é variável de acordo com a magnitude da dinâmica marítima e fluvial. O corpo arenoso está muito exposto à ondulação de Noroeste. No entanto, os afloramentos rochosos, denominados de Cavalos de Fão, provocam uma refração e difração das ondas, contribuindo para uma diminuição da sua energia na

chegada à praia, principalmente no período de tempestades com orientação sudoeste. Os eventos extremos provocam galgamentos no sistema dunar, nomeadamente na extremidade Norte da restinga, transportando grandes quantidades de sedimentos para o interior da entrada do estuário. Neste sentido, e por dificuldade em atravessar a barra nos períodos de baixa mar, ao longo das décadas, tem-se vindo a assistir a vários ciclos de rutura e posteriormente alimentação artificial, para tentar recuperar a restinga e o equilíbrio da embocadura do rio Cávado (Gomes *et al.*, 2011; Pinho, 2005).

3.2.1 CAUDAIS

No sentido de avaliar a grandeza dos caudais do rio Cávado, de forma a quantificar a dinâmica fluvial, foram analisados os caudais registados na estação hidrométrica de Barcelos (estação 04F/02H) de 1978 a 2002, com recurso aos dados do SNIRH. Uma vez que não foram encontradas análises da dinâmica fluvial em trabalhos anteriores, apresentam-se de seguida vários valores de caudais fluviais para que, posteriormente, no Cap. 4, seja possível realizar cenários com diferentes caudais do rio.

A estação hidrométrica de Barcelos, com a sua localização apresentada na Fig. 28, está integrada na bacia hidrográfica do rio Cávado e é da responsabilidade da Autoridade Nacional da Água. Pertence ao distrito de Braga, está localizada no ponto de coordenadas (X;Y) de 159108.969 e 506595.959 e abrange uma bacia com cerca de 1434 km² (SNIRH, 2020). Dos caudais médios diários registados na estação de Barcelos, cerca de 7419 dados, verificou-se a existência de dias sem informação disponível. Essas falhas podem estar associadas a avarias na estação.

Numa primeira abordagem, pretendeu-se aferir se a zona de estudo se enquadrava com o padrão nacional, ou seja, quais os meses que correspondiam aos anos mais húmidos e mais secos. Para tal, foram considerados os anos que possuísem mais de 300 dos 365 dias do ano, com registos de caudais médios diários, tais como os apresentados no Fig. 35. Deste modo, os anos mais completos são os referentes aos períodos 1979 – 1990 e 1996 – 1999, 16 anos respetivamente. A Tabela A. 1 do Anexo A apresenta as médias dos caudais médios diários referente a cada mês, nos anos já mencionados. Esta análise só pretende validar o que já é naturalmente conhecido, ou seja, os meses de janeiro, fevereiro e dezembro são os meses mais húmidos, correspondentes ao inverno, e os de verão são os mais secos. O sombreado a laranja da Tabela A. 1 do Anexo A, permite não só identificar o mês mais húmido em cada ano como também compreender que em alguns meses, tais como em maio de 1983 e novembro de 1999, foram provavelmente meses de ocorrências de fenómenos naturais extremos que não são habituais nessas épocas do ano.

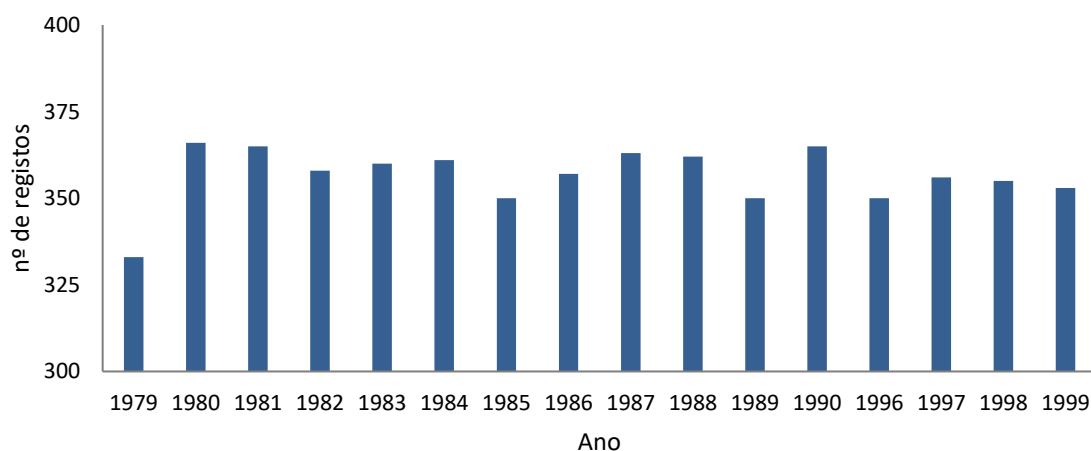


Fig. 35 - Nº de registos por ano do caudal médio diário da estação hidrométrica de Barcelos.

De seguida, calcularam-se os caudais médios diários associados a alguns percentis. Em primeiro lugar, os caudais médios diários foram ordenados por ordem decrescente desde 1978 a 2002, obtendo o caudal médio diário máximo de 735.85 m³/s (Fig. A. 1 dos anexos), ou seja, o caudal médio diário que limita os valores inferiores a esse. Neste sentido, quanto maior a percentagem, menor será o número de dias, ao longo do período em análise, com caudais iguais ou superiores ao valor que limita esse patamar. Para um percentil de 95%, o caudal obtido foi de 146.85 m³/s (Fig. 36 e Tabela 1). De acordo com a Tabela 1 pode-se verificar que mais de metade dos caudais médios diários registados são inferiores a 50 m³/s.

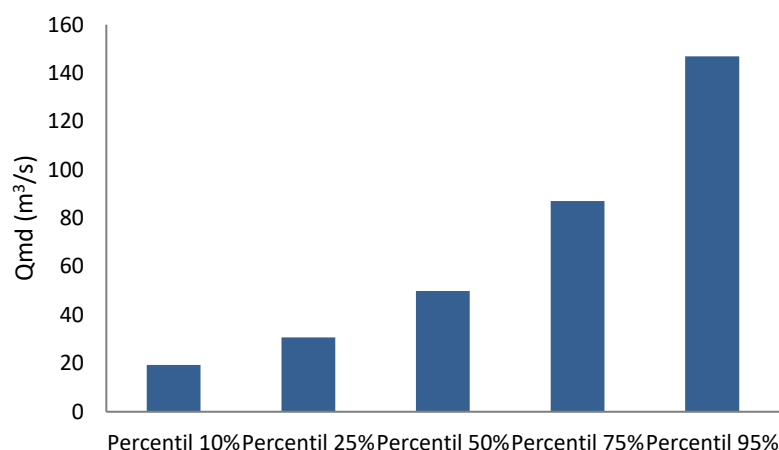


Fig. 36 - Percentis dos caudais médios diários registados na estação de Barcelos no período 1978 – 2002.

Tabela 1 - Análise dos percentis da estação de Barcelos.

Percentil	Caudal médio diário (m³/s)	Nº de dados iguais ou superiores à %
10%	19.36	7048
25%	30.74	6677
50%	49.87	5564
75%	87.16	1855
95%	146.85	371

Os dados também foram analisados de forma a determinar qual o valor do caudal máximo para um determinado período de retorno. Para tal, recorreu-se à distribuição de *Gumbel*, que implica a utilização dos valores extremos existentes, ou seja, os valores dos caudais máximos anuais. Dos dados fornecidos pelo SNIRH, foram considerados não só os anos que possuíam mais de 300 dos 365 dias do ano, como também aqueles que fossem iguais ou superiores a 100 m³/s. Assim, os anos considerados para esta análise referem-se desde 1979-1990 e 1996 – 1999 da Tabela A. 2 do anexo A. De acordo com a distribuição de *Gumbel*, uma função de derivação de probabilidade para analisar eventos extremos, determinou-se o caudal máximo anual para um período de retorno de 50 anos, através da seguinte expressão:

$$X = \bar{x} - s x \left\{ 0.45 + 0.7797 x \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

em que o X representa o valor correspondente a um determinado período de retorno, $\bar{x}$ a média, S o desvio padrão e TR o período de retorno.

De acordo com os dados em estudo, obteve-se uma média de 266.48 m³/s e um desvio padrão de 170.42 m³/s. A Tabela 2 apresenta os caudais obtidos para períodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 30 e 50 anos. O caudal obtido para um período de retorno de 50 anos foi de 808.26 m³/s.

Tabela 2 – Caudais para diferentes períodos de retorno de acordo com a Distribuição de *Gumbel*.

TR (anos)	Q (m ³ /s)
5	489.09
10	588.81
15	645.06
20	684.45
30	739.48
50	808.26

Nos dados fornecidos pelo SNIRH também constavam os registos de caudais instantâneos máximos anuais dos anos que se apresentam na Tabela 3. Sendo apenas seis anos de registos e não consecutivos, a análise da distribuição de *Gumbel* (Tabela 4), foi executada como termo de comparação da análise presente na Tabela 2. Sendo um caudal instantâneo, a sua grandeza é significativamente superior ao analisando anteriormente, atingindo para um período de retorno de 50 anos, um caudal de 1277.11 m³/s.

Tabela 3 – Caudais Máximos Anuais registados na Estação de Barcelos, (SNIRH).

Ano Hidrológico	Nível Instantâneo Máximo Anual (m)	Caudal Instantâneo Máximo Anual (m ³ /s)
1979/80	3.06	471.54
1980/81	1.25	153.58
1981/82	4.61	850.81
1986/87	1.51	246.30
1989/90	2.49	864.66
1990/91	1.90	429.86

Tabela 4 - Caudais para diferentes períodos de retorno com base nos registos diretos do SNIRH.

TR (anos)	Q (m ³ /s)
5	717.70
10	892.47
15	991.08
20	1060.12
30	1156.56
50	1277.11

Em resumo, da análise dos dados conhecidos foi possível obter os seguintes caudais fluviais de referência:

- O caudal médio diário máximo registado é de 735.85 m³/s (Fig. A. 1 dos anexos);
- O caudal médio diário para o percentil de 95% é de 146.85 m³/s (Fig. 36 e Tabela 1);
- O caudal máximo anual é 808.26 m³/s, para um período de retorno de 50 anos (Tabela 2).

De modo a validar a grandeza dos caudais obtidos com base nos registos da estação hidrométrica de Barcelos, obtiveram-se os seguintes valores adotados em diferentes estudos:

- O caudal médio diário turbinado de 40 m³/s, pela barragem da Caniçada (Silva, 2006).
- O caudal médio diário anual é de 71 m³/s na foz do estuário do Cávado (Carvalho *et al.*, 2013).
- O caudal máximo anual é superior a 200 m³/s na barragem da Caniçada (Pinho, 2005).

3.2.2 AGITAÇÃO MARÍTIMA

O conhecimento das condições da agitação marítima é muito relevante para o estudo temporal do regime hidrodinâmico e morfológico numa frente costeira, merecendo assim uma análise cuidada. De seguida, apresenta-se a análise que permitiu auxiliar a escolha das características da agitação marítima que serão consideradas nas simulações.

As características da agitação marítima são determinadas com recurso a boias ondógrafo. Atualmente, o Instituto Hidrográfico dispõe em Portugal continental três boias costeiras: Leixões, Sines e Faro. Dada a sua localização em relação ao caso de estudo, foram considerados os registos da boia ondógrafo de Leixões. Os registos das condições de agitação marítima são efetuados de 3 em 3 horas, durante períodos de 30 minutos. Em condições de temporal, ou seja, quando a altura de onda significativa excede 5 m (na costa Oeste), os períodos de aquisição são efetuados por períodos de 30 minutos quase contínuos.

Silva (2013) caracterizou as condições médias globais e médias sazonais, a partir da altura de onda significativa (H_s), período de pico (T_p) e a direção associada, relativamente ao período compreendido entre julho de 1993 e dezembro de 2007. A Fig. 37 apresenta a série temporal da altura de onda significativa no período em análise. O eixo superior do gráfico representa as percentagens anuais de registos válidos. Com essa leitura é possível verificar que os registos efetuados ao longo do período considerado apresentaram algumas lacunas, nomeadamente entre 1993 e 1995, 2000 e 2001 e 2005. Estas falhas nos registos podem estar associadas ao tráfego marítimo e às condições ambientais que podem levar a falhas no correto funcionamento da boia.

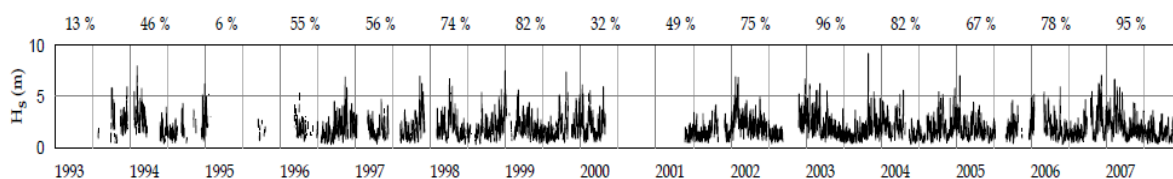


Fig. 37 - Série temporal da altura de onda significativa no período 1993-2007 (Silva *et al.*, 2008).

As condições médias globais revelaram que as alturas de onda significativas mais frequentes são de 1 m a 2 m, com 46% das ocorrências, a frequência de valores superiores a 2 m corresponde a 24%, os períodos de calma, inferiores a 1 m, correspondem a 17% e apenas 1.2% correspondem a alturas superiores a 5 m. O valor máximo da altura de onda significativa registado foi de 9.2 m. Relativamente ao período de pico, cerca de 84% dos registos estão compreendidas entre 6 e 12 s, com um valor médio de cerca de 9 s. Por fim, na análise da direção média associada ao período de pico, verificou-se que cerca de 74% das ocorrências estão inseridas nos octantes de NW-WNW (Silva, 2013).

Na análise das condições médias sazonais foram claras as diferenças entre os períodos de verão (abril a setembro) e inverno (outubro a março), sendo que o período de inverno revelou os valores médios mensais da altura de onda significativa mais elevados, sendo todos superiores a 2 m. Adicionalmente, o período de pico mensal está compreendido entre os 7 e os 11 s. Salienta-se que os valores de pico superiores a 14 s ocorrem com maior frequência nos meses de inverno (Silva, 2013).

Também foram avaliadas as alturas de onda significativas para os períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, através da distribuição assintótica de extremos de *Gumbel*. Nesta análise só foram considerados os anos que possuísem mais de 40% de registos válidos. Foram consideradas quatro posição gráficas, obtendo valores relativamente distintos para os vários períodos de retorno. A Tabela 5 apresenta o desvio padrão (e) e o coeficiente de correlação (r) para cada posição gráfica considerada:

$$S(Xi) = \frac{i}{N} \quad (2)$$

$$S(Xi) = \frac{i}{N + 1} \quad (3)$$

$$S(Xi) = \frac{i + 0.44}{N + 0.12}, i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$S(Xi) = \frac{i - 2/5}{N + 1/5} \quad (5)$$

em que i representa o número de valores da amostra tais que $x \leq Xi$ e N o número total de valores da amostra.

Tabela 5 – Qualidade do ajuste da função de distribuição de *Gumbel* para diferentes posições gráficas (Silva et al., 2008).

	$\frac{i}{N}$	$\frac{i}{N + 1}$	$\frac{i + 0.44}{N + 0.12}$	$\frac{i - 2/5}{N + 1/5}$
e (m)	0.32	0.37	0.40	0.39
r	0.94	0.91	0.91	0.91

A Tabela 6 ilustra as alturas de onda significativas associadas aos diferentes períodos de retorno. A posição gráfica que permitiu um melhor ajuste foi a apresentada na equação (2), revelando alturas de onda mais baixas.

Tabela 6 – Alturas de onda significativas associadas aos períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos (Silva et al., 2008).

	$\frac{i}{N}$	$\frac{i}{N + 1}$	$\frac{i + 0.44}{N + 0.12}$	$\frac{i - 2/5}{N + 1/5}$
H ₁₀	8.05	9.04	8.81	8.83
H ₅₀	9.09	10.77	10.36	10.39
H ₁₀₀	9.53	11.50	11.01	11.05

Adicionalmente, os registos de 1993 – 2007 também permitem identificar a direccionalidade das ondas, de modo que o quadrante de Noroeste (NW) é o predominante. A orientação da ondulação está diretamente relacionada com a predominância das alturas de onda e dos períodos de pico. Em termos de situações de temporal e nos períodos de inverno, são registadas alturas de onda significativas e períodos

de pico mais elevados com predominância nos octantes NW e WNW. A direção da ondulação justifica o movimento norte-sul da deriva litoral na costa Oeste Portuguesa (PLN, 2016b; Silva, 2013).

3.2.3 MARÉS

A oscilação periódica do nível da água, devido aos efeitos combinados (entre outros fatores) da rotação da Terra, das forças atrativas exercidas pela Lua e pelo Sol e condicionadas pela batimetria e geomorfologia local, denomina-se de maré astronómica. As marés podem ser classificadas de acordo com a amplitude de maré como microtidais, mesotidais ou macrotidais. Os ciclos de maré oscilam entre valores extremos máximos e mínimos, designados de preia-mar e baixa-mar, respetivamente. A maior diferença entre as amplitudes das marés ocorre, quinzenalmente, com o alinhamento da Lua e do Sol, próximo das situações de Lua Nova ou Lua Cheia, e caracteriza-se por maré viva. Por oposição, a menor diferença de amplitude da maré é conhecida como maré morta.

Na costa portuguesa, as marés astronómicas são semi-diurnas, ou seja, cada ciclo de maré é constituído por duas preias-mar e duas baixas-mar. De acordo com os dados das tabelas de marés de Esposende, a maré local possui as características que se apresentam na Tabela 7. É de salientar que as alturas de água indicadas são calculadas em relação ao Zero Hidrográfico.

Tabela 7 – Características das marés para Esposende no 1º trimestre de 2020 (Marés, 2020).

PM(máx)	BM(mín)	NM	PMAV	BMAV	PMAM	BMAM
4.00 m	0.20 m	2.10 m	3.50 m	0.60 m	2.60 m	1.50 m

O projeto de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado teve como base a Tabela de Marés de 2015 relativa ao Porto de Viana do Castelo, publicada pelo Instituto Hidrográfico (Tabela 8). Além disso, foi efetuada a concordância de marés entre Esposende e o Porto de Viana do Castelo: + 0.03 m para Preia Mar de Águas Mortas (PMAM); - 0.04 m para Preia Mar de Águas Vivas (PMAV); + 0.23 m para Baixa Mar de Águas Mortas (BMAM); e, + 0.50 m para Baixa Mar de Águas Vivas (BMAV).

Tabela 8 – Características das marés para o Porto de Viana do Castelo em 2015 (PLN, 2016b).

PM(máx)	BM(mín)	NM	PMAV	BMAV	PMAM	BMAM
3.95 m	0.10 m	2.00 m	3.52 m	0.47 m	2.71 m	1.29 m

Porém, existem outros fenómenos atmosféricos que podem acentuar a variação das marés como a pressão atmosférica, o vento e a precipitação. A variação do nível do mar associada a estas causas denomina-se de maré meteorológica. A sobrelevação do nível do mar define-se como uma oscilação temporária das águas do mar como resultado de uma diminuição da pressão atmosférica ou da ação de ventos intensos e persistentes em direção à costa, podendo decorrer ao longo de horas ou dias. A ocorrência simultânea de marés vivas e sobrelevações de origem meteorológica origina níveis extremos que resultam em inundações na linha da costa, no recuo da linha da costa e em alterações na dinâmica sedimentar. Os sistemas estuarinos e lagunares são considerados zonas de elevada vulnerabilidade à subida do nível médio da água do mar. É, por isso, que no âmbito da proteção costeira se deve proceder a simulações de médio a longo prazo que tenham em consideração as variações desse nível médio da água do mar. Dias e Taborda (1988), Parry (2000), Andrade e Freitas (2002) e o Instituto Hidrográfico,

preveem até 2100 uma subida do nível do mar de, no mínimo, 10 cm, podendo em caso extremo alcançar os 60 cm (Ferreira *et al.*, 2008; PLN, 2016b).

Admitindo que a sobrelevação (S.S.) resultante de fenómenos meteorológicos em Esposende é um valor médio obtido dos valores dos autores acima mencionados, cerca de + 0.30 m, o nível máximo atingido pela água seria de: $PM(máx) + S.S. = + 4.00 + 0.30 = + 4.30 \text{ m (ZH)}$.

No projeto de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado também foi considerada uma sobrelevação referente a Cascais, de + 0.54 m, e ainda, uma subida de origem meteorológica adicional correspondente ao cenário mais pessimista desenvolvido em 2007 pelo Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (IPPC), obtendo um valor de + 0.26 m. Através dos dados da Tabela 8, obteve um valor para o nível máximo atingido pela água de: $+ 3.95 + 0.54 + 0.26 = + 4.75 \text{ m (ZH)}$.

3.2.4 CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS

A granulometria dos sedimentos do estuário do rio Cávado tem sido estudada ao longo do tempo. A realização de recolha de amostras e posterior análise em laboratório têm como objetivo estudar as características físico-químicas dos sedimentos a dragar na foz do rio Cávado. O grau de contaminação do material recolhido é avaliado segundo os critérios de qualidade elencados na Portaria n.º 1450/2007, de 12 de novembro. Esta classificação divide-se em 5 classes:

- Classe 1: Material dragado limpo – pode ser depositado no meio aquático ou reposto em locais sujeitos a erosão ou utilizado para alimentação de praias sem normas restritivas;
- Classe 2: Material dragado com vestígios de contaminação – pode ser imerso no meio aquático tendo em atenção as características do meio recetor e o uso legítimo do mesmo;
- Classe 3: Material dragado ligeiramente contaminado – pode ser utilizado para terraplenos ou no caso de imersão necessita de estudo aprofundado do local de deposição e monitorização posterior do mesmo;
- Classe 4: Material dragado contaminado – deposição em terra, em local impermeabilizado, com a recomendação de posterior cobertura de solos impermeáveis;
- Classe 5: Material muito contaminado – idealmente não deverá ser dragado e em caso imperativo, deverão os dragados ser encaminhados para tratamento prévio e/ou deposição em aterro de resíduos devidamente autorizado, sendo proibida a sua imersão.

A Tabela 9 apresenta as campanhas realizadas no estuário do rio Cávado, solicitadas pela Polis Litoral Norte ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ). As amostras recolhidas a 10 de agosto de 2011 apresentaram algum grau de contaminação, devido à presença de Mercúrio nas zonas da Barra do rio Cávado (ESPB), do Canal de Navegação (ESPC), da Doca de Recreio (ESPR) e da Doca de Pesca (ESPP). O canal de navegação foi a zona que apresentou os resultados menos satisfatórios, uma vez que apresentava vestígios de Mercúrio e de Arsénio.

A 22 de fevereiro de 2012 realizou-se a segunda campanha, tendo em conta os pontos de amostragem que apresentaram maior grau de contaminação na 1ª campanha, ou seja, na Barra do Rio Cávado e no Canal de Navegação. Esta campanha teve como objetivo aferir a origem da contaminação nos pontos que foram anteriormente detetados. A não existência de Mercúrio em todas as amostras analisadas permitiu concluir que a quantidade de metal pesado existente anteriormente neste local, foi desaparecendo, tendo surgido devido a uma ação pontual. A 12 de agosto de 2016, recolheram-se quatro amostras no canal de navegação. Os resultados obtidos permitiram demonstrar que os sedimentos do canal de navegação podem ser depositados no meio aquático, dragados em locais sujeitos a erosão ou utilizados para alimentação artificial das praias adjacentes (ISQ, 2016; ISQ, 2012; ISQ, 2011).

Tabela 9 – Recolha de sedimentos no estuário do Cávado e resultados obtidos.

	10/08/2011	22/02/2012	12/08/2016
Entidade de recolha de sedimentos	Xavisub	Xavisub	Multisub
Entidade que realiza os ensaios laboratoriais	ISQ	ISQ	ISQ
Nº de amostras	51	-	4
Localização	Barra do Cávado, Canal de Navegação, Doca de Recreio e Doca de Pesca	Barra do Rio Cávado e zona poente do Canal de Navegação	Canal de Navegação
Resultados	Barra do Cávado: Classe 2; Canal de Navegação: Classe 4; Doca de Pesca: Classe 2; Doca de Recreio: Classe 2.	Classe 1	Classe 1
Classificação textural	0.02 a 2 mm	0.02 a 2 mm	Arenoso

Na seção 3.3.3 é descrita a campanha que envolveu a realização de cerca de 16 amostras mensais entre 2009 e 2010, ao longo do estuário do rio Cávado. Neste estudo a análise granulométrica foi executada através da separação mecânica de uma coluna de seis crivos com malhas de diferentes dimensões (cascalho, > 2 mm; areia muito grossa, 1 - 2 mm; areia grossa 0,5 – 1.0 mm; areia média, 0.25 – 0.5 mm; areia fina, 0.125 – 0.250 mm; areia muito fina, 0,063 – 0.125 mm; e, silte, > 0.063 mm). Uma vez que neste estudo só foram utilizados os peneiros até aos 2 mm, considerou-se que no peneiro de 4 mm passaram todos os sedimentos (Carvalho *et al.*, 2013).

A Fig. 38 ilustra a localização geográfica dos pontos de amostragem referentes ao ano de 2009 e 2010 (a amarelo), a 10 de agosto de 2011 (a verde) e a 12 de agosto de 2016 (a azul). No estudo realizado aos sedimentos do estuário do rio Cávado, por Silva (2006), os locais de recolha de amostras foram a praia Suave-Mar e a praia de Ofir e os ensaios em laboratório basearam-se na NP EN 933-1. As curvas granulométricas nestes locais permitem determinar a dimensão dos sedimentos existentes nas praias adjacentes à foz do rio Cávado.

As amostras de sedimentos recolhidas entre 2008 e 2016 permitiram obter uma visão geral da granulometria média existente desde a ponte de Fão até à foz do rio Cávado. O diâmetro médio das partículas é determinado através do parâmetro D_{50} , que consiste no peneiro em que a percentagem de acumulados é de 50%, sendo este o diâmetro considerado para a simulação numérica. A Tabela 10 resume a dimensão média das partículas ao longo do estuário do rio Cávado.

Neste sentido, a foz do rio Cávado é essencialmente caracterizada por areia, variando entre areia média a fina. A zona a montante da doca de recreio apresenta uma maior variedade de sedimentos do tipo gravilha. O aumento da diversidade de partículas é característico do material existente a montante do estuário. Relativamente às praias adjacentes, o material de deriva litoral, proveniente da praia Suave-Mar, caracteriza-se por ser arenoso.



Fig. 38 - Localização geográfica dos pontos de amostragem (Google Earth).

Tabela 10 – Caracterização dos sedimentos na foz do rio Cávado.

Referência	Localização	D ₅₀ (mm)	Tipo de Sedimentos
Silva (2006)	Suave Mar	0.60	Areia Média
	Ofir	0.35	Areia Fina
ISQ (2016)	EA1	0.28	Areia Média
	EA2	0.35	Areia Média
	EA3	0.40	Areia Média
	EA4	0.55	Areia Média
ISQ (2011 e 2012)	ESPB	0.02-2	Areia
	ESPC	0.02-2	Areia
	ESPR	0.02-2	Areia
	ESPP	0.02-2	Areia
Carvalho (2013)	E1	> 2.00	Gravilha
	E1a	> 2.00	Gravilha
	E2	> 2.00	Gravilha
	E3	1.65	Areia Grossa
	E3a	> 2.00	Gravilha

3.3 ESTUDOS REALIZADOS

Tal como foi referido, a morfologia da restinga está associada à dinâmica marítima e fluvial, sendo que as alterações mais significativas se verificam na sua extremidade Norte. A restinga, por si só, é o resultado da evolução da alteração morfológica do litoral ao longo dos séculos. No entanto, tem-se vindo a assistir a uma translação da restinga para o interior do estuário, devido à predominância da ação marítima face à dos caudais fluviais que têm decrescido desde a construção das barragens no rio Cávado.

A estabilidade do corpo dunar é de extrema importância uma vez que este protege diretamente a cidade de Esposende. A fragilidade deste corpo dunar que sofreu vários episódios de rutura, pondo em causa a

3.3.2 MODELAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DINÂMICA SEDIMENTAR NO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO

Em 2005, a Universidade do Minho realizou um estudo que consistiu na análise das características hidrodinâmicas e do transporte sedimentar na foz do rio Cávado recorrendo a simulações numéricas com dados recolhidos desde 1991 a 2003. Para tal análise, foram utilizados os programas RMA2 e SED2D, respetivamente. Foram definidos dois modelos hidrodinâmicos: o regional, que abrangia a zona desde a embocadura do estuário até ao açude do Angelino (Fig. 40), e o local, que contemplava a embocadura do estuário propriamente dita. No caso do modelo morfodinâmico, apenas se estudou o modelo local, por forma a quantificar a concentração de sedimentos na zona mais crítica do estuário.

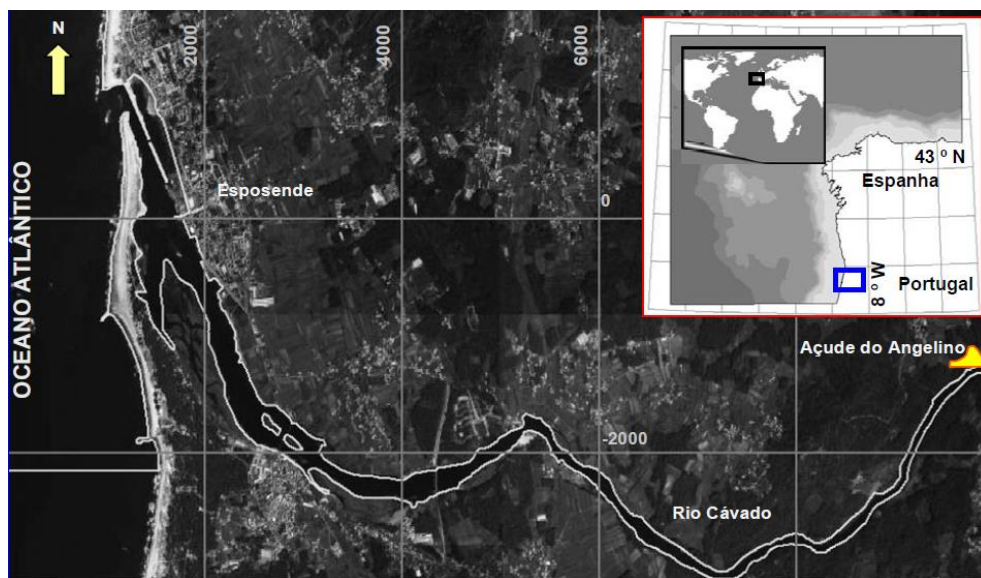


Fig. 40 - Localização da área de estudo: Foz do rio Cávado, a Oeste, e Açude do Angelino, a Este, adaptado de Pinho (2005).

Embora os caudais fluviais apresentem valores máximos anuais superiores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, os estudos realizados consideraram um caudal fluvial constante, com um valor próximo ao valor médio anual do caudal proveniente do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada. Quanto à variação do nível das marés, consideraram uma maré viva com cerca de 3.05 m e uma maré morta de 1.0 m. De salientar que no estudo realizado não foi considerada a ação da agitação marítima, fator este também fundamental na compreensão da dinâmica costeira. Com essas simulações hidrodinâmicas foi possível obter os valores apresentados da

Tabela 11, referente às velocidades máximas das correntes de enchente e de vazante, face à ocorrência das marés viva e morta. A Fig. 41 ilustra a simulação realizada no RMA2 e permite concluir que as velocidades máximas ocorrem no canal de aproximação à embocadura e nos períodos de vazante, tanto na maré viva como na maré morta.

Tabela 11 – Velocidades máximas das correntes para os dois tipos de maré analisados, obtidas através do modelo hidrodinâmico local (Pinho, 2005).

Amplitude da maré	Velocidade das Correntes (m/s)	
	Enchente	Vazante
Maré Viva	1.40	3.00
Maré Morta	0.40	1.00

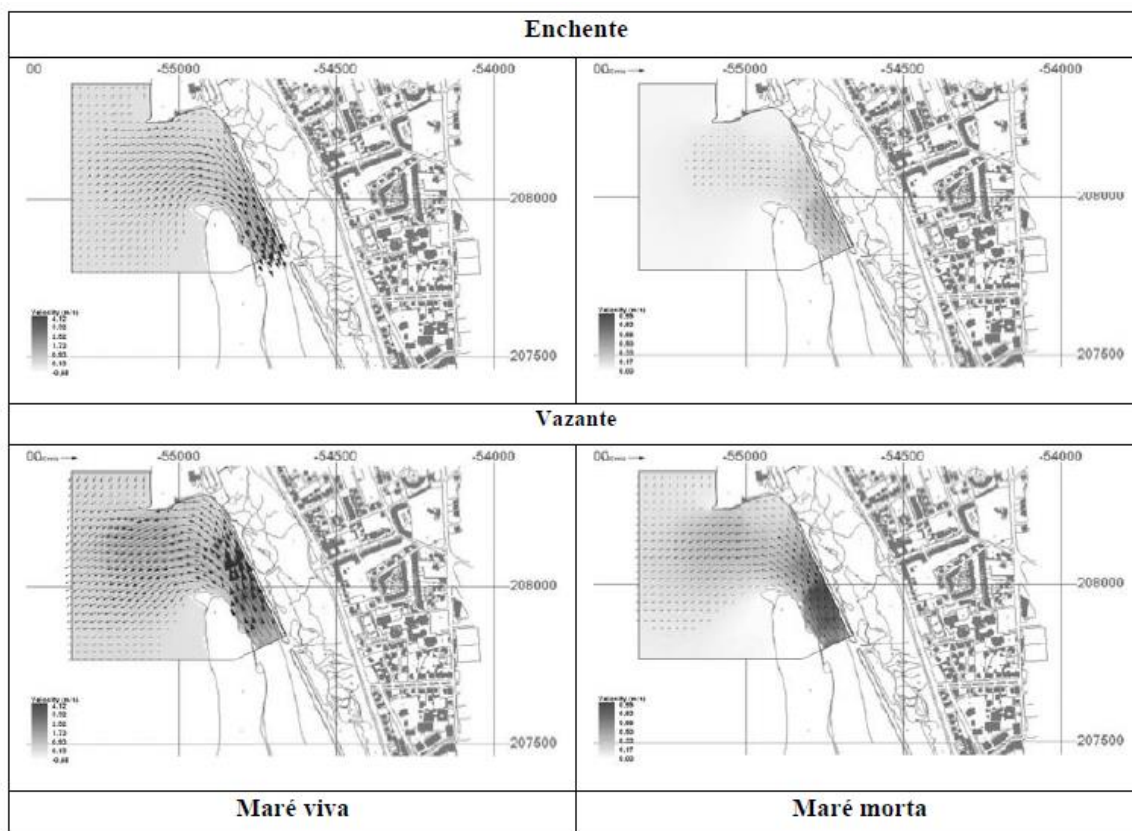


Fig. 41 - Modelo hidrodinâmico local: velocidades máximas da corrente na enchente e na vazante para os dois tipos de maré analisados (Pinho, 2005).

No estudo realizado com o modelo morfodinâmico foram analisadas as alterações das concentrações de sedimentos provocados pelos dois regimes de maré, com base em simulações de 12.5 h e 25.0 h (Fig. 42 e Fig. 43). Embora se tenha registado que os sedimentos do delta de vazante sejam do tipo areia grossa a muito grossa (média 0.85 mm) e saibro (média 40 μ m), e que estes tendem a migrar para a extremidade da restinga, nas simulações adotou-se uma granulometria constante de 2 mm para os fundos. Os resultados mais significativos verificam-se ao fim de 25 h de simulação, sendo que de uma maneira geral, durante a maré morta, tende a ocorrer deposição em todo o canal próximo à embocadura. Em contrapartida, numa maré viva, forma-se um delta de vazante e ocorre erosão tanto na zona sul da praia a norte da embocadura como no canal à direita da restinga.

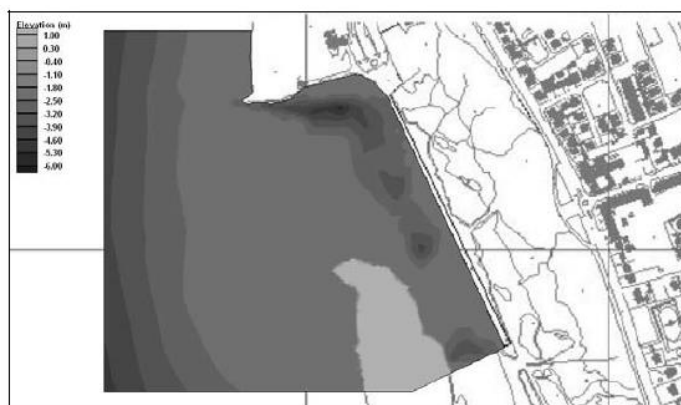


Fig. 42 - Batimetria inicial local (Pinho, 2005).

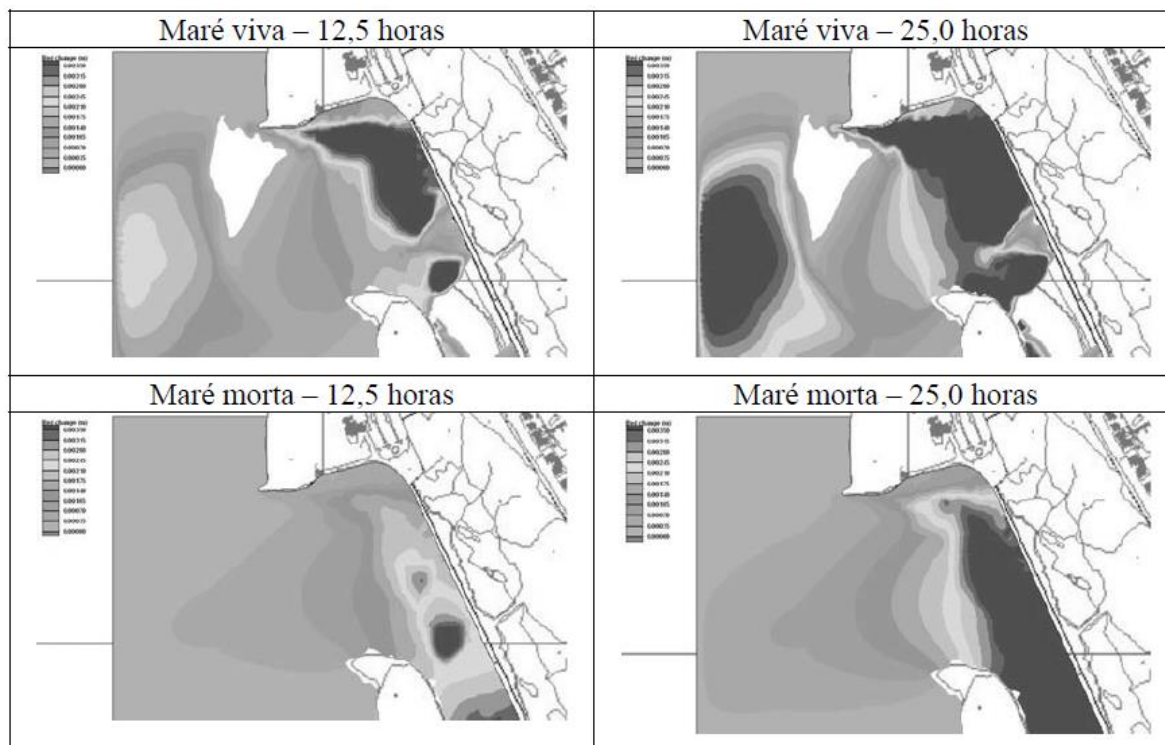


Fig. 43 - Modelo local de transporte sedimentar: deposição de sedimentos para diferentes condições de maré (Pinho, 2005).

Os estudos realizados permitiram fazer uma análise inicial dos fenómenos que motivam as alterações morfodinâmicas mais significativas na embocadura do rio Cávado ocorridas na presença de correntes de vazante nos períodos de marés vivas e nas cheias (Pinho, 2005).

3.3.3 CARACTERÍSTICAS DO ESTUÁRIO DO RIO CÁVADO

A Faculdade de Ciências da Universidade do Porto realizou em 2013 um estudo que compreendeu a recolha de 16 amostras mensais entre fevereiro de 2009 e setembro de 2010, em 5 seções ao longo do estuário (E1, E2 e E3 na margem e E1a e E3a dentro do canal), apresentadas na Fig. 44, e teve como objetivo caracterizar a distribuição espacial e sazonal da biodiversidade epibêntica com base na temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido, precipitação e tipo de sedimentos (Carvalho *et al.*, 2013).

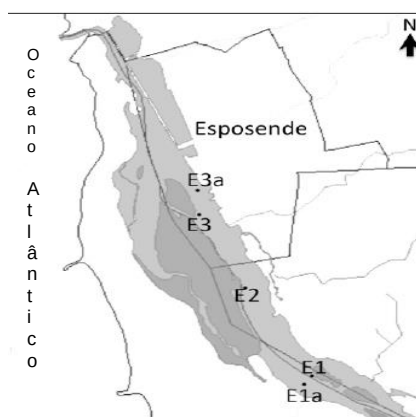


Fig. 44 - Localização das cinco estações de amostragem ao longo do estuário do rio Cávado: E1, E2 e E3 nas margens e E1a e E3a no canal, adaptado de Carvalho *et al.* (2013).

Relativamente à temperatura da água, de janeiro a julho, esta variou entre 10.0°C e 20.5°C. A temperatura média (entre 16.0°C e 20.5°C) e a salinidade da água apresentaram valores mais elevados durante os meses de Verão e valores mais baixos durante o Inverno (entre 10.0°C a 16.0°C), sendo que a salinidade possui valores superiores nas estações mais próximas da foz do rio Cávado (E2, E3 e E3a), como era de esperar.

A precipitação foi registada nos últimos sete dias antes do dia de cada amostragem, obtendo um valor máximo de precipitação em dezembro de 2009, apresentando um valor de 65 mm. Os valores mais elevados de precipitação ocorreram durante os meses de Inverno e Primavera, ou seja, os meses mais húmidos. Este facto ilustra que o sistema estuarino do Cávado se assemelha aos restantes estuários da costa portuguesa.

A análise granulométrica (ver Anexo B) revelou que as estações E1, E1a e E2 apresentam mais de 85% de gravilha, ou seja, com diâmetros iguais ou superiores a 2 mm. No caso das Estações E3 e E3a, embora apresentem na sua maioria gravilha, também são constituídas por areias e lodo, fator este comum nas seções mais próximas da embocadura de um estuário, uma vez que grande parte dos sedimentos de maior dimensão estão depositados a montante. A estação E3 é a que apresenta maior variação granulométrica (Carvalho *et al.*, 2013).

3.4 INTERVENÇÕES REALIZADAS APÓS 2015

Nesta seção serão referidas as intervenções mais significativas realizadas na foz do rio Cávado, desde 2015 até ao presente. O cronograma temporal representado na Fig. 45 sintetiza as intervenções efetuadas uma vez que algumas foram realizadas em paralelo.

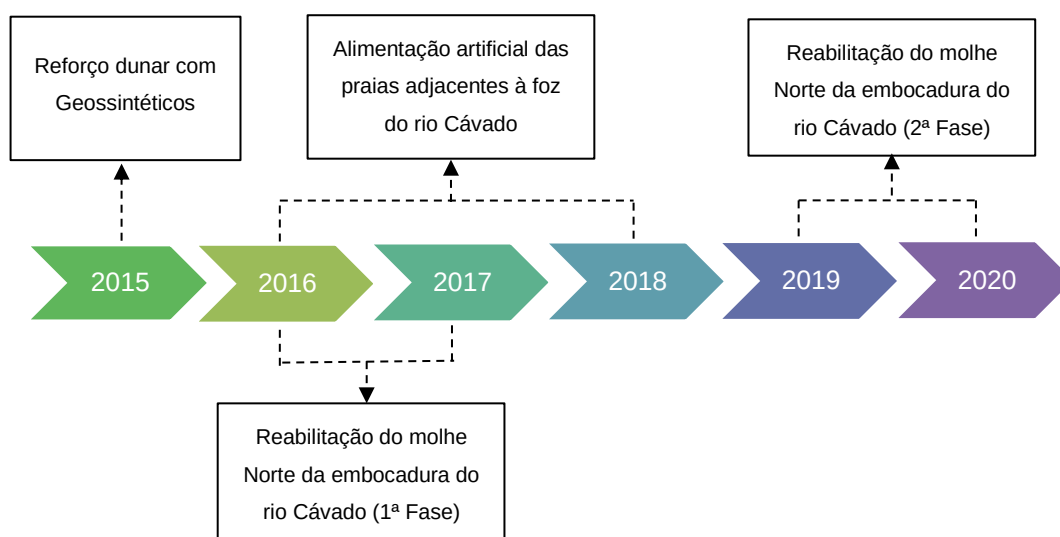


Fig. 45 - Cronograma temporal das intervenções realizadas na foz do rio Cávado.

3.4.1 COLOCAÇÃO DE GEOCILINDROS NA RESTINGA DE OFIR

Ao longo dos anos foram várias as intervenções realizadas na foz do rio Cávado com o intuito de garantir as profundidades de água necessárias para garantir a segurança da navegação. As dragagens realizadas nas últimas décadas apresentam uma certa periodicidade. Destacam-se as dragagens de 1994, 2001 e 2006, da responsabilidade do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (MAOT). De

maneira a compreender a grandeza dos trabalhos realizados, nomeadamente do volume de sedimentos dragados e os custos, apresentam-se na Tabela 12 os volumes correspondentes às dragagens referidas.

Tabela 12 – Dragagens efetuadas na foz do rio Cávado (Gomes *et al.*, 2011).

Ano	Volume dragado	Custo sem IVA	Custo unitário
1994	105 000 m ³	59 990 €	0.57 €/m ³
2001	15 000 m ³	19 550 €	1.30 €/m ³
2006	112 000 m ³	660 000€	5.89 €/m ³

Tendo em conta a crescente erosão das dunas, proteções naturais contra os galgamentos oceânicos e, por forma a minimizar o número de intervenções de dragagem na barra do rio Cávado a curto prazo, houve a necessidade de implementar sistemas de reforço na restinga com um período de vida útil superior, mais robustos e resistentes, que não criassem impactes negativos do ponto de vista ambiental e paisagístico. Neste sentido, em 2015 foi realizada uma intervenção que pretendia reforçar o cordão dunar na extremidade Norte da restinga, tanto do lado do mar como do lado do rio. A solução teve por base a aplicação de cilindros fabricados com material geossintético e preenchidos com areia (Gomes *et al.*, 2011; Palma, 2016; PLN, 2016a).

Os cilindros geossintéticos são sistemas fechados que são preenchidos por material granular, material este na maioria das vezes retirado das zonas mais próximas do local a depositar de maneira a que as características dos sedimentos sejam o mais semelhante possível. No caso de Esposende, o material introduzido nos cilindros provinha do material dragado no canal de navegação da embocadura do rio Cávado.

Para o dimensionamento da solução de proteção com geocilindros foram adotadas as seguintes características: uma altura de onda significativa entre 8.5 m e 9.5 m, um período de pico entre 12 s e 14 s e, um nível máximo de maré de 4.34 m. Com base nos critérios de dimensionamento desta solução, o diâmetro adotado neste projeto para os geocilindros foi de 5 m.

A configuração dos geocilindros (Fig. 46 e Fig. 47) adotada consistiu na colocação de duas fiadas até à cota + 6.40 m (ZH) no talude do lado do rio e, três fiadas de geocilindros até à cota + 9.10 m (ZH) no talude do lado do mar. Esta configuração tinha como objetivo garantir uma cota de coroamento próxima da obtida aquando da alimentação artificial realizada em 2006, sendo aproximadamente + 8.00 m (ZH). Adicionalmente, definiu-se uma seção mínima entre os dois taludes de 50 m.

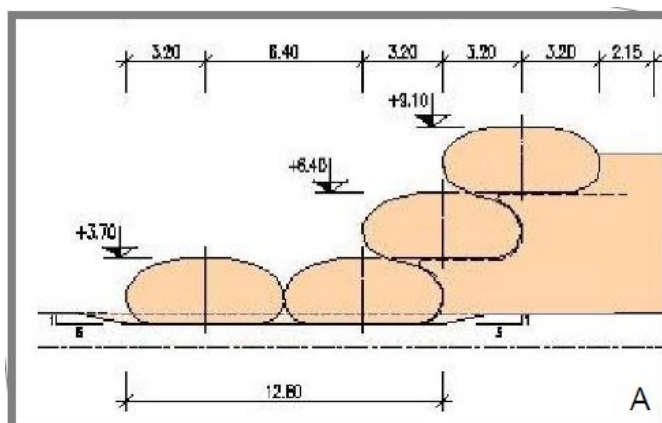


Fig. 46 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do mar, A (Palma, 2016).

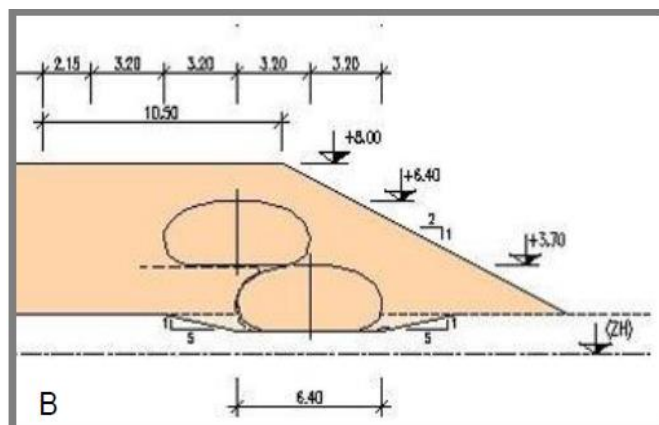


Fig. 47 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do rio, B (Palma, 2016).

A superfície onde são implementados os geocilindros estava nivelada e livre de qualquer obstrução. Além disso, os geocilindros da fiada inferior apresentam uma proteção de pé de talude em tela de geotêxtil. Para finalizar a intervenção, foi construída uma duna artificial através da deposição de uma camada de areia sobre os geocilindros, na qual na maioria das vezes é reincorporada vegetação dunar de maneira a garantir a máxima integração natural e paisagística com o ambiente envolvente. Para compreender a grandeza dos trabalhos realizados, a Tabela 13 resume o volume de sedimentos movimentados e colocados na zona de intervenção (Palma, 2016).

Tabela 13 – Volume de sedimentos utilizado no reforço dunar da restinga de Ofir.

Destino	Sedimentos (m ³)
Enchimento dos geocilindros	35 546
Construção da duna artificial	114 245

É importante referir que este tipo de intervenção exige um grande esforço mecânico e humano. Uma vez que os geocilindros são implantados nas zonas de espraçamento, por vezes as ações marítimas e fluviais, quando intensas, vão incidir no que já foi construído, levando por vezes à destruição da barreira protetora artificialmente contruída. Assim, durante a implantação dos geocilindros, através das vistorias efetuadas ao longo da fase de execução, foram reportadas várias seções de geocilindros que já apresentavam algumas deficiências, tais como ruturas e deslocamentos. De salientar que os geocilindros mais afetados foram os do lado do mar. No início de 2016, foram registadas mais deficiências nos geocilindros colocados no ano anterior. A Fig. 48 apresenta alguns exemplos de problemas: a) estreitamento da largura da restinga devido a possíveis galgamentos e erosões tanto do lado do mar como do lado do rio; b) ruturas de geocilindros por vandalismo ou por objetos cortantes provenientes da ação marítima, principalmente na fiada de base do lado do rio; c) migração de areias no interior dos geocilindros do lado do mar, por ação da agitação marítima que alcança a restinga (Palma, 2016).

Em função destes fatores, na Fig. 48 verifica-se que a solução implementada poderá não ter sido a mais eficaz para resolver os problemas associados à estabilidade da restinga. Este sistema estuarino está sujeito a regimes hidrodinâmicos de elevada energia. Além disso, a imposição de manter a cota de coroamento da restinga de modo a não agravar os impactes paisagísticos, torna inevitável os galgamentos cíclicos que este sistema tem sofrido nos invernos que são cada vez mais intensos.



Fig. 48 - Estado do fim da obra e exemplos de problemas encontrados nos geocilindros face aos fenómenos marítimo e fluvial, no início de 2016: a) aspeto da restinga no final da obra de reforço; b) rutura de um geocilindro no lado do rio da restinga; c) migrações de areia no interior do geocilindro, Palma (2016).

3.4.2 REABILITAÇÃO DO MOLHE NORTE DA EMBOCADURA DO RIO CÁVADO – 1ª FASE

Entre 2016-2017, após a intervenção de reforço da restinga de Ofir, procedeu-se à “Reabilitação do Molhe Norte da Embocadura do Rio Cávado – 1ª Fase”, especificamente do troço final do molhe Norte na embocadura do rio Cávado, numa extensão de 100 m.

O molhe Norte da embocadura do Cávado caracteriza-se por possuir dois troços de estrutura distinta: o seu enraizamento é constituído por uma estrutura vertical de alvenaria de pedra e betão, com cerca de 95 m de comprimento; e, dá continuidade, em direção ao oceano, a uma estrutura em talude de enrocamento, com aproximadamente 100 m de comprimento (Fig. 49).



Fig. 49 - Molhe Norte da embocadura do rio Cávado, estado atual.

O quebramar Norte da foz do rio Cávado permite abrigar as embarcações na entrada e saída da embocadura e minimizar a energia da agitação marítima que se propaga para o interior do estuário em particular, para orientações de NW. O que é certo é que sendo esta estrutura um obstáculo direto à ação do mar, ao longo dos tempos foi apresentando sinais de degradação (Fig. 50).

Neste sentido, foi recentemente efetuada uma intervenção de reabilitação no molhe, por forma a aumentar a sua resistência, mantendo as funções que esta obra costeira desempenha. Essas funções consistem em conter as areias provenientes das correntes de deriva litoral a norte, garantindo o aumento do volume na praia Suave Mar, minimizar o impacto da agitação marítima, por forma a salvaguardar a foz dos períodos de forte ondulação, bem como a entrada e saída de embarcações, e, o guiamento das correntes estuarinas (PLN, 2020; PLN, 2016b).



Fig. 50 - Fotografias do molhe Norte da embocadura do rio Cávado evidenciando o estado de degradação da estrutura de enrocamento: a) falhas na estrutura (vista Norte), b) destruição na seção da cabeça (vista Norte), (PLN, 2016b).

A intervenção executada consistiu no reperfilamento da estrutura existente e no reforço do manto e do sub-manto, sem alterar a diretriz do traçado em planta, o seu comprimento, de aproximadamente 100 m, ou o tipo de estrutura. A Tabela 14 resume as características dos perfis tipo do troço atualmente reabilitado. A Fig. 51 apresenta a planta geral da obra de reabilitação e a Fig. 52 ilustra o estado atual dos taludes de enrocamento.

Tabela 14 – Características dos perfis tipo da intervenção de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado (PLN, 2016b).

	Perfil tipo do tronco	Perfil tipo da cabeça
Cota de coroamento	+6.75 m (ZH)	+6.75 m (ZH)
Inclinação dos taludes	3(H):2(V)	2.5(H):1(V)
Manto de proteção exterior	2 camadas de enrocamento de 10-12 t, com a espessura de 3.20 m, assente num sub-manto de enrocamento de 1-2 t, constituído também por 2 camadas, com a espessura de 1.70 m.	2 camadas de enrocamento de 10-12 t, com a espessura de 3.20 m, assente num sub-manto de enrocamento de 1-2 t, constituído também por 2 camadas, com a espessura de 1.70 m.
Perfil do lado Norte	Desenvolve-se de forma variável, descendo até à cota +2.00 m (ZH), prolongando-se por uma banquetta com 5.25 m de largura.	Desenvolve-se até à cota -3.00 m (ZH), prolongando-se por uma banquetta com 15.10 m de largura.
Perfil do lado Sul	Desenvolve-se até à cota -3.00 m (ZH) prolongando-se por uma banquetta com 15.10 m de largura.	Desenvolve-se até à cota -3.00 m (ZH), prolongando-se por uma banquetta com 15.10 m de largura.

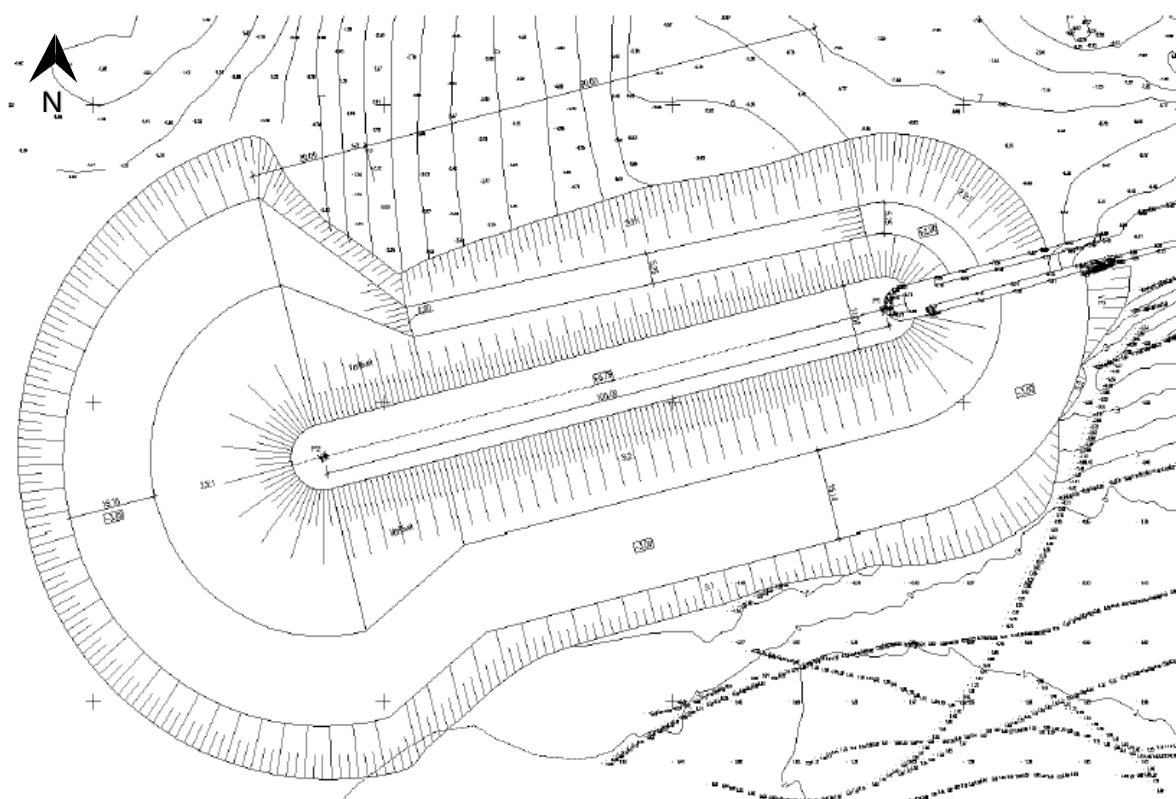


Fig. 51 - Planta geral do projeto de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado (PLN, 2016b).

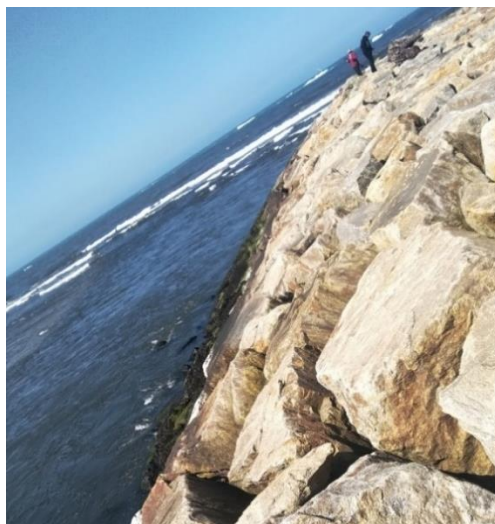


Fig. 52 - Talude de enrocamento do quebramar Norte, maio de 2020.

A fase de execução da obra de reabilitação integrou as seguintes tarefas: o enrocamento, proveniente da remoção, foi previamente selecionado para posterior reutilização no reperfilamento dos mantos. O enrocamento não reutilizado foi transportado para um local adequado de vazadouro. A areia dragada foi depositada na praia Suave-Mar, localizada imediatamente a Norte do molhe, de modo a manter o perfil da praia semelhante ao existente. A Fig. 53 ilustra as obras de reabilitação do Molhe Norte, à esquerda, e o talude de enrocamento reabilitado, à direita (PLN, 2016b).



a)



b)

Fig. 53 - Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado: a) fase de execução da intervenção no molhe Norte; b) molhe Norte após execução da intervenção e farolim (PLN, 2020).

3.4.3 ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DAS PRAIAS ADJACENTES À FOZ DO CÁVADO

De 2015 a 2018 foram executadas várias intervenções significativas de alimentação artificial das praias adjacentes à foz do Cávado – a praia de Suave Mar e a da restinga de Ofir. Estas tinham como objetivo principal proteger a zona costeira dos avanços do mar, e evitar o desaparecimento e/ou rutura da restinga, devido aos galgamentos oceânicos. As areias a utilizar na alimentação artificial das praias eram provenientes das dragagens realizadas no troço final do canal de navegação do rio Cávado (Fig. 54). Os trabalhos de dragagem abrangeram um troço de cerca de 530 m de comprimento e com uma largura variável entre 30 e 40 m, sendo a dragagem efetuada até à cota – 2.50 m (ZH) na entrada da barra, em

cerca de 240 m, e até à cota - 2.0 m (ZH), no restante comprimento. As cotas a garantir nas zonas de alimentação artificial obtiveram variações entre + 3.0 m (ZH) e + 7.0 m (ZH) na praia Suave Mar e entre + 1.0 m (ZH) e + 3.5 m (ZH) na praia da restinga.

A alimentação artificial na praia Suave Mar foi realizada com a colocação de areias em alinhamentos próximos das arribas ou do pé das dunas. No caso da praia da restinga, a areia ficou encostada aos geocilindros de proteção da arriba existente (PLN, 2016a).



Fig. 54 - Origem dos sedimentos dragados na embocadura do rio Cávado e alimentação artificial da praia de Suave-Mar e da restinga de Ofir adaptado de (Polis, 2016).

3.4.4 REABILITAÇÃO DO MOLHE NORTE DA EMBOCADURA DO RIO CÁVADO – 2ª FASE

Atualmente, já se encontra finalizada a segunda fase do projeto “Reabilitação do Molhe Norte da Embocadura do Rio Cávado”. A obra, observada na Fig. 55, consistiu na reabilitação do dique, a Este da embocadura, que garante a proteção da marginal de Esposende e que, face aos temporais ocorridos, tem levado à sua degradação. Os danos visíveis na estrutura tais como a destruição do prisma de enrocamento e consequente abaixamento da cota de coroamento, demonstraram a facilidade de galgamento sobre a mesma durante a ocorrência de forte agitação marítima.

Nos últimos anos, com a ocorrência de eventos meteorológicos extremos, embora o dique seja uma barreira costeira – mas não suficiente – registaram-se alguns casos de inundações costeiras. Salienta-se que o grau de degradação no dique é tanto maior quanto mais próximo o trecho se encontra da embocadura.

As fases da intervenção incluíram: a reconstrução e reforço do dique, nomeadamente o prisma de enrocamento, através do reperfilamento e reforço dos taludes, com inclinação 3(H):2(V) ao longo do trecho e uma inclinação mais suave de 2(H):1(V) nas cabeças; e, a colocação de um manto de enrocamento por forma a garantir a configuração inicial da obra, mantendo a cota de coroamento da estrutura de + 5 m (ZH) (PLN, 2016b).

A Fig. 56 ilustra o estado atual dos dois troços do Dique. O troço da esquerda, após a reabilitação mencionada, e o da direita, que permanece num estado de degradação significativo.

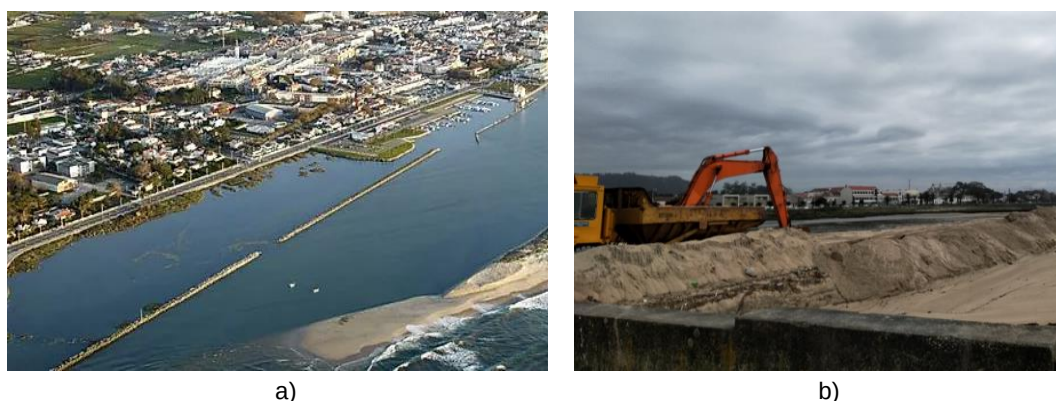


Fig. 55 - Intervenção no dique da foz do rio Cávado: a) resultado do galgamento devido às marés e inundações associadas a períodos de agitação marítima intensa na seção entre o dique e o muro da marginal de Esposende; b) obras de intervenção no dique (PLN, 2020).



Fig. 56 - Estado atual dos troços do Dique.

3.5 NOVAS SOLUÇÕES PARA PROTEÇÃO DA RESTINGA

A foz do rio Cávado e a cidade de Esposende estão atualmente protegidas por estruturas concebidas e construídas pelo Homem, tais como o quebramar Norte e o dique. Adicionalmente, a existência de um sistema dunar natural, como a Restinga de Esposende, reforça a proteção da cidade de Esposende da ação direta das ondas. O estado deste sistema dunar é muito influenciado pelas variações das marés, da agitação marítima (intensificando-se em períodos de tempestade) e pelos caudais fluviais. Estes fenómenos levam à erosão da restinga, nomeadamente na extremidade Norte, ao transporte de sedimentos para o canal de navegação, no interior do estuário, e, por vezes, à rutura do sistema dunar. Face ao histórico referido na seção 2.7, a restinga, sendo um elemento natural móvel, tem vindo a apresentar volumetrias variáveis ao longo do tempo.

Uma vez que a presente dissertação tem como objetivo propor novas soluções para a restinga de Ofir, a fim de lhe proporcionar maior resiliência e de alcançar uma volumetria satisfatória e estável no tempo, fez-se uma análise do problema com base nos projetos anteriores e em fotografias aéreas. Essa análise integrou os projetos de 1884 e 1908 de Neiva (2012), as fotografias aéreas de 2002, 2010 e 2019 com recurso ao *Google Earth*, e finalmente, a batimetria de 2020 da carta náutica da Navionics. A Fig. 57

representa a linha da costa desde o quebramar Norte até à doca de pesca, a morfologia da restinga em preia mar (à esquerda), em baixa mar (ao centro) e o conjunto das anteriores (à direita).

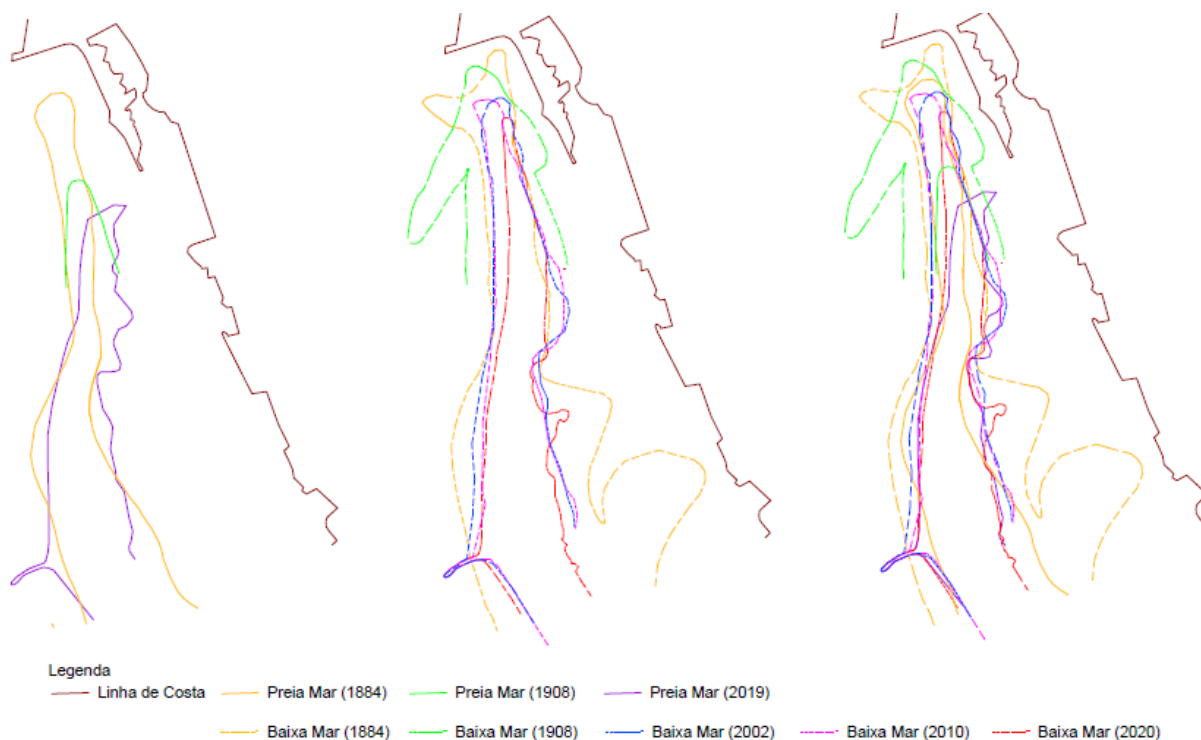


Fig. 57 - Evolução morfológica da Restinga de Ofir.

Com base na Fig. 57, e de um modo geral, é possível observar que ao longo do tempo a restinga tem vindo a perder volumetria. Além disso, este corpo dunar apresenta consideráveis variações morfológicas diárias, entre marés. Estas alterações conduzem frequentemente a problemas, nomeadamente, nos períodos de baixa-mar, uma vez que a entrada para a foz do rio Cávado é estreita e o canal de navegação apresenta profundidades que não garantem o calado mínimo para a circulação de embarcações. Já nos períodos de preia-mar, a extremidade da restinga é galgada pela subida do nível médio da água do mar e pela ação direta da agitação marítima, expondo a frente urbana da cidade de Esposende.

Sendo a restinga uma proteção costeira natural, histórica e emblemática para os habitantes da cidade, não é fácil e linear as entidades públicas aceitarem projetos de intervenção que integrem soluções mais rígidas.

Neste contexto, como já foi referido na seção 3.4.1, em 2015 surgiu a solução de colocar os cilindros geossintéticos. Esta solução surgiu porque se entendia que era uma solução ambientalmente mais sustentável, mais escondida e integrada no perfil da restinga e que proporcionaria, em simultâneo, uma maior resistência à restinga. Ainda assim, este tipo de soluções acarreta inconvenientes. Numa fase inicial, enquanto os cilindros permaneceram recobertos por uma camada de areia, cumpriram a sua funcionalidade, garantindo a resistência e o reperfilamento da restinga.

Em contrapartida, estes elementos são obstáculos diretos às ondas incidentes o que leva, ao fim de algum tempo, a ficarem expostos. A exposição constante origina deformações nos geocilindros ou até mesmo a sua destruição. No caso de Esposende, esta solução não teve o resultado pretendido, na medida em que, atualmente, desapareceram quase todos os geocilindros. Tendencialmente, as soluções mais

sustentáveis são também soluções de baixo custo e com menor impacto visual que permitem melhorar a proteção contra a erosão e controlar o arrastamento de sedimentos. No entanto, por vezes, estas estruturas não são suficientemente robustas para resistir às ações a que estão expostas.

Após analisar detalhadamente o caso de estudo, a restinga de Ofir, e ter conhecimento de outros casos semelhantes de embocaduras, serão apresentadas e justificadas algumas das possíveis intervenções que se poderiam implementar na zona. Na presente dissertação, as soluções propostas tiveram como base estruturas rígidas, nomeadamente quebra-mares destacados, quebra-mares curvilíneos e estruturas longitudinais. Apesar de a curto prazo serem estruturas potencialmente mais caras e com maior impacto visual, a sua elevada rigidez é uma característica importante quando comparada com estruturas mais simples, como a aplicação de geocilindros. Face ao enquadramento, a solução base a propor consiste num conjunto de quatro sub-estruturas que permitam obter resultados não só na restinga de Ofir, como também na entrada da foz do rio Cávado e ao longo do canal de navegação. Por forma a justificar uma possível proposta de intervenção, teve-se em conta os aspetos a seguir referidos.

1. A mobilidade dos sedimentos na zona origina grandes quantidades de sedimentos depositados ao longo do canal de navegação, sedimentos estes que tendem a ser retirados com intervenções de dragagem. Estas intervenções podem ser diminuídas ao ponto de não terem de ser executadas com a regularidade que hoje são (quase anualmente). Assim sendo, por forma a minorar esse efeito, propôs-se uma estrutura a sotamar da restinga que permite fixar o canal de navegação e que evita parcialmente o transporte de areias para o interior do canal. Essa estrutura longitudinal possui um alinhamento com uma orientação de NNW-SSE e uma cota máxima inicial de + 4.0 m (ZH). A cota de coroamento adotada permitirá que nos períodos de preia mar esteja praticamente submersa e que seja galgável nos períodos de cheias. Além disso, também se adotou uma ligeira curvatura, na extremidade de montante, com orientação para Sul de modo a que as correntes de sentido estuário-oceano sofram uma inflexão, protegendo a zona da cabeça da estrutura.
2. Relativamente ao quebramar Norte existente, esta estrutura possui uma orientação quase perpendicular à linha da costa. A orientação da agitação marítima predominante de Noroeste e Oeste-Noroeste que alcança a entrada do estuário possui ainda muita energia. Neste sentido, com o objetivo de proteger a entrada da embocadura, diminuindo a ação direta das ondas e transformando-as em ondas difratadas e com menor energia e amplitude, propôs-se um prolongamento do quebramar Norte com as características do projeto de reabilitação do molhe Norte, mas com uma ligeira curvatura para Sul. É de salientar que a implementação de uma estrutura deste tipo também permite facilitar o transporte de sedimentos de deriva litoral na medida em que estes vão contornando a estrutura e vão sendo encaminhados para Sul.
3. No caso da restinga propriamente dita, é necessário intervir na frente deste corpo dunar com o intuito de a proteger face à ação direta do mar e consequentemente recuperar ao longo dos tempos a volumetria do sistema, tornando-a mais próxima da morfologia que apresentou em tempos anteriores (ver Fig. 57). Para cumprir com estes objetivos, a solução a propor consiste numa estrutura destacada, ou eventualmente duas com alinhamento consecutivo e orientadas para sul, separadas entre si, com uma cota máxima de + 6.0 m (ZH), galgável. O quebramar destacado a Norte terá uma geometria que permite fazer a ligação à extremidade Norte da estrutura longitudinal. Entre os dois quebra-mares destacados também é possível implementar uma ligação entre ambos, com uma cota inferior, de modo a estar permanentemente submerso. No entanto, a sua existência serviria como obstáculo para uma pré-rebentação das ondas incidentes. Esta solução promoverá a retenção de areias no lado Este dos quebra-mares destacados. É de realçar que a proposta apresentada também integra a continuidade das operações de manutenção da restinga através do reforço, quer por alimentação artificial, proveniente das dragagens do canal de navegação, quer por recolocação de geocilindros.

Com base na descrição anterior, a Fig. 58 apresenta o esquema que pretende facilitar a visualização espacial da localização aproximada e das possíveis geometrias das propostas sugeridas. Através da Fig. 58 é possível observar duas ligações possíveis entre a estrutura longitudinal e o quebramar destacado 1, representado a 1. A imagem da direita teve como base o quebramar destacado existente na foz do rio Douro (ver seção 2.5.2).

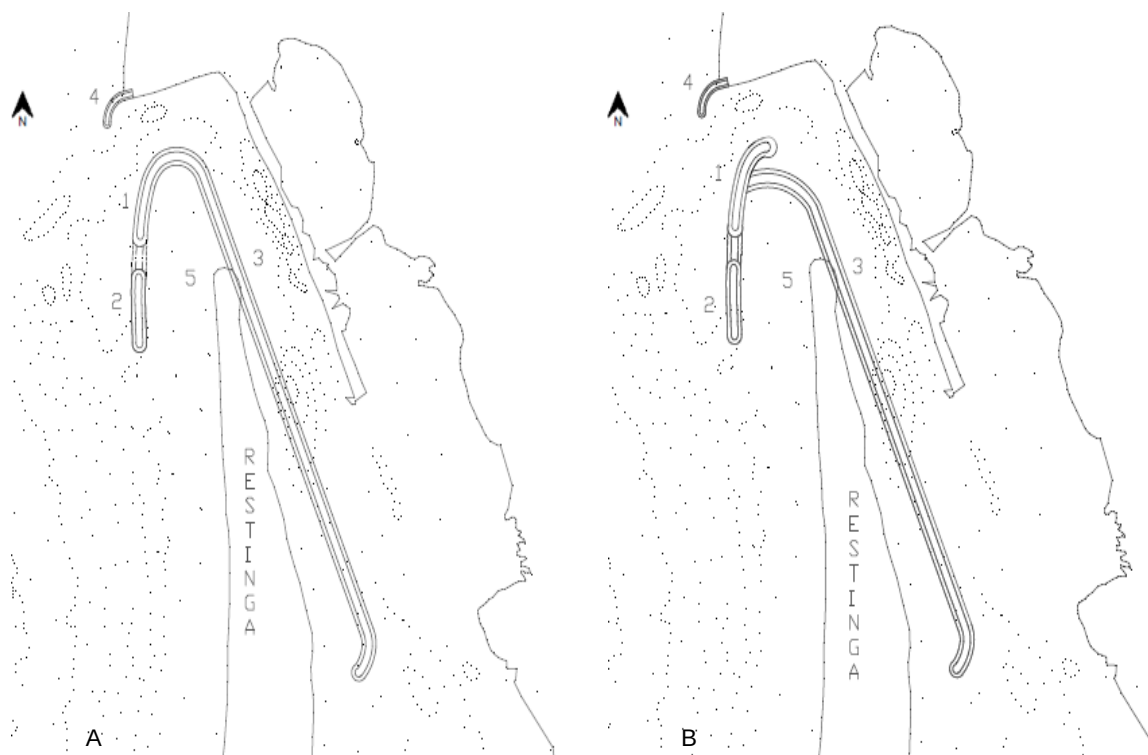


Fig. 58 - Proposta integral da intervenção na foz do Cávado: A – alternativa 1; B – alternativa 2. 1 – quebramar destacado 1; 2 – quebramar destacado 2; 3 – estrutura longitudinal; 4 – aumento do quebramar Norte; 5 – alimentação artificial.

A localização adotada das respetivas estruturas teve por base a batimetria da carta náutica de 2020. Os quebramares destacados encontram-se a uma cota entre os 0 e + 2 m (ZH) e a estrutura longitudinal a uma cota de 0 m. As distâncias entre o quebramar Norte e as restantes estruturas são de aproximadamente 80 m, podendo ser superior, por forma a facilitar as manobras das embarcações na entrada e saída da embocadura. A ligação entre os quebramares destacados (representado a tracejado na Fig. 58) a uma cota mais baixa que os restantes também é uma possibilidade a considerar, podendo estar a uma distância diferente da apresentada, que é de cerca de 30 m.

A Fig. 59 representa o pré-dimensionamento dos perfis tipo dos quebramares destacados e da estrutura longitudinal obtidos com base nos perfis tipo do projeto de “Reabilitação do Molhe Norte da Embocadura do Rio Cávado – 2ª Fase”.

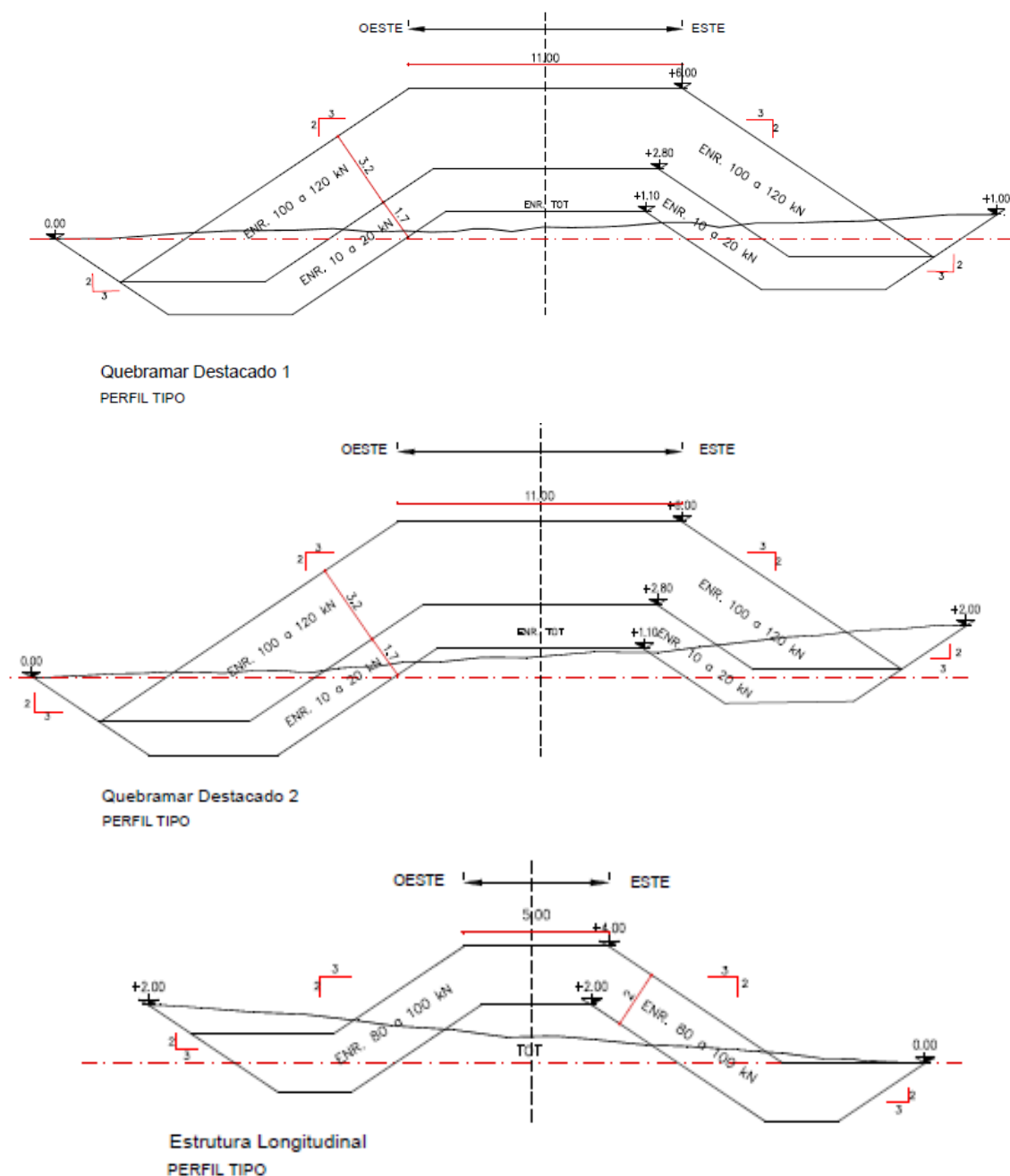


Fig. 59 - Perfis tipo das estruturas propostas.

Em resumo, as propostas apresentam soluções que, pelo menos do ponto de vista teórico, poderiam ter sucesso para a zona em estudo. É certo que para concretizar um projeto desta dimensão seria necessário dividir as propostas referidas em várias fases de intervenção como por exemplo: numa primeira fase, a construção da estrutura longitudinal; numa segunda fase, o quebramar destacado 1; de seguida, a construção de um ou mais quebramares destacados consecutivos ao que já tivera sido construído, e, por último, a ampliação do quebramar Norte. Para que um projeto deste tipo seja proposto às entidades públicas é necessário realizar vários estudos com combinações de estruturas distintas, com geometrias e materiais diferentes e testadas para uma ampla gama de condições hidrodinâmicas. No âmbito da presente dissertação, para as simulações numéricas, serão consideradas e testadas as seguintes estruturas: os quebramares destacados 1 e 2 e o dique. As geometrias das estruturas e as cotas de

coroamento consideradas estão apresentadas na Fig. 60. Estas estruturas servirão de obstáculo direto à ação das ondas, promovendo a diminuição da sua energia em direção à restinga e também a retenção dos sedimentos na restinga provenientes do Norte, aumentando a sua volumetria. A Fig. 61 e a Fig. 62 representam a seção transversal A-A' apresentada na Fig. 60, por forma a compreender como são inseridas as estruturas propostas na topografia da zona existente.

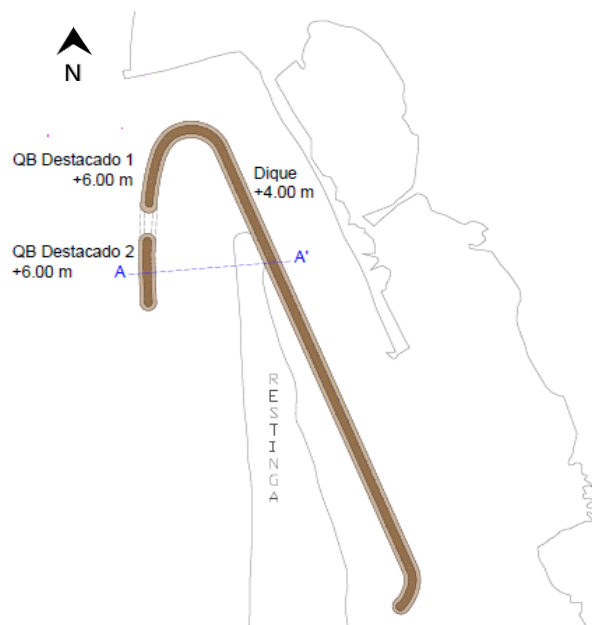


Fig. 60 - Propostas de intervenção a simular no modelo numérico.

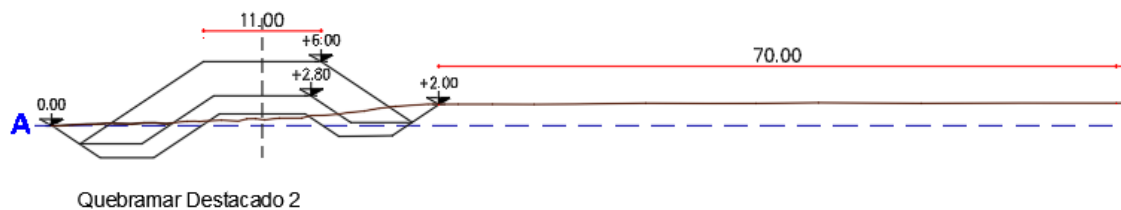


Fig. 61 - Perfil transversal: lado do mar da restinga.

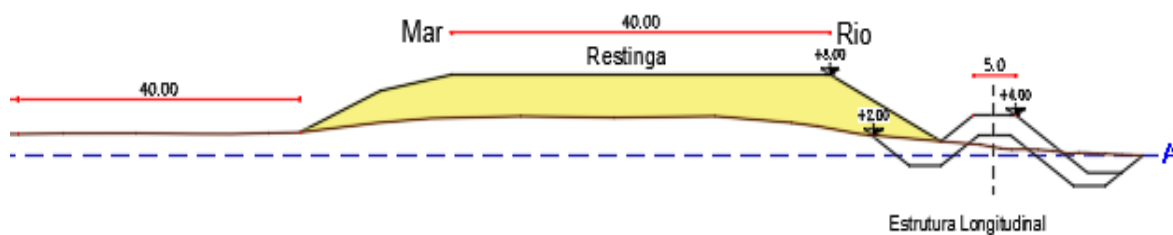


Fig. 62 - Perfil transversal: lado do rio da restinga.

4

MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1 MODELO NUMÉRICO DELFT3D

O Delft3D é um modelo numérico que foi desenvolvido pela Deltares, Holanda. Este *software* tem a capacidade de simular a maioria dos processos físicos que ocorrem em zonas costeiras, fluviais e estuarinas, tais como as variações morfológicas, a propagação das ondas, das correntes de marés e dos ventos, os caudais e o transporte de sedimentos. O presente modelo apresenta vários módulos sendo que os principais são: o módulo FLOW, que simula o comportamento hidrodinâmico que resulta da ação das correntes de maré e do escoamento fluvial; o módulo WAVE, que simula a propagação das ondas; e o Módulo MORPHOLOGY, que simula o transporte sedimentar. Cada módulo pode ser executado independentemente ou em combinação com outros módulos por forma a produzir simulações mais precisas e realistas. A transmissão da informação pelos diversos módulos é efetuada automaticamente através do ficheiro que permite essa comunicação, ou seja, cada módulo escreve os resultados exigidos por outro módulo neste ficheiro de comunicação e lê a partir do ficheiro a informação exigida por outros módulos.

Para os cenários propostos e apresentados na seção 3.5, foi necessário recorrer aos diferentes módulos acima referidos. A Fig. 63 apresenta num esquema simplificado a metodologia aplicada na análise de cada cenário selecionado. De modo a compreender mais detalhadamente a configuração do *software* utilizado, os conceitos que são apresentados nas seções seguintes foram elaborados com base nos manuais do utilizador FLOW, WAVE e MORPHOLOGY do Delft3D.

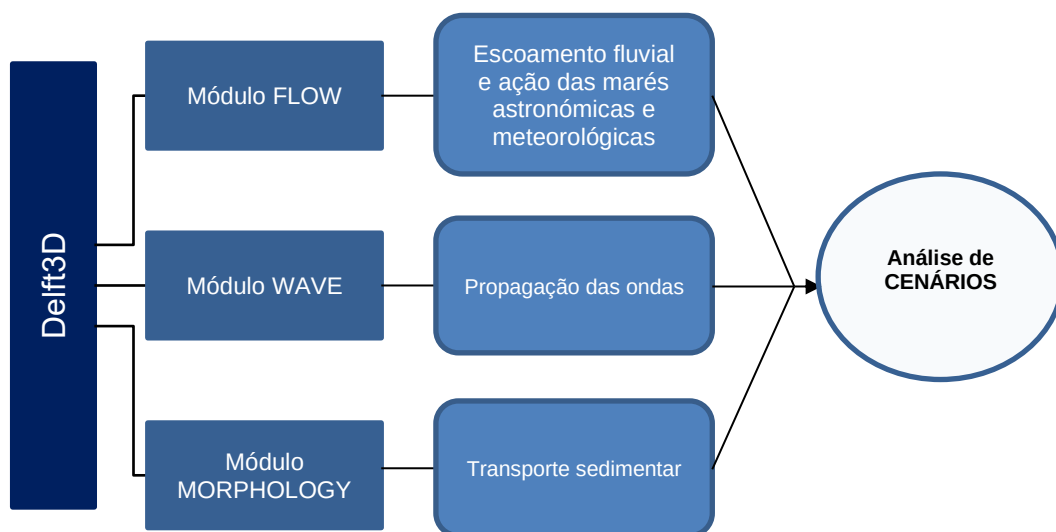


Fig. 63 - Esquema da metodologia aplicada para análise dos cenários selecionados.

4.2 DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS MÓDULOS DO DELFT3D

4.2.1 MÓDULO DELFT3D-FLOW

O Delft3D-FLOW pode ser aplicado numa vasta gama de situações, como por exemplo simulações de escoamento em estuários (Ramos *et al.*, 2014), rios (Parsapour-moghaddam *et al.*, 2018), lagos e albufeiras; simulações de descargas fluviais em baías (Wulp *et al.*, 2016), simulações em reservatórios (Bermúdez *et al.*, 2018), simulações de escoamento em períodos de tempestade provocados pela ação da maré e do vento (Cañizares *et al.*, 2008), simulações dos efeitos da densidade relacionados com a intrusão salina e os gradientes de temperatura, simulações das forças de arrastamento criadas por estruturas verticais.

O módulo Delft3D-FLOW permite a simulação multidimensional (2D e 3D) que tem por base as equações de Navier Stokes para um fluido incompressível em águas pouco profundas, de acordo com as hipóteses de Boussinesq para a pressão hidrostática, utilizando o método das diferenças finitas. Para este estudo, que se caracteriza por uma zona com baixas profundidades, o módulo foi executado num modelo bidimensional de profundidade média (2DH) de modo a reduzir o tempo de computação. Com este modelo pretende-se simular a hidrodinâmica através dos efeitos das marés, descargas fluviais, ação do vento, das ondas, gradientes de densidade e de temperatura. Para uma compreensão deste *software*, nas referências incluiu-se o manual do utilizador do Delft3D-FLOW (Deltares, 2014a).

De seguida, e adotando o sistema de coordenadas cartesiano, apresenta-se a equação que exprime a conservação da quantidade de momento vertical, simplificada para a pressão hidrostática, p , na hipótese de águas pouco profundas,

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (6)$$

em que ρ representa a massa volúmica da água do mar, z a direção vertical e g a aceleração da gravidade.

As equações de conservação da quantidade de movimento em direções horizontais podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_w} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w(d + \zeta)} + \nu_H \bar{v}^2 u \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_w} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w(d + \zeta)} + \nu_H \bar{v}^2 v \quad (8)$$

em que u e v representam as componentes de velocidade Euleriana nas direções de x e y , respetivamente, f o parâmetro de Coriolis, g a aceleração da gravidade, ρ_w a massa volúmica de referência da água do mar e ζ a elevação da superfície livre da água do mar relativamente ao plano de referência ($z = 0$). Por fim, ν_H representa o coeficiente de difusividade da turbulência horizontal que é definido por:

$$\nu_H = \nu_{SGS} + \nu_H^{back} + \nu_V \quad (9)$$

em que ν_{SGS} representa a difusividade da turbulência horizontal e é calculada no modelo Delft3D-FLOW através de uma formulação que resolve a os movimentos e misturas turbulentas numa escala inferior à malha do modelo. Por outro lado, ν_H^{back} representa a difusividade da turbulência horizontal responsável

pelos movimentos turbulentos horizontais não resolvidos da mistura e que é habitualmente usado como um parâmetro de calibração. Por fim, v_v representa o coeficiente de difusividade da turbulência vertical, que neste estudo não foi tido em conta.

Uma consequência importante de um escoamento não uniforme é a intensidade da turbulência. O movimento turbulento próximo do fundo causa um aumento da erosão do material do leito. Além disso, a turbulência é o principal movimento que mantém os sedimentos em suspensão e por isso um fator importante a referir. Neste contexto, os efeitos da turbulência são determinados por um modelo denominado de fecho da turbulência. O modelo Delft3D-FLOW dispõe de quatro métodos para determinar este parâmetro. Para o presente trabalho, foi utilizado o modelo κ - ε . Este envolve um sistema de duas equações, uma aplicada ao transporte para a energia cinética turbulenta (κ) e a outra para a taxa de dissipação da energia turbulenta (ε).

No fundo do mar, a tensão tangencial é calculada recorrendo à seguinte lei de tensão quadrática:

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho_0 g |\vec{u}_b| \vec{u}_b}{C_{3D}^2} \quad (10)$$

em que $\vec{u}_b$ corresponde à velocidade horizontal na camada inferior e C_{3D} representa o coeficiente 3D-Chézy, que é calculado a partir do coeficiente bidimensional de Chézy, C_{2D} , da seguinte forma:

$$C_{3D} = C_{2D} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_{zb}}{2H} \right) \quad (11)$$

em que K representa a constante de von Karman, δ_{zb} representa a distância vertical medida desde o fundo do mar ao ponto de grelha computacional mais próximo e H a profundidade total da água. Por último, C_{2D} é calculado utilizando o coeficiente de Manning, n , através de,

$$C_{2D} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (12)$$

4.2.2 MÓDULO DELFT3D-WAVE

O Delft3D-WAVE integra um modelo computacional espectral de terceira geração denominado de *Simulating WAVes Nearshore* (SWAN) aplicado em vários estudos, como por exemplo na simulação da propagação de ondas em águas profundas e pouco profundas. O modelo SWAN permite fornecer estimativas realistas dos parâmetros das ondas em vários contextos tais como áreas costeiras, lagos e estuários a através de determinadas condições de vento, fundos e correntes.

Este modelo incorpora os processos de propagação das ondas, as interações onda-corrente e os fenómenos da sua dissipação devido à rebentação das ondas e à fricção com os fundos. É de salientar que o modelo de terceira geração tem como novidade a integração de uma aproximação da refração-difração, que anteriormente não era considerada. Esta nova funcionalidade possibilitou uma melhor previsão das alturas de onda em torno de quebramares, nomeadamente a sua transformação a sotamar destas estruturas (Akpınar *et al.*, 2012; Deltares, 2014b).

A evolução do espectro de ondas é descrita pela equação de equilíbrio de ação espectral. A formulação para zonas costeiras pouco profundas em coordenadas cartesianas, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\delta}{\delta t} N + \frac{\delta}{\delta x} c_x N + \frac{\delta}{\delta y} c_y N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_\sigma N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (13)$$

em que $\frac{\delta}{\delta t} N$ representa a taxa local da variação da densidade da ação no tempo, $\frac{\delta}{\delta x} c_x N$ e $\frac{\delta}{\delta y} c_y N$ os fatores de propagação da ação no espaço cartesiano, com velocidades de propagação nas direções x e y de c_x e c_y , respetivamente, $\frac{\delta}{\delta \sigma} c_\sigma N$ o deslocamento da frequência relativa devido às variações de profundidade e correntes com velocidade de propagação c_σ e $\frac{\delta}{\delta \theta} c_\theta N$ a refração induzida em profundidade com velocidade de propagação c_θ . Por fim, $\frac{S}{\sigma}$ representa a componente da fonte em termos de densidade de energia que responde à geração, dissipação e interações não lineares de ondas.

O modelo SWAN pode comunicar com o modelo FLOW de um modo online, através da equação de equilíbrio de momento. A integração do SWAN permite simular ainda a força induzida das ondas com base no gradiente das tensões de radiação, através das seguintes expressões com coordenadas x e y que se traduzem por,

$$F_x = -\frac{\delta S_{xx}}{\delta x} - \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \quad (14)$$

$$F_y = -\frac{\delta S_{yx}}{\delta x} - \frac{\delta S_{yy}}{\delta y} \quad (15)$$

onde S representa o tensor das tensões de radiação:

$$S_{xx} = \rho g \int (n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2}) E(\sigma, \theta) \quad (16)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \int n \sin \theta \cos \theta E(\sigma, \theta) \quad (17)$$

$$S_{yy} = \rho g \int (n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2}) E(\sigma, \theta) \quad (18)$$

Em que S_{xx} representa a tensão normal de radiação, S_{yy} a tensão tangencial de radiação e n a relação entre a velocidade de grupo e a velocidade de fase.

4.2.3 MÓDULO DELFT3D-MORPHOLOGY

O módulo de transporte sedimentar e análise da morfologia pode ser aplicado em estuários, rios e zonas costeiras, com escalas temporais de curto a longo prazo. Este módulo permite detalhar tanto o transporte de sedimentos em suspensão coesivos - lama - e não coesivos – areia - como por arrastamento no leito. Além disso, permite fazer uma análise dos fenómenos de erosão e deposição em toda a área de estudo. A implementação deste módulo é uma extensão do módulo FLOW.

Para o presente estudo será analisado o transporte de sedimentos não coesivos em suspensão e por arrastamento. O transporte de sedimentos em suspensão é calculado com base na equação de equilíbrio para a concentração em massa dos sedimentos e expressa-se por,

$$\frac{\delta c}{\delta t} + \frac{\delta uc}{\delta x} + \frac{\delta vc}{\delta y} + \frac{\delta(w - w_s)c}{\delta z} - \frac{\delta}{\delta x} \left(\epsilon_{s,x} \frac{\delta c}{\delta x} \right) - \frac{\delta}{\delta y} \left(\epsilon_{s,y} \frac{\delta c}{\delta y} \right) - \frac{\delta}{\delta z} \left(\epsilon_{s,z} \frac{\delta c}{\delta z} \right) = 0 \quad (19)$$

onde c representa a concentração em massa da fração sedimentar (em kg/m^3), u , v e w são os componentes da velocidade do fluxo (em m/s), $\varepsilon_{s,x}$, $\varepsilon_{s,y}$ e $\varepsilon_{s,z}$ a turbulência da difusividade de cada fração sedimentar (em m^2/s) e w_s é a velocidade de queda da fração sedimentar.

Relativamente ao transporte de sedimentos por arrastamento, a sua direção pode ser determinada através da equação seguinte:

$$\tan(\alpha_r) = \frac{v - \alpha_1 \frac{u}{U} I_s}{u + \alpha_1 \frac{v}{U} I_s} \quad (20)$$

em que U representa a velocidade média em profundidade, I_s representa a intensidade do escoamento secundário e α_1 é dado pela seguinte expressão,

$$\alpha_1 = \frac{2}{k^2} E_s \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{kC}\right) \quad (21)$$

em que k representa a constante de Von Kármán, g a aceleração da gravidade, C a rugosidade de Chézy e E_s um coeficiente que representa o efeito do escoamento em espiral.

A composição do fundo pode ser modelada como uma única camada bem misturada, ou como multicamadas, por forma a estudar o desenvolvimento de diferentes camadas ao nível da erodibilidade, durante escalas temporais longas. Os sedimentos transportados por suspensão e por arrastamento podem ser modelados por uma gama de formulações de transporte. No presente estudo, considerou-se que o material era não coesivo, constante em toda a zona, e adotou-se a formulação de Van Rijn (1993).

Este modelo apresenta expressões que permitem caracterizar os fenómenos de erosão e deposição, sendo essas equações dadas por:

$$E = MS(\tau_{cw}, \tau_{sr,e}) \quad (22)$$

$$D = w_s c_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \quad (23)$$

$$c_b = c(z = \frac{\Delta z_b}{2}, t) \quad (24)$$

em que E representa o fluxo de erosão, M o parâmetro de erosão; $S(\tau_{cw}, \tau_{sr,e})$ a função da evolução da erosão, D o fluxo de deposição, w_s a velocidade de queda da fração sedimentar, c_b a concentração média de sedimentos no fundo da camada computacional; $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d})$ a função da evolução da deposição, τ_{cw} a tensão máxima de arrastamento no fundo do mar devido às correntes e ondas, $\tau_{sr,e}$ a tensão de arrastamento crítica de erosão e, por último, $\tau_{cr,d}$ representa a tensão de arrastamento crítica por deposição.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MÓDULOS DELFT3D

4.3.1 DELFT3D-FLOW

A criação do modelo hidrodinâmico necessita de um ficheiro de entrada que tem como objetivo armazenar todos os parâmetros que são definidos e que serão utilizados para executar o modelo a fim de simular os fenómenos físicos em estudo. Esse ficheiro denomina-se de *Master Definiton Flow* (MDF). Os nomes atribuídos ao ficheiro MDF e aos seus arquivos de atributos têm uma estrutura

específica que permite salvaguardar a ligação entre ambos. Neste sentido, a parte *runid* deve ser a mesma e só se altera o tipo de extensão de cada arquivo, como por exemplo, *runid.mdf*.

A preparação do MDF é realizada através de uma interface gráfica denominada de FLOW-GUI, como ilustra a Fig. 64. Das células apresentadas na linha da parte superior da Fig. 64, importa referir a importância da ferramenta View → Visualisation Area uma vez que esta janela possibilita a visualização da malha no ficheiro MDF, bem como os elementos físicos tais como as proteções costeiras, as barragens, os bancos de areia e os pontos seleccionados para observação.

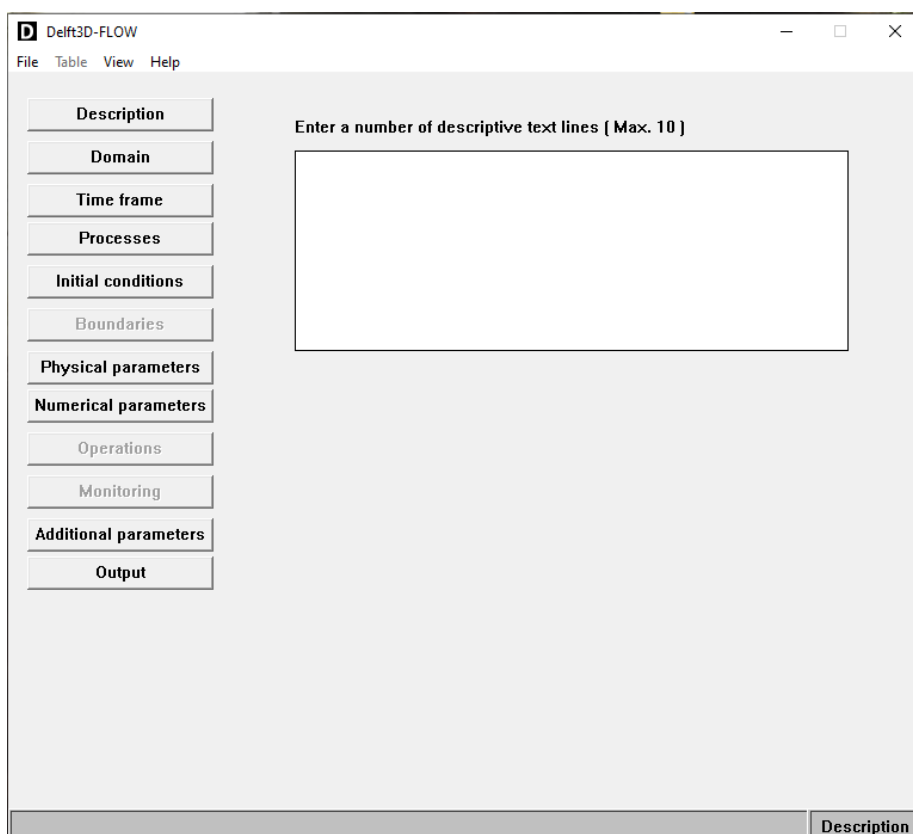


Fig. 64 - Janela principal do FLOW-GUI.

De seguida são inumerados os pontos chave para a compreensão de alguns parâmetros que foram introduzidos ao longo da implementação do modelo Delft3D-FLOW nos diferentes grupos de dados, possíveis de visualizar nas células do lado esquerdo da Fig. 64.

Domínio (Domain)

Existem dois tipos de sistemas de coordenadas na horizontal: as coordenadas cartesianas, em metros, com uma latitude da zona modelo específica que, por conseguinte, possibilita determinar a força fixa de Coriolis e, as coordenadas esféricas, definidas em graus decimais, onde a força de Coriolis varia com a latitude. Na área de estudo considerou-se uma latitude de 41.32° N.

Para a construção da malha, o modelo Delft3D contém um programa que gera as malhas denominado de RGFGGRID. Ao construir a malha é necessário ter em atenção que esta deve incidir somente na zona de estudo que se pretende modelar e que se deve adaptar o mais próximo possível dos limites terra-água.

A construção de uma malha adequada requer concentração e várias iterações de modo a que se encontre uma malha com as características que não torne o *software* pesado e com tempo de simulação inadaptáveis face ao tempo estimado para o estudo.

Para o caso de estudo, construiu-se uma malha que abrangia na direção Oeste-Este, desde a Foz do rio Cávado até à estação hidrométrica de Barcelos e Norte-Sul, desde as praias a norte do quebramar Norte até ao quebramar de Ofir. Foram testadas malhas com diferentes resoluções até alcançar a malha representada na Fig. 65. Esta possui uma resolução 40x40 variável, aumentando linearmente a partir da costa em direção à fronteira. Para a conceção geométrica da malha, foram consideradas as posições de diferentes elementos, tais como os quebramares, a restinga e a linha da costa.

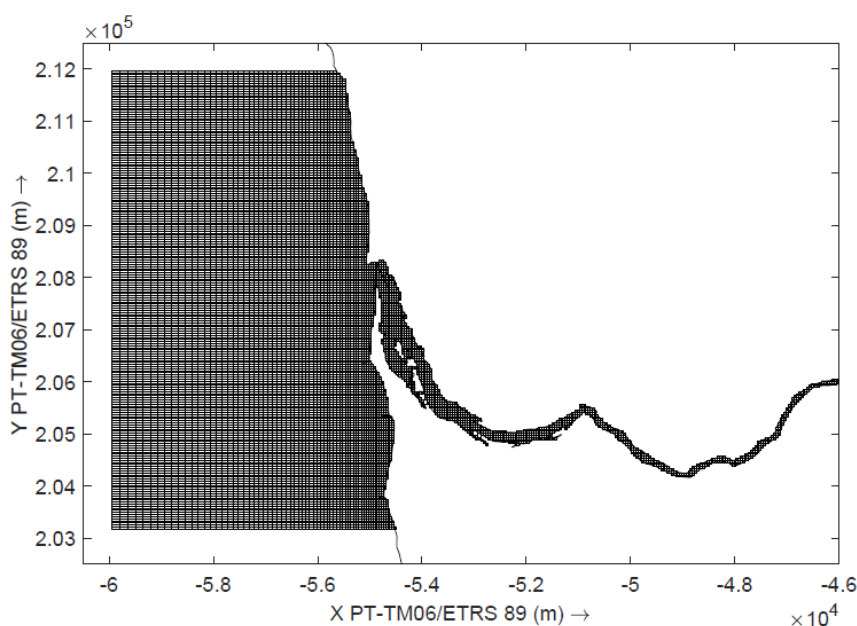


Fig. 65 - Aspeto visual da malha 40x40 para análise do Delft3D-FLOW.

Posteriormente, recorre-se à ferramenta QUICKIN para gerar os dados referentes às profundidades na zona inserida na malha criada. Os dados batimétricos foram obtidos através da carta náutica de 2020, com os dados representados no sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06. Também foram fornecidos pela Polis Litoral Norte dados batimétricos. No entanto, estes documentos apresentavam, por um lado, dados bastante detalhados ao longo da linha da costa, mas por outro, muitas falhas no interior do estuário. Foi por esse motivo que se optou por usar somente os dados topo-hidrográficos disponíveis na carta Náutica. A Fig. 66 e a Fig. 67 representam a batimetria da Carta Náutica na linha de costa de Esposende e no interior do rio Cávado. Através destas foi possível verificar que os dados batimétricos na linha de costa eram abundantes e exaustivos. Em contrapartida, a batimetria desde a foz do rio Cávado para montante era limitada e dispersa, sendo cada vez menor para montante.

Sendo uma zona costeira, de profundidades baixas, qualquer variação neste parâmetro permitiria obter oscilações significativas quanto ao comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico do sistema. Uma vez que existiam zonas da malha com escassez de informação batimétrica, os dados foram submetidos a uma interpolação triangular através da ferramenta QUICKIN. Esta interpolação permitiu tornar a batimetria da malha o mais semelhante possível à batimetria natural (Fig. 68).

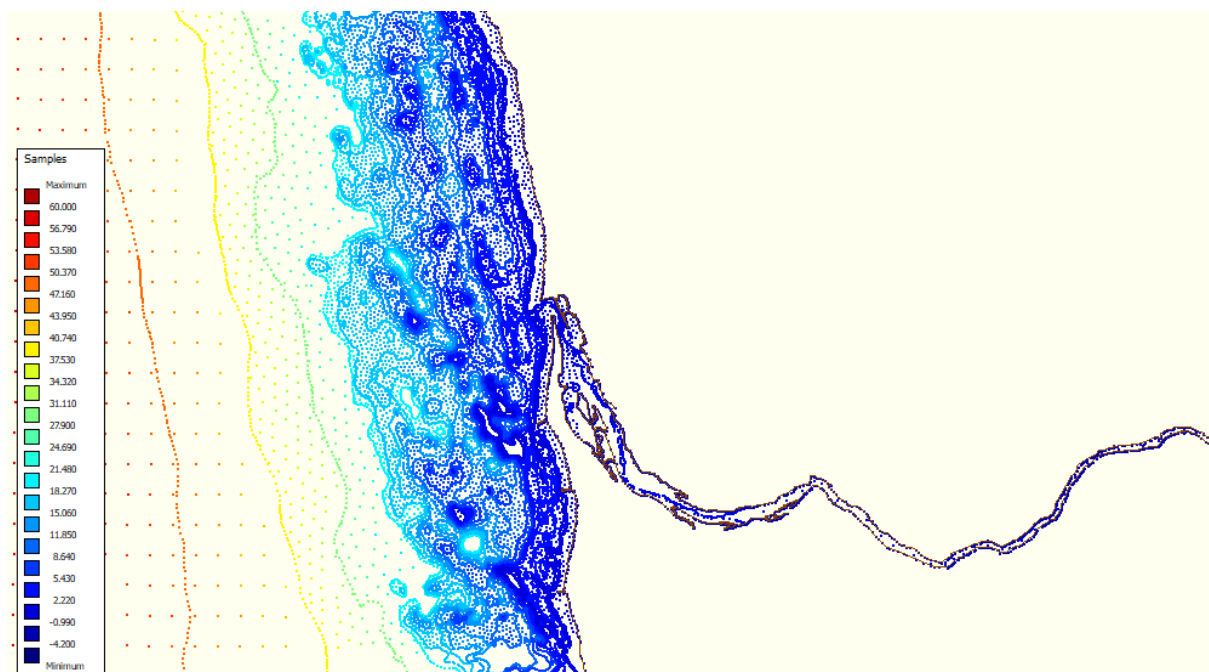


Fig. 66 - Batimetria da linha de costa de Esposende e estuário do Cávado: Carta Náutica, 2020.

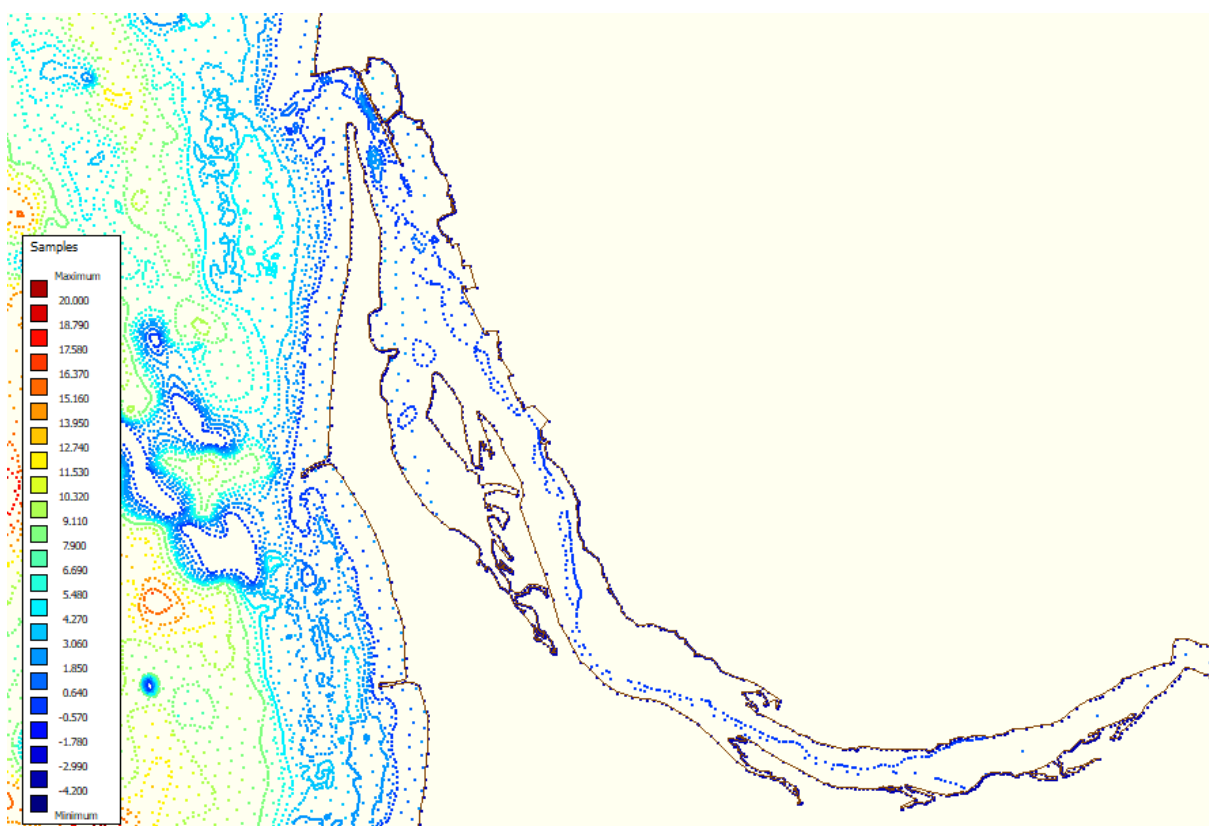


Fig. 67 - Detalhe da batimetria na restinga de Ofir e no canal de navegação da foz do rio Cávado: Carta Náutica, 2020.

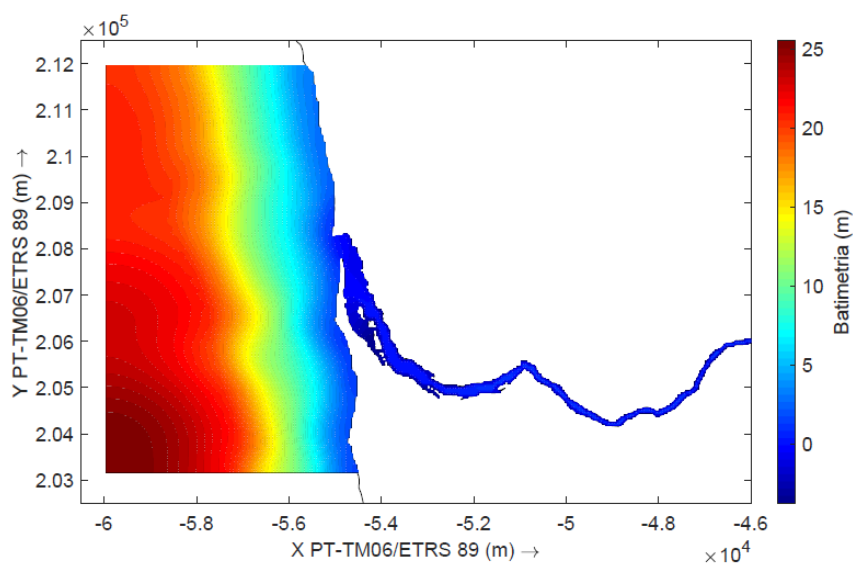


Fig. 68 - Aspeto visual da malha e da batimetria após a interpolação.

Intervalo de Tempo da simulação (Time Frame)

No grupo de dados temporais é necessário definir os seguintes instantes de entrada: a data de referência da simulação, a data e a hora de início da simulação e a data e hora do final da simulação. Adicionalmente, é definido o parâmetro do fator de escala que, por um lado, capte de um modo perceptível os efeitos a analisar ao longo da série temporal, e por outro, torne o período das simulações viáveis. O valor recomendado para este parâmetro deve estar compreendido entre 1/3-1/10 minutos e está dependente das características geométricas da malha. O valor adotado para o caso de estudo e que obteve uma melhor estabilidade na malha foi de 1/10 minutos.

Condições Iniciais (Initial Conditions)

Estas condições permitem especificar os valores iniciais de cálculo. Estas condições são fundamentais na medida em que influenciam todas as variáveis dependentes tais como o nível de água, a salinidade, a temperatura e a concentração de sedimentos. Assim sendo, para a validação do modelo assumiu-se um nível médio da água do mar de referência de + 2.00 m (ZH). Relativamente à salinidade e de acordo com estudos anteriores sobre a região, adotou-se um valor de 35.8 ppt para a salinidade e de 17 ° C para a temperatura (Silva, 2006). No que respeita aos cenários que serão abordadas posteriormente, adotou-se os valores de + 0.60 m (ZH) para BMAV e + 4.30 m (ZH) para PMAV+SS. Estes valores tiveram como base a análise das marés, efetuada na seção 3.2.3.

Condições Fronteira (Boundaries)

Quando se pretende simular ondas longas, tais como as marés, as condições fronteiras podem ser definidas segundo o contorno da malha. Neste sentido, para o caso em estudo, foram criadas três condições de fronteira: Norte, Sul e Oeste. A fronteira Este já está limitada pela linha da costa de Esposende e a geometria do estuário do rio Cávado.

Nestes limites são impostos alguns parâmetros iniciais do modelo tais como a maré astronómica, os ventos, a subida do nível médio da água do mar e o transporte de sedimentos. No presente caso de

estudo, não foi considerada a ação do vento, uma vez que não se obteve informação suficiente da zona. Relativamente às marés, para a validação do modelo, os dados considerados foram obtidos através da base de dados TPXO 7.2, um modelo global de marés que usa dados obtidos por indicadores de maré e o satélite TOPEX/Poseidon. Foi utilizada uma aproximação de variação espacial na qual os harmónicos de maré foram extraídos para cada fronteira do modelo: Norte, Oeste e Sul (Fig. 69).

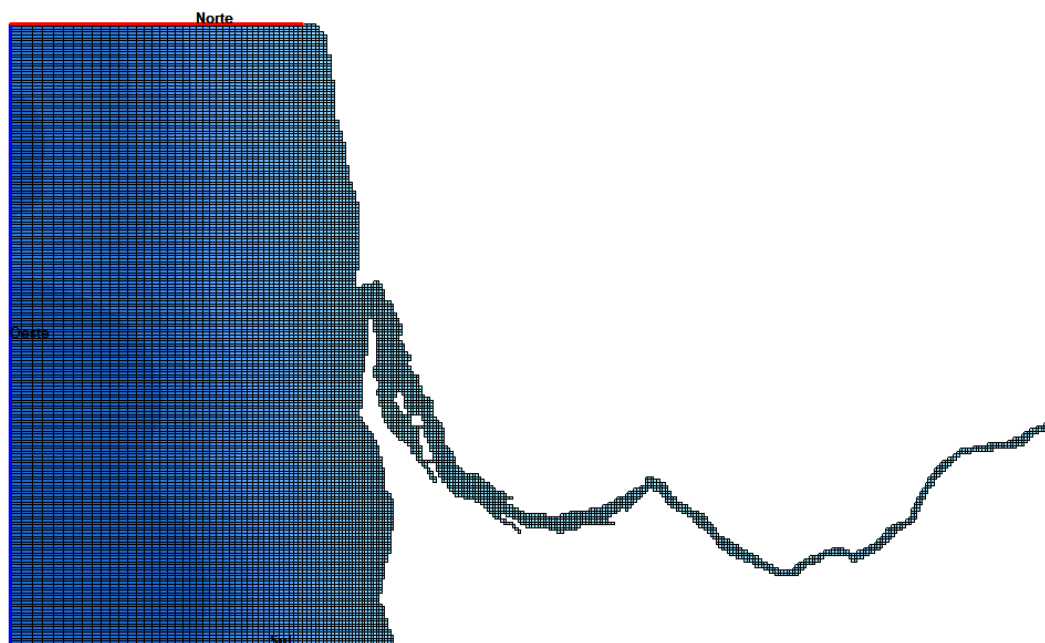


Fig. 69 - Condições Fronteira.

As características do nível do mar foram calculadas através das principais componentes harmónicas de maré (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4, MN4), obtidos pelo modelo TPXO 7.2. A Tabela 15 apresenta as amplitudes e as fases das componentes das marés usadas para a área de estudo.

Tabela 15 – Componentes da maré nas fronteiras do modelo.

	Fronteira Norte		Fronteira Oeste		Fronteira Sul	
	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	1.063	75.110	1.061	75.037	1.063	74.839
S2	0.371	105.110	0.370	104.901	0.371	105.004
N2	0.225	56.750	0.224	56.660	0.225	56.644
K2	0.100	101.420	0.100	101.196	0.100	101.346
K1	0.074	65.550	0.074	65.315	0.074	65.460
O1	0.059	320.910	0.059	320.791	0.059	321.011
P1	0.021	57.060	0.021	56.906	0.021	57.002
Q1	0.019	265.930	0.019	265.850	0.019	266.101
MF	0.005	183.280	0.005	183.339	0.005	183.359
MM	0.003	189.540	0.003	189.614	0.003	189.613
M4	0.007	223.840	0.007	222.959	0.006	224.249
MS4	0.003	333.200	0.003	332.717	0.003	337.527
MN4	0.001	123.930	0.001	123.102	0.001	117.303

Nas simulações realizadas após a validação do modelo, o efeito das marés foi considerado um parâmetro constante, de acordo com o cenário a analisar (maré baixa ou maré alta com sobrelevação). Para as condições de transporte também foram adotados os mesmos valores da salinidade e da temperatura, como referido anteriormente nas condições iniciais.

Parâmetros Físicos (Physical Parameters)

De seguida são listados os parâmetros físicos que também têm de ser considerados no modelo hidrodinâmico:

- Constantes hidrodinâmicas: a gravidade com um valor por defeito de 9.81 m/s^2 e a massa volúmica da água, igual a 1024 kg/m^3 ;
- Rugosidade: optou-se pela formulação de Manning, utilizando para isso um coeficiente de rugosidade constante (n) de $0.05 \text{ sm}^{0.33}$ (Silva, 2006);
- Viscosidade e coeficientes de turbulência horizontais de fundo: De acordo com trabalhos anteriores, os valores considerados de ν_H^{back} e D_H^{back} foram de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ (Silva, 2006);
- Sedimentos: as características dos sedimentos são introduzidas no modelo através do parâmetro D_{50} , já referido no Cap 3. No presente estudo este parâmetro apresentou um valor de 0.5 mm , constante em toda a área de análise e numa camada de 5 m , parâmetro este por defeito do modelo.

Operações (Operations)

Neste grupo são inseridas as descargas de água doce, que na presente dissertação são devidas ao rio Cávado. A sua localização na malha é efetuada com auxílio da ferramenta Visualisation Area. A Tabela 16 apresenta os valores dos caudais adotados para a realização das simulações, localizados na estação hidrométrica de Barcelos. Estes valores foram obtidos com base na análise de caudais efetuada no Cap 3. Além disso, também têm de ser considerados a salinidade e a temperatura da água do rio, admitindo um valor de 0 ppt e $17 \text{ }^\circ\text{C}$, respetivamente (Silva, 2006).

Tabela 16 - Caudais adotados para as simulações.

Denominação	Caudal (m^3/s)
Q1	150
Q2	800

4.3.2 DELFT3D-WAVE

Para criar o modelo da propagação das ondas é necessário obter um ficheiro de entrada que permite o armazenamento dos parâmetros utilizados, idêntico ao mencionado na seção 4.3.1. No caso das ondas, esse ficheiro denomina-se de *Master Definition Wave* (MDW). É possível comunicar o módulo WAVE com o FLOW, por forma a simular em simultâneo as ondas com os processos hidrodinâmicos.

De seguida, são referidos os aspetos mais relevantes a ter em conta na implementação do modelo das ondas. No entanto, para uma compreensão mais aprofundada deste *software*, nas referências incluiu-se o manual do utilizador do Delft3D-WAVE (Deltares, 2014b).

Malha

A construção da malha para a simulação das ondas é realizada pelo mesmo método que o mencionado na seção anterior, ou seja, com base nas ferramentas RGFGRID e QUICKIN. Para estudar a propagação das ondas na zona de estudo, considerou-se uma malha que abrangesse desde a Foz do rio Cávado até à ponte de Fão. A limitação considerada deve-se ao facto de a rebentação das ondas ser atenuada na embocadura da foz do rio Cávado e na restinga, não se sentindo a influência da agitação marítima para montante do estuário. Para o módulo Delft3D-WAVE considera-se uma malha com uma resolução de 80x80 (Fig. 70).

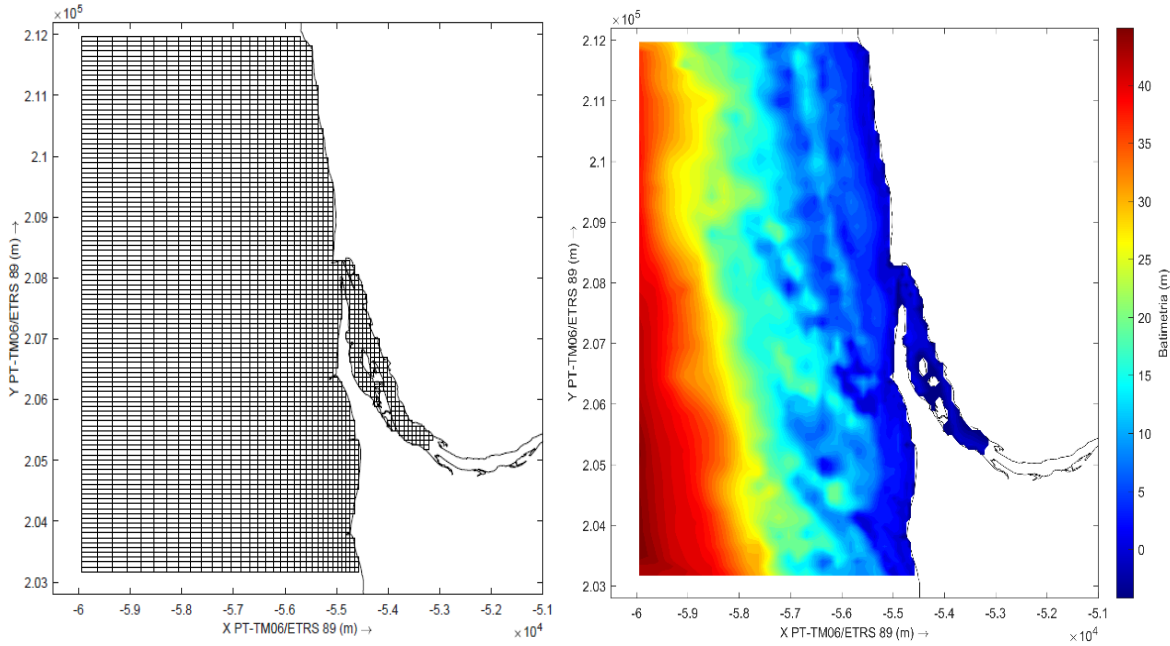


Fig. 70 - Aspeto visual da malha 80x80 e da batimetria para análise do Delft3D-WAVE.

Condições Fronteira

As condições fronteira consideradas no modelo Delft3D-WAVE foram Norte, Oeste e Sul. Cada fronteira caracteriza-se por: altura de onda significativa (em m), período de pico da onda (em s) e direção da onda (com o vetor de onda em graus e a contar de norte, no sentido horário).

Uma vez que não são conhecidos os espectros reais para representar o espectro de propagação das ondas no SWAN adotou-se a formulação empírica de JONSWAP. Esta descreve a distribuição da energia das ondas pelas frequências do espectro, desde as águas profundas até à linha da costa e expressa-se por,

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-(f - f_p)^2 / 2\sigma^2 f_p^2 \right] \quad (25)$$

em que f_p representa a frequência do pico espectral, α o nível extremo de alta frequência, γ e σ o aumento e a redução do pico espectral do oceano, respetivamente (Akpınar *et al.*, 2012).

Assim sendo, para o caso de estudo, considerou-se as alturas de onda significativa de 1.5, 3.5 e 5.0 m, um período de pico de 10 s e uma direção de onda de 292°. Estes valores foram adotados com base na análise da agitação marítima apresentada na seção 3.2.2.

Obstáculos

Os obstáculos permitem interromper a propagação das ondas no espaço da grelha onde quer que estes elementos se encontrem. Estes afetarão o campo de ondas através da redução da altura da onda, ao longo de todo o seu comprimento, e pela difração das ondas ao longo das suas extremidades.

A localização do obstáculo deve ser especificada através de coordenadas dos pontos. As coordenadas X-start e Y-start representam a localização do ponto inicial de um segmento do obstáculo e as coordenadas X-end e Y-end, a localização do último ponto do segmento. A criação dos vários segmentos é realizada por forma a criar um polígono, sendo esta a representação gráfica do obstáculo no modelo computacional.

Além disso, no modelo também é possível especificar o tipo de obstáculo, podendo-se defini-lo como *Sheet* ou *Dam*. No primeiro caso, considera-se o coeficiente de transmissão constante ao longo do obstáculo. O modelo define por defeito um valor de 1.0, representando o coeficiente de transmissão para a altura significativa de onda. No segundo caso, o coeficiente de transmissão está dependente das condições de onda incidente no obstáculo e da altura do obstáculo.

Para o caso de estudo, o conjunto obstáculos reproduzidos no modelo foram os quebra-mares destacados 1 e 2 e a estrutura longitudinal. Para simplificar, considerou-se que estes eram do tipo *Sheet*, ou seja, representando cada quebra-mar destacado como um polígono, de acordo com a geometria apresentada na seção 3.5.

A Fig. 71 apresenta a localização dos quebra-mares implementados e permite verificar que a sua geometria é semelhante às propostas referidas anteriormente. A definição dos coeficientes de reflexão e de transmissão foram aproximados e de acordo com os valores referidos em Freire *et al.* (2007). Neste sentido, a Tabela 17 resume os parâmetros adotados para a definição dos obstáculos implementados.

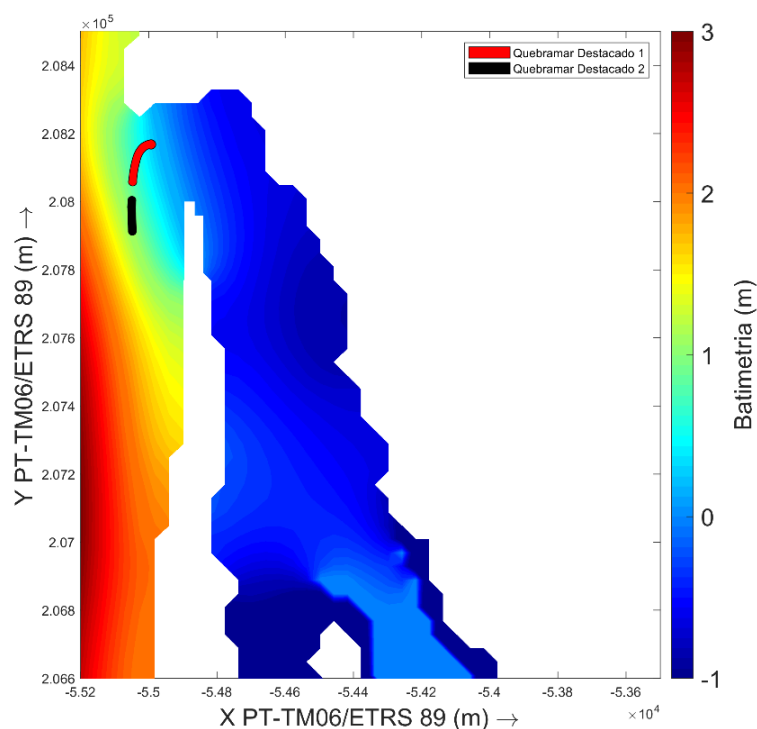


Fig. 71 - Localização das estruturas no módulo Delft3D-WAVE.

Tabela 17 - Parâmetros dos quebramares destacados 1 e 2.

Tipo de Obstáculo	Sheet
Reflexão	Especular
Coeficiente de reflexão	0.40
Coeficiente de transmissão	0.30

Parâmetros Físicos

Os parâmetros físicos considerados foram:

- Constantes: a direção do Norte por defeito de 90° e a profundidade mínima da água definida por defeito de 0.05 m;
- Processos: a rebentação induzida pela profundidade é calculada através do modelo de Battjes e Janssen (1978). Os coeficientes da taxa de dissipação, α , e da relação entre a altura e a profundidade da onda, γ , foram considerados por defeito no modelo iguais a $\alpha=1$ e $\gamma=0.73$. Para a dissipação da energia das ondas devido ao atrito de fundo adotou-se a formulação de JONSWAP, com um coeficiente de atrito por defeito do modelo de 0.067 m^2s^{-3} ;
- O controlo da difusão do espaço direcional e de frequência no SWAN foi fixado em 50%;
- Critérios de exatidão definidos no SWAN: a alteração da altura da onda significativa local é limitada a 0.02 m, a alteração do período médio a 0.02 m e a percentagem de pontos da grelha húmida a 98%.

4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação garante que os resultados obtidos através do modelo numérico são fiáveis. Esta foi efetuada com base nos dados obtidos numa campanha realizada por Silva (2006), relativamente à variação do nível das marés. O período de validação está compreendido entre as 00:00h do dia 15 de agosto de 2006 e as 00:00h de 2 de setembro de 2006. A análise da variação do nível médio das águas do mar foi realizada em três pontos localizados em zonas distintas do estuário do rio Cávado estando eles na foz do rio Cávado, na marina de Esposende e na ponte de Fão, como ilustra a Fig. 72. A validação do modelo foi efetuada com o estado atual da zona de estudo, sem considerar a solução de proteção costeira proposta.



Fig. 72 - Localização geográfica dos pontos da campanha de (Silva, 2006).

Em cada ponto acima referido, foram realizadas duas campanhas: uma em período de marés vivas e outra em marés mortas (Tabela 18). Para a validação do modelo foram usadas as seguintes características da região: ν_H^{back} e D_H^{back} com $10 \text{ m}^2/\text{s}$; $0.05 \text{ sm}^{0.33}$ para n ; salinidade e temperatura do rio Cávado de 0 ppt e 17°C , respetivamente, e um caudal médio diário turbinado pela barragem da Caniçada de $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Além disso, o *time step* utilizado foi de 6 s.

Tabela 18 – Recolhas de dados (Silva, 2006).

Local	Estado da Maré	Data
Marina de Esposende	Marés Vivas	22 de agosto de 2006
	Marés Mortas	29 de agosto de 2006
Ponte de Fão	Marés Vivas	24 de agosto de 2006
	Marés Mortas	31 de agosto de 2006

Para as condições fronteira considerou-se uma salinidade de 0 ppt, uma temperatura de 17°C e as séries temporais referentes ao período do estudo de Silva (2006) para as alturas de onda significativa (Fig. 73), os período de pico (Fig. 74) e as direções de origem das ondas (Fig. 75). Os valores de cada parâmetro foram obtidos num período de 3 em 3 horas, durante os 18 dias da série temporal.

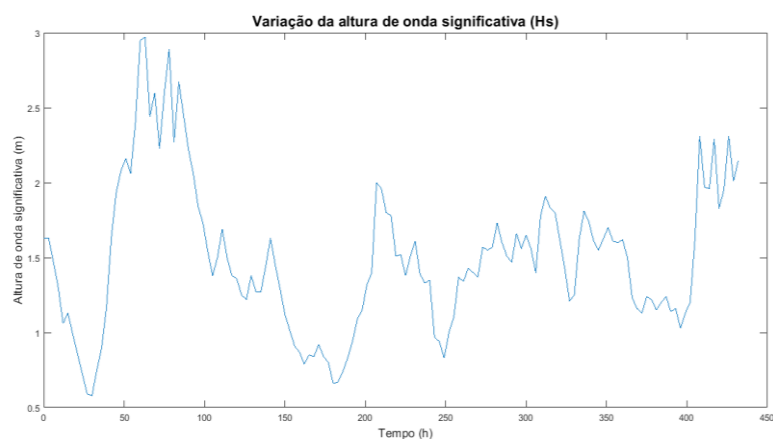


Fig. 73 - Série temporal da altura de onda significativa.

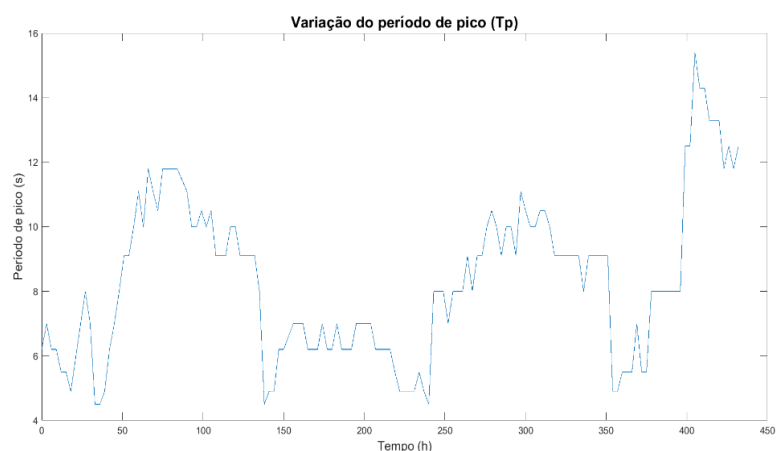


Fig. 74 - Série temporal da altura de onda significativa.

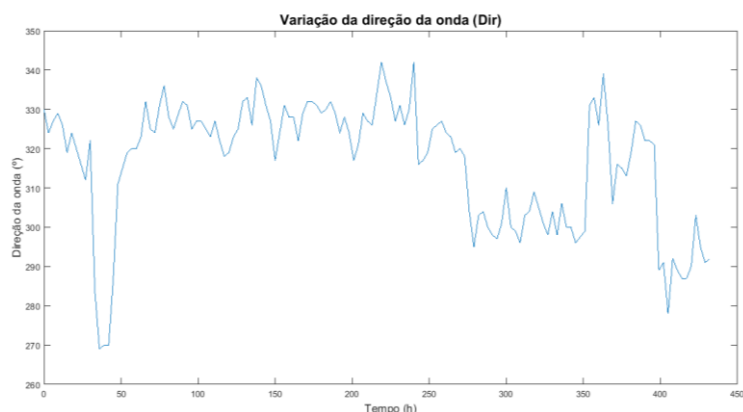


Fig. 75 - Série temporal da direção da onda.

Para validar os resultados do modelo numérico foram tidos em conta os seguintes parâmetros:

O coeficiente de correlação (R^2) descreve o grau de co-linearidade entre os resultados simulados e os obtidos noutra estudo. Este coeficiente varia entre 0 e 1 sendo que, quanto mais próximo de 1, melhor é a concordância dos resultados do modelo numérico. Em teoria, este parâmetro expressa-se por:

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (R_i - S_i)}{\sqrt{\sum_i^N (R_i - \bar{R})^2}} \quad (26)$$

O Erro Quadrático Médio (RMSE) permite medir a diferença entre os valores simulados e os obtidos noutra estudo. Este parâmetro é determinado através da seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N (R_i - S_i)^2}{N}} \quad (27)$$

em que R_i representa os resultados medidos no modelo que serve de base, S_i os resultados calculados com o modelo numérico, $\bar{R}$ é o valor médio dos valores medidos e N é o número total de valores de dados registados.

A Tabela 19 e as Fig. 76 e Fig. 77 apresentam os resultados da validação do modelo numérico. Tendo em conta os resultados obtidos, e de um modo geral, verificou-se um excelente ajustamento na validação do modelo para todos os casos. No entanto, o melhor resultado foi alcançado em ambos os locais (Marina e Ponte de Fão) no período de maré morta. As diferenças obtidas nos resultados de validação poderão estar associadas à batimetria utilizada, da carta Náutica de 2020, não coincidir com o aspeto da batimetria no período do estudo de Silva (2006).

Tabela 19 – Resultados da calibração do modelo.

	R^2	RMSE (m)
Marina 24/08/2006	0.9750	0.1092
Marina 31/08/2006	0.9938	0.0266
Ponte Fão 22/08/2006	0.9799	0.0730
Ponte Fão 29/08/2006	0.9922	0.0362

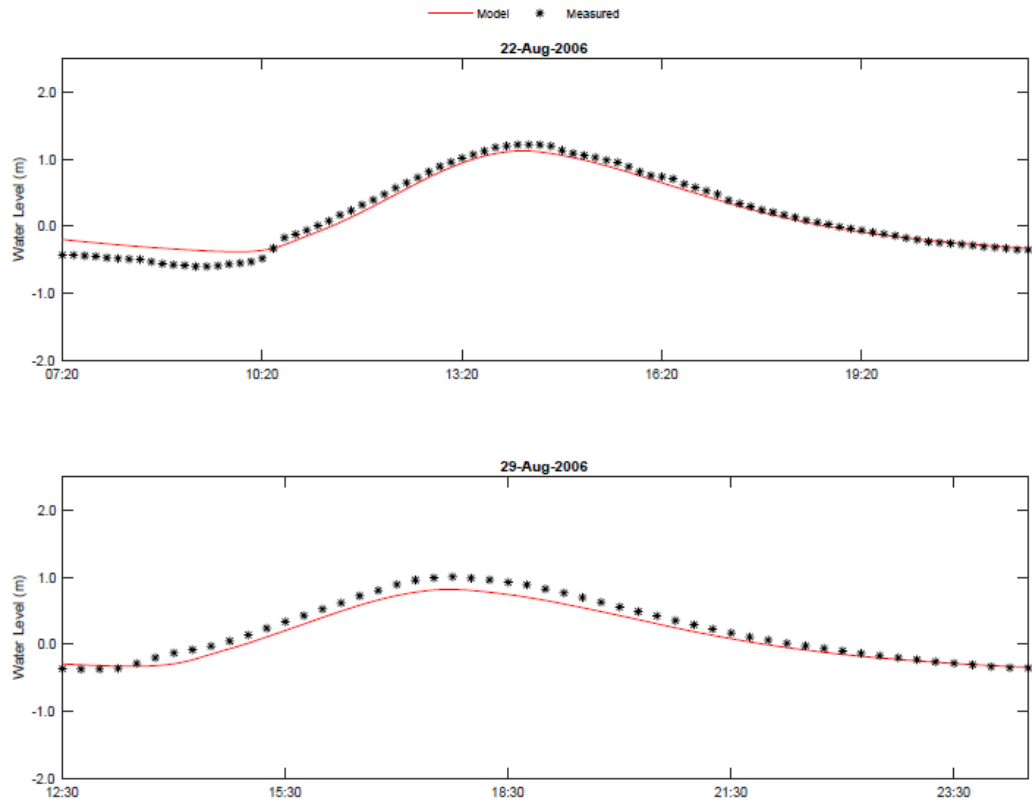


Fig. 76 - Resultados da validação do modelo na Marina de Esposende.

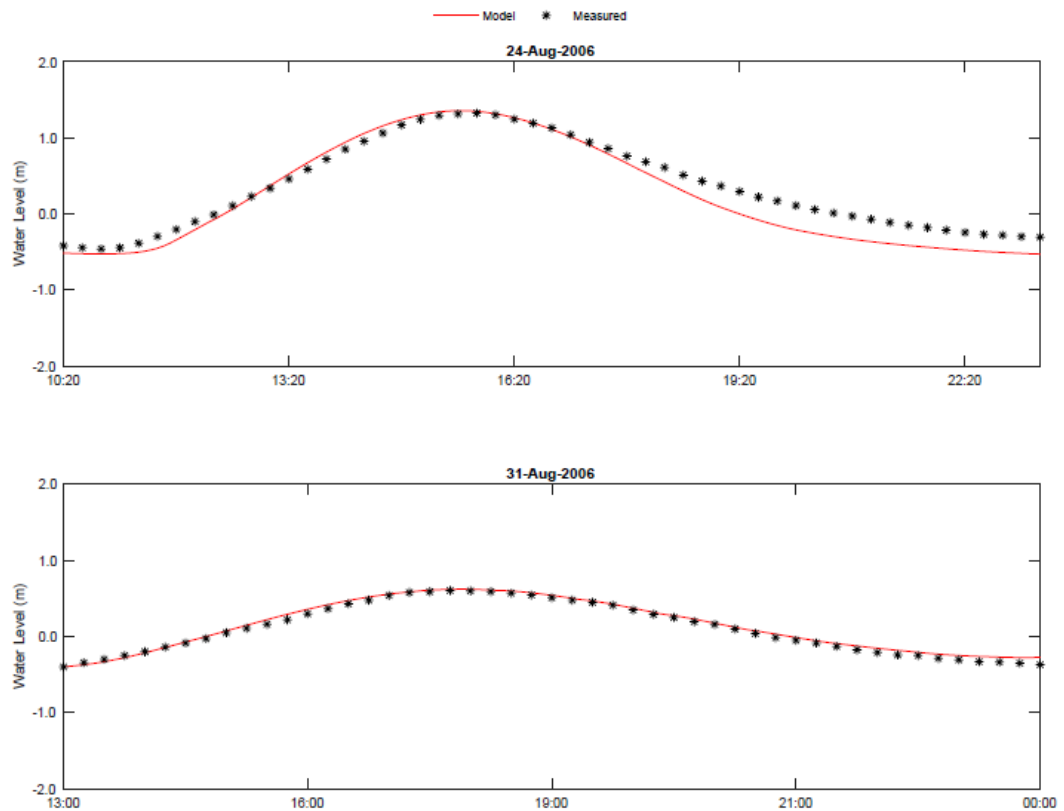


Fig. 77 - Resultados da validação do modelo na Ponte de Fão.

4.5 CONDIÇÕES DE TESTE E CENÁRIOS A SIMULAR

Após a implementação do modelo numérico e verificada a validação do mesmo para os níveis de água, seguiu-se a execução das simulações. No entanto, os primeiros resultados apresentaram anomalias correntes nos modelos numéricos, nomeadamente, instabilidade nas condições fronteira. Para ultrapassar estes problemas foi necessário calibrar o modelo, por forma a garantir que os cenários a analisar fossem uma representação aproximada da realidade. A fase da calibração foi um dos passos mais morosos no que respeita ao trabalho efetuado a nível computacional, necessitando de mais de 100 simulações. As alterações efetuadas consistiram em ajustes nos parâmetros físicos e numéricos, nomeadamente no módulo FLOW, e resumem-se a:

- Introduzir um ficheiro em formato .dry, no modelo hidrodinâmico, com informação complementar relativa aos bancos de areia no interior do estuário e na extremidade Norte da restinga (completando as falhas da estrutura apresentadas em simulações anteriores);
- Alterar o coeficiente de rugosidade uma vez que para a zona de estudo, com profundidades reduzidas, este parâmetro é crítico. Neste sentido, variou-se o coeficiente de rugosidade entre 0.04 e 0.06 $\text{sm}^{0.33}$;
- Aumentar o parâmetro de reflexão de 200 s^2 para valores como, por exemplo, 500 e 1000 s^2 . Este parâmetro deve ser suficientemente grande para atenuar as ondas introduzidas no início da simulação nas fronteiras, contribuindo com a estabilidade do modelo.

Posteriormente, selecionaram-se as simulações com os resultados mais satisfatórios obtendo no total 12 cenários. Para cada cenário foram executadas duas fases de simulações de modo a compreender o impacto das estruturas face ao comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico. De seguida, apresentam-se as duas fases consideradas.

- Fase 1 – análise de cenários sem a inclusão de novas estruturas de defesa costeira;
- Fase 2 – análise de cenários de duas propostas de intervenção de proteção costeira, nomeadamente:
 - Fase 2.1 – cenário composto pelos quebra-mares destacados 1 e 2 (ver Fig. 60);
 - Fase 2.2 – cenário com os mesmos quebra-mares destacados e, adicionalmente, uma estrutura longitudinal (ver Fig. 60).

Para os cenários foram admitidos os parâmetros apresentados na Tabela 20. A Tabela 21 representa os cenários selecionados com as respetivas combinações de parâmetros. A coluna “ID” representa a nomenclatura adotada para identificar os diferentes cenários a testar.

Tabela 20 – Parâmetros admitidos nos cenários.

Caudal fluvial	Q1 (m^3/s)	150
	Q3 (m^3/s)	800
Níveis de maré	BMAV (m)	0.6
	PMAV+SS (m)	4.3
Direção da agitação (Dir)	(°)	292
Altura de onda significativa (H_s)	(m)	1.5
	(m)	5.0
Período de pico (T_p)	(s)	10.0

Tabela 21 – Cenários efetuados para as Fases 1 e 2.

ID	Caudal (m³/s)	Nível de maré	Rumo da agitação	Hs (m)	Hs (dir) (°)	Tp (s)	Duração (h)
Q1_BMAV_WNW_HS1.5	150	BMAV	WNW	1.50	292	10	48
Q1_BMAV_WNW_HS3.5				3.50			
Q1_BMAV_WNW_HS5.0				5.00			
Q1_PMAV+SS_WNW_HS1.5		PMAV+SS	WNW	1.50	292	10	48
Q1_PMAV+SS_WNW_HS3.5				3.50			
Q1_PMAV+SS_WNW_HS5.0				5.00			
Q2_BMAV_WNW_HS1.5	800	BMAV	WNW	1.50	292	10	48
Q2_BMAV_WNW_HS3.5				3.50			
Q2_BMAV_WNW_HS5.0				5.0			
Q2_PMAV+SS_WNW_HS1.5		PMAV-SS	WNW	1.50	292	10	48
Q2_PMAV+SS_WNW_HS3.5				3.50			
Q2_PMAV+SS_WNW_HS5.0				5.0			

É de salientar que no modelo numérico foram introduzidos onze pontos de monitorização com localizações próximas das estruturas propostas (Fig. 78). A escolha desses pontos foi efetuada por forma a obter pelo menos um ponto do lado a barlar e a sotamar de cada estrutura. Estes pontos tiveram como objetivo analisar a magnitude da agitação marítima após a introdução das estruturas de defesa costeira.

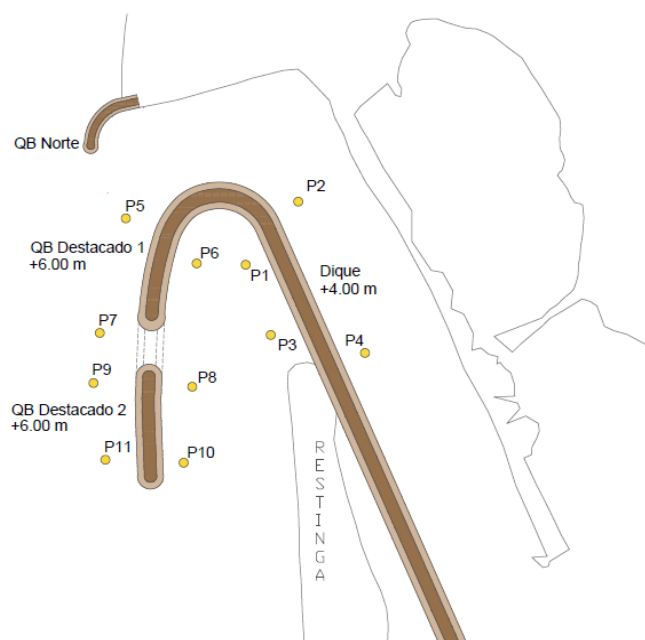


Fig. 78 - Localização adotada para os pontos de monitorização.

4.6 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados das simulações de diferentes cenários extraídos do modelo Delft3D de modo a avaliar o efeito das marés, da agitação marítima, do caudal fluvial ao longo do troço de costa em estudo, ou seja, a frente urbana da cidade de Esposende e a restinga.

Estes processos influenciam os fenómenos de erosão e deposição ao longo da foz do rio Cávado. Esta análise visa comparar qualitativamente o comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico entre o estado atual da zona de estudo e duas possíveis propostas de intervenção.

A análise está dividida em dois grupos que permitem fazer a comparação entre o estado atual e uma proposta de intervenção. Primeiramente, apresenta-se a comparação entre as fases 1 (estado atual) e 2.1 (intervenção com dois quebra-mares destacados) através das alturas de onda significativas, velocidades dos fundos e a deposição/acreção dos sedimentos. Posteriormente, efetua-se a comparação entre a fase 1 e a 2.2 (intervenção com os mesmos quebra-mares destacados e uma estrutura longitudinal).

4.6.1 CENÁRIOS DAS FASES 1 E 2.1

4.6.1.1 Análise das alturas de onda significativas

Para a análise da altura de onda significativa consideraram-se dois cenários para duas amplitudes de maré, preia mar de água vivas e baixa mar de águas vivas, com um valor de + 4.30 m (ZH) e + 0.60 m (ZH), respetivamente.

Consideraram-se duas alturas de onda significativa, 1.5 m e 5.0 m, um período de pico de 10 s e uma direção incidência da onda de 292°. Esta análise permite obter uma comparação dos resultados das alturas de onda significativas na situação atual e com uma hipotética implementação de dois quebra-mares destacados.

Na Fig. 79 apresentam-se as simulações efetuadas para PMAV+SS e com um $H_s = 1.5$ m. Nas condições atuais, as ondas alcançam a entrada da foz do rio Cávado com alturas entre 0.75 e 1.70 m e atingem a restinga com alturas entre 0.75 e 1.25 m, expondo a linha de costa da mesma. Relativamente à situação após a intervenção proposta, os quebra-mares permitem uma redução da altura de onda a sotamar de até 70%, obtendo na extremidade da restinga uma menor energia das ondas (entre 0.5 e 0.70 m). Em contrapartida, não se verificam alterações significativas das alturas de onda significativas na envolvente do quebramar Norte.

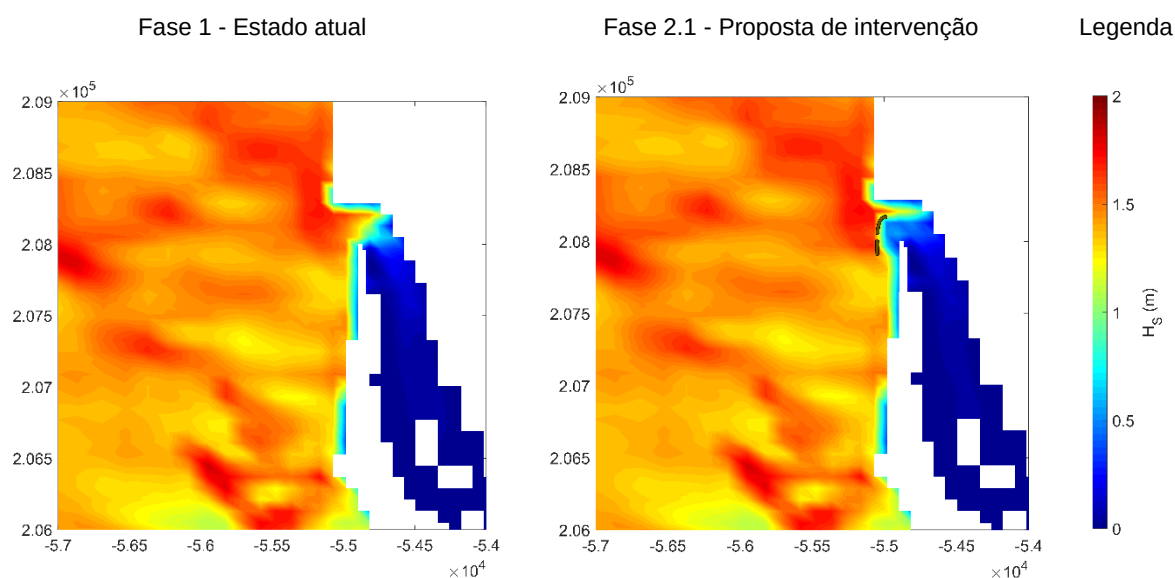


Fig. 79 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.

A Fig. 80 apresenta os resultados obtidos nas simulações para PMAV+SS e $H_s = 5.0$ m. No estado atual as ondas incidentes na entrada da foz e na proximidade da restinga apresentam valores compreendidos entre 1.5 e 2.5 m. Nos cenários com os quebramares implementados verifica-se uma redução da energia das ondas para valores inferiores a 1.7 m a sotamar das estruturas. O quebramar destacado 2, localizado mais a sul, está exposto a ondas de maior amplitude. A Fig. 81 apresenta com maior detalhe a redução da energia das ondas nas proximidades dos quebramares destacados, para um H_s de 1.5 m e 5.0 m.

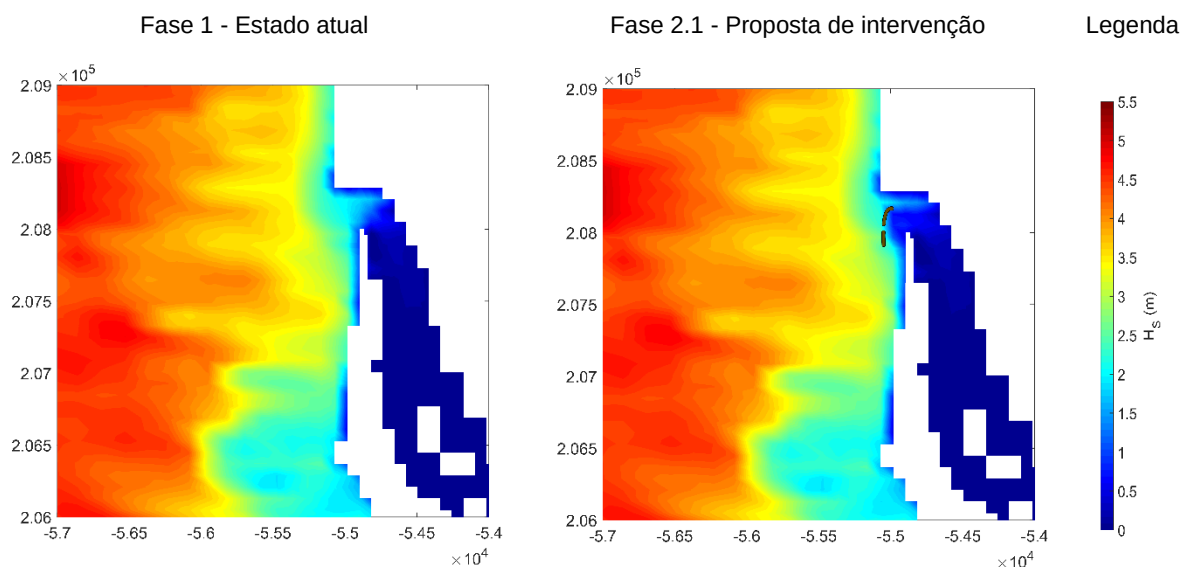


Fig. 80 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e H_s 5.0 m.

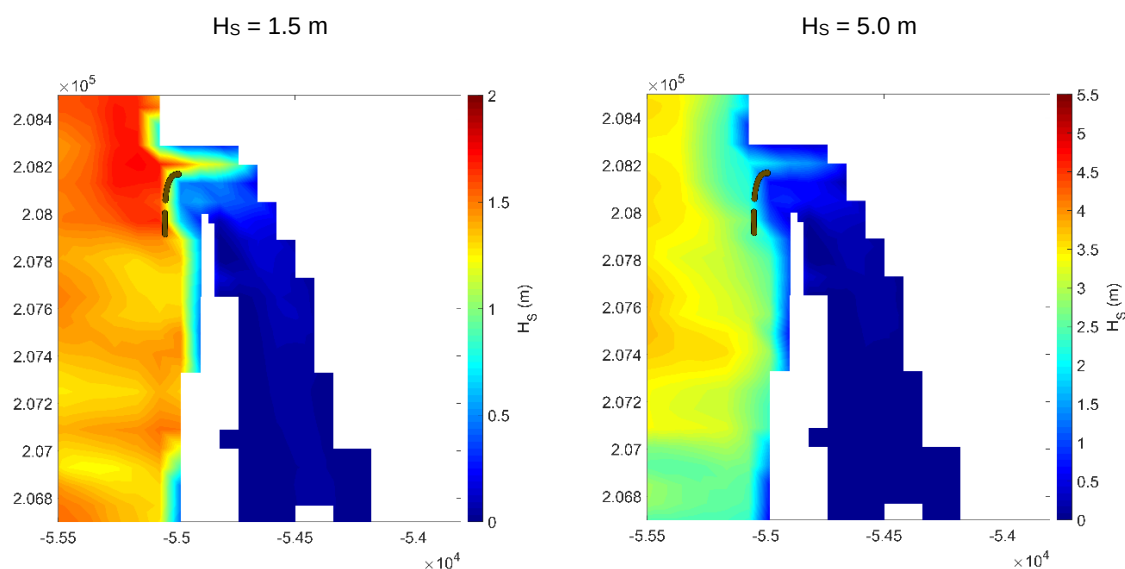


Fig. 81 - Pormenor nos quebramares destacados: cenários com H_s de 1.5 e 5.0 m.

Nas Fig. 82 e Fig. 83 apresentam-se as simulações efetuadas para BMAV e com um H_s de 1.5 e 5.0 m, respetivamente. Na BMAV verifica-se que a ação das ondas não tem influência na foz do rio Cávado nem no canal de navegação. Para estes cenários, conclui-se que a proposta definida não promove alterações significativas na região de estudo.

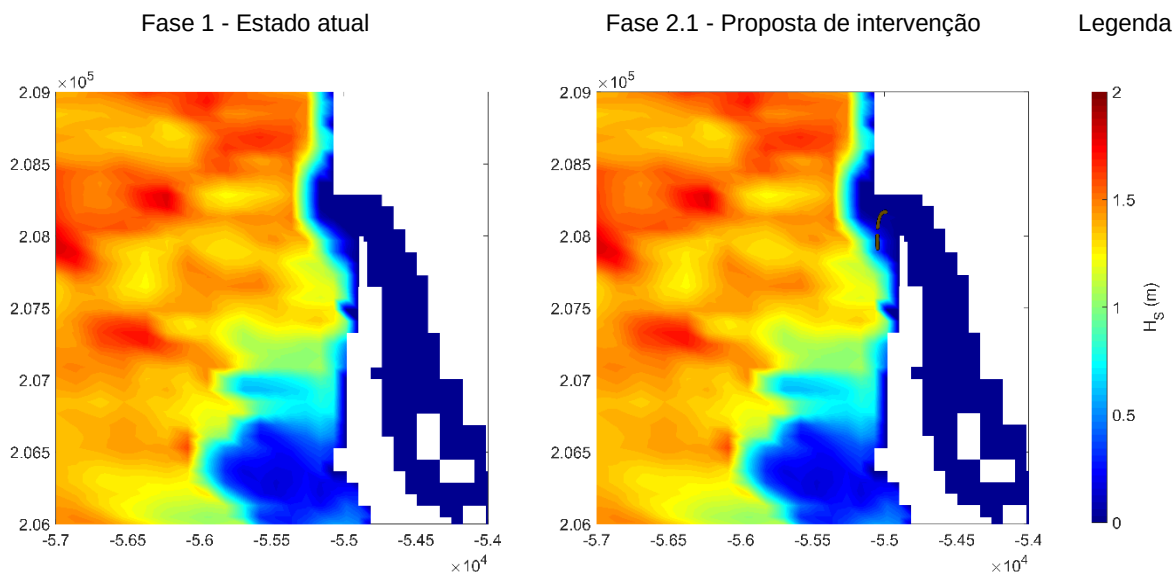


Fig. 82 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.

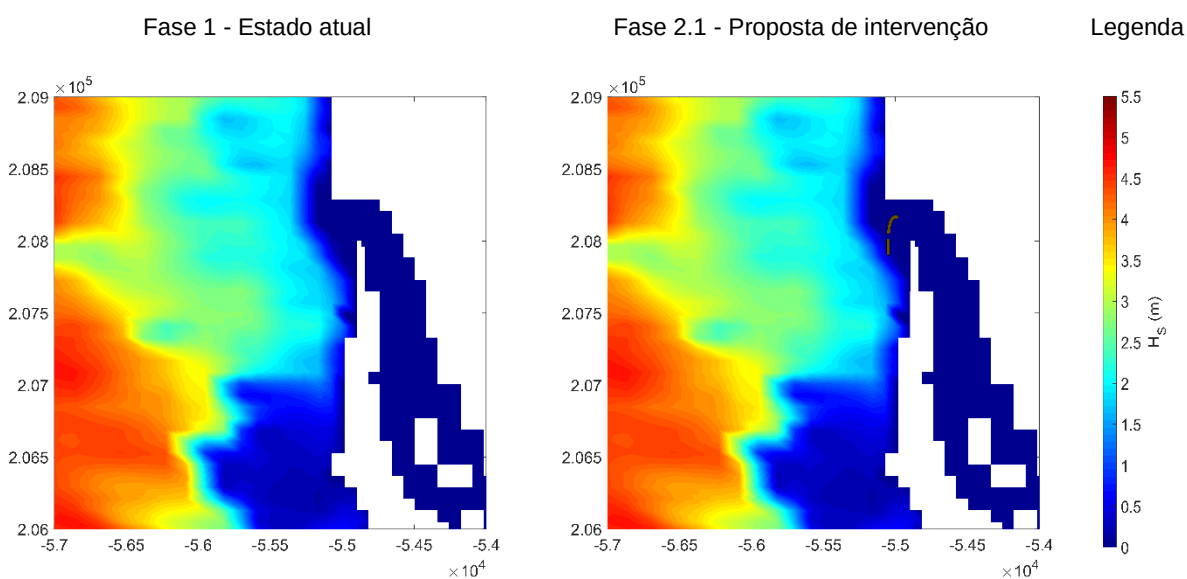


Fig. 83 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 5.0$ m.

Importa referir que em todos os valores de cenários se verifica que as alturas de onda são mínimas ao longo do canal de navegação, apresentando cerca de 0.5 m. Isto deve-se à existência da restinga e à curvatura acentuada que a foz do rio Cávado apresenta. No entanto, salienta-se que a ação marítima que atinge a linha da costa da restinga é considerável, sendo mais intensa nos períodos de PMAV+SS. A existência dos quebramares destacados permite salvaguardar melhor a extremidade Norte da restinga.

Seguidamente, procedeu-se à análise dos registos nos sete pontos de monitorização (Fig. 78), por forma a compreender a influência da proposta de intervenção. A Tabela 22 apresenta as alturas de onda significativas exatas nos pontos P5 a P11, correspondentes aos pontos de envolvimento das estruturas, na fase 1 (situação atual) e na fase 2.1 (com inclusão dos quebramares destacados 1 e 2). Para cada uma

das fases analisadas, três cenários correspondem a um período de BMAV e três a um período de PMAV+SS. Para cada nível de maré foram simuladas três alturas de onda significativas, 1.5, 3.5 e 5.0 m. É possível observar que os pontos P5 e P6 não apresentam registos nos cenários de BMAV. Além disso, verifica-se que os pontos que apresentam maior amplitude de onda são os pontos a sul, P9 e P11.

Tabela 22 – H_s para os pontos de monitorização P5 a P11: Fase 1 e 2.1.

	ID	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Fase 1	Q1_BMAV_HS1.5	-	-	0.36	0.26	0.58	0.33	0.62
	Q1_BMAV_HS3.5	-	-	0.30	0.11	0.53	0.25	0.62
	Q1_BMAV_HS5.0	-	-	0.30	0.12	0.53	0.25	0.62
	Q1_PMAV+SS_HS1.5	1.63	1.52	1.57	1.51	1.57	1.45	1.50
	Q1_PMAV+SS_HS3.5	2.13	2.03	2.32	2.27	2.48	2.29	2.50
	Q1_PMAV+SS_HS5.0	2.14	2.05	2.38	2.32	2.57	2.36	2.61
Fase 2.1	Q1_BMAV_HS1.5	-	-	0.36	0.13	0.59	0.13	0.63
	Q1_BMAV_HS3.5	-	-	0.30	0.05	0.53	0.04	0.62
	Q1_BMAV_HS5.0	-	-	0.30	0.05	0.53	0.04	0.62
	Q1_PMAV+SS_HS1.5	1.68	0.49	1.59	0.81	1.64	1.04	1.56
	Q1_PMAV+SS_HS3.5	2.17	0.69	2.34	1.22	2.54	1.64	2.55
	Q1_PMAV+SS_HS5.0	2.19	0.70	2.40	1.26	2.63	1.70	2.66

Os resultados permitem fazer duas análises: a primeira, nos pontos de monitorização a sotamar da estrutura, ou seja, P6, P8 e P10, através da comparação entre as H_s na situação atual e incluindo a segunda, na situação com estruturas, comparar entre as H_s a barlamar e a sotamar das estruturas.

Relativamente à primeira análise, a Tabela 23 apresenta os coeficientes de redução das H_s em que as percentagens positivas representam a redução e as percentagens negativas o aumento. Ao analisar os resultados obtidos verifica-se que as H_s aumentam ligeiramente nos pontos a barlamar da estrutura. Estes resultados eram esperados tendo em conta que a rebentação das ondas nas estruturas provoca uma oscilação das mesmas devido aos fenómenos de interação onda-estrutura, nomeadamente a reflexão. Relativamente aos pontos a sotamar, é possível concluir que os quebra-mares destacados promovem, em qualquer cenário, a redução da altura de onda significativa.

Tabela 23 – Coeficientes de Redução da H_s entre as Fases 1 e 2.1 (%).

ID	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Q1_BMAV_HS1.5	-	-	0	51	-2	62	-1
Q1_BMAV_HS3.5	-	-	0	60	0	84	0
Q1_BMAV_HS5.0	-	-	0	58	0	84	0
Q1_PMAV+SS_HS1.5	-3	68	-1	46	-4	29	-4
Q1_PMAV+SS_HS3.5	-2	66	-1	46	-2	28	-2
Q1_PMAV+SS_HS5.0	-2	66	-1	46	-3	28	-2

As Fig. 84, Fig. 85 e Fig. 86 apresentam os resultados dos três pontos de monitorização, localizados imediatamente a sotamar dos quebra-mares destacados para os cenários no estado atual e com a inclusão destas estruturas. Relativamente ao P6 e recorrendo à Tabela 23, verifica-se uma maior redução da altura

de onda significativa nos cenários em PMAV+SS, entre 66% a 88%. No ponto P8, as reduções são significativas para os dois níveis de maré, apresentando reduções entre 50% a 60% em BMAV e 46 % em PMAV+SS. No caso do ponto P10, os resultados apresentam uma maior redução em BMAV compreendidos entre 60% a 85%, enquanto nos períodos de PMAV+SS a redução é inferior a 30%.

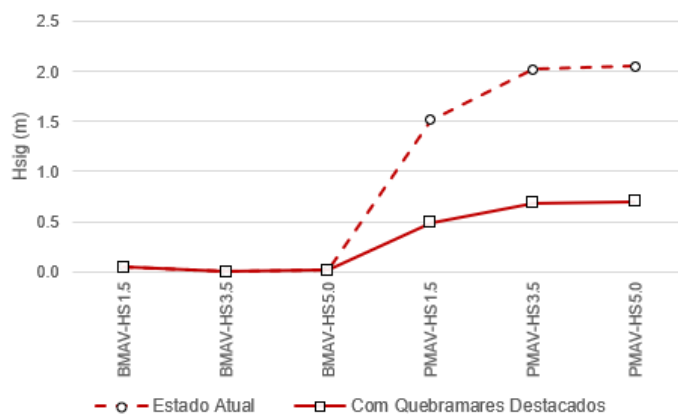


Fig. 84 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 6.

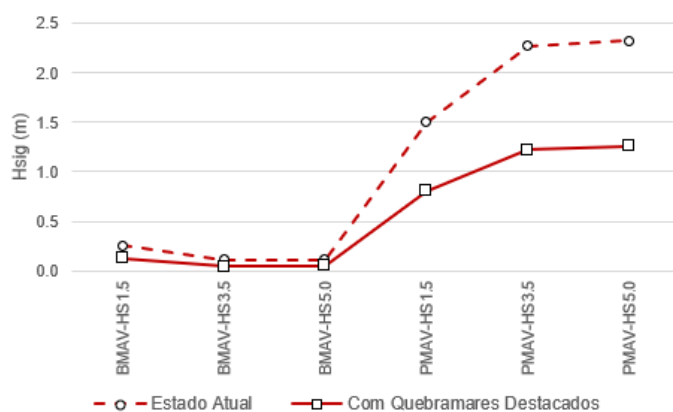


Fig. 85 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 8.

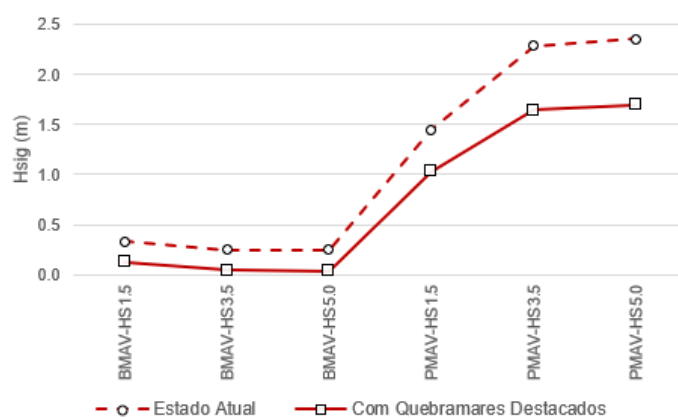


Fig. 86 - Alturas de onda significativas no ponto de monitorização 10.

A segunda análise, efetuada com base na Tabela 24, permite observar as variações dos coeficientes de transmissão entre os pontos adotados. Salienta-se que embora se tenha introduzido os pontos P1, P2, P3 e P4 no modelo, estes não foram analisados uma vez que as H_s e as suas oscilações são mínimas, tendo cada vez menos influência no interior do canal de navegação.

É possível verificar que os pontos P10-P11 em PMAV+SS apresentaram os coeficientes de transmissão mais elevados, entre 63% a 65%. Além disso é possível observar, em qualquer conjunto de pontos, que o coeficiente de transmissão aumenta com o nível do mar e com a altura de onda significativa. Salienta-se que os resultados da Tabela 24 são aproximados e que a adoção de pontos com outras localizações podem revelar valores significativamente distintos dos apresentados.

Tabela 24 – Coeficiente de transmissão entre os pontos P5-P6, P8-P9, P10-P11 na fase 2.1 (%).

ID	P5-P6	P8-P9	P10-P11
Q1_BMAV_HS1.5	-	36	21
Q1_BMAV_HS3.5	-	15	8
Q1_BMAV_HS5.0	-	16	8
Q1_PMAV+SS_HS1.5	29	51	63
Q1_PMAV+SS_HS3.5	32	52	65
Q1_PMAV+SS_HS5.0	32	53	65

4.6.1.2 Análise das velocidades junto ao fundo

De seguida serão analisadas as velocidades junto dos fundos provocadas pelas condições hidrodinâmicas (amplitude da maré, escoamento fluvial e agitação marítima) para duas descargas fluviais: em primeiro lugar, para um caudal de 150 m³/s (Q1) e posteriormente, para um caudal extremo de 800 m³/s (Q2).

Nas Fig. 87 e Fig. 88 apresentam-se os resultados obtidos para as velocidades do escoamento junto ao fundo nas simulações de BMAV. Para um H_s de 1.5 m e no estado em que se encontra atualmente a zona de estudo, é possível verificar que os sedimentos são arrastados predominantemente no final do canal de navegação, para a margem direita, com uma orientação SW-NE e com uma velocidade superior a 1 m/s. Adicionalmente, o escoamento desloca-se para a entrada da embocadura com direção W.

Já para um H_s de 5.0 m, após sair da foz, o escoamento é encaminhado para sul com uma distribuição mais dispersa. Relativamente às simulações com os quebramares destacados, a alteração hidrodinâmica e morfodinâmica é significativa em BMAV. As estruturas conduzem o escoamento da foz do rio Cávado em direção a sul pela zona abrigada.

Relativamente às simulações em PMAV+SS (Fig. 89) verifica-se, no interior do estuário, uma circulação de sedimentos em direção à margem direita do canal de navegação, com distribuição semelhante ao verificado para BMAV. No entanto, verifica-se que a velocidade obtida é significativamente inferior quando comparada com a situação de BMAV, estando compreendida entre os 0.15 e os 0.35 m/s.

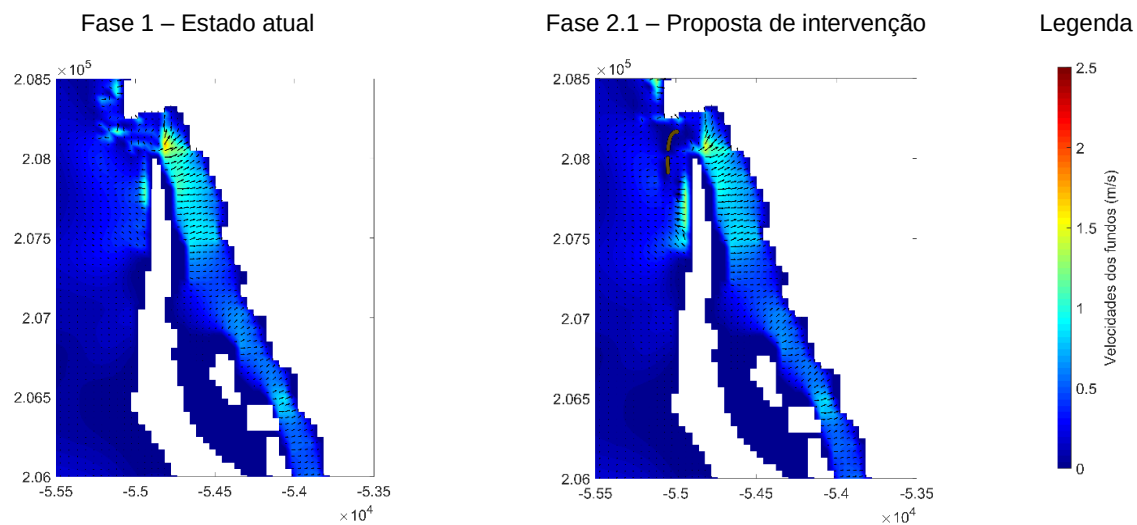


Fig. 87 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 1.5$ m.

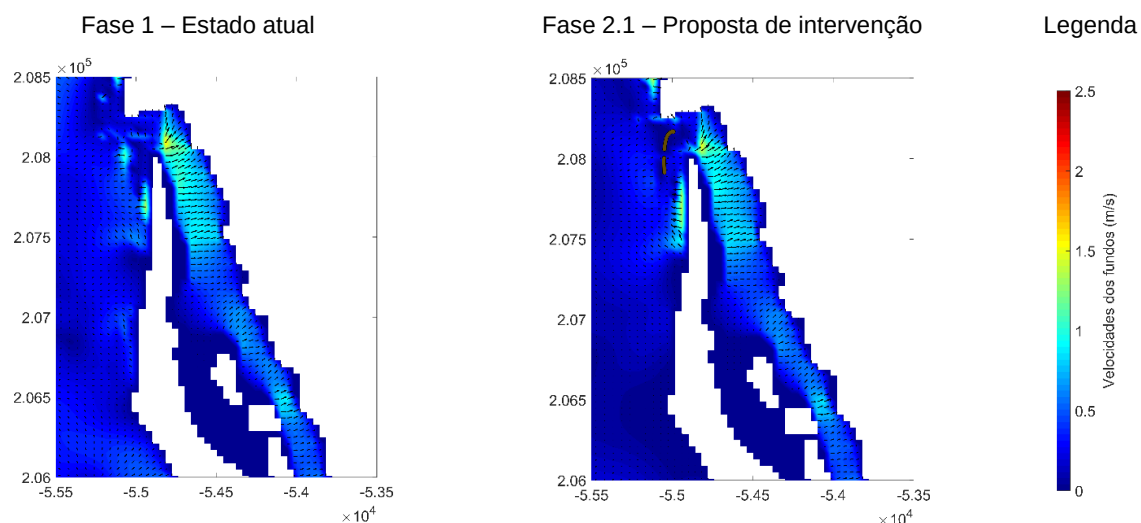


Fig. 88 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 5.0$ m.

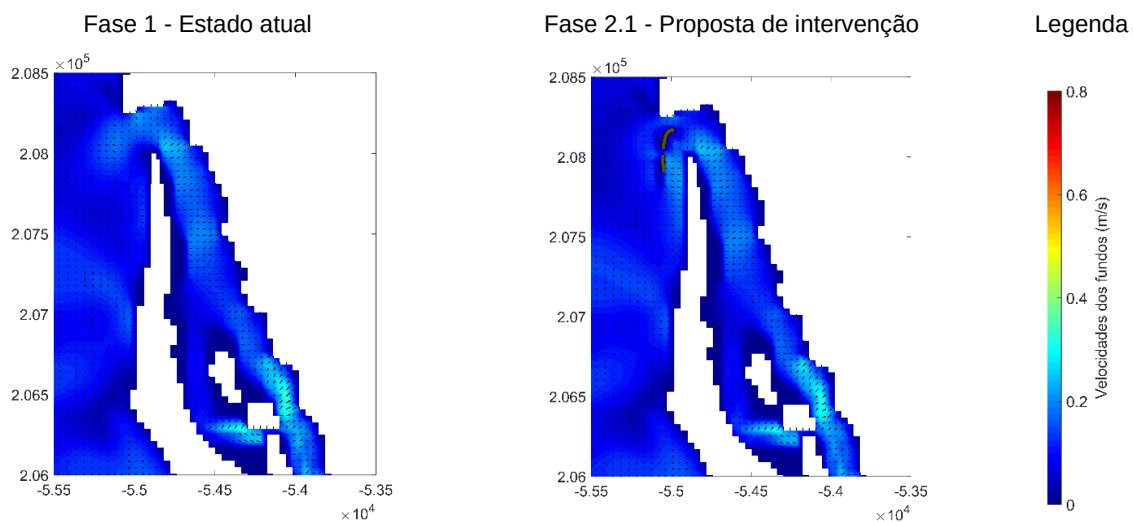


Fig. 89 - Parâmetros das simulações: Q1, PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.

A Fig. 90 apresenta os resultados obtidos das velocidades do escoamento junto ao fundo nas simulações de BMAV para um caudal extremo de $800 \text{ m}^3/\text{s}$ e para H_s de 1.5 e 5.0 m. A ocorrência de um caudal extremo desencadeia alterações no sistema estuarino sob influência da descarga fluvial, não se sentindo qualquer alteração nas alturas de onda significativas.

Neste sentido, pode-se concluir que as velocidades junto dos fundos são intensas na generalidade do canal de navegação, apresentando valores compreendidos entre 1.25 e 3.0 m/s. O caudal extremo desencadeia velocidades superiores a 3.0 m/s no canal de aproximação à embocadura. Estas velocidades ocorrem devido ao estreitamento do canal até à embocadura e ao limite da extremidade da restinga. O escoamento fluvial sai da embocadura em forma de jato com velocidades ainda significativas, acabando por se dissipar em profundidades de água maiores.

A inclusão dos quebramares destacados permite travar parcialmente a circulação dos sedimentos para o oceano, encaminhando-os pela zona abrigada das estruturas, em direção a sul.

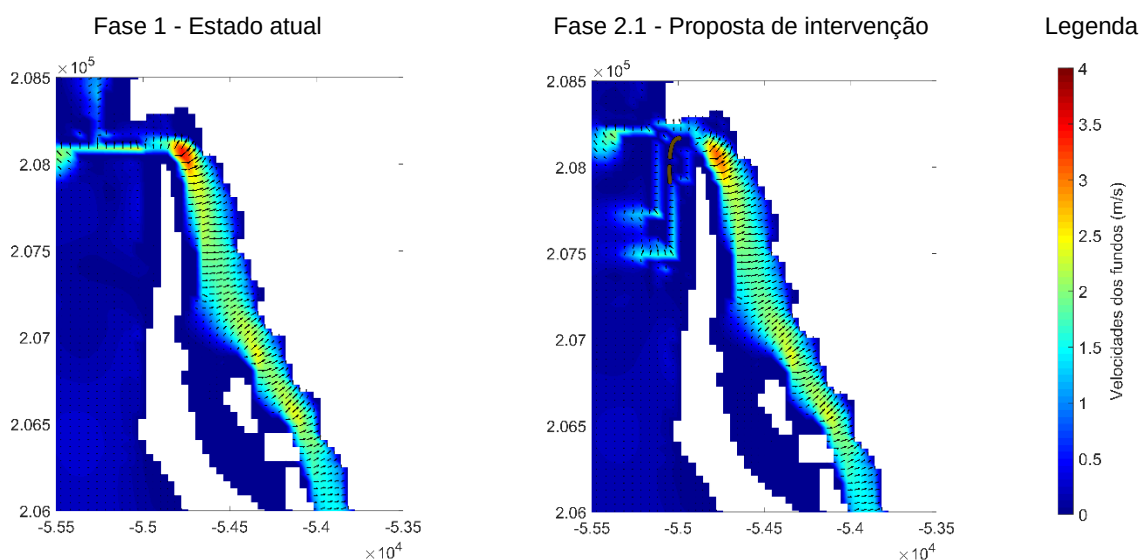


Fig. 90 - Parâmetros das simulações: Q2, BMAV.

Relativamente aos cenários em PMAV+SS, apresentados na Fig. 91 e na Fig. 92, verifica-se uma velocidade junto dos fundos no interior do estuário inferior quando comparado com a BMAV, com velocidades entre 0.5 e 2.0 m/s. No entanto, a foz do rio Cávado apresenta velocidades elevadas entre 1.5 e 3.5 m/s com um escoamento em jato em direção ao oceano.

A inclusão dos quebramares destacados permite dispersar o escoamento para diferentes direções e minimizar as velocidades na foz do rio Cávado. Além disso, permite encaminhar o escoamento pela zona abrigada das estruturas, para sul.

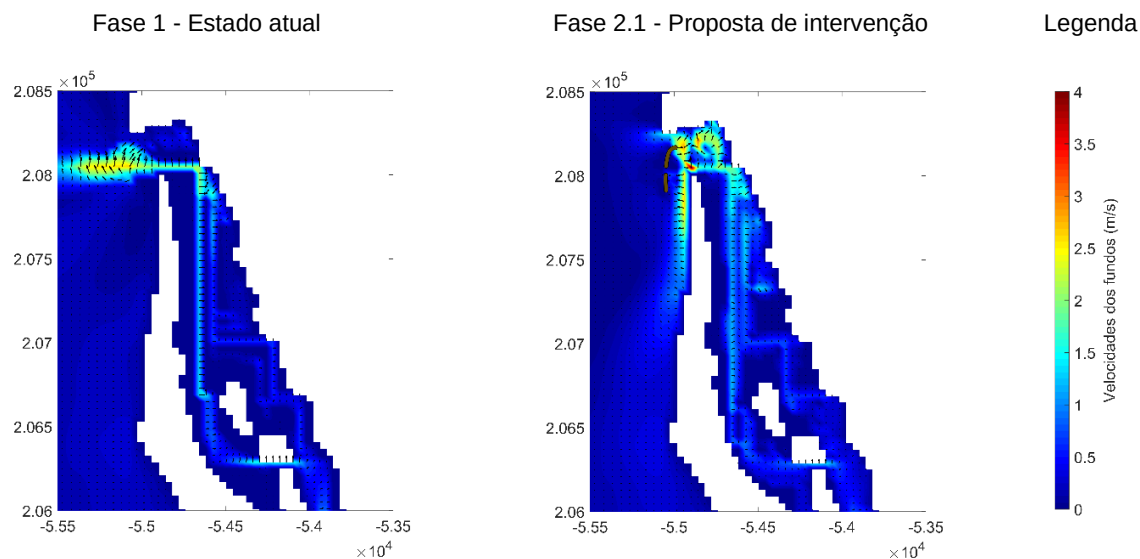


Fig. 91 - Parâmetros das simulações: Q2, PMAV+SS 1.5 m.

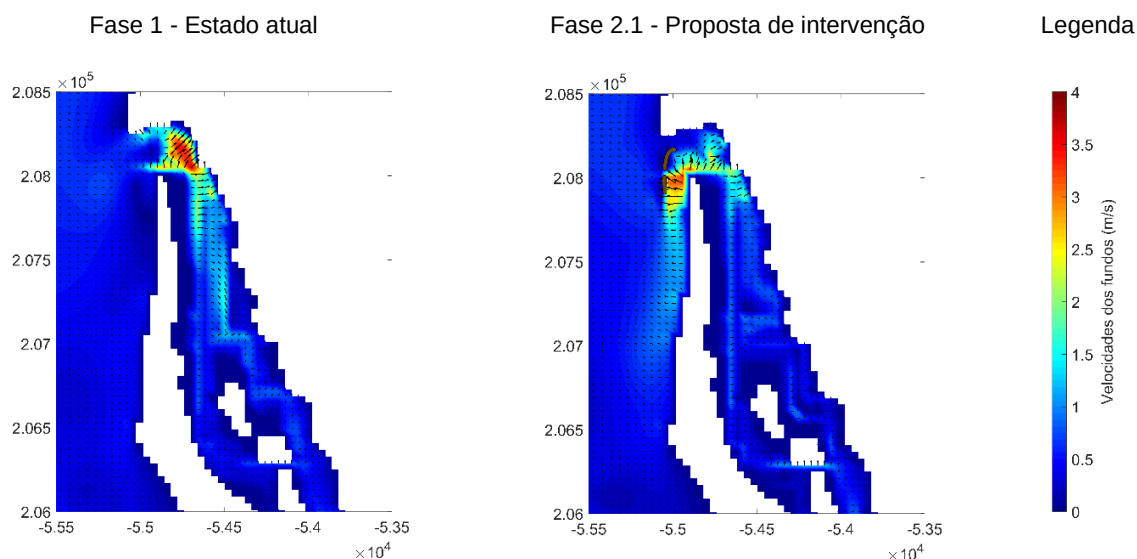


Fig. 92 - Parâmetros das simulações: Q2, PMAV+SS e $H_s = 5.0$ m.

4.6.1.3 Análise das tendências gerais de erosão/deposição

Para avaliar as variações morfológicas da zona de estudo, mais precisamente na foz do rio Cávado e na extremidade Norte da restinga, foi considerado um diâmetro médio dos sedimentos constante e igual a 0.5 mm para uma camada com uma espessura de 5 m. O estudo dos fenómenos de erosão e deposição consistiu na análise qualitativa entre os cenários da situação atual e com a proposta de intervenção para os cenários de BMAV, com alturas de onda significativas de 1.5 e 5.0 m e para os caudais de 150 e 800 m^3/s .

Nas Fig. 93, Fig. 94 e Fig. 95 observa-se que a entrada da foz do rio Cávado é alvo de uma erosão intensa (representado a azul) provocada pelas velocidades elevadas do escoamento junto dos fundos. Além disso, nas proximidades da entrada da foz verifica-se uma acumulação sedimentar que acompanha o

fenómeno de erosão. O quebramar Norte também é alvo de erosão nas proximidades da estrutura, podendo pôr em causa a sua estabilidade. Quanto à restinga propriamente dita, esta está exposta aos dois fenómenos. Salienta-se que para um caudal extremo (Fig. 95) ambos os fenómenos ganham proporções acrescidas, apresentando erosão em toda a embocadura, potenciando a fragilidade do quebramar Norte e da extremidade da Restinga.

Quanto à existência dos quebramares destacados, desta análise é possível observar o comportamento dos fenómenos erosão/acrecção na envoltória das estruturas. Grande parte dos sedimentos provenientes do estuário são encaminhados para a zona abrigada da estrutura. Além disso, a inclusão dos quebramares permite aumentar o volume de sedimentos depositados ao longo da restinga de forma natural. Relativamente à erosão, embora minimizada, mantém-se na foz do rio Cávado e ao longo da restinga, tornando a extremidade da restinga facilmente erodível. Importa referir que, para um caudal extremo (Fig. 95), os quebramares destacados estão sujeitos a erosão a barlar e nas extremidades de ambas as estruturas, pondo em causa a sua estabilidade. Quanto ao interior do estuário, importa referir que, para um caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ os resultados não apresentaram grandes variações, sendo que os fenómenos de erosão/deposição são mínimos. Isto poderá estar relacionado com a resolução limitada da carta náutica no interior do estuário e com as simplificações efetuadas na caracterização dos sedimentos por falta de dados para os caracterizar com rigor. Em contrapartida, verifica-se que para um caudal extremo o canal de navegação apresenta zonas de erosão significativas.

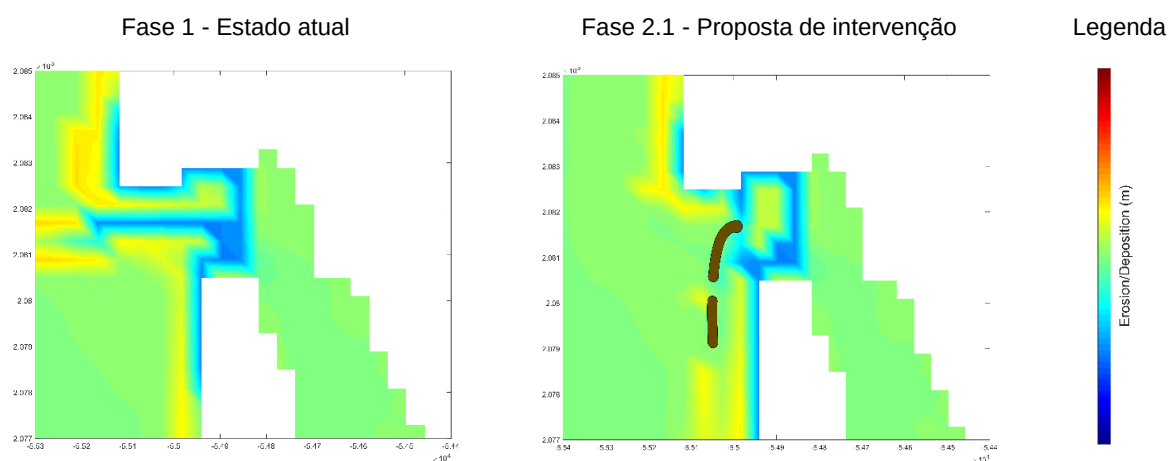


Fig. 93 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 1.5 \text{ m}$.

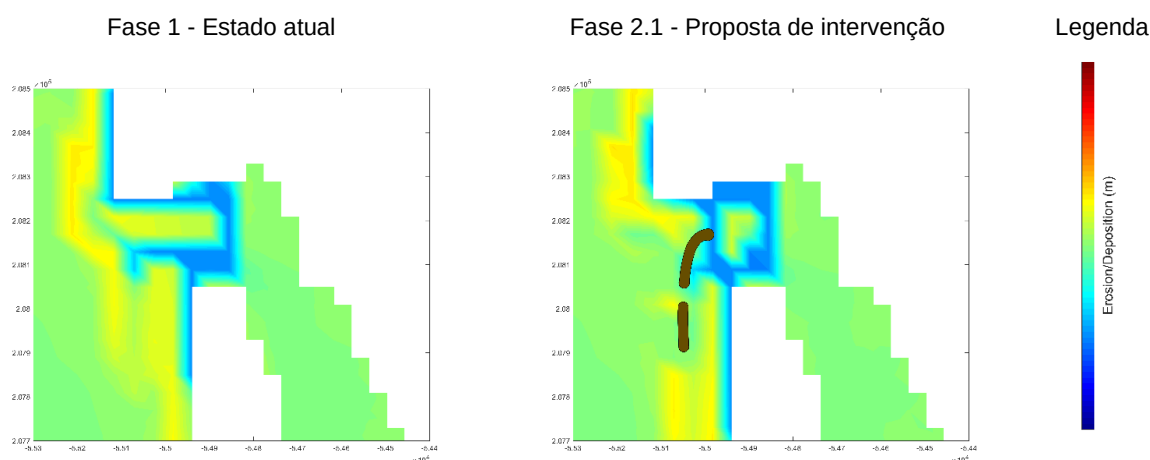


Fig. 94 - Parâmetros das simulações: Q1, BMAV e $H_s = 5.0 \text{ m}$.

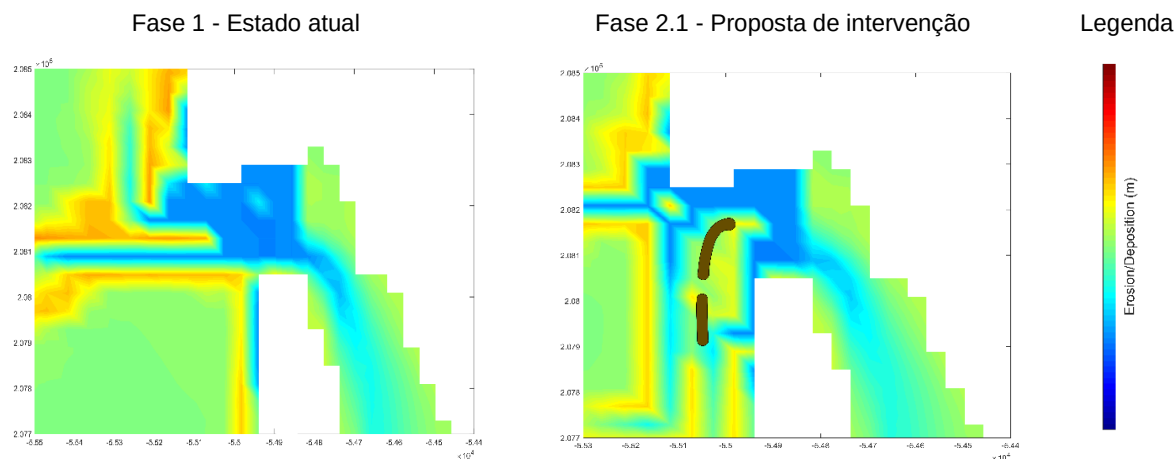


Fig. 95 - Parâmetros das simulações: Q2, BMAV e $H_s = 1.5$ m.

4.6.2 CENÁRIOS DAS FASES 1 E 2.2

4.6.2.1 Análise das alturas de onda significativas

Esta análise incide nos cenários para as amplitudes de maré de PMAV+SS, uma vez que na análise anteriormente efetuada na fase 2.1 se verificou que a proposta de intervenção não desencadeia consequências significativas na hidrodinâmica da foz do rio Cávado em BMAV. Foram simulados os cenários com as alturas de onda significativas de 1.5 e 5.0 m, um período de pico de 10 s e um rumo da agitação de 292°. A proposta da fase 2.2 integra a implementação de uma estrutura longitudinal a sotamar da restinga. Neste sentido, de seguida serão comparados os resultados para o estado atual e a proposta de intervenção da fase 2.2.

A Fig. 96 apresenta os resultados para o cenário de PMAV+SS e para um H_s de 1.5 m. O estado atual mantém-se semelhante ao que se apresentou para o mesmo cenário na seção 4.6.1.2, possuindo alturas de onda significativas na entrada da foz do rio Cávado entre 0.75 a 1.70 m. Salienta-se uma vez mais que a geometria da restinga e da foz do rio Cávado são os principais fatores que mitigam a ação da agitação marítima no interior do estuário. Quanto à inclusão de uma estrutura longitudinal, localizada na margem do rio da restinga, o efeito das alturas de onda significativas são reduzidos.

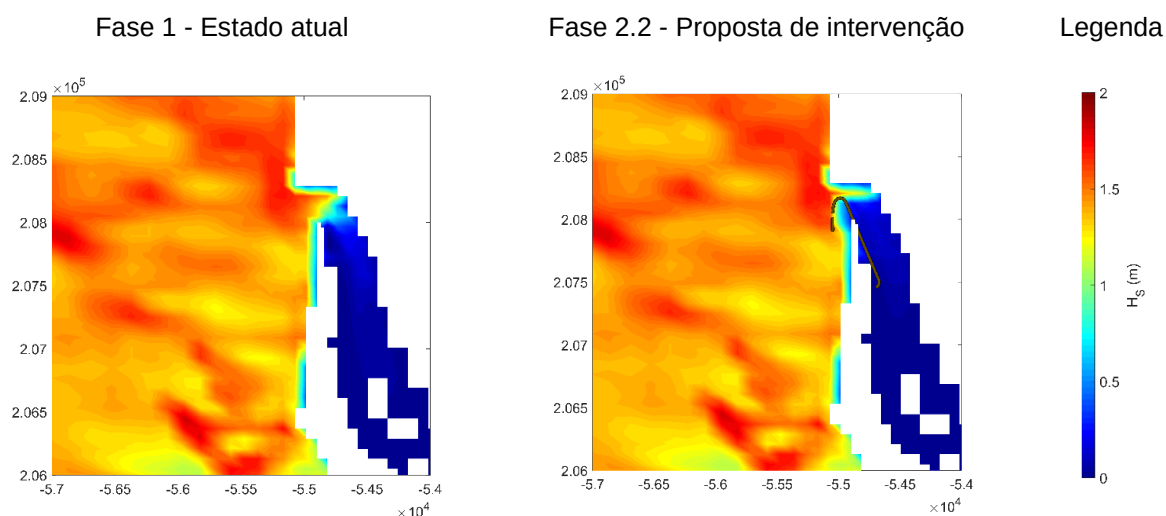


Fig. 96 - Parâmetros das simulações: Q1, PMAV e $H_s = 1.5$ m.

Para este parâmetro também foram analisados para PMAV+SS as H_s nos pontos de monitorização P5 e P6, a barlar e a sotamar do quebramar destacado, respetivamente. Isto porque as geometrias das soluções adotadas têm influência nos fenómenos resultantes da interação onda-estrutura.

Através da Tabela 25 é possível observar que para as diferentes fases, o ponto P5 é semelhante. No que respeita ao ponto P6, verifica-se que na fase 2.1, com a inclusão dos quebramares destacados 1 e 2, há uma maior redução das alturas de onda significativas a sotamar das estruturas, representando assim um menor coeficiente de transmissão. Por oposição, a existência do dique permite uma maior reflexão, resultando em alturas de onda significativas superiores a sotamar da estrutura, quando comparado com a fase anterior.

Tabela 25 - Resultados das H_s para os pontos de monitorização P5 a P11: Fases 1, 2.1 e 2.2.

ID	Fase 1		Fase 2.1		Fase 2.2	
	P5	P6	P5	P6	P5	P6
Q1_PMAV+SS_HS1.5	1.63	1.52	1.68	0.49	1.67	0.65
Q1_PMAV+SS_HS3.5	2.13	2.03	2.17	0.69	2.18	0.91
Q1_PMAV+SS_HS5.0	2.14	2.05	2.19	0.70	2.18	0.92

4.6.2.2 Análise das velocidades junto ao fundo

Relativamente às velocidades junto do fundo, o estudo consistiu em analisar a tendência do transporte dos mesmos para os períodos de BMAV e PMAV+SS para um caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$. A Fig. 97 ilustra os resultados obtidos das velocidades junto dos fundos nas simulações relativas à BMAV e para um H_s de 1.5 m.

No estado atual, as velocidades são orientadas predominantemente para a margem direita do canal de navegação. As correntes de vazante transportam os sedimentos para o oceano e têm tendência a formar um delta de vazante, na entrada da foz do rio Cávado.

As simulações com os quebramares destacados e a estrutura longitudinal mostram que é possível transportar o escoamento do interior do estuário para sul, na envolvente dos quebramares destacados. No canal de navegação verifica-se que a estrutura permite proteger o lado Este da restinga, aumentando a área que não está em contacto com os impactos provocados pelo escoamento proveniente de montante. Em contrapartida, a diminuição da seção do canal de navegação, pela existência do dique, origina velocidades de arrastamento dos fundos superiores quando comparado com a situação atual.

A Fig. 98 apresenta os resultados obtidos para a PMAV+SS e uma H_s de 1.5 m. De um modo geral, pode-se verificar que as velocidades em toda a zona de estudo são inferiores às observadas para a BMAV, obtendo-se velocidades máximas de cerca de 0.4 m/s . Relativamente à simulação com a proposta de intervenção é possível concluir que o estreitamento do canal (com a existência do dique) gera velocidades mais intensas na entrada do estuário do rio Cávado, quando comparado com o estado atual, e manifesta uma tendência em transportar os sedimentos em direção ao quebramar Norte.

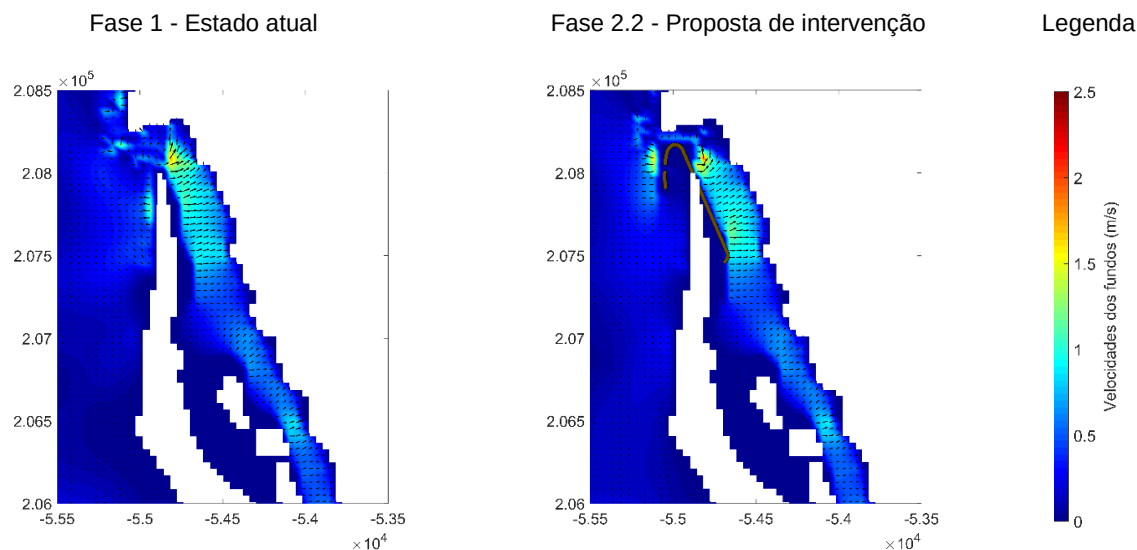


Fig. 97 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.

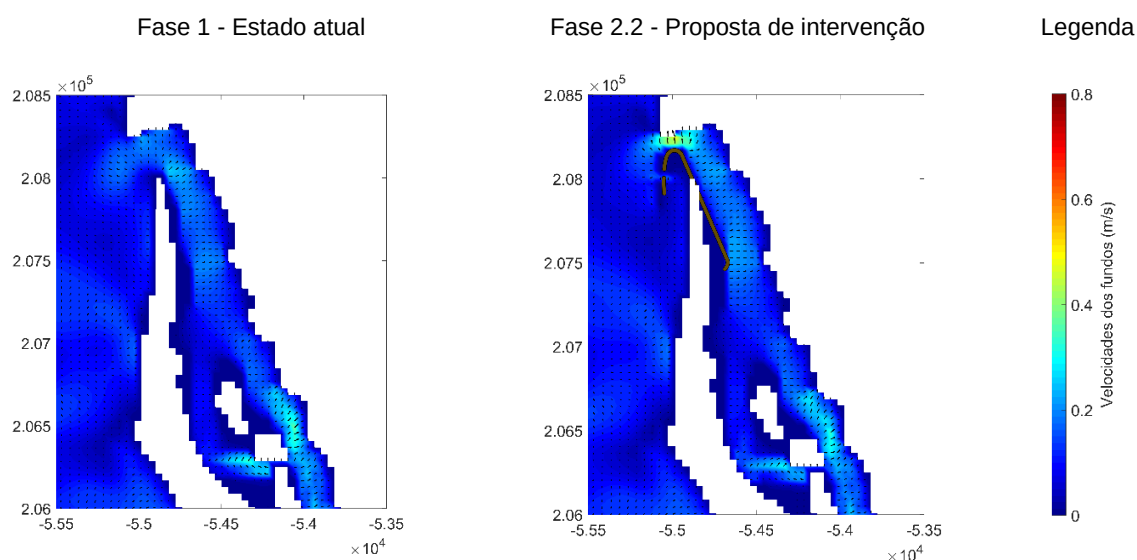


Fig. 98 - Parâmetros das simulações: PMAV+SS e $H_s = 1.5$ m.

4.6.2.3 Análise das tendências gerais de erosão/deposição

Para a fase 2.2., a análise das variações morfológicas consistiu numa comparação qualitativa entre os cenários da situação atual e com a proposta de intervenção para os cenários de BMAV e com um caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Face à resolução da batimetria utilizada, esta análise foi efetuada tendo em vista identificar as tendências gerais dos fenómenos de erosão e deposição.

Nas Fig. 99 e Fig. 100 verifica-se uma tendência erosiva na entrada da foz do rio Cávado devido às velocidades junto dos fundos resultantes da BMAV. Associado a este fenómeno, observa-se a acumulação de sedimentos nas proximidades laterais das zonas onde ocorre erosão.

A deposição também verificada na entrada da foz do rio Cávado poderá estar associada a cotas mais elevadas dos fundos, promovendo essa deposição. O quebramar Norte e a extremidade da restinga também são alvo de erosões significativas.

A existência da estrutura longitudinal garante a proteção da extremidade Norte da restinga face às correntes resultantes do período de vazante, que potenciam a erosão. No entanto, estas velocidades permanecem na foz do rio Cávado, mantendo o efeito da erosão nessa zona. Os sedimentos arrastados do interior do estuário são encaminhados para sul através do contorno da estrutura longitudinal. A abertura entre os quebramares 1 e 2 permite encaminhar parte desses sedimentos em direção à extremidade da Restinga. A restante parte dos sedimentos vai depositando no oceano e ao longo da linha de costa da restinga.

Das duas alturas de onda significativas analisadas, verifica-se que para um H_s de 5.0 m à uma maior deposição na extremidade da restinga. Isto deve-se porque as ondas de maior energia provocam maior turbulência e transportam mais sedimentos, nomeadamente suspensos.

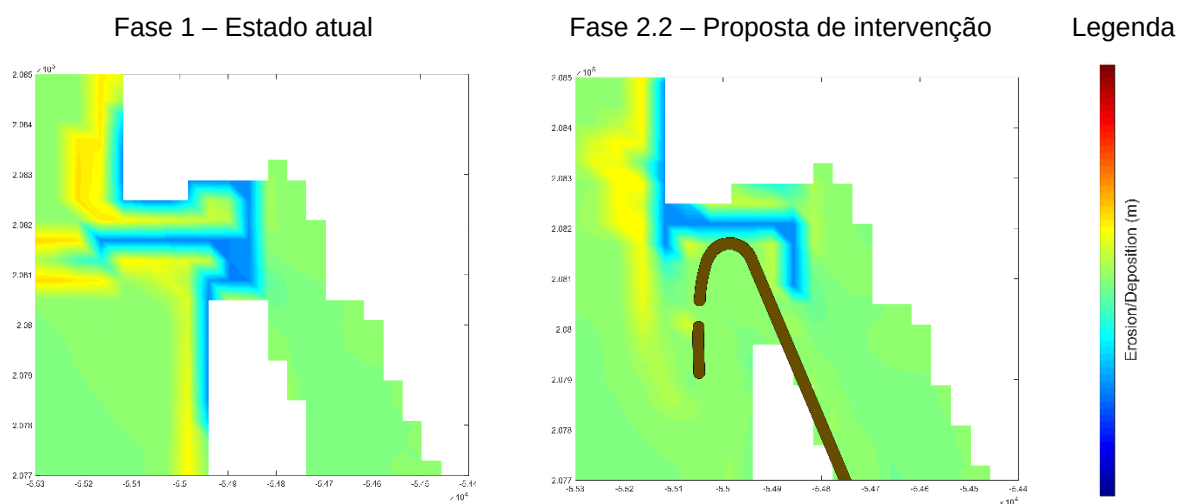


Fig. 99 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 1.5$ m.

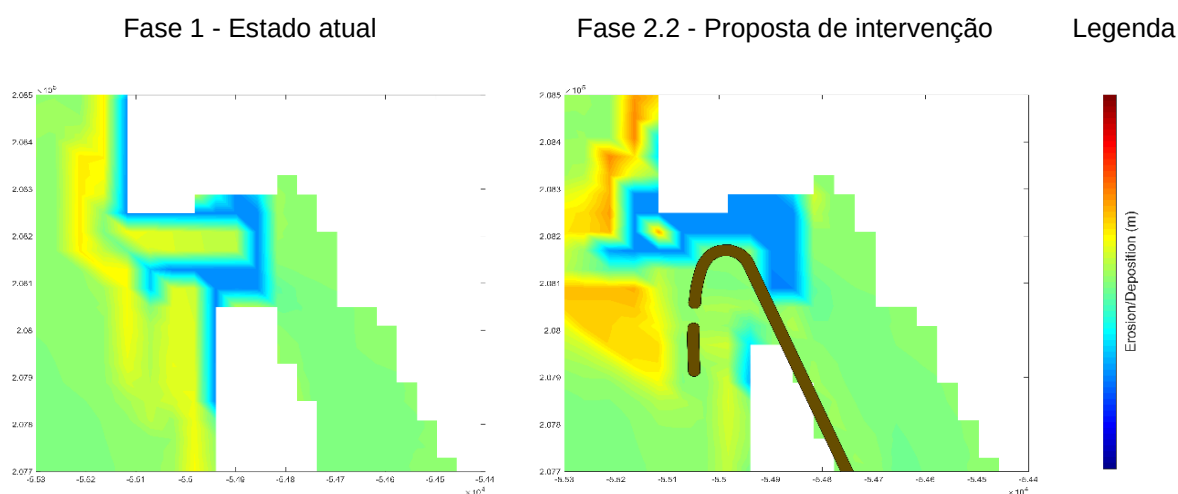


Fig. 100 - Parâmetros das simulações: BMAV e $H_s = 5.0$ m.

4.7 ANÁLISE DE RESULTADOS PARA UMA MALHA MAIS REFINADA

Para alguns cenários e com a malha do módulo FLOW inicialmente adotada, considerando-a inicialmente adequada, face ao fator tempo e aos objetivos da presente dissertação, ou seja, com uma resolução de 40x40, obtiveram-se resultados pouco satisfatórios. Os cenários que apresentaram esses resultados são os referentes ao caudal extremo de 800 m³/s, tanto para BMAV como para PMAV+SS.

Através da seção 4.6.1.2 e da Fig. 90, Fig. 91 e Fig. 92 é possível observar que o escoamento orientado do interior do estuário sai da foz do rio Cávado em direção ao oceano sob a forma de um jato estreito e com uma dispersão não gradual. Assim sendo, por forma a compreender melhor os fenómenos existentes na foz do rio Cávado, criou-se uma malha do módulo FLOW mais refinada, com uma resolução de 20x20.

As simulações com uma malha mais refinada carecem de um maior tempo computacional e permitem obter uma maior quantidade de *outputs*. Neste sentido, uma análise com uma malha deste tipo necessita de um estudo mais prolongado para que seja possível analisar todos os cenários selecionados segundo os processos físicos de interesse para a presente dissertação.

De seguida será apresentada uma avaliação geral das velocidades junto ao fundo e dos fenómenos de erosão/deposição para dois cenários efetuados com a malha 20x20. Será feita a comparação entre a situação atual (Fase 1) e a situação com a inclusão dos quebramares destacados 1 e 2 (Fase 2.1).

4.7.1 ANÁLISE DAS VELOCIDADES JUNTO AO FUNDO

A análise das velocidades junto ao fundo incide nos cenários para um caudal extremo de 800 m³/s (Q2), para as amplitudes de maré de BMAV e PMAV+SS, com alturas de onda significativas de 1.5 m, um período de pico de 10 s e um rumo da agitação de 292°.

A Fig. 101 apresenta as velocidades obtidas do escoamento junto ao fundo num cenário de BMAV. Através desta é possível verificar a transição suavizada das velocidades do escoamento ao longo do canal de navegação. As velocidades aumentam à medida que a seção do canal estreita, apresentando velocidades da ordem dos 2 m/s. Além disso, a simulação com uma malha mais refinada permitiu resolver a dispersão do escoamento do interior do estuário na saída da foz do rio Cávado para o oceano, apresentando uma maior área do jato divergente.

A inclusão dos quebramares destacados permite dividir o escoamento em três direções distintas, nomeadamente, a Norte da extremidade Norte do quebramar destacado 1, entre os quebramares destacados em direção Oeste, e a Sul da extremidade Sul do quebramar destacado 2.

Quanto às simulações em PMAV+SS, Fig. 102, verifica-se um comportamento semelhante do escoamento junto aos fundos quando comparado com a BMAV, mas menos intenso. Assim sendo, verifica-se que a velocidade obtida nas seções mais estreitas do canal de navegação e na foz do rio Cávado está compreendida entre 1.00 e 1.50 m/s.

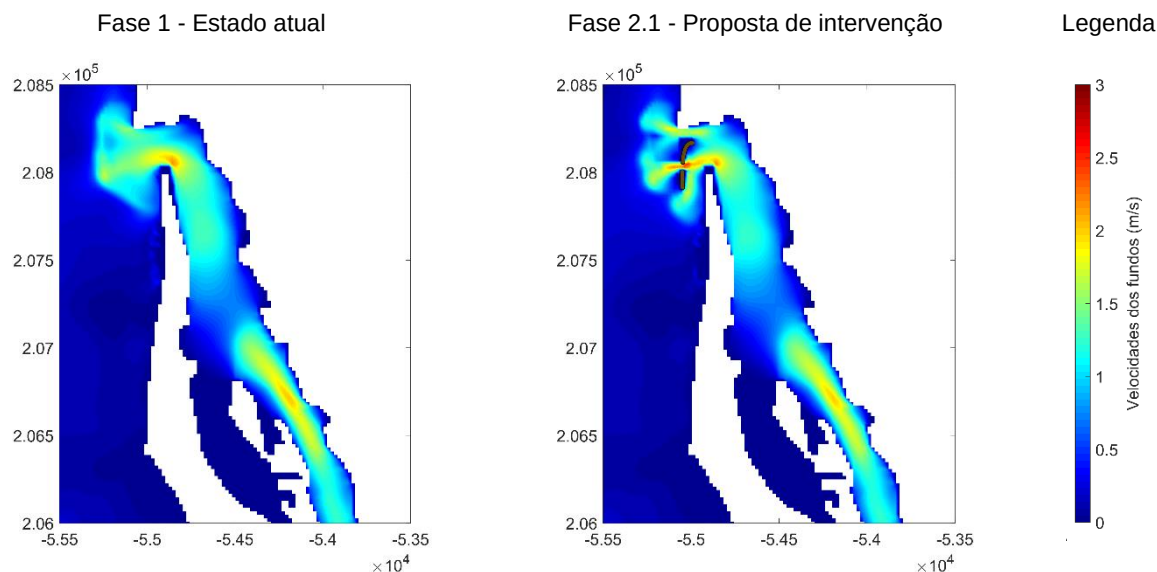


Fig. 101 - Simulações com a malha 20x20: Q2, BMAV.

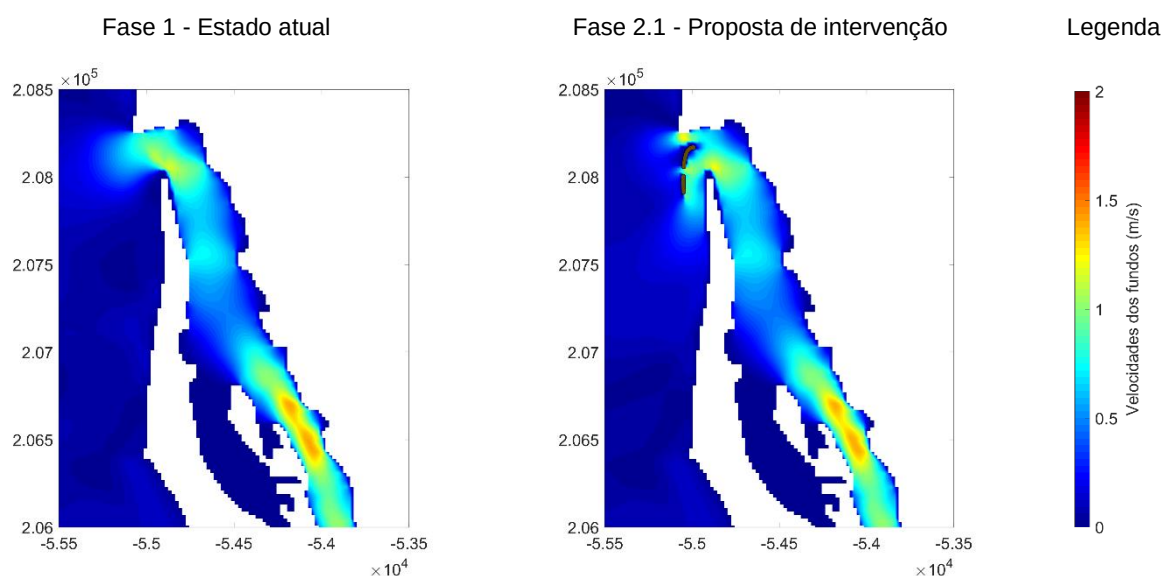


Fig. 102 - Simulações com a malha 20x20: Q2, PMAV+SS.

4.7.2 ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS GERAIS DE EROÇÃO/DEPOSIÇÃO

Relativamente aos fenómenos de erosão/deposição e com uma malha mais refinada de 20x20, foi efetuada a simulação de um cenário correspondente a um caudal extremo de 800 m³/s, com altura de onda significativa de 1.5 m e em BMAV. Os resultados obtidos para o cenário mencionado foram mais satisfatórios quando comparados com a malha inicialmente adotada de 40x40.

Através da Fig. 103 é possível verificar que ocorre erosão ao longo do canal de navegação, mas que este fenómeno é intensificado com o aproximar da foz, em direção à extremidade Norte da restinga. Na proximidade do quebramar Norte a erosão também é significativa.

A inclusão dos quebramares destacados intensifica a erosão na proximidade do quebramar Norte, entre os quebramares destacados e não minimiza a erosão na extremidade Norte na restinga. No entanto, é possível observar que as estruturas também promovem a acumulação de sedimentos na sua envolvente, tanto na zona abrigada, potenciando a alimentação natural na extremidade da Restinga do lado do oceano, bem como na zona da frente oceânica.

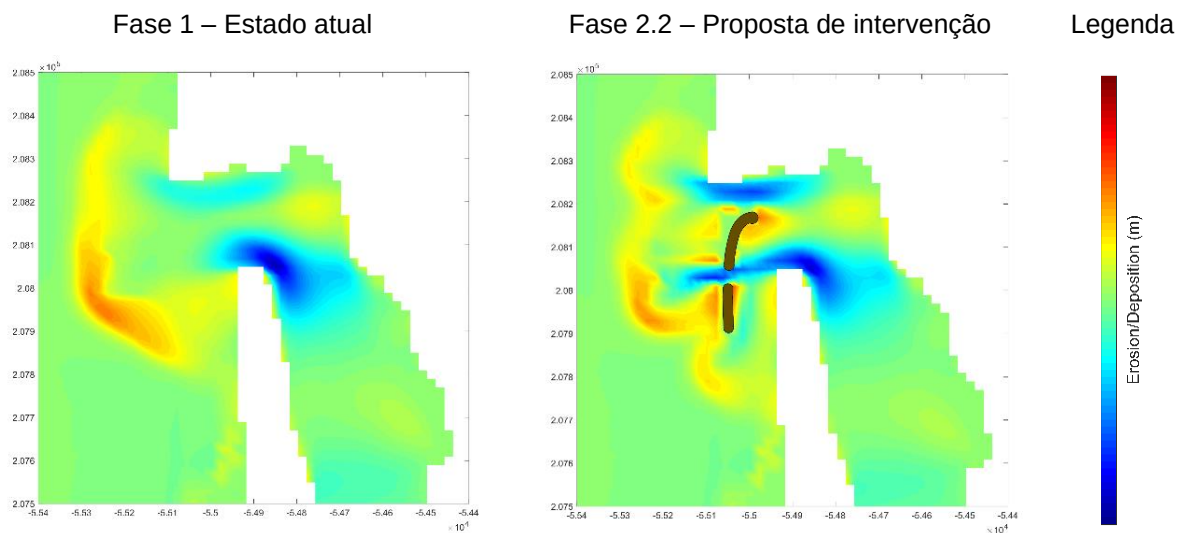


Fig. 103 - Simulações com a malha 20x20: Q2, BMAV e $H_s = 1.5$ m.

5

CONCLUSÕES

Desde finais do séc. XVIII que a restinga de Esposende tem vindo a apresentar instabilidades morfológicas significativas que afetam o canal de navegação, comprometendo as condições de segurança de navegabilidade. Além disso, a ocorrência de eventos extremos tem originado ruturas na extremidade Norte da restinga, tornando a cidade de Esposende mais exposta aos fenómenos provenientes do oceano. Tendo em conta os problemas apresentados, a presente dissertação teve por objetivo estudar propostas de intervenção costeira analisando a sua eficiência face aos efeitos hidrodinâmicos e morfodinâmicos na restinga de Esposende (localizada na margem esquerda da foz do rio Cávado). As propostas apresentadas incidiram num conjunto de estruturas rígidas nomeadamente quebramares destacados e numa estrutura longitudinal.

A metodologia deste estudo baseou-se no modelo numérico Delft3D, em particular na utilização dos módulos Flow, Wave e Morphology. Com este modelo simularam-se os efeitos hidrodinâmicos considerados como condições limite, tais como: a variação do nível do mar, a agitação marítima e as correntes fluviais. Para além disso, simularam-se os parâmetros: batimetria, rugosidade dos fundos e diâmetro médio dos sedimentos, considerando os dois últimos parâmetros constantes em toda a área de estudo. Após a seleção dos efeitos e parâmetros a ter em consideração e através de várias combinações definidas por análises probabilísticas, definiu-se um plano de testes com 12 cenários. Para avaliar o impacto das estruturas de proteção costeira foram efetuadas simulações tendo em conta as seguintes fases:

- Fase 1 – análise de cenários sem a inclusão de novas estruturas de defesa costeira;
- Fase 2 – análise de cenários de duas propostas de intervenção de proteção costeira, nomeadamente:
 - Fase 2.1 – cenário composto por quebramares destacados 1 e 2.
 - Fase 2.2 – cenário com os mesmos quebramares destacados e, adicionalmente, uma estrutura longitudinal do lado do estuário.

Com os resultados obtidos foi possível comparar os cenários entre as fases 1 e 2. Quanto à hidrodinâmica do sistema, na fase 1 verificou-se que no canal de navegação e em condições de BMAV, o escoamento tem tendência em se deslocar em direção à margem direita do estuário, intensificando-se com o afunilamento no final do canal de navegação. Para além disso, identificou-se uma corrente de vazante que encaminha os sedimentos para um delta de vazante à entrada da foz do rio Cávado, precisamente a Oeste e que as velocidades são superiores para a BMAV comparando com a PMAV+SS, tal como esperado. A existência dos quebramares destacados, fase 2.1, encaminha o escoamento pela zona abrigada da estrutura com maior intensidade e para a proximidade da extremidade da restinga. Ao incluir a estrutura longitudinal (fase 2.2), verificou-se um aumento do escoamento direcionado para a margem

direita do canal de navegação. Para além disso, salienta-se que o escoamento é encaminhado para sul, contornando as estruturas destacadas.

Relativamente à dissipação da energia da agitação marítima incidente, no caso atual as ondas dissipam-se com o aproximar da linha da costa devido à diminuição da profundidade. A restinga é o obstáculo primordial no impacto da ondulação incidente. Embora reduza bruscamente a ação marítima, entre o lado do oceano e o lado do rio, o seu grau de exposição pode gerar variações no canal de navegação que não foram consideradas para este estudo. A construção dos quebramares destacados galgáveis a Oeste da restinga, permite reduzir, entre 30% a 85%, a energia das ondas em direção a esta. A adição do dique não resultou em alterações significativas no interior do estuário. Isto é espetável porque esta estrutura tem como função fixar o canal de navegação e impedir o transporte de sedimentos da restinga para o interior do estuário, contribuindo para a estabilidade e aumento da volumetria da restinga.

No que respeita à morfodinâmica, no caso atual, verificou-se que ocorre erosão na embocadura do rio Cávado, na proximidade do quebramar Norte e na extremidade Norte da restinga. Consequentemente a este fenómeno, ao entrar no oceano, as correntes perdem intensidade e os sedimentos depositam-se, formando um banco de areia na entrada da embocadura. Na restinga, as acumulações sedimentares provenientes do transporte fluvial, de deriva litoral e da ação da agitação marítima favorece a formação de pré-dunas paralelas à restinga. Relativamente ao canal de navegação, este apresentou erosões elevadas no centro do mesmo, na ocorrência de um caudal extremo. As simulações realizadas com os quebramares destacados permitiram verificar que estas estruturas limitam a zona de deposição de sedimentos, sendo estes encaminhados pela zona abrigada das estruturas. Assim, estas estruturas potenciam a alimentação natural e gradual na extremidade da restinga. Ao incluir uma estrutura longitudinal, verificou-se que esta impede a erosão da extremidade da restinga, em particular do lado do rio.

A avaliação efetuada com uma malha mais refinada de 20x20 permitiu obter resultados mais satisfatórios nos cenários correspondentes a um caudal extremo de 800 m³/s. Quanto às velocidades junto ao fundo obteve-se uma melhor transição entre o escoamento fluvial que sai da foz do rio Cávado e entra no oceano. No que respeita aos fenómenos de erosão/deposição é possível verificar a evolução da erosão em direção à extremidade Norte da restinga e a acumulação sedimentar nomeadamente na zona abrigada das estruturas.

A integração dos módulos FLOW, WAVE e MORPHOLOGY do modelo numérico Delft3D exige uma grande quantidade de inputs por forma a tornar o modelo o mais realista possível. Porém, no presente estudo, alguns dos dados de entrada adotados limitaram os resultados obtidos no modelo numérico. Os dados batimétricos utilizados apresentaram falhas na zona de estudo, nomeadamente no interior do estuário. As características dos sedimentos eram dispersas e desatualizadas. As massas sedimentares na área eram desconhecidas. A temperatura e a salinidade no estuário foram consideradas constantes. Nesta perspetiva, seria útil a realização de um levantamento topo-hidrográfico exaustivo no interior do canal de navegação para uma melhor compreensão das condições atuais na zona de estudo. Adicionalmente, seria interessante estudar de forma mais aprofundada o processo da intrusão salina no estuário.

Note-se que as propostas estudadas são uma primeira avaliação de possíveis soluções a implementar na zona de estudo com vista a contribuir para uma maior resiliência da restinga e posterior aumento da sua volumetria, através da redução das ondas incidentes e zonas de erosão. Assim sendo, e uma vez que já foram apresentadas algumas simulações mais satisfatórias com a introdução de uma malha mais fina no modelo numérico, seria pertinente dar seguimento a este estudo com a nova malha e os cenários selecionados na presente dissertação. Para além disso, seria oportuno estudar novos cenários para condições hidrodinâmicas extremas, com maiores alturas de onda significativas, períodos de pico mais

longos e diferentes direções de incidência das ondas. Também seria conveniente realizar um estudo mais exaustivo das propostas apresentadas, alterando as suas geometrias, características e posicionamento. Para além de tudo isto, seria também importante proceder a uma modelação física para comparar com os resultados obtidos através da modelação numérica.

Em trabalhos futuros, por forma a completar/melhorar a proposta desenvolvida na presente dissertação poderão ser ainda considerados os seguintes cenários:

- um reforço dunar através da re-colocação de geocilindros, por forma a garantir a estabilização do perfil da restinga.
- um aumento no quebramar Norte com uma ligeira curvatura para sul, com vista a minimizar a energia das ondas que alcançam a entrada da foz do rio Cávado, garantir condições mais favoráveis para a entrada e saída de embarcações e transportar os sedimentos de deriva litoral em direção N-S.

Com estes estudos seria possível apresentar diversas propostas de intervenção nesta zona, e, posteriormente, seleccionar a solução que maximize os seguintes fatores: a redução da energia das ondas na restinga, a potencialização de acumulação de sedimentos na frente oceânica da restinga, a minimização de intervenções de dragagens no canal de navegação e o impacte visual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akpınar, Adem [et al.] (2012). *Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea*. Continental Shelf Research. 50: 80 - 99.
- Almeida, Carlos Alberto Brochado de (1979). *Salinas Medievais Entre Cávado e o Neiva, Braga*.
- Ambiente, Agência Portuguesa do (2016). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica: Região Hidrográfica do Cávado, Leça e Ave (RH2)*
- Antiqueira, J. A.; Calliari, L. J.; Fontoura, J. A. S. (2004). *Geomorphologic Evolution of a Sand Spit Located in the Mouth of a Choked Coastal Lagoon. Lagoa dos Patos: Southern Brazil*. Journal of Coastal Research. 39: 255-258. ISSN 0749-0208.
- Apa, Agência Portuguesa do Ambiente - (2018). *Alimentação artificial de praias na faixa ccosteira de Portugal Continental: Enquadramento e retrospectiva das intervenções realizadas (1950-2017)* [Relatório Técnico].
- Aveiro, Notícias de (2019). Disponível em WWW: <URL: <https://www.noticiasdeaveiro.pt/ps-distrital-destaca-empenho-do-governo-no-desassoreamento-da-ria/>>. [Consultado a 10-04-2020].
- Bermúdez, María [et al.] (2018). *Numerical Modeling of the Impact of a Pumped-Storage Hydroelectric Power Plant on the Reservoirs' Thermal Stratification Structure: a Case Study in NW Spain*. Environmental Modeling & Assessment. 23: 71-85.
- Cañizares, Rafael; Irish, Jennifer L. (2008). *Simulation of storm-induced barrier island morphodynamics and flooding*. Coastal Engineering. 55: 1089-1101.
- Carvalho, A. N.; Santos, P. T. (2013). *Factors affecting the distribution of epibenthic biodiversity in the Cávado estuary (NW Portugal)*. Journal of Integrated Coastal Zone Management. 13:1. 101-111. ISSN 1646-8872.
- Carvalho, G. Soares de; Gomes, Fernando Veloso; Pinto, Francisco Taveira (2000) - *Os Estuários de Portugal e os Planos de Bacia Hidrográfica*. In EUROCOAST-PORTUGALp. 13, 18-19; 66-67. ISBN 972-8558-05-8.
- Castelle, Bruno [et al.] (2018). *Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280-km high-energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 200: 212-223.
- Cavaco, Irmãos (2020). *Concepção/Projecto e Construção das Obras Necessárias à Melhoria das Acessibilidades e das Condições de Segurança da Barra do Douro*. Disponível em WWW: <URL: http://icsa.pt/client/skins/a_negocio.asp?page=28>. [Consultado a 28-04-2020].
- Ceia, Filipe Rafael [et al.] (2010). *Coastal vulnerability in barrier islands: The high risk areas of the Ria Formosa (Portugal) system*. Ocean & Coastal Management. 53: 478-486.
- Consulmar Disponível em WWW: <URL: <https://www.consulmar.pt/pt-pt/portfolio/porto-de-leixoes-novos-porta-contentores-no-horizonte/>>. [Consultado a 25-03-2020].
- Cristino, Pedro (2020). *Prémio Secil Engenharia atribuído a obra do Molhe Norte da barra do Douro*. Disponível em WWW: <URL: <https://www.construir.pt/2010/05/03/premio-secil-engenharia-atribuido-a-obra-do-molhe-norte-da-barra-do-douro/>>. [Consultado a 18-04-2020].
- Deltares (2014a). *Delft3D-FLOW* [User manual].

- Deltares (2014b). *Delft3D-WAVE* [User manual].
- Dias, J. M.; Lopes, J. F.; Dekeyser, I. (2000). *Tidal Propagation in Ria de Aveiro Lagoon, Portugal*. Physics and Chemistry of the Earth. 25: 369-374.
- Dinis, Daniela Filipa Ferreira (2016). *Simulação Laboratorial de Dispositivos para a Atenuação de Erosões Localizadas ("Scour Apron") em Estruturas de Defesa Costeira em Cilindros Geossintéticos*. Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, Óscar; Dias, João A.; Taborda, Rui (2008). *Implications of Sea-Level Rise for Continental Portugal*. Journal of Coastal Research. 242: 317-324.
- Fitri, Arniza [et al.] (2019). *Dynamics of Sediment Transport and Erosion-Deposition Patterns in the Locality of a Detached Low-Crested Breakwater on a Cohesive Coast*. Water. 11.
- Freire, Sofia Costa; Neves, Maria da Graça; Silva, António Pires (2007). *Avaliação de metodologias de cálculo do coeficiente de reflexão* [5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária - Lisboa].
- Gibeatu, James C.; Davis, Richard A. (1993). *Statistical Geomorphic Classification of Ebb-Tidal Deltas Along the West-Central Florida Coast*. Journal of Coastal Research.
- Gomes, Fernando Veloso [et al.] (2011). *Relatório do Grupo de Trabalho sobre a Restinga de Ofir/Esposende*.
- Gomes, Fernando Veloso [et al.] (2006). *Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores*. ISBN 972-752-074-x.
- Gomes, Pedro T.; Botelho, Ana C.; Carvalho, Gaspar S. (2002). *Sistemas dunares do litoral de Esposende*. ISBN 972-9027-16-1.
- Harris, P.T. [et al.] (1992). *Evolution of subtidal sandbanks in Moreton Bay, eastern Australia*. Marine Geology. 103: 225-247.
- Hayes, Miles O. (1975) - *Morphology of Sand Accumulation in Estuaries: An Introduction to the Symposium* In CRONIN, L. Eugene *Estuarine Research*.
- Hesp, Patrick A. [et al.] (2005). *Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil*. Annals of the Brazilian Academy of Sciences. 3 493-508. ISSN 0001-3765.
- Hughes, Steven A.; Schwichtenberg, Bradd R. (1998). *Current-induced scour along a breakwater at Ventura Harbor, CA — experimental study*. Coastal Engineering. 34: 1-22.
- ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2011). *Caracterização Físico-Química dos Sedimentos a Dragar no Porto de Esposende* [Relatório de Monitorização Ambiental].
- ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2012). *Caracterização Físico-Química dos Sedimentos a Dragar no Porto de Esposende* [Relatório de Monitorização Ambiental].
- ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2016). *Caracterização Físico-Química de Sedimentos da Foz do rio Cávado* [Relatório de Monitorização Ambiental].
- Lira (2020). *Orçamento Participativo Portugal 2017*. Disponível em WWW: <URL: http://lira.web.ua.pt/?page_id=402>. [Consultado a 07-05-2020].

- Loureiro, Eduardo Jorge Santa Marinha (2007). *Indicadores Geomorfológicos e Sedimentológicos na Avaliação da Tendência Evolutiva da Zona Costeira - Aplicação ao Concelho de Esposende*. Douturamento em Ciências. Universidade do Minho.
- Marés, Tábua de (2020). Disponível em WWW: <URL: <https://tabuademares.com/pt/braga/esposende>>. [Consultado a 15-04-2020].
- Martins, Hugo; Gomes, Fernando Veloso (2011). *Alimentação Artificial de Praias em Ambientes Energéticos Intermédios*. 978-989-95557-5-4
- Militello, Adele; Hughes, Steven A. (2000). *Circulation Patterns at Tidal Inlets with Jetties*. US Army Corps of Engineers.
- Neiva, Manuel Albino Penteado (2012). *Esposende: a barra, o porto e a navegabilidade do Cávado - Projectos e Memórias*.
- Nemus (2003). *Estudo do Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Barra do Cávado* [Relatório Não Técnico].
- Neves, Luciana Paiva das (2001). *Estudo de Alternativas Possíveis de Obras arítimas para a Fixação de Embocaduras*
- Oliveira, João Nuno Correia (2016). *Modelação do impacte do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego nas praias adjacentes a sul*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Otvos, Ervin G. (2000). *Beach ridges — definitions and significance*. *Geomorphology*. 32: 83-108.
- Palma, Daniela Marisa Ludovico da Costa e (2016). *Aplicação de geossistemas em obras de proteção costeira, o caso da restinga de Ofir*. Mestrado em Engenharia Geológica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Parsapour-Moghaddam, Parna; Rennie, Colin D.; Slaney, Jonathan (2018). *Hydrodynamic Simulation of an Irregularly Meandering Gravel-Bed River: Comparison of MIKE 21 FM and Delft3D Flow models*. In E3S Web of Conferences. 2018.
- Peixoto, Raquel Alexandra Fernandes Meneses Maciel (2016). *Modelação Hidrodinâmica do Estuário do Douro: Cenários de Cheia e Influência dos Novos Molhes*. Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Perillo, G. M. E. (1995). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. 1.
- Pinheiro, João Pedro Torres (2008). *Avaliação dos Processos de Transposição Artificial de Sedimentos em Embocaduras*. Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinho, J. L. S. (2005). *Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado*.
- PLN, Polis Litoral Norte (2016a). *Alimentação Artificial das Praias Adjacentes à Foz do rio Cávado*
- PLN, Polis Litoral Norte (2016b). *Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado*
- PLN, Polis Litoral Norte (2020). *Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR)*
- Disponível em WWW: <URL: <https://www.polislitoral norte.pt/poseur>>. [Consultado a 27-04-2020 a 30-04-2020].

- Porto, Afonso Alves Moreira de Vasconcelos (2013). *Estudo Laboratorial do Comportamento de uma Restinga Móvel Confinada por Cilindros de Geossintéticos*. Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ramos, V. [et al.] (2014). *Tidal stream energy impacts on estuarine circulation*. Energy Conversion and Management. 80: 137-149.
- Silva, J. Figueiredo da [et al.] (2001). *Airborne observations of frontal systems in the inlet channel of the Ria de Aveiro, Portugal*. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 26:9. 713-719.
- Silva, José Manuel Fernandes da (2006). *Contributos para a Calibração de um Modelo Hidrodinâmico do Estuário do Rio Cávado*. Universidade do Minho.
- Silva, Raquel (2013). *Regime de Ventos e de Agitação Marítima junto ao Porto de Leixões*.
- Silva, Raquel [et al.] (2008). *A Importância de alguns Parâmetros Gidromorfológicos em Estudos de Modelação das Zonas Costeiras. 3as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. FEUP: 978-989-95557-2-3
- Silva, Susana Manuel Teixeira Ribeiro Figueiredo da (2016). *Intervenções de Alimentação Artificial de Praias. Casos de Estudo Nacionais e Internacionais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Snirh, Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - (2020). Disponível em WWW: <URL: <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.2>>. [Consultado a 05-04-2020].
- Tabajara, Luiz L. C. A. [et al.] (2013). *Critérios para a Classificação e Manejo de Costa Arenosa Dominada por Ondas e com Intensa Ocupação Urbana: o caso de Imbé, RS, Brasil*. Journal of Integrated Coastal Zone Management. 13: 409-431.
- Taveira-Pinto, Francisco; Neves, Ana Cristina (2004). *Environmental aspects of using detached breakwaters for coastal protection purposes*. Management of Environmental Quality. 15:1. 62 - 71.
- Teodoro, A. C.; Pinto, F. Taveira; Santos, I. (2014). *Morphological and statistical analysis of the impact of breakwaters under construction on a sand spit area (Douro River)*. Journal of Coastal Conservation. 177-191.
- Teodoro, A. C.; Pinto, Francisco Taveira (2011). *Análise da Evolução Morfológica da Restinga do rio Douro*. ISSN 978-989-95557-4-7.
- Vila-Concejoa, A. [et al.] (2006). *Quantification of inlet-related hazards in barrier island systems. An example from the Ria Formosa (Portugal)*. Continental Shelf Research. 26: 1045-1060.
- Woodroffe, Colin D. (2003). *Coasts. Form, process and evolution*. Cambridge University. ISBN 0521 011833.
- Wulp, Simon A. van der [et al.] (2016). *Numerical simulations of river discharges, nutrient flux and nutrient dispersal in Jakarta Bay, Indonesia*. Marine Pollution Bulletin. 110:2. 675-685.

ANEXOS

ANEXO A – ANÁLISE DOS CAUDAIS

ANEXO B – ANÁLISE DOS SEDIMENTOS

ANEXO A

ANÁLISE DOS CAUDAIS

Tabela A. 1 - Análise dos registos dos caudais médios na estação de Barcelos, (SNIRH).

Ano	Caudal Médio Mensal (m³/s)											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1978										41.94	44.78	110.40
1979	136.74	154.69	107.97	85.78	61.68	79.39	52.45	26.56	18.30	72.79	50.48	57.44
1980	86.99	94.79	78.22	64.82	56.00	42.69	25.74	23.22	15.02	33.36	51.45	47.03
1981	39.70	27.11	52.00	53.53	47.90	36.41	29.75	20.45	34.21	66.89	44.75	144.20
1982	146.31	96.42	79.80	52.57	39.45	43.45	41.31	32.08	35.57	56.15	67.32	117.67
1983	69.90	56.55	51.89	85.49	179.92	81.76	47.00	48.92	8.88	26.52	67.69	87.87
1984	126.11	110.64	80.56	94.61	54.51	47.70	33.68	24.04	17.89	48.65	106.02	154.37
1985	133.63	142.41	126.04	121.98	78.79	42.29	39.49	38.91	34.00	33.17	63.31	95.70
1986	133.86	143.49	113.96	80.02	53.56	34.82	29.95	33.86	41.39	35.10	47.85	49.84
1987	82.23	103.29	62.87	81.02	40.48	29.56	30.25	25.56	20.92	87.26	95.04	111.75
1988	175.84	247.88	80.62	51.12	71.28	48.72	61.84	48.03	39.92	60.46	60.59	45.26
1989	30.13	29.99	49.16	40.47	26.74	26.08	24.68	20.84	14.72	20.11	40.32	193.20
1990	108.43	143.92	73.18	31.94	36.12	27.46	28.15	18.69	17.71	27.47	55.19	48.75
1991	130.14	97.80	144.95	71.90	42.56	36.70	30.50					
1992										32.50	72.73	126.89
1993	80.55											
1994		140.32	75.84	66.87		101.03	40.13	32.85		42.48	113.98	94.34
1995	131.15		104.77	61.23	59.87	52.17	36.93	33.62	41.96		93.76	110.86
1996	174.15	139.27	102.83	74.54	58.89	56.33	25.48	24.81	24.86	45.79	72.59	121.03
1997	125.39	93.14	54.89	23.11	40.85	77.82	47.33	41.91	29.77	67.38	149.63	157.84
1998	162.06	101.61	57.76	119.80	75.65	74.17	28.66	26.92	56.30	42.55	58.10	44.41
1999	53.49	36.00	24.15	29.60	61.36	40.00	34.77	21.69	42.04	90.49	106.61	52.07
2000	90.76	63.59		83.21	89.11	32.01	26.82	18.07	17.61	37.82	108.52	
2001	182.81	129.78	104.60	120.64	84.66	48.91	24.42	19.95	19.97	51.09	21.37	33.73
2002	33.53	33.05	47.67	28.59	20.75							
<i>Q̄médio</i>	115.75	108.88	76.50	71.24	62.81	49.27	35.58	29.20	27.73	50.90	68.14	91.89

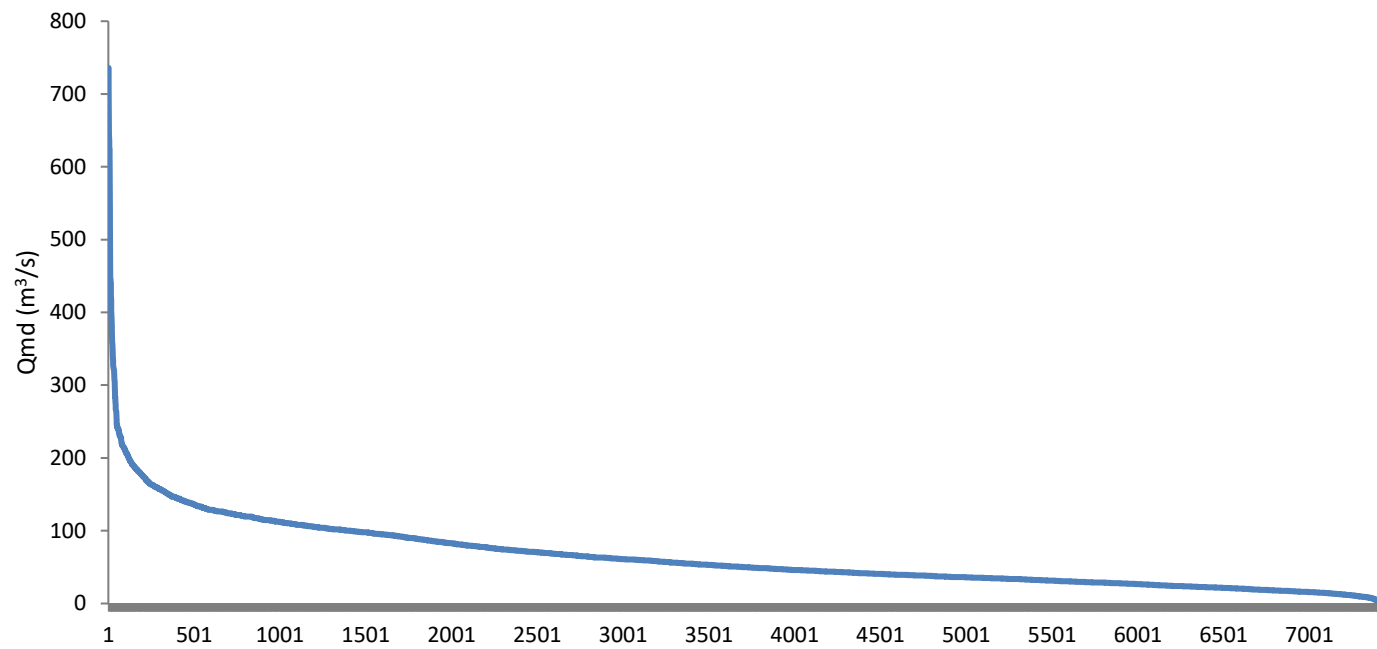


Fig. A. 1 - Variação dos caudais médios registados na estação de Barcelos, por ordem decrescente (SNIRH).

Tabela A. 2 - Caudais máximos anuais registados na estação de Barcelos.

Ano	Caudais Máximos Mensais (m³/s)												Caudal Máximo Anual (m³/s)
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
1979	229.03	252.34	222.78	206.23	130.41	102.87	84.20	33.52	20.86	227.68	85.36	127.84	252.34
1980	307.21	122.90	158.29	107.16	83.55	60.54	46.62	49.44	22.35	40.66	75.34	76.52	307.21
1981	72.03	107.40	110.66	93.52	71.80	54.85	41.63	44.99	64.05	333.00	63.26	541.61	541.61
1982	447.54	119.00	97.19	73.75	60.69	62.48	53.59	61.63	76.40	104.89	146.73	355.13	447.54
1983	102.51	179.82	96.97	215.95	522.85	124.19	60.65	73.76	13.86	80.33	106.20	304.93	522.85
1984	214.40	198.12	176.94	165.76	79.71	75.29	44.41	38.00	29.96	99.76	324.42	352.73	352.73
1985	300.91	212.43	233.63	242.58	93.71	83.04	47.14	52.34	72.30	75.88	128.76	217.02	300.91
1986	231.33	213.54	190.28	121.63	74.22	46.14	38.41	53.60	106.08	39.45	103.98	79.27	231.33
1987	117.03	163.06	160.22	183.97	67.84	53.60	43.83	41.60	43.83	205.45	156.89	140.20	205.45
1988	615.93	735.83	101.28	82.79	101.31	85.84	79.06	71.65	73.76	77.37	77.69	71.21	735.83
1989	46.14	98.24	104.84	68.48	35.00	39.27	30.72	29.72	22.91	32.48	99.73	644.14	644.14
1990	161.01	440.75	110.11	60.32	53.76	38.59	46.70	42.94	30.85	70.98	93.73	67.84	440.75
1991	231.34	128.76	196.41	110.37	71.78	49.40	52.82						
1992										101.91	105.17	242.93	
1995	187.11		154.64	84.56	97.86	75.88	84.56	70.98	60.43		180.86	190.28	
1996	235.02	213.54	143.88	154.64	77.56	70.98	34.42	43.27	36.38	92.95	128.76	180.88	235.02
1997	182.42	127.55	102.95	27.75	100.89	117.03	58.32	59.01	46.74	115.91	229.51	240.61	240.61
1998	240.61	113.67	74.22	167.40	118.17	101.91	38.93	59.72	89.15	65.56	85.47	75.05	240.61
1999	112.56	69.40	32.08	82.77	94.89	63.32	61.86	35.45	105.91	149.92	148.53	164.68	164.68
2000	132.37	94.33		163.55	131.03	51.33	39.34	28.10	29.86	67.18	137.57		

ANEXO B

ANÁLISE DOS SEDIMENTOS

Para a caracterização dos sedimentos na área de estudo, foram analisadas várias campanhas de recolha de sedimentos realizadas no período de 2008 a 2016. As recolhas de amostras analisadas foram efetuadas nas seguintes zonas da área de estudo:

- na praia Suave-Mar;
- na praia de Ofir;
- na barra do rio Cávado;
- no canal de navegação;
- na doca de recreio;
- na doca de Pesca;
- na ponte de Fão.

O ISQ realizou uma 1ª campanha, a 10 de agosto de 2011, com cerca de 51 amostras na barra do rio Cávado (ESPB), no canal de navegação (ESPC), na doca de recreio (ESPR) e na doca de pesca (ESPP). A Fig. B. 1 apresenta a localização geográfica do local de recolha de algumas amostras. Os resultados obtidos de percentagem acumulada de material que passa nos peneiros de cada amostra efetuada estão apresentados com detalhe em ISQ (2011).



Fig. B. 1 - Localização geográfica das amostras referentes à campanha do dia 10 de agosto de 2011 (Google Earth).

Em cada ponto foram retiradas duas amostras, uma à superfície e outra a uma profundidade de 1.5 m. As Fig. B. 2 e Fig. B. 3. ilustram a curva granulométrica do ponto ESPB-SUP e ESPB-PROF. A vermelho é possível observar o D50, com um valor aproximado de 1.2 mm e 1.4 mm para ESPB-SUP e ESPB-PROF, respetivamente. De um modo geral, as amostras obtiveram valores médios das partículas entre os 0.02 e os 2 mm, classificando-se assim como areia.

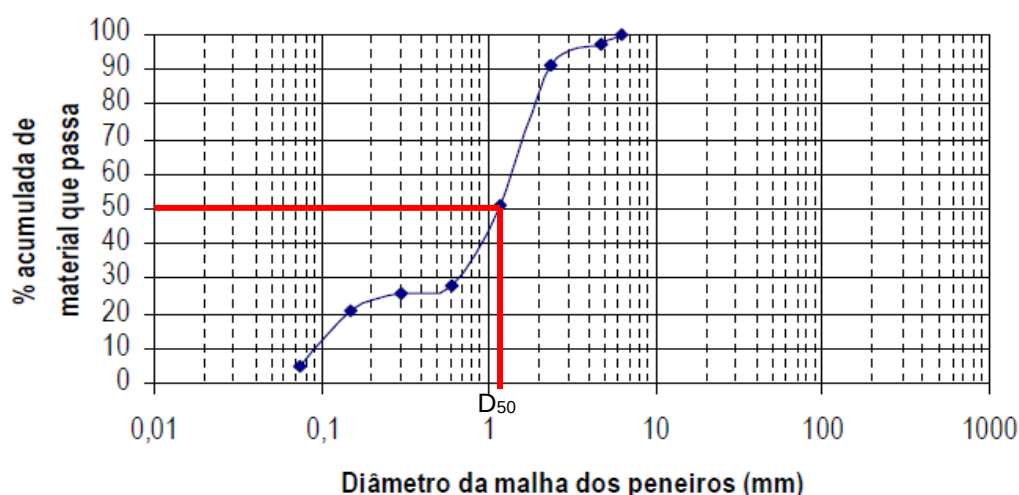


Fig. B. 2 - Curva granulométrica do ponto AQ 18176/11 - ESPB1 – SUP (ISQ, 2011).

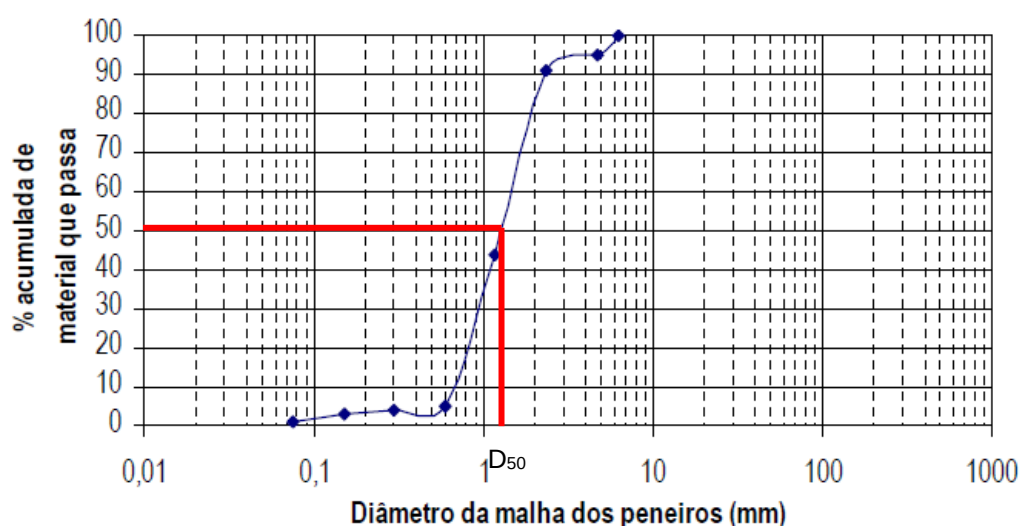


Fig. B. 3 - Curva granulométrica do ponto AQ 18177/11 - ESPB1 – PROF (ISQ, 2011).

Relativamente à 2ª campanha executada pelo ISQ a 22 de fevereiro de 2012, foram apenas realizadas amostras nos pontos que tinham sido classificados como contaminados, na 1ª campanha. Obteve-se uma granulometria média semelhante à anteriormente apresentada, ou seja, entre os 0,02 e 2 mm.

A campanha realizada pelo ISQ, a 12 de agosto de 2016, consistiu na recolha de quatro amostras no canal de navegação, como apresentado na Fig. B. 4. Uma vez que todas as amostras estão integradas no canal de navegação e visto que as curvas granulométricas são semelhantes, apenas são apresentadas as curvas granulométricas referentes aos pontos EA1 e EA4 (Fig. B. 5 e Fig. B. 6) obtendo-se um D_{50} de aproximadamente 0,28 e 0,55 mm, respetivamente.



Fig. B. 4 - Localização geográfica das amostras referentes à campanha do dia 12 de agosto de 2016 (Google Earth).

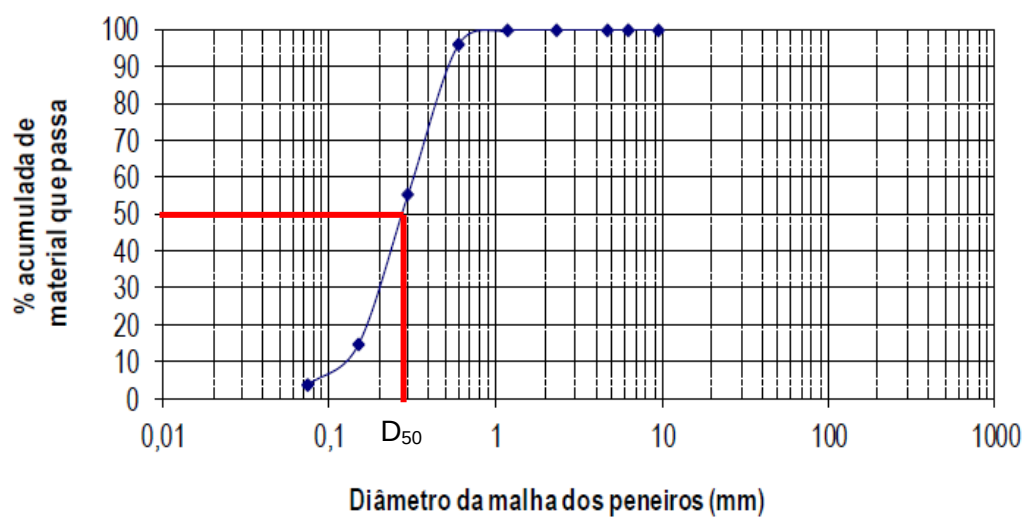


Fig. B. 5 - Curva granulométrica do ponto EA1 (ISQ, 2016).

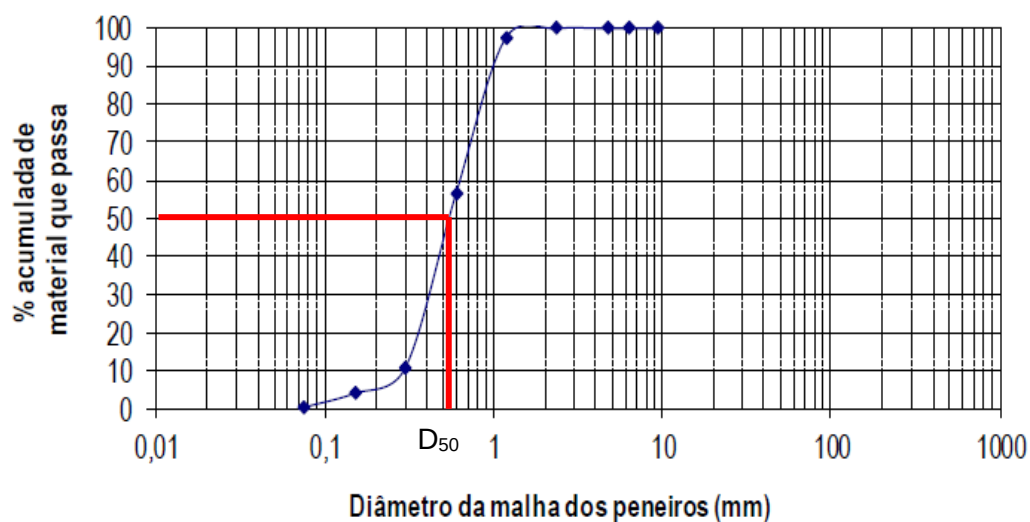


Fig. B. 6 - Curva granulométrica do ponto EA4 (ISQ, 2016).

Tal como já foi mencionado em 3.3.3, a campanha realizada incidiu na recolha de 16 amostras, durante fevereiro de 2009 e setembro de 2010, em 5 locais que estão apresentados aproximadamente na Fig. B. 7. Com base na tabela referente ao “Peso seco de cada fração de tamanho de grão, expresso em percentagem, por estação de amostragem” (Carvalho *et al.*, 2013), foi possível obter as curvas granulométricas referentes aos 5 pontos de amostragem (Fig. B. 8). Salienta-se que como nos ensaios só são utilizados os peneiros até 2 mm, considerou-se que o material retido atingia os 100% no peneiro seguinte, com 4 mm.



Fig. B. 7 - Localização geográfica das amostras referentes à campanha no período de 2009-2010 (Google Earth).

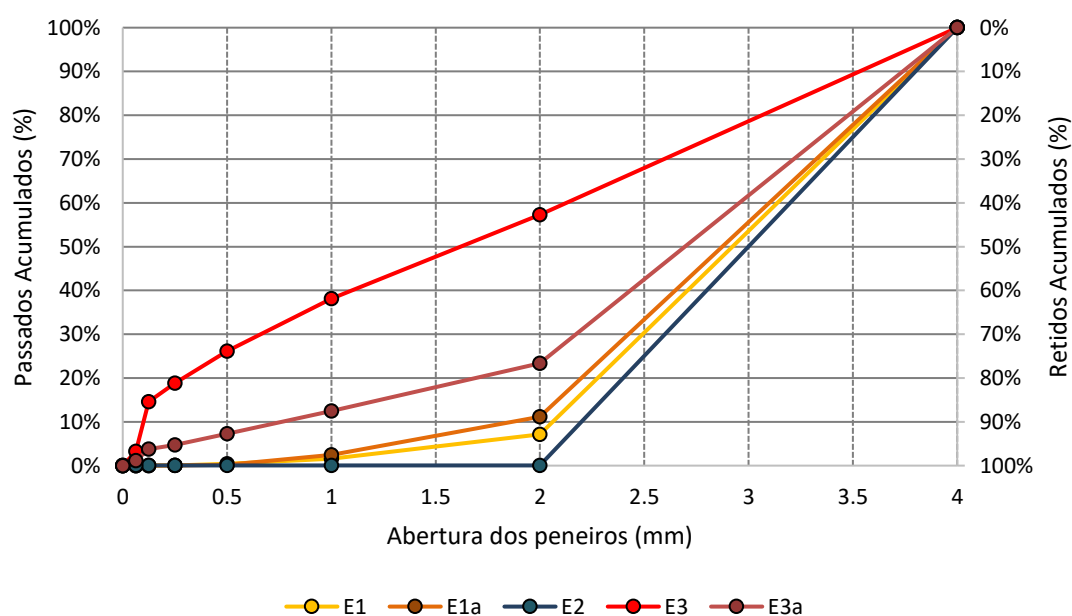


Fig. B. 8 - Curva granulométrica dos pontos E1, E1a, E2, E3 e E3a, referente ao período 2009-2010.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, E1, E1a, E2 e E3a apresentam um D_{50} superior a 2 mm, caracterizando-se como gravilhas. A amostra E3 é significativamente distinta das restantes, apresentando não só um D_{50} inferior, aproximadamente de 1.65 mm, como também apresenta uma maior variabilidade de tamanho dos sedimentos.

Por último, também foi possível obter resultados das praias adjacentes à foz do rio Cávado, ou seja, da praia Suave-Mar e de Ofir. Uma vez que o estudo não especifica com precisão a localização geográfica da recolha das amostras, considerou-se que o parâmetro D_{50} obtido para estas praias é constante, embora não corresponda à realidade. Neste sentido, com base nas curvas granulométricas apresentadas, obteve-se o valor médio do D_{50} para cada uma das praias, obtendo-se para a praia de Suave-Mar 0.60 mm (areia média) e para a praia de Ofir 0.35 mm (areia fina).

A Tabela B. 1 resume os D_{50} das recolhas de amostras mencionadas. Desta análise foi possível obter um valor médio do D_{50} , correspondente a 0.78 mm e um valor da mediana de 0.55 mm. Os valores referidos permitirão auxiliar na adoção do D_{50} , parâmetro fundamental para a análise morfodinâmica no modelo numérico, abordado no Cap 4. Na possibilidade de admitir no modelo numérico um D_{50} variável, procedeu-se à conversão das coordenadas obtidas no *Google Earth* para as do Delft3D.

Tabela B. 1 - Recolhas de amostras efetuadas: parâmetro D_{50} e conversão de coordenadas.

Ponto	D_{50} (mm)	Coordenadas			
		WG84 (Google Earth)		Etrs89/PT TM06	
		Latitude (N)	Longitude (W)	X	Y
Suave-Mar	0.59	41°32'31.13"	8°47'39.03"	-55161.023	208280.96
Ofir	0.34	41°32'8.89"	8°47'28.58"	-54924.034	207592.97
EA1	0.28	41°32'25.62"	8°47'42.72"	-55247.86	208111.62
EA2	0.35	41°32'27.96"	8°47'38.46"	-55148.56	208183.06
EA3	0.40	41°32'28.74"	8°47'33.90"	-55042.68	208206.31
EA4	0.55	41°32'26.76"	8°47'29.12"	-54932.35	208144.38
ESPB1-SUP	1.20	41°32'31.01"	8°47'28.42"	-54915.13	208275.38
ESPB1-PROF	1.40	41°32'31.01"	8°47'28.42"	-54915.13	208275.38
ESPB2-SUP	0.80	41°32'29.78"	8°47'31.20"	-54979.56	208275.87
ESPB2-PROF	0.90	41°32'29.78"	8°47'31.20"	-54979.56	208275.87
ESPB3-SUP	0.60	41°32'28.08"	8°47'36.54"	-55104.03	208186.42
ESPB3-PROF	0.80	41°32'28.08"	8°47'36.54"	-55104.03	208186.42
ESPB4-SUP	0.90	41°32'27.50"	8°47'39.45"	-55171.62	208169.04
ESPB4-PROF	1.20	41°32'27.50"	8°47'39.45"	-55171.62	208169.04
ESPB5-SUP	0.50	41°32'25.89"	8°47'42.24"	-55236.67	208119.86
ESPB5-PROF	0.50	41°32'25.89"	8°47'42.24"	-55236.67	208119.86
ESPC1-SUP	> 0.02	41°31'38.91"	8°46'55.74"	-54169.72	206662.29
ESPC1-PROF	> 0.02	41°31'38.91"	8°46'55.74"	-54169.72	206662.29
ESPC2-SUP	> 0.02	41°31'44.47"	8°46'59.97"	-54266.50	206834.56
ESPC2-PROF	> 0.02	41°31'44.47"	8°46'59.97"	-54266.50	206834.56
ESPC3-SUP	> 0.02	41°31'50.15"	8°47'4.30"	-54365.56	207010.55
ESPC3-PROF	> 0.02	41°31'50.15"	8°47'4.30"	-54365.56	207010.55
ESPC4-SUP	> 0.02	41°31'56.08"	8°47'8.76"	-54467.58	207194.28
ESPC4-PROF	> 0.02	41°31'56.08"	8°47'8.76"	-54467.58	207194.28
ESPC5-SUP	> 0.02	41°32'2.01"	8°47'11.32"	-54525.54	207377.68
ESPC5-PROF	> 0.02	41°32'2.01"	8°47'11.32"	-54525.54	207377.68
ESPC6-SUP	> 0.02	41°32'8.03"	8°47'15.01"	-54609.67	207564.05

Ponto	D50 (mm)	Coordenadas			
		WG84 (Google Earth)		Etrs89/PT TM06	
		Latitude (N)	Longitude (W)	X	Y
ESPC6-PROF	> 0.02	41°32'8.03"	8°47'15.01"	-54609.67	207564.05
ESPC7-SUP	1.00	41°32'13.80"	8°47'18.73"	-54694.55	207742.72
ESPC7-PROF	1.00	41°32'13.80"	8°47'18.73"	-54694.55	207742.72
ESPC8-SUP	0.60	41°32'21.39"	8°47'23.53"	-54804.04	207977.72
ESPC8-PROF	0.80	41°32'21.39"	8°47'23.53"	-54804.04	207977.72
ESPC9-SUP	1.00	41°32'28.88"	8°47'26.59"	-54873.21	208209.34
ESPC9-PROF	0.90	41°32'28.88"	8°47'26.59"	-54873.21	208209.34
ESPR1-SUP	0.20	41°32'4.23"	8°47'9.90"	-54492.10	207445.92
ESPR1-PROF	0.30	41°32'4.23"	8°47'9.90"	-54492.10	207445.92
ESPR2-SUP	0.20	41°32'2.85"	8°47'7.72"	-54441.89	207402.96
ESPR2-PROF	0.20	41°32'2.85"	8°47'7.72"	-54441.89	207402.96
ESPR3-SUP	0.30	41°32'2.17"	8°47'5.11"	-54381.54	207381.53
ESPR3-PROF	1.00	41°32'2.17"	8°47'5.11"	-54381.54	207381.53
ESPR4-SUP	0.30	41°32'00.07"	8°47'4.91"	-54377.40	207316.70
ESPR4-PROF	0.50	41°32'00.07"	8°47'4.91"	-54377.40	207316.70
ESPR5-SUP	> 2.00	41°31'59.38"	8°47'2.94"	-54331.89	207295.07
ESPR5-PROF	> 2.00	41°31'59.38"	8°47'2.94"	-54331.89	207295.07
ESPR6-SUP	1.00	41°31'57.62"	8°47'3.00"	-54333.69	207240.78
ESPR6-PROF	1.00	41°31'57.62"	8°47'3.00"	-54333.69	207240.78
ESPR7-SUP	0.30	41°31'54.27"	8°47'3.85"	-54354.17	207137.58
ESPR7-PROF	0.30	41°31'54.27"	8°47'3.85"	-54354.17	207137.58
ESPP1-SUP	0.30	41°31'38.25"	8°46'50.33"	-54044.45	206640.98
ESPP1-PROF	0.30	41°31'38.25"	8°46'50.33"	-54044.45	206640.98
ESPP2-SUP	0.40	41°31'37.92"	8°46'48.94"	-54012.30	206630.56
ESPP2-PROF	0.40	41°31'37.92"	8°46'48.94"	-54012.30	206630.56
ESPP3-SUP	0.40	41°31'36.82"	8°46'49.08"	-54015.80	206596.65
ESPP3-PROF	0.50	41°31'36.82"	8°46'49.08"	-54015.80	206596.65
ESPP4-SUP	0.40	41°31'36.02"	8°46'48.40"	-54000.22	206571.85
ESPP4-PROF	0.40	41°31'36.02"	8°46'48.40"	-54000.22	206571.85
ESPP5-SUP	0.30	41°31'36.83"	8°46'47.23"	-53972.91	206596.64
ESPP5-PROF	0.30	41°31'36.83"	8°46'47.23"	-53972.91	206596.64
E1	> 2.00	41°30'59.77"	8°46'29.19"	-53563.16	205450.17
E1a	> 2.00	41°30'56.53"	8°46'31.53"	-53618.162	205350.61
E2	> 2.00	41°31'10.72"	8°46'44.63"	-53918.653	205790.66
E3	1.65	41°31'27.24"	8°46'51.70"	-54078.761	206301.55
E3a	> 2.00	41°31'32.61"	8°46'50.82"	-54057.117	206467.07