



## Município de Esposende

# ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE RISCOS E PROGRAMA DE INTERVENÇÃO PARA A PROTEÇÃO DA RESTINGA DE OFIR E BARRA DO CÁVADO

INSTITUTO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

FEUP, dezembro de 2021



ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE RISCOS E PROGRAMA DE INTERVENÇÃO PARA A  
PROTEÇÃO DA RESTINGA DE OFIR E BARRA DO CÁVADO

---

**Município de Esposende**

# **ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE RISCOS E PROGRAMA DE INTERVENÇÃO PARA A PROTEÇÃO DA RESTINGA DE OFIR E BARRA DO CÁVADO**

**INSTITUTO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**

**FEUP, dezembro de 2021**



# Índice

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>5</b>
<b>PREÂMBULO</b> .....	<b>7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA E DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL</b> .....	<b>13</b>
2.1. O rio Cávado .....	13
2.2. Evolução morfodinâmica .....	14
2.3. Características gerais do Estuário do rio Cávado .....	21
2.4. Análise temporal do posicionamento da restinga /linha de costa da foz do rio Cávado .....	26
2.5. Intervenções realizadas na barra e restinga da foz do rio Cávado .....	27
2.6. Estudos realizados para a melhoria da barra do Cávado .....	36
2.6.1. Projeto de melhoria da barra do Cávado (IPTM – 2003) .....	36
2.6.2. Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado .....	37
<b>3. ANÁLISE COMPARATIVA DE CASOS SIMILARES</b> .....	<b>41</b>
3.1. Introdução .....	41
3.2. Casos nacionais .....	41
3.2.1. Ria de Aveiro .....	41
3.2.2. Estuário do rio Douro .....	43
3.2.3. Ria Formosa, Algarve .....	44
3.2.4. Banco de O’Bril, Estuário do Guadiana .....	45
3.3. Casos internacionais .....	47
3.3.1. Florence, Oregon, Estados Unidos da América .....	47
3.3.2. Barview, Oregon, Estados Unidos da América .....	48
3.3.3. Chosei, Japão .....	49
3.3.4. Brighton, Oregon, Estados Unidos da América .....	50
3.3.5. Guano Rock, Oregon, Estados Unidos da América .....	52
3.3.6. Southport, Gold Coast, Austrália .....	53
3.3.7. Letitia, Gold Coast, Austrália .....	54
3.3.8. Viladaide, Espanha .....	54
3.3.9. Liñero, Espanha .....	56
3.3.10. Morro Bay, Estados Unidos da América .....	57
3.3.11. Lagoa de Patos, Brasil .....	58
3.4. Considerações finais .....	60
<b>4. DADOS BASE</b> .....	<b>61</b>
4.1. Caudais do rio Cávado .....	61
4.2. Agitação Marítima e Vento .....	64
4.3. Marés .....	67
4.4. Sedimentos .....	68
4.4.1. Campanhas anteriores .....	68
4.4.2. Campanha de recolha de sedimentos de 2021 .....	71
4.5. Geologia e Geomorfologia de Esposende .....	74
4.6. Levantamento geofísico por métodos elétricos .....	80
4.6.1. Introdução .....	80
4.6.2. Localização .....	80
4.6.3. Materiais e métodos .....	81
4.6.4. Resultados obtidos - resistividade elétrica .....	81
<b>5. PROPOSTA DE SOLUÇÕES</b> .....	<b>85</b>
5.1. Requisitos funcionais e justificação .....	85
5.2. Soluções baseadas na Natureza (SbN) .....	87
5.3. Considerações finais .....	89
<b>6. MODELAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	<b>91</b>
6.1. Introdução .....	91
6.2. Módulo Delft3D-FLOW .....	91
6.3. Módulo Delft3D-WAVE .....	92

6.4. Módulo Delft3D-MORPHOLOGY.....	94
6.5. Implementação do modelo numérico.....	95
6.6. Calibração e Validação do Modelo Numérico.....	104
6.7. Cenários Simulados.....	108
6.8. Análise da Hidro e Morfodinâmica.....	108
6.8.1. Configuração atual da restinga de Ofir.....	108
6.8.2. Situação após a construção de novas estruturas de proteção.....	115
6.9. Conclusões e considerações finais.....	121
<b>7. MODELAÇÃO FÍSICA.....</b>	<b>125</b>
7.1. Introdução.....	125
7.2. Instalação Experimental.....	125
7.3. Equipamentos e acessórios.....	126
7.3.1. Sistema de geração de agitação marítima.....	126
7.3.2. Sistema de aquisição de agitação marítima.....	127
7.3.3. Sistema Laser Scanner FARO® FOCUS.....	128
7.3.4. Sistema de recirculação de água.....	129
7.3.5. Estabilizador de escoamento e descarregador de caudal sólido.....	129
7.3.6. Indicadores de direção do escoamento.....	129
7.3.7. Guias para a construção do modelo físico.....	130
7.3.8. Areia, brita e enrocamento.....	130
7.4. Modelo físico.....	131
7.4.1. Escala geométrica do modelo físico.....	131
7.4.2. Área reproduzida no estudo experimental.....	132
7.4.3. Batimetria dos fundos.....	132
7.4.4. Construção do Modelo.....	133
7.4.5. Sondas de níveis hidrodinâmicos.....	137
7.5. Condições de teste e procedimento experimental.....	139
7.5.1. Introdução.....	139
7.5.2. Definição de variáveis hidrodinâmicas.....	139
7.5.3. Plano de testes.....	142
7.5.4. Procedimento experimental e medições.....	143
7.6. Resultados do estudo experimental.....	144
7.6.1. Introdução.....	144
7.6.2. Análise da hidrodinâmica e morfodinâmica - condições moderadas.....	145
7.6.3. Análise da hidrodinâmica e morfodinâmica - condições extremas.....	153
7.6.4. Análise das principais transformações morfológicas.....	158
7.6.5. Análise dos levantamentos com sistema Laser Scanner.....	164
7.7. Conclusões e considerações finais.....	172
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>174</b>
<b><u>ANEXOS</u></b>	
<b>ANEXO A.....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>189</b>

## PREÂMBULO

Em resposta à solicitação do Município de Esposende, S.A., o Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos (IHRH) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto realizou o “*Estudo de Caracterização de Riscos e Programa de Intervenção para a Proteção da Restinga de Ofir e Barra do Cávado*”.

Este estudo compreendeu, inicialmente, uma análise da evolução história e o diagnóstico da situação atual da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado, bem como a análise de casos de estudo nacionais e internacionais com características semelhantes. Esse trabalho serviu de base à definição de propostas de intervenção tendo em vista o reforço da restinga de Ofir e da barra do rio Cávado.

Dada a complexidade dos processos costeiros e estuarinos, foi necessário recorrer, numa fase posterior, à aplicação conjunta de modelação numérica e de modelação física, não apenas para a caracterização da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar da restinga e do estuário do rio Cávado para as condições atuais, mas também para avaliar a eficácia das intervenções propostas para a melhoria das condições atualmente existentes. Os resultados numéricos foram validados com dados do protótipo (trajetórias de *drifters* lançados no local) e com os resultados do estudo experimental realizado na FEUP.

Para as condições atuais, *i.e.*, ainda sem as intervenções propostas, os resultados obtidos evidenciaram o estreitamento e o assoreamento do canal de navegação e o movimento de translação da extremidade norte da restinga para o interior do estuário. Estas alterações morfológicas comprovaram a necessidade de proteger o intradorso, a cabeça e o talude de barlar da restinga. Os quebra-mares destacados e o dique longitudinal interior, complementados com medidas de naturalização, para potenciar a colonização por organismos marinhos e o desenvolvimento de plantas, permitem reduzir eficazmente os problemas identificados, bem como os atuais riscos costeiros.

As intervenções de proteção propostas e estudadas neste trabalho terão de ser reequacionadas, numa futura fase de projeto, de forma a otimizar a sua forma, posicionamento e volumetria, tendo em conta as condições existentes à data, mas sem descurar a sua integração no sensível ambiente natural local.

O presente trabalho foi desenvolvido pela seguinte equipa técnica:

- Professor Francisco Taveira Pinto;
- Professor Paulo Rosa Santos;
- Professora Luciana das Neves;
- Doutor José Victor Ramos;
- Professor Renato Henriques;
- Mestre Francisco V.C. Taveira Pinto.

Porto e FEUP, 31 de dezembro de 2021.

A Direção do Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos,

F. Taveira Pinto

(Prof. Catedrático da FEUP, Presidente do IHRH)



# 1. INTRODUÇÃO

A prestação de serviços relativa ao “*Estudo de Caracterização de Riscos e Programa de Intervenção para a Proteção da Restinga de Ofir e Barra do Cávado*” foi realizada em resposta à solicitação do Município de Esposende, no âmbito do contrato assinado (AD\_0028/2020) com o Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (IHRH-FEUP).

O presente documento corresponde ao relatório final do referido estudo, que teve como base o plano de trabalhos apresentado na Figura 1. Este relatório tem como principal objetivo apresentar todo o trabalho realizado, designadamente a nível da: recolha e análise da documentação bibliográfica existente para a caracterização da evolução história e diagnóstico da situação atual da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado; análise de casos de estudo nacionais e internacionais com características idênticas; recolha de dados de base para os trabalhos de modelação; definição de alternativas de intervenção tendo em vista a resolução dos problemas atuais; e, por fim, os resultados e as conclusões obtidos nos trabalhos de modelação numérica e física. Essa modelação visou, não apenas a caracterização da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado para as condições atuais, mas também a avaliação da eficácia das intervenções propostas para a melhoria das condições atualmente existentes.

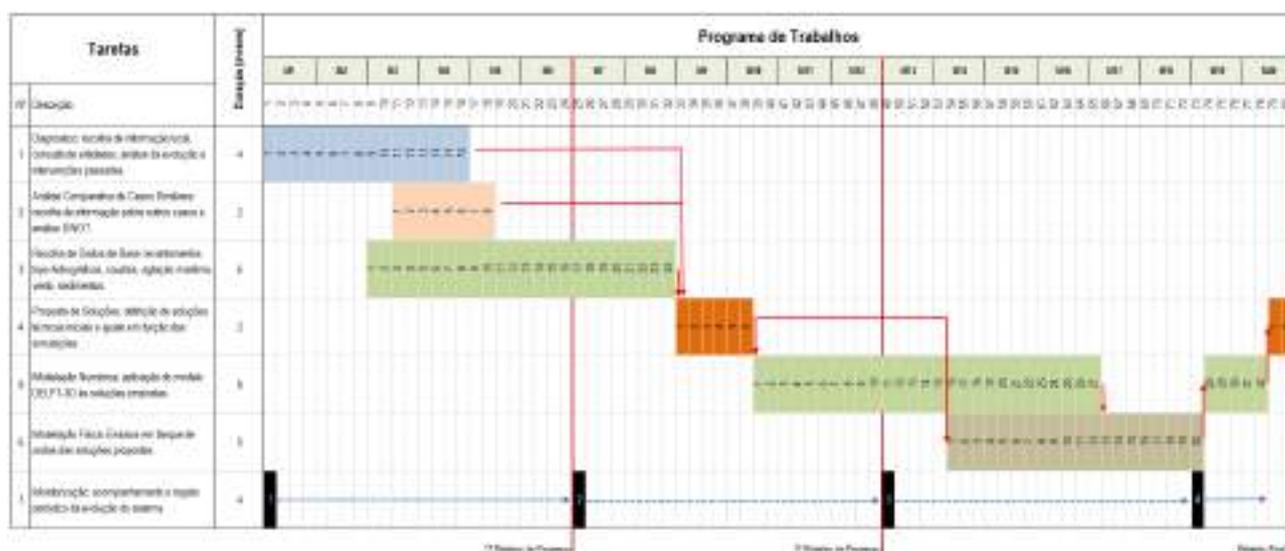


Figura 1 - Plano de trabalhos do “*Estudo de Caracterização de Riscos e Programa de Intervenção para a Proteção da Restinga de Ofir e Barra do Cávado*”.

Na primeira fase do estudo foram reunidos os documentos existentes e disponíveis sobre a restinga de Ofir e a barra do rio Cávado, incluindo estudos, projetos de intervenção, relatórios técnicos, bem como todos os dados de base existentes relativos a este setor costeiro. Assim, foram analisados os arquivos documentais existentes na Câmara Municipal de Esposende e os arquivos de outras instituições que tiveram um papel relevante nas intervenções realizadas neste setor costeiro. Estes documentos foram compilados e analisados de forma a produzir um relatório de diagnóstico da situação histórica e atual. Essa revisão serviu como ponto de partida para uma abordagem integrada do problema atual, tentando diagnosticar as vantagens e as fragilidades das intervenções anteriores, tendo servido como base crítica construtiva para este estudo, conducente a uma solução mais resistente e resiliente para a restinga e áreas adjacentes.

De facto, a restinga de Ofir é um sistema dunar natural e sensível, cuja forma e tamanho são controlados por um intenso transporte sedimentar, que resulta de uma combinação não linear de vários processos costeiros (e.g., agitação marítima, ventos, correntes e descargas do rio Cávado). Como consequência, grande parte do transporte sedimentar no canal de navegação provém dos sedimentos deslocados da restinga para o seu interior, reduzindo a acessibilidade aos portos locais. Adicionalmente, a ocorrência de eventos extremos pode provocar a rutura da restinga, aumentando o risco de inundações na frente urbana da cidade de Esposende.

De forma a proteger a cidade de Esposende, face à ocorrência de temporais, é fundamental garantir a estabilidade e a robustez da restinga de Ofir, uma vez que esta se localiza na frente urbana da cidade e constitui uma proteção natural do estuário contra a agitação marítima. Mesmo assim, a vulnerabilidade da população e das estruturas urbanas ribeirinhas é elevada, devido à sua localização, uma vez que a restinga corre o risco de romper e deixar de desempenhar esta função de proteção. A ocorrência de tempestades e cheias tem também 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, orientação e altura.

Algumas intervenções mais recentes como a aplicação de geossintéticos na praia de Ofir e na restinga, em 2015, não mostraram ser muito eficazes no controlo do recuo da linha de costa. Em 2016, foi efetuada uma alimentação artificial das praias adjacentes à foz do rio Cávado, nomeadamente em Suave Mar e na restinga de Ofir, 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 utilizados nessa intervenção provieram das operações de dragagem de areia no canal de navegação, junto à barra. De modo a fazer face aos níveis de dano do molhe norte e do dique paralelo à marginal de Esposende, foi proposto o reperfilamento da estrutura existente e reforçando o manto, de maneira a evitar o galgamento da mesma nos períodos de preia-mar e de tempestade.

Neste contexto, é importante garantir o equilíbrio dinâmico da evolução da restinga de Ofir, integrada no estuário do rio Cávado, visto que, esta geoforma costeira protege a cidade de Esposende da ação direta do mar. Assegurar a manutenção sustentada desta zona litoral e a conservação dos ecossistemas, torna premente o estudo de novas soluções que respondam aos problemas identificados e que promovam menos impactes ambientais e socioeconómicos.

Tendo por base este enquadramento, neste estudo, foi proposta uma intervenção para a melhoria das condições atuais que consiste no reforço da restinga de Ofir com areia complementado com a construção de dois quebramares destacados, de coroamento a cota baixa, e de um dique longitudinal a contornar o perímetro interno da restinga, em conjunto com medidas de promoção da colonização dessas estruturas por organismos marinhos e plantas, conferindo às mesmas um aspeto mais natural e melhorando o seu enquadramento local, constituindo assim estruturas “vivas”.

Devido à complexidade dos processos costeiros e estuarinos, neste trabalho foi necessário recorrer à aplicação simultânea de modelação numérica e de modelação física, não apenas para a caracterização da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar na restinga de Ofir e barra do rio Cávado para as condições atuais, mas também para avaliar a eficácia das intervenções propostas para a melhoria das condições existentes. Os resultados dos modelos físicos, depois de transpostos para o protótipo, permitiram obter conclusões importantes sobre as dinâmicas desses sistemas costeiros e estuarinos, assim como obter resultados para a validação dos modelos numéricos.

Concluiu-se que as estruturas propostas, complementadas com as medidas de naturalização, permitem reduzir eficazmente os problemas identificados, bem como os riscos costeiros existentes. De referir que as intervenções de proteção propostas e estudadas neste trabalho terão de ser reequacionadas, numa futura fase de projeto, de forma a otimizar a sua forma, implantação local e volumetria, tendo em conta as condições existentes nessa data (batimetria dos fundos e morfologia da restinga), permitindo alcançar assim eficazmente os objetivos estabelecidos, mas sem descuidar a integração das mesmas no sensível ambiente natural local.





## 2.2. Evolução morfodinâmica

O período quaternário, considerado como os últimos 2588 milhões de anos da história da Terra, foi marcado por oscilações climáticas que alternaram entre períodos mais quentes ou interglaciais, semelhantes ao período atual, e períodos glaciais, normalmente mais longos, cuja temperatura era substancialmente mais baixa do que a temperatura atual. Este período é decomposto em duas épocas: pleistocénico e holocénico. A época holocénica refere-se ao período que decorre desde há 11 700 anos até à atualidade. Neste período termina definitivamente a última glaciação (designada por Würm ou Würmiano) e inicia-se o atual período interglacial. No início deste período o nível do mar atual estaria, de acordo com Dias *et al.* [1], cerca de 120 a 140 m abaixo do nível atual. A posterior subida do nível médio do mar deu-se de modo relativamente rápido até ao período entre 8000 e 6000 anos, em que as temperaturas terão sido ligeiramente superiores às atuais, bem como o nível médio do mar. Nesta altura terá ocorrido uma incursão do mar para o interior da sua posição atual, com formação de vários sistemas de lagunas costeiras e estuários na região de Esposende, mais vastos que os atuais. Esta alternância climática foi-se repetindo nos últimos 5000 anos (Figura 3).

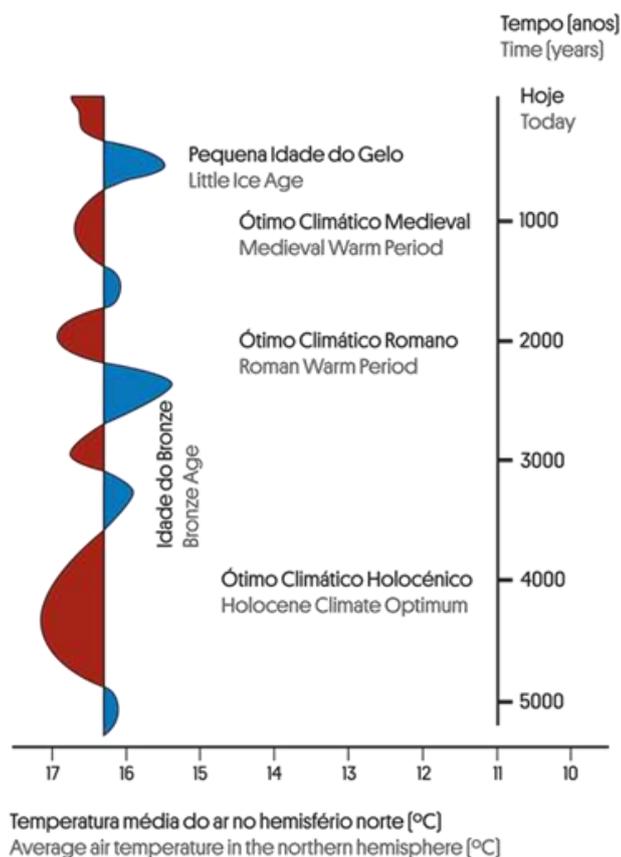


Figura 3 - Temperatura média no hemisfério norte nos últimos 5000 anos.

De 700 a 1300 AD, terá ocorrido um aquecimento em toda a Europa designado como “pequeno ótimo climático”, sendo que as temperaturas no norte deste continente terão sido superiores às que atualmente se verificam [2], existindo evidências de intrusões do mar nas costas baixas europeias [3]. Este período terá coincidido com uma pequena subida do nível médio da água do mar, que se estendeu, provavelmente, até ao séc. XV. Diferentes autores [4,5,6] levantam a possibilidade da existência de um canal no rio Cávado mais profundo, largo e navegável do que o atual.

É também possível que neste período o rio Cávado (designado por Celos nessa altura) desaguasse mais a sul, junto à localidade de Fão. Com o progressivo assoreamento desta zona, a partir do séc. XVI, é provável que o rio tenha começado a desviar o seu estuário progressivamente para norte, passando a desaguar junto à Ermida da Sr.<sup>a</sup> da Bonança. A existência de sedimentos grosseiros heterométricos, compatíveis com génese fluvial, em zonas interdunares na Bonança, comprovada através de sondagens, parece confirmar esta hipótese [7]. O rio Cávado terá então continuado a sua migração para norte até à sua posição atual, com a formação da restinga.

A deposição da parte mais superficial do depósito arenoso que cobre a superfície da região de Fão parece enquadrar-se num período de clima mais frio que o atual, designado por Pequena Idade do Gelo, ocorrido aproximadamente entre 1300 e 1850 [8,9,10,11].

Embora o conjunto de processos que originou este período ainda seja motivo de debate, parece haver alguma convergência no sentido de ter sido iniciado por atividade vulcânica e mantido pela ocorrência de menor atividade solar, criando mecanismos de feedback no sistema climático que contribuiriam para o arrefecimento [8]. A ocorrência de uma sucessão de mínimos de manchas solares parece estar relacionada com um período alargado de menor irradiação solar, contribuindo para o arrefecimento (Figura 4). De 1300 a 1850 ocorreram os mínimos de manchas solares de Wolf, Spörer, Maunder e Dalton (Figura 5).

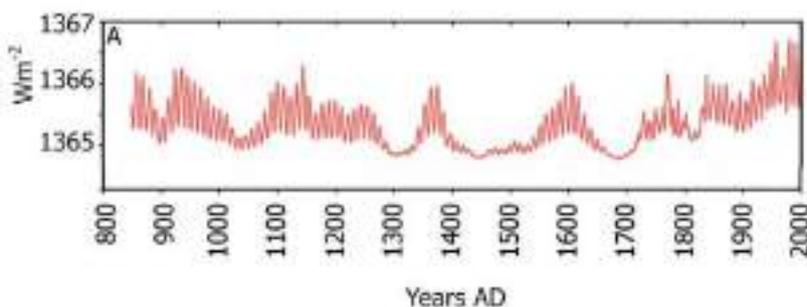


Figura 4 - Irradiação solar nos últimos 1200 anos [5].

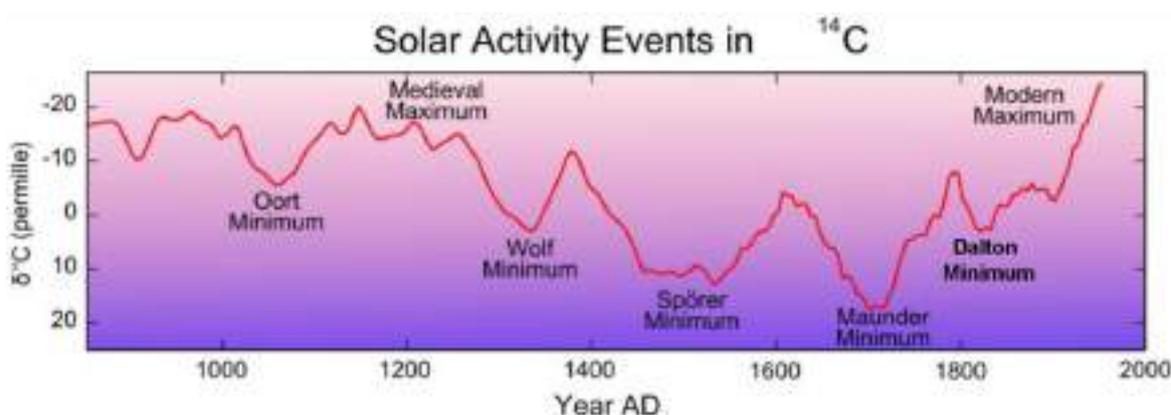


Figura 5 - Mínimos de manchas solares entre 800 e 2000 AD, baseados em anomalias isotópicas de Carbono 14.

Durante a Pequena Idade do Gelo estima-se que o mar poderá ter estado entre 20 e 80 cm abaixo do nível médio atual (admitindo que o ritmo de subida do nível médio da água do mar, a partir de 1700, terá ocorrido, aproximadamente, à média global do ritmo de subida da era de medição por satélite – 3.2 mm/ano).

Neste período é bastante provável que, devido ao aumento do número de tempestades, com chuva/neve intensa, possa ter ocorrido um aumento da sedimentação ao longo dos vales dos rios, criando o chamado “preenchimento mais jovem” [11]. A jusante e no interior dos estuários, a descida do nível médio da água do mar terá permitido um aumento da quantidade de sedimentos que migram em direção a estes, contribuindo para o abastecimento das praias. O mesmo conjunto de fenómenos terá levado a que os rios cortassem os seus próprios depósitos perto da foz, com canais mais estreitos e incisos sobre os abundantes sedimentos, formando terraços fluviais e sistemas complexos de ínsuas. A montante a sedimentação é também abundante.

A quantidade de sedimentos no rio e a existência de canais estreitos e grande quantidade de sedimentos no leito do rio Cávado é ainda visível na Figura 6, na primeira metade do Séc. XX.



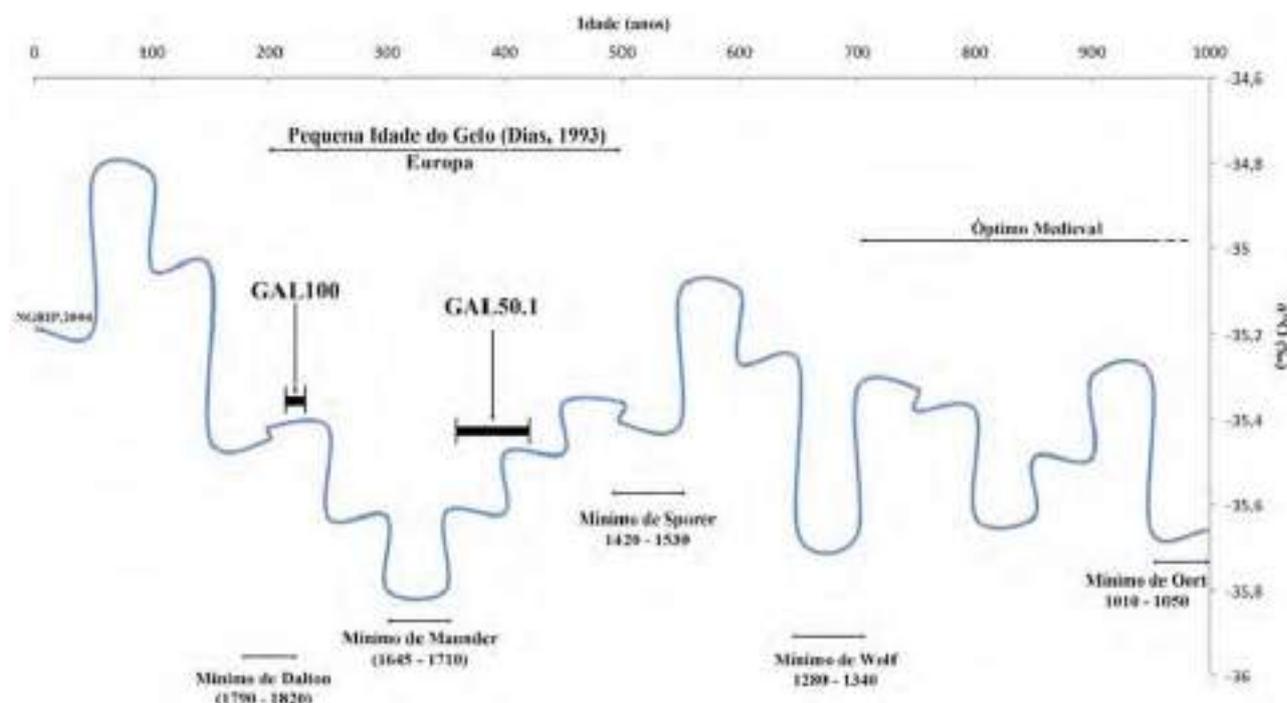
**Figura 6 - Leito do rio Cávado na primeira metade do séc. XX (Câmara Municipal de Esposende, 2012).**

Os sedimentos transportados pelos rios e, nesta região em especial, pelo rio Cávado, são depositados nas zonas costeiras onde vão constituir praias largas. Esta abundância sedimentar nas praias e no leito do rio, conjugada com ventos fortes em períodos mais secos e frios, comuns durante a *Pequena Idade do Gelo* [12], permitiu a mobilização de sedimentos para a criação de dunas costeiras extensas.

Considerando que o nível médio da água do mar era menor do que no presente, terá ocorrido também um aumento da área das praias, reforçando a superfície potencial de sedimentos que pode fornecer areia para a formação e crescimento de dunas. Este contexto terá sido fundamental para a formação da maioria dos cordões dunares recentes da costa noroeste portuguesa. Datações de amostras arenosas por OSL (*Optically-Stimulated Luminescence* - Figura 6), conduzidas recentemente na zona de Darque, e retiradas de formações sedimentares contemporâneas de Fão, enquadram-se com este período, tendo os sedimentos sido, muito provavelmente, depositados entre o Séc. XVI e o Séc. XIX [7,13].

Na localidade da Apúlia, em 1586, há relatos de que a areia cobria uma extensa porção dos terrenos agrícolas, o que levou os seus habitantes a pedir proteção régia [14], confirmando que este processo de invasão arenosa, que já estaria em curso, ter-se-á intensificado. Chaves [15] refere que “*Fam foi arrasada pelas areias oriundas do Norte*”, após o Concílio do Papa Leão I, referindo também que “*a igreja Matriz foi arrasada até ao telhado, andando as cabras por cima*” [16].

No caso particular das Dunas de Fão, os sedimentos que constituem as dunas encontram-se a cobrir a necrópole de Fão, que terá funcionado entre os séculos XI a XIV, confirmando, pelo mais elementar princípio estratigráfico da sobreposição, que estas dunas são de formação recente, com idade medieval/renascentista.



**Figura 7 - Datções por OLS obtidas para as unidades litostratigráficas de Galeão: Areias de Galeão (GAL100) e Areias da Ribeira da Areia (GAL50.1). As barras negras indicam o intervalo de erro da datação. Foi usada a cronostratigrafia do MIS1 (dados  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  de NGRIP members, 200) [13].**

O facto de haver sempre pouca vegetação na costa, não só pelas condições naturais costeiras como pelo facto de as pessoas utilizarem a cobertura vegetal como fonte de combustível ou para outras utilizações, como produção de fertilizante, levou a que a areia se mobilizasse facilmente para zonas interiores, por vezes até a alguns quilómetros da costa.

Este movimento sedimentar contribuiu para a extinção ou eutrofização da maioria das lagunas previamente existentes, sendo que nesta zona a laguna residual da Apúlia é o único vestígio remanescente deste conjunto lagunar. Havendo a ameaça da destruição dos campos agrícolas que ficavam mais no interior, durante o primeiro terço do séc. XX, foram conduzidas extensas campanhas de florestação das dunas litorais no sentido de conter o movimento de areia.

Na Figura 8 é possível ver como alguns destes campos dunares ainda migravam vigorosamente para o interior na segunda metade do séc. XX, a poucos quilómetros deste setor, neste caso a norte da localidade da Amorosa, no concelho de Viana do Castelo e junto à localidade de Fieiro Alto no norte do concelho de Esposende.



**Figura 8 – A) Campo dunar a norte da Amorosa, 1973; B) Zona a norte da Amorosa, 2012; C) Campo dunar a sul do rio Neiva, 1973; D) Zona a sul do rio Neiva, 2012.**

A partir do Séc. XX, a crescente popularidade do usufruto das zonas costeiras para fins recreativos, levou a que a morfologia dunar fosse ocupada por urbanizações. Pequenos focos de ocupação, muitas vezes por casas precárias de pequenas comunidades pesqueiras, foram sendo substituídas por localidades que privilegiaram a construção mais fixa e pesada, culminando, nalguns casos, em pequenas cidades costeiras ou em grande volumetria de construção.

Com o aquecimento que se verificou após o final da pequena idade do gelo, por volta de 1850, o nível médio do mar começou novamente a subir.

Durante o séc. XX, o nível médio do mar terá subido em média, em Portugal, cerca de 17 cm. Com esta subida intensificou-se a migração para o interior do sistema praia-duna, inicialmente de modo lento, sem grandes consequências morfológicas ou de desestabilização do sistema. A migração dava-se mantendo a largura da praia e a estabilidade dunar. Esta migração acelerou durante a segunda metade do séc. XX devido a um variado conjunto de razões, sendo o aumento do nível médio da água do mar e a dinâmica climática apenas duas delas. A subida do nível médio da água do mar provoca também uma diminuição da profundidade do nível base de erosão. No fundo, essa subida modifica o perfil de equilíbrio do estuário do rio, aumentando a profundidade do seu leito e diminuindo a capacidade de transporte de sedimentos para o litoral. Este conjunto de fatores naturais, por si só, provoca défice sedimentar na zona costeira. Fatores antrópicos, tais como a multiplicação dos aproveitamentos hidroelétricos e a exploração de areia no leito dos rios, contribuíram também para a redução do aporte sedimentar às zonas costeiras por parte dos rios. Finalmente, a necessidade de defesa de núcleos urbanos recorrendo a obras de engenharia (tipo esporão), apesar de terem contribuído para a estabilização de alguns setores costeiros, provocaram a intensificação da erosão noutros, em especial para sotamar da sua implantação. Esta erosão ocorreu, por vezes, até vários quilómetros para sul destas estruturas e continua a ocorrer. Durante os anos 70 e 80, quando já se estava a verificar algum recuo, foram construídos esporões adicionais para tentar conter a erosão. Após a construção das novas estruturas verificou-se a intensificação da erosão para sotamar, em alguns locais com recuos mais de cinco vezes superiores aos anteriormente observados.

Nestas últimas décadas observou-se o emagrecimento das praias no setor, o rebaixamento do seu perfil e o desenvolvimento de uma arribada de erosão, nalguns casos fortemente truncada, criando um perfil refletivo da energia da onda que ainda hoje se mantém. Perdeu-se a duna embrionária e a duna frontal foi completamente desestabilizada morfológicamente. Nalguns casos, onde o perfil e a largura da praia permitem procedimentos de retenção sedimentar, como por exemplo paliçadas, tem-se conseguido alguma reconstituição das dunas, como por exemplo entre a praia de Esposende e Cepães. A única exceção à tendência erosiva tem sido o setor intermédio da restinga, situado entre a zona de edificação costeira de Ofir e a parte mais próxima da extremidade da restinga, onde se tem verificado estabilidade ou mesmo alguma acreção nas últimas décadas.

[1] Dias, J.A.; Rodrigues, A.; Magalhães, F. (1997) - Evolução da linha de costa, em Portugal, desde o último máximo glaciário: Síntese dos conhecimentos. Estudos do Quaternário, 1:53-66, Lisboa, Portugal. ISSN: 0874-0801

[2] Bel, M., Walker, H. J. C. (1992) Late quaternary environmental change. Longman Group. Essex.

[3] Lamb, H.H. (1995) Climate history and the modern world. Routledge, Londres.

[4] Amândio, J. B. (1994). Esposende e o seu concelho na História e na Geografia. Mínia. Braga: A.S.P.A.. 3ª série, Ano II (1994). pp. 35-64.

[5] Amândio, J. B. (1995). O engenheiro Custódio José Gomes de Vilas Boas e os portos de mar de Esposende em 1795 e Viana em 1805. Viana do Castelo: Amigos do Mar.

[6] Felgueiras, J. (1998). A pilotagem e pilotos-mores da barra de Esposende. Esposende: [Edição de Autor], 1998. p. 18.

- [7] Granja, H. M. (1990). Repensar a geodinâmica da zona costeira: o passado e o presente. Que futuro? (o Minho e o Douro Litoral). Universidade do Minho, Thesis, unpublished, 347p.
- [8] Miller, Gifford H.; Geirsdóttir, Áslaug; Zhong, Yafang; Larsen, Darren J.; Otto-Bliesner, Bette L.; Holland, Marika M.; Bailey, David A.; Refsnider, Kurt A.; Lehman, Scott J.; Southon, John R.; Anderson, Chance; Björnsson, Helgi; Thordarson, Thorvaldur (2012). "Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks". *Geophysical Research Letters*. 39 (2) – Science Daily (January 30, 2012). doi:10.1029/2011GL050168
- [9] IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [10] Matthews, John A.; Briffa, Keith R. (2005). "The 'little ice age': Re-evaluation of an evolving concept". *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 87: 1736. doi:10.1111/j.0435-3676.2005.00242.x.
- [11] Grove, A. T., (2001). The little ice Age and its Geomorphological consequences in Mediterranean Europe, *Climatic Change*, 48: 121–136, Kluwer Academic Publishers.
- [12] Alcoforado, M. J. (1999). Variações climáticas do passado: chave para o entendimento do presente? Exemplo referente a Portugal (1675-1715). *Territorium* 6.1999.
- [13] Carvalhido R. (2012). O litoral norte de Portugal (Minho-Neiva): evolução paleoambiental quaternária proposta de conservação do património geomorfológico. Tese de Doutoramento. Braga: Universidade do Minho.
- [14] Neiva M. A. P. (1991) Esposende - páginas de memória. Edição de autor, Esposende.
- [15] Chaves, P. J. G. (1929). Portos de Mar na Costa Norte e sua importância, Tipografia Esposendense de José da Silva Vieira, Esposende, 1929, p. 7.
- [16] Granja, H. M. (2002) Reconstituição Paleoambiental da Zona Costeira, a Norte da Laguna de Aveiro, desde a Idade Média até à Actualidade. *O Litoral em Perspectiva Histórica (Séc. XVI a XVIII)*, Porto, Instituto de História Moderna, 2002, p. 93-109.

### 2.3. Características gerais do Estuário do rio Cávado

A zona da foz do rio Cávado e o seu estuário (41°32'20.92"N; 8°47'31.65"W) situam-se no litoral do concelho de Esposende, no distrito de Braga (Figura 9, zona a laranja) e estão inseridas 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 16 km [1,2].



Figura 9 - 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 (Figura 9, zona a amarelo) é uma defesa costeira natural, fundamental para a proteção da cidade de Esposende contra a ação do mar. Esta formação geológica natural tem um comprimento de cerca de 2100 m e uma morfologia variável de acordo com a magnitude da dinâmica marítima e fluvial. Neste estudo, o limite da dinâmica fluvial é delimitado pelo Açude de Barcelinhos, estando a sua localização apresentada na Figura 9 [1,2].

A foz do rio Cávado caracteriza-se por apresentar uma costa relativamente plana, 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 de costa. A Figura 10 ilustra espacialmente as três obras costeiras existentes na zona que permitem o controlo da evolução da linha de costa, designadamente: o molhe norte da margem direita da embocadura (A), que retém sedimentos na praia a norte da embocadura; o esporão da restinga (B), de forma curvilínea, com cerca de 250 m de comprimento e uma orientação SW, localizado aproximadamente a meio do comprimento da restinga, e o esporão de Ofir (C), orientado para oeste.

De referir também a existência de um dique paralelo à marginal de Esposende (D), que constitui uma proteção secundária da frente urbana, permitindo a dissipação da energia da agitação marítima incidente durante as tempestades (condições extremas). Este dique apresenta um comprimento de cerca de 865 m e tem um perfil em talude de enrocamento.

No tardoz da estrutura 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, bem como aos sedimentos provenientes do mar.

O grau de exposição da estrutura tem sido o principal fator para a sua degradação, e que tem levado a uma diminuição da cota de coroamento da mesma e, conseqüentemente, a um aumento da frequência e magnitude dos galgamentos, sobretudo durante a ocorrência de preia-mar.

Em períodos de tempestade, as ondas alcançam o interior do estuário e, por vezes, incidem no muro marginal, provocando inundações na frente urbana [1,3,4]. A Figura 11 apresenta o estado atual das estruturas costeiras mencionadas anteriormente.



**Figura 10 - Caracterização do estado atual da embocadura do rio Cávado e obras existentes: A) molhe norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique; s) sentido da deriva litoral (Google Earth, 2019).**

A frente ribeirinha da cidade de Esposende, localizada na margem direita do estuário do rio Cávado, Figura 10, está 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 PDM de Esposende, e no que respeita às condicionantes relativas ao uso do solo, verifica-se que grande parte do extremo de jusante da margem esquerda pertence à Rede Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) [1,5].



**Figura 11 - Estado atual das infraestruturas costeiras (20 de maio de 2020): A) molhe norte; B) esporão da restinga; C) esporão da praia de Ofir; D) dique.**

O leito do rio possui bancos de areia, pequenas ilhas e uma extensa área de sapal (Figura 12 e Figura 13), que o dividem em diversos canais de baixa profundidade. Importa referir também que o trecho final do rio Cávado, imediatamente antes da sua embocadura, tem uma orientação predominante SE-NW [2,5].



**Figura 12 - Bancos de areia no interior do estuário (20 de maio de 2020).**



**Figura 13 - Sapal entre o dique e a linha de costa da marginal de Esposende (20 de maio de 2020): A) baixa mar; B) preia mar.**

A embocadura do rio Cávado apresenta uma curvatura acentuada em direção ao oceano Atlântico e caracteriza-se por ter uma largura variável, dependendo do posicionamento da restinga e do local onde a mesma é medida (a largura é de aproximadamente 40 m segundo a direção N-S), e profundidades de água geralmente entre 1 e 3 m, facto este que impossibilita atualmente uma navegação segura na barra. Nos períodos de mará vaza, a foz do rio Cávado apresenta várias unidades morfológicas que podem ser assinaladas na Figura 14 e na Figura 15. 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 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 e com profundidade inferior a 1 m [2,6].



**Figura 14 - Foz do rio Cávado (maio de 2020): a) extremidade norte da restinga de Ofir; 1) delta de vazante; 3) canal principal; 4) canal secundário.**

Através de uma análise visual é possível concluir que a foz do rio Cávado apresenta um aumento dos bancos de areia do delta de enchente na parte terminal do estuário, junto ao molhe e ao dique existentes. Na área entre esse dique e a frente urbana de Esposende encontra-se um extenso banco de areia. As acumulações sedimentares extensas e visíveis nestas zonas devem-se, essencialmente, às alterações hidrodinâmicas que ocorreram recentemente.

Importa ainda referir que a morfologia da embocadura do rio Cávado sofre modificações significativas aquando da ocorrência de tempestades marítimas coincidentes com situações de cheia do rio Cávado. De facto, a coincidência desses eventos no tempo provoca um aumento global da erosão na extremidade da restinga e galgamento no dique. Além disso, a estas ações adiciona-se ainda o acréscimo do volume sedimentar de origem fluvial transportado para o oceano e para as praias adjacentes.



**Figura 15 - 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.**

O corpo arenoso da restinga está muito exposto à ondulação de noroeste. No entanto, os afloramentos rochosos denominados de Cavalos de Fão, provocam a refração e difração das ondas, contribuindo para uma diminuição da energia que atinge a praia, principalmente aquando da ocorrência 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. Esta situação provoca dificuldades no escoamento fluvial em particular na maré vaza, tendo-se assistido, ao longo do tempo, a vários ciclos de rotura da restinga de Ofir e à conseqüente necessidade de efetuar operações de alimentação artificial, para tentar recuperar a restinga e o equilíbrio da embocadura do rio Cávado [1,2].

[1] Gomes, F. [et al.] (2011). *Relatório do Grupo de Trabalho sobre a Restinga de Ofir/Esposende*.

[2] Pinho, J.L.S. (2005). *Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado*.

[3] Nemus (2003). *Estudo do Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Barra do Cávado* [Relatório Não Técnico].

[4] PLN (2016b). *Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado. Polis Litoral Norte*.

[5] Carvalho, G. Soares de; Gomes, Fernando Veloso; Pinto, Francisco Taveira (2000) - *Os Estuários de Portugal e os Planos de Bacia Hidrográfica* In *EUROCOAST-PORTUGAL* p. 13, 18-19; 66-67. ISBN 972-8558-05-8.

[6] Loureiro, E. (2007). *Indicadores Geomorfológicos e Sedimentológicos na Avaliação da Tendência Evolutiva da Zona Costeira - Aplicação ao Concelho de Esposende*. Doutoramento em Ciências. Universidade do Minho.

#### 2.4. Análise temporal do posicionamento da restinga /linha de costa da foz do rio Cávado

Ao longo dos anos, o posicionamento da restinga do rio Cávado tem sofrido grandes alterações face à dinâmica acentuada entre as ações fluviais do rio Cávado e toda a agitação marítima incidente. A cidade de Esposende, como consequência das alterações morfológicas na embocadura do rio Cávado, tem ficado cada vez mais exposta.

Na Figura 16 estão representados os vários posicionamentos da linha de costa nas últimas quatro décadas. Estas linhas de costa foram obtidas a partir de imagens dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 8 corrigidas através de dados de maré do marégrafo de Leixões, referentes ao nível médio da água do mar, e admitindo ainda um talude médio da praia com uma inclinação de 0.029 [1]. Para uma análise mais aprofundada da dinâmica local, o Anexo A apresenta cerca de 120 linhas de costa referentes ao período compreendido entre 1980 e 2020.

Ao longo da primeira década (Figura 16a), *i.e.*, entre 1980 e 1990, o posicionamento da restinga sofreu um ligeiro recuo e a largura da mesma teve uma pequena redução. Durante a segunda década (Figura 16b), manteve-se a tendência observada anteriormente, o que dá suporte aos cenários mais pessimista relativamente ao grau de exposição da cidade de Esposende.

A extremidade norte da restinga está sujeita a importantes processos erosivos devido ao efeito da maré, da agitação marítima, sobretudo em períodos de tempestade, e ainda devido às descargas fluviais. Estes fenómenos contribuem para o transporte sedimentar e, por vezes, para a rotura do sistema dunar.

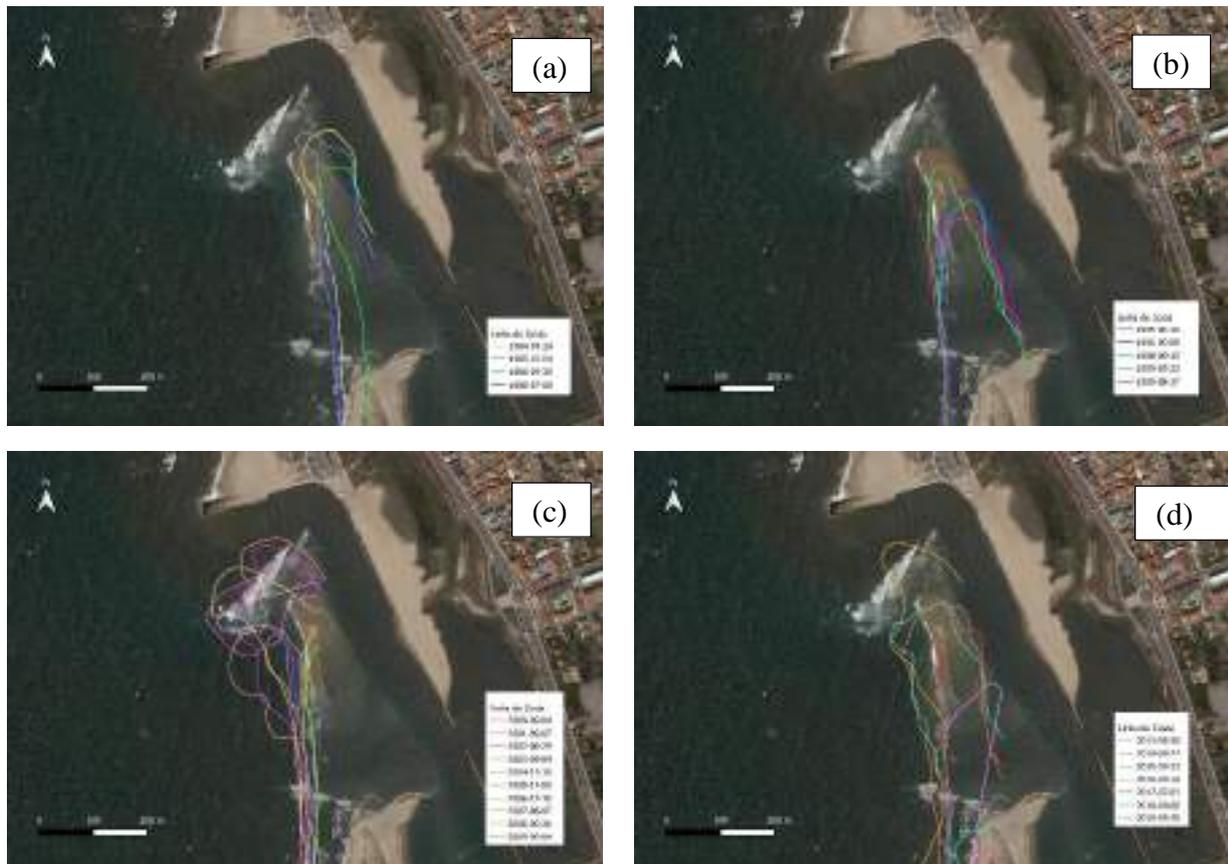


Figura 16 - Evolução temporal da morfologia da restinga entre os anos: (a) 1980 e 1990; (b) 1990 e 2000; (c) 2000 e 2010 e (d) 2010 e 2019.

Na Figura 16c estão representadas as linhas de costa relativas à terceira década. É visível o acentuado dinamismo morfológico da restinga, sendo que, com o evoluir dos anos, a volumetria do banco dunar continuou a diminuir, expondo, ainda mais, a frente urbana da cidade de Esposende. No final da terceira década, foram realizados vários projetos de intervenção com o objetivo de evitar recuos acentuados da histórica e emblemática proteção costeira natural de Esposende. Na Figura 16d é visível que a restinga aumentou a sua volumetria no ano 2015, devido à realização de uma nova intervenção de alimentação artificial, desta vez reforçada com geossistemas preenchidos com areia. Esta solução mostrou-se pouco eficaz, tendo as novas estruturas de proteção ruído. Consequentemente, o banco dunar continuou a recuar acentuadamente.

[1] COSMO. Data de acesso (01-12-2020). <https://cosmo.apambiente.pt/>

## 2.5. Intervenções realizadas na barra e restinga da foz do rio Cávado

Neste subcapítulo são apresentadas as intervenções mais relevantes realizadas na foz do rio Cávado, desde 2015 até hoje. O cronograma apresentado na Figura 17 sintetiza as intervenções efetuadas. De referir ainda que algumas foram realizadas em paralelo.

Nos últimos anos, foram várias as intervenções realizadas na foz do rio Cávado com o intuito de garantir as cotas necessárias para a segurança da navegabilidade. De referir que as dragagens realizadas nas últimas décadas apresentam uma certa periodicidade. Destacam-se as dragagens de 1994, 1998, 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 1 os volumes correspondentes às dragagens referidas.

Tendo em conta a crescente erosão das dunas, proteções naturais contra a ocorrência de galgamentos oceânicos, e por forma a minimizar o número de intervenções de dragagem na barra a curto prazo, foi necessário implementar no local sistemas de reforço com um período de vida útil superior, mais robustos e resistentes, mas que não criassem impactos negativos do ponto de vista ambiental e paisagístico.

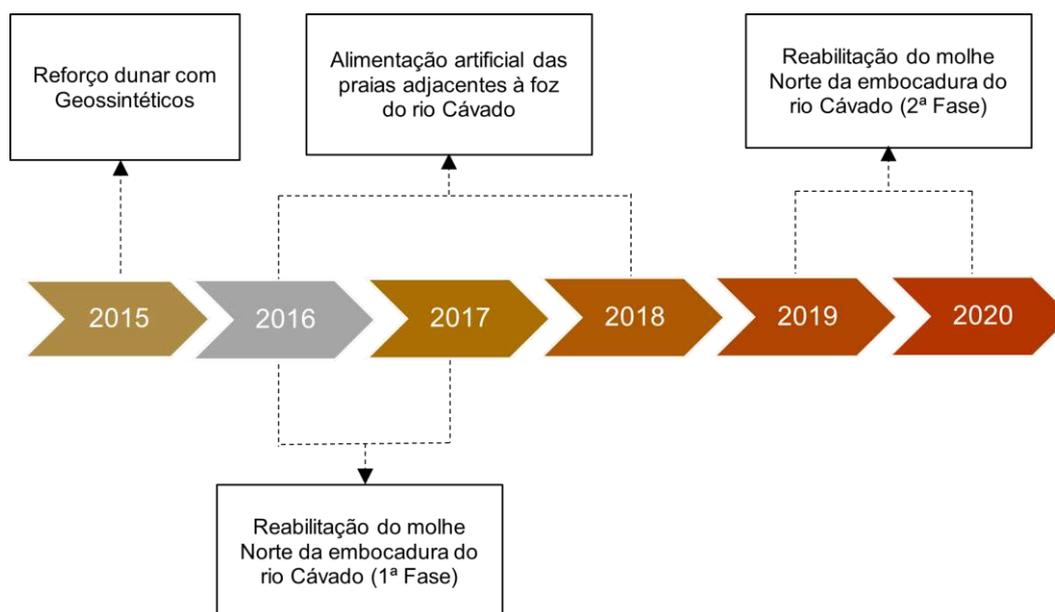


Figura 17 - Cronograma temporal das intervenções realizadas na foz do rio Cávado.

**Tabela 1 - Dragagens efetuadas na foz do rio Cávado [1].**

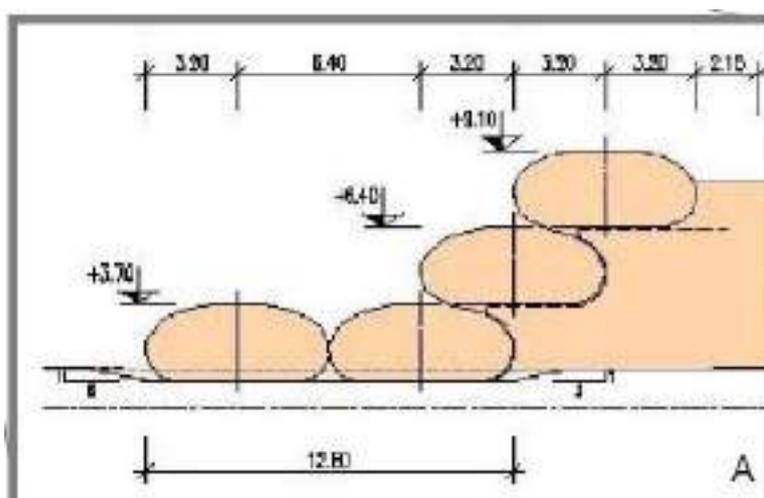
Ano	Volume dragado	Custo (sem IVA)
1994	105 000 m <sup>3</sup>	59 990 €
1998	300 h	2 990 €
2001	15 000 m <sup>3</sup>	19 550 €
2006	112 000 m <sup>3</sup>	660 000€

Assim, 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 em material geossintético [1,2,3].

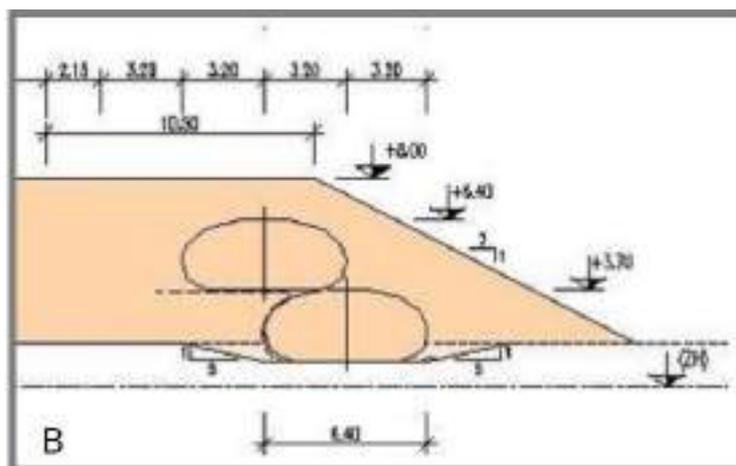
Os geossistemas, neste caso geocilindros, são sistemas fechados, fabricados em material geotêxtil, usualmente preenchidos com o material granular disponível localmente. No caso desta intervenção, o material introduzido nos cilindros foram areias provenientes da dragagem no canal de navegação da embocadura do rio Cávado.

No dimensionamento dos geocilindros foram adotadas as seguintes condições de mar: alturas de ondas significativa,  $H_s$ , entre 8.5 e 9.5 m, período de onda de pico,  $T_p$ , entre 12 e 14 s e um nível de maré igual a 4.34 m (ZH). Para essas condições de dimensionamento foi obtido um diâmetro teórico para os geocilindros de 5 m.

A configuração da intervenção adotada (Figura 18 e Figura 19) consistiu na colocação de duas fiadas de geocilindros 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 em 2006, ou seja, aproximadamente +8.0 m (ZH). Adicionalmente, definiu-se uma largura mínima entre os dois taludes de 50 m.



**Figura 18 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do mar, A [2].**



**Figura 19 - Esquema do perfil transversal da restinga de Ofir, com a configuração dos geocilindros do lado do rio, B [2].**

A superfície onde foram colocados os geocilindros estava nivelada e livre de qualquer obstrução. Além disso, foi inicialmente preconizada a colocação de uma proteção de pé de talude, em tela de geotêxtil, nos geocilindros da fiada inferior, embora não seja certo se a mesma foi efetivamente instalada. Para finalizar a intervenção foi construída uma duna artificial através da deposição de uma camada de areia sobre os geocilindros, na qual é usualmente reincorporada vegetação dunar de maneira a garantir uma melhor integração paisagística no ambiente natural envolvente (o que não terá sido feito neste caso). A Tabela 2 resume o volume de sedimentos movimentados e colocados na zona de intervenção [2].

**Tabela 2 - Volume de sedimentos utilizado no reforço dunar da restinga de Ofir.**

Destino	Volume de sedimentos (m <sup>3</sup> )
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 espraiamento da agitação marítima, por vezes, as ações marítimas e fluviais, quando intensas, incidem no que já foi construído, levando, à destruição da barreira protetora artificialmente construída. Assim, durante a implantação dos geocilindros, através das vistorias efetuadas ao longo da fase de execução, foram reportadas várias secções que apresentavam algumas deficiências, tais como ruturas e deslocamentos de geocilindros, sendo os mais afetados os do lado do mar. Com efeito, ainda na fase de construção, alguns dos geocilindros romperam e tiveram que ser remendadas. Por outro lado, devido à exposição solar e à fraca qualidade do material aplicado, este perdeu em poucos meses uma parte substancial da sua resistência inicial.

No início de 2016, foram registadas mais deficiências nos geocilindros colocados no ano anterior. A Figura 20 apresenta alguns exemplos dos problemas: a) estreitamento da largura da praia devido a possíveis galgamentos e erosões, tanto do lado do mar, como do lado do rio; b) rutura de geocilindros devido a atos de vandalismo ou por objetos cortantes provenientes da ação marítima, principalmente na fiada de base do lado do rio; c) movimentação de areias no interior dos geocilindros do lado do mar, por ação da agitação marítima ou correntes [2]. De referir ainda que o problema identificado na Figura 20c pode também resultar de um deficiente enchimento do geossistema.



**Figura 20 - Exemplos de problemas encontrados nos geocilindros face aos fenómenos marítimos e fluviais, no início de 2016 [2].**

A Figura 20 mostra que a solução implementada não foi eficaz na resolução dos problemas associados à estabilidade da restinga. Este sistema estuarino tem uma elevada dinâmica e está sujeito a regimes hidrodinâmicos de elevada energia, o que não se coaduna com a instalação de um sistema rígido com o proposto. Além disso, a imposição de manter a cota de coroamento da restinga para não agravar os impactes paisagísticos, torna inevitável os galgamentos cíclicos que este sistema tem sofrido no inverno, e que são cada vez mais intensos.

Entre 2016 e 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 rio 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 (Figura 21).



**Figura 21 - Molhe norte da embocadura do rio Cávado, estado atual.**

O quebramar norte da foz do rio Cávado permite abrigar as embarcações na entrada e na saída da embocadura e minimizar a energia da agitação marítima que entra para o interior do estuário, em particular para a orientação de NW. Sendo esta estrutura um obstáculo direto à ação do mar, ao longo dos tempos foi apresentando sinais de degradação (Figura 22).



**Figura 22 - Molhe norte da embocadura do rio Cávado, estado de degradação da estrutura de enrocamento: a) falhas na estrutura (vista norte), b) destruição na secção da cabeça (vista norte) [5].**

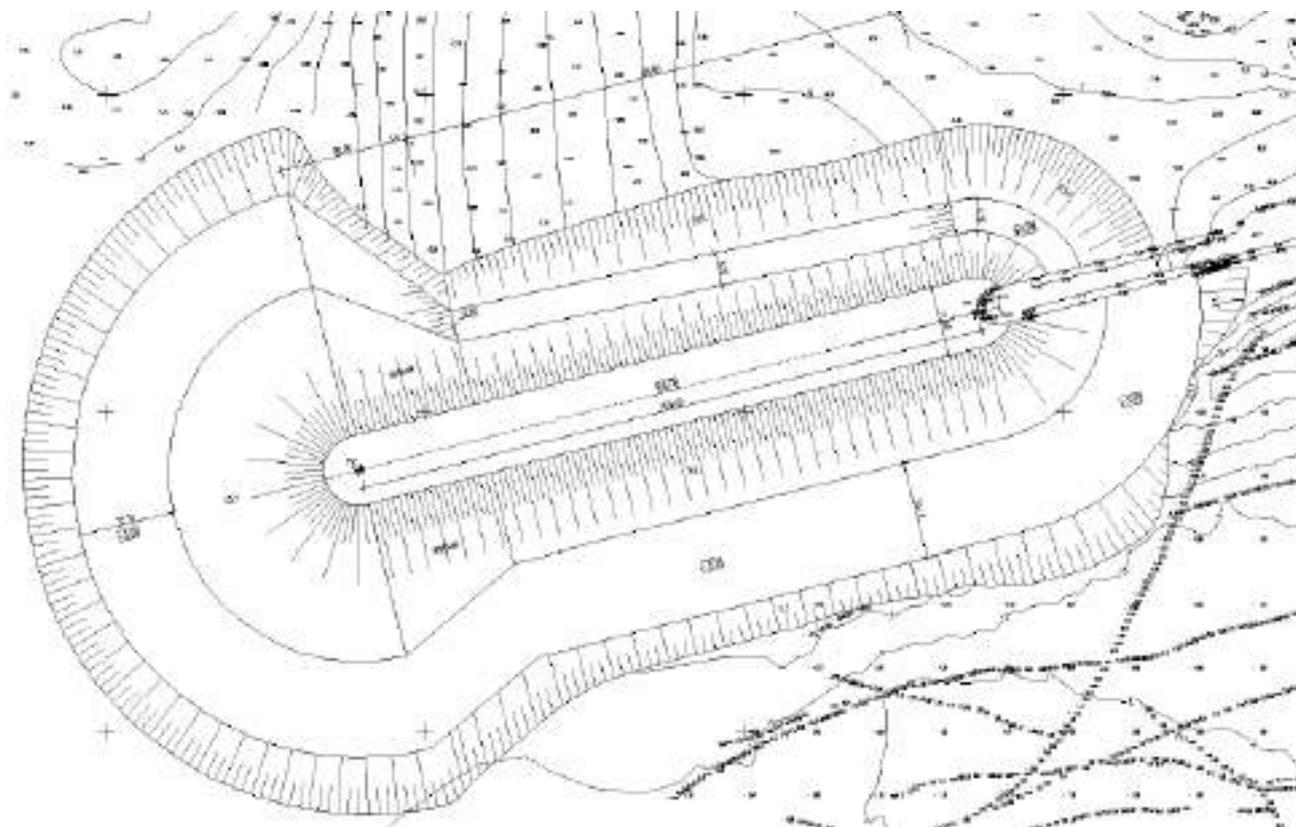
Neste sentido, foi recentemente efetuada uma intervenção de reabilitação no molhe, por forma a aumentar a sua resistência, mantendo as funções que esta obra costeira desempenha. Essas funções consistem em: (i) conter as areias provenientes das correntes de deriva litoral a norte, garantindo o aumento do volume na praia Suave Mar; (ii) 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 (iii) o guiamento das correntes fluviais [4,5].

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 e o tipo de estrutura. A Tabela 3 resume as características principais dos perfis-tipo do troço atualmente reabilitado.

A Figura 23 apresenta a planta geral da obra de reabilitação e a Figura 24 o estado atual dos taludes de enrocamento.

**Tabela 3 - Características dos perfis-tipo da intervenção de reabilitação do molhe norte do rio Cávado [5].**

	<b>Perfil-tipo do tronco</b>	<b>Perfil-tipo da cabeça</b>
<b>Cota de coroamento</b>	+6.75 m (ZH)	+6.75 m (ZH)
<b>Inclinação dos taludes</b>	3(H):2(V)	2,5(H):1(V)
<b>Manto de proteção exterior</b>	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.
<b>Perfil do lado norte</b>	Desenvolve-se de forma variável, descendo até à cota +2,00 m (ZH), prolongando-se por uma banqueteta com 5,25 m de largura.	Desenvolve-se até à cota -3,00 m (ZH), prolongando-se por uma banqueteta com 15,10 m de largura.
<b>Perfil do lado sul</b>	Desenvolve-se até à cota -3,00 m (ZH) prolongando-se por uma banqueteta com 15,10 m de largura.	Desenvolve-se até à cota -3,00 m (ZH), prolongando-se por uma banqueteta com 15,10 m de largura.

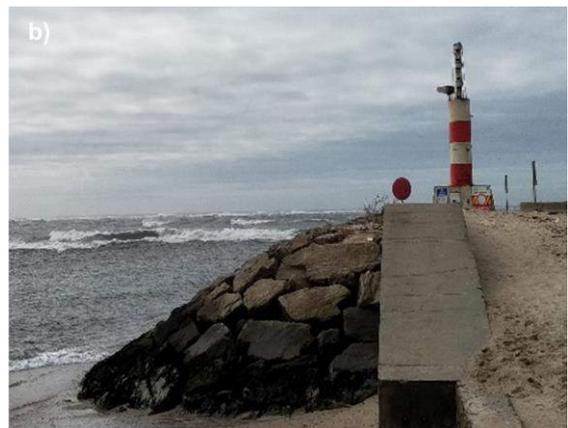


**Figura 23 - Planta geral do projeto de reabilitação do molhe norte da foz do rio Cávado [5].**



**Figura 24 - 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 a vazadouro. A areia dragada foi depositada na praia Suave-Mar, localizada imediatamente a norte do molhe, de modo a manter um perfil da praia semelhante ao atualmente existente. A Figura 25 ilustra as obras de reabilitação do molhe norte, à esquerda, e o talude de enrocamento reabilitado, à direita [5].



**Figura 25 - 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 [4].**

De 2015 a 2018 foram executadas várias intervenções de alimentação artificial das praias adjacentes à foz do Cávado – a praia de Suave Mar e a da restinga de Ofir. Estas intervenções tiveram 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 usadas na alimentação artificial das praias eram provenientes das dragagens realizadas no troço final do canal de navegação do rio Cávado (Figura 26).

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. Nas zonas da alimentação artificial foram obtidas variações de cotas 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 [3].



**Figura 26 - Origem dos sedimentos dragados na embocadura do rio Cávado e alimentação artificial da praia de Suave Mar e da restinga de Ofir, adaptado de [3].**

Atualmente, já se encontra finalizada a segunda fase do projeto de “*Reabilitação do Molhe Norte da Embocadura do Rio Cávado*”. A intervenção, apresentada na Figura 27, consistiu na reabilitação do dique, a Este da embocadura, que garante a proteção da marginal de Esposende e que, face aos temporais ocorridos, se encontrava degradado. Os danos na estrutura, tais como a destruição do prisma de enrocamento e o conseqüente abaixamento da cota de coroamento, demonstram a facilidade de galgamento da mesma durante períodos 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.

A intervenção incluiu: (i) a reconstrução e reforço do dique, nomeadamente do prisma de enrocamento, através do reperfilamento e reforço dos taludes, com inclinação de 3(H):2(V) ao longo do trecho e uma inclinação mais suave de 2(H):1(V) nas cabeças; e (ii) pela colocação de um manto de enrocamento de 3 a 6 t por forma a garantir a configuração inicial da obra, mantendo a cota de coroamento da estrutura de + 5 m (ZH) [5].

A Figura 28 ilustra o estado atual dos dois troços do dique da foz do rio Cávado. O troço da esquerda, após a reabilitação mencionada, e o da direita, que permanece num estado de degradação significativo.



**Figura 27 - Intervenção no dique da foz do rio Cávado: a) resultado do galgamento e inundações devido às marés associadas a períodos de agitação marítima intensa na secção entre os diques e o muro marginal de Esposende; b) obras de intervenção no dique [4].**



**Figura 28 - Estado atual dos troços do dique da foz do rio Cávado.**

[1] Gomes, F. [et al.] (2011). Relatório do Grupo de Trabalho sobre a Restinga de Ofir/Esposende.

[2] Palma, D. (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.

[3] PLN, Polis Litoral Norte (2016a). *Alimentação Artificial das Praias Adjacentes à Foz do rio Cávado*.

[4] PLN, Polis Litoral Norte (2020). Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR).

[5] PLN (2016b). Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado. Polis Litoral Norte.

## 2.6. Estudos realizados para a melhoria da barra do Cávado

A morfologia da restinga está associada à dinâmica marítima e fluvial, sendo que as alterações mais significativas ocorrem 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 das ações marítimas face aos caudais fluviais, cujos valores extremos 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 frente ribeirinha da cidade de Esposende. A fragilidade deste corpo dunar, que sofreu vários episódios de rutura, pondo em causa essa segurança, foi o motivo pelo qual ao longo dos tempos foram estudadas várias intervenções com o intuito de mitigar os problemas na barra de Esposende. Assim, esta secção serve para ilustrar e descrever alguns estudos já efetuados com possíveis soluções de melhoria da barra do Cávado, antecedendo os casos de estudo nacionais e internacionais com estruturas implementadas em zonas similares à barra da foz do Cávado, que serão apresentados no próximo capítulo.

### 2.6.1. Projeto de melhoria da barra do Cávado (IPTM – 2003)

Por solicitação do Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos (IPTM), foram estudadas em 2003, pela NEMUS - Gestão e Qualificação Ambiental, três alternativas para a melhoria da navegação na barra do rio Cávado e da acessibilidade às infraestruturas marítimas existentes. Essas três alternativas, que não chegaram a ser implementadas, apresentavam as seguintes características (Figura 29):

- A alternativa 1 não contemplava a construção de qualquer molhe, mas propunha a continuação das infraestruturas existentes e a dragagem periódica desde a embocadura do rio até à doca de pesca, numa área com cerca de 240 m de extensão e uma profundidade de 1.6 m abaixo do zero hidrográfico (ZH);
- As alternativas 2 e 3 consistiam na construção de dois molhes, um de cada lado da embocadura, por forma a fixar a entrada no canal de navegação. Os molhes seriam construídos com material idêntico ao já existente no molhe norte, ou seja, com blocos de enrocamento de grande dimensão em todo o tronco da estrutura, exceto na cabeça do molhe, que seria constituído com blocos de betão “Antifer”. Estas alternativas diferiam no comprimento dos molhes a adotar. Assim sendo, os molhes norte e sul da alternativa 2 apresentavam 160 m e 310 m, respetivamente, e, os da alternativa 3 apresentavam 120 m e 310 m. A cota dos fundos a alcançar com as dragagens, em ambas as alternativas, seria de 1 m abaixo do ZH.

Do ponto de vista paisagístico, as alternativas 2 e 3 apresentam maiores impactos, uma vez que serão mais um obstáculo visual devido à construção de um molhe na extremidade da restinga. Nesse trabalho, a dinâmica estuarina foi estudada através da aplicação de modelos numéricos. Embora os resultados obtidos não estejam ainda disponíveis, os autores concluíram que as alterações seriam insignificantes em comparação com as já existentes na barra, pelo que a escolha da alternativa a implementar não deveria ser realizada com base nestes aspetos. Neste sentido, e tendo em conta os fatores ambientais e socioeconómicos, concluiu-se que a melhor alternativa seria escolhida entre as soluções 1 e 3 [1].



Figura 29 - Características das alternativas apresentadas no projeto, adaptado de [1].

### 2.6.2. Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado

A Universidade do Minho realizou em 2005 um estudo que consistiu na análise das características hidrodinâmicas e do transporte sedimentar na foz do rio Cávado, recorrendo a simulações numéricas baseadas em dados recolhidos entre 1991 e 2003. Nessa análise, foram utilizados os programas RMA2 e SED2D, respetivamente [2]. O estudo envolveu a implementação de dois modelos hidrodinâmicos: o regional, que abrangia a zona desde a embocadura do estuário até ao açude do Angelino (Figura 30), e o local, que contemplava a embocadura do estuário. No estudo morfodinâmico apenas se recorreu ao modelo local, por forma a quantificar a concentração de sedimentos na zona mais crítica do estuário.

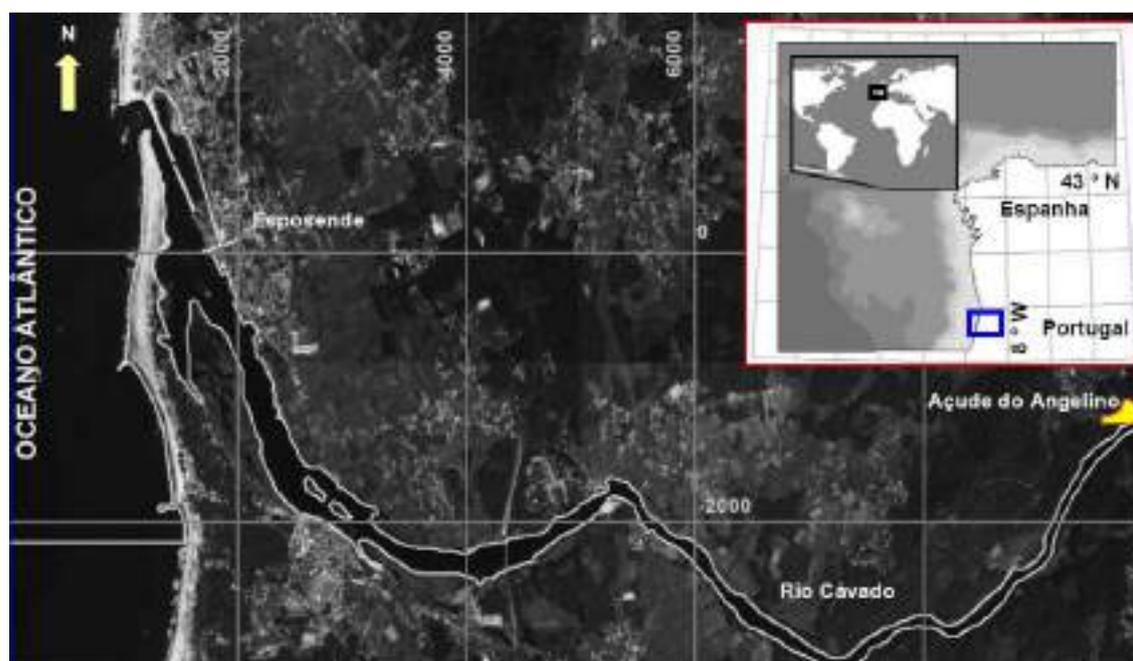
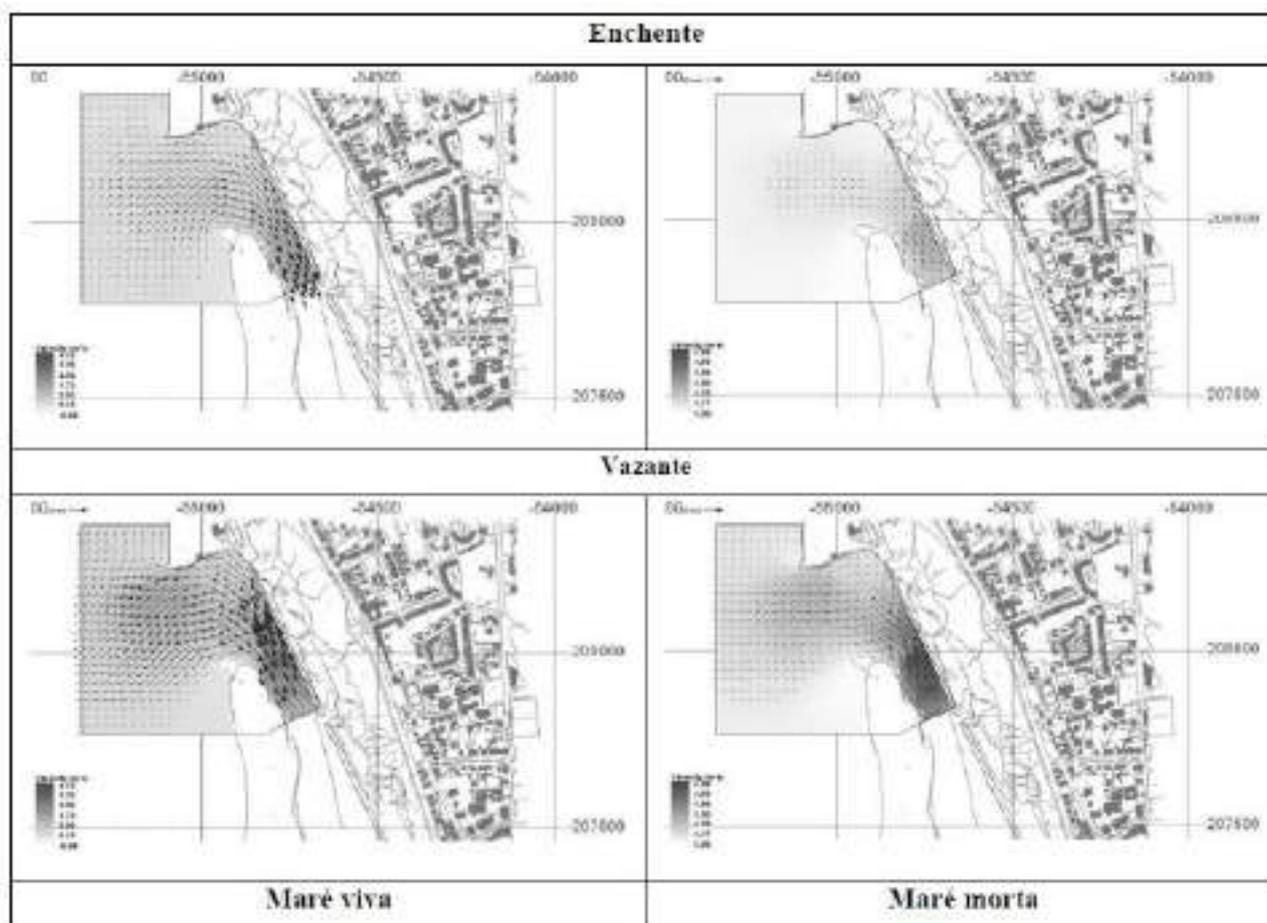


Figura 30 - Localização da área de estudo: Foz do rio Cávado, a oeste, e Açude do Angelino, a este, adaptado de [2].

Embora os caudais fluviais apresentem valores médios diários máximos anuais superiores a 200 m<sup>3</sup>/s, os estudos realizados consideraram um caudal fluvial constante, com um valor próximo do valor médio anual do caudal proveniente do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada. Quanto à variação do nível das marés, foi considerada uma amplitude de maré viva de 3.05 m e de maré morta de 1.00 m. De salientar que no estudo realizado não foi considerada a agitação marítima, fundamental na compreensão da dinâmica costeira. A partir dos resultados das simulações hidrodinâmicas foi possível obter os valores relativos às velocidades máximas das correntes de enchente e de vazante, face à ocorrência das marés viva e morta, Tabela 4. A Figura 31 ilustra a simulação realizada com o 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 4 - Velocidades máximas das correntes para os dois tipos de maré analisados, obtidos através do modelo hidrodinâmico local [2].**

Maré	Velocidade das Correntes (m/s)	
	Enchente	Vazante
Viva	1.4	3.0
Morta	0.4	1.0



**Figura 31 - Modelo hidrodinâmico local, velocidades máximas da corrente na enchente e na vazante para os dois tipos de maré analisados [2].**

As alterações nas concentrações e tipo de sedimentos provocadas pelos dois regimes da maré foram analisadas com o modelo morfodinâmico, com base em simulações de 12.5 h e 25 h (Figura 32 e Figura 33), correspondentes a um e a dois ciclos de maré, respetivamente. Embora se tenha verificado que os sedimentos do delta de vazante eram do tipo areia grossa a muito grossa (diâmetro médio de 0.85 mm) e saibro (diâmetro médio de 0.40 mm), e que estes tendem a migrar para a extremidade da restinga, nas simulações adotou-se uma granulometria constante (diâmetro médio de 2.0 mm) para os fundos. Os resultados mais significativos verificaram-se ao fim de 25 h de simulação, sendo que, de uma maneira geral, durante a maré morta, se forma um delta de vazante e ocorre erosão tanto na zona sul da praia a norte da embocadura, como no canal à direita da restinga.

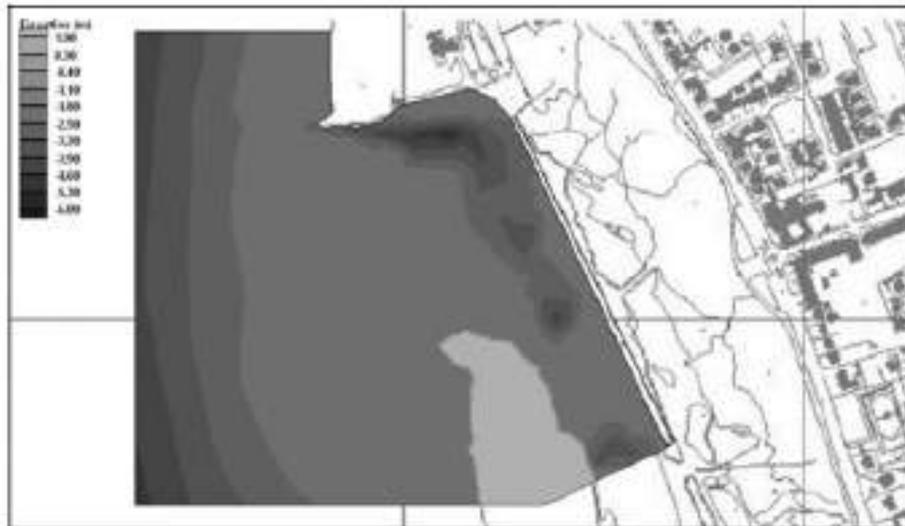


Figura 32 - Batimetria inicial local [2].

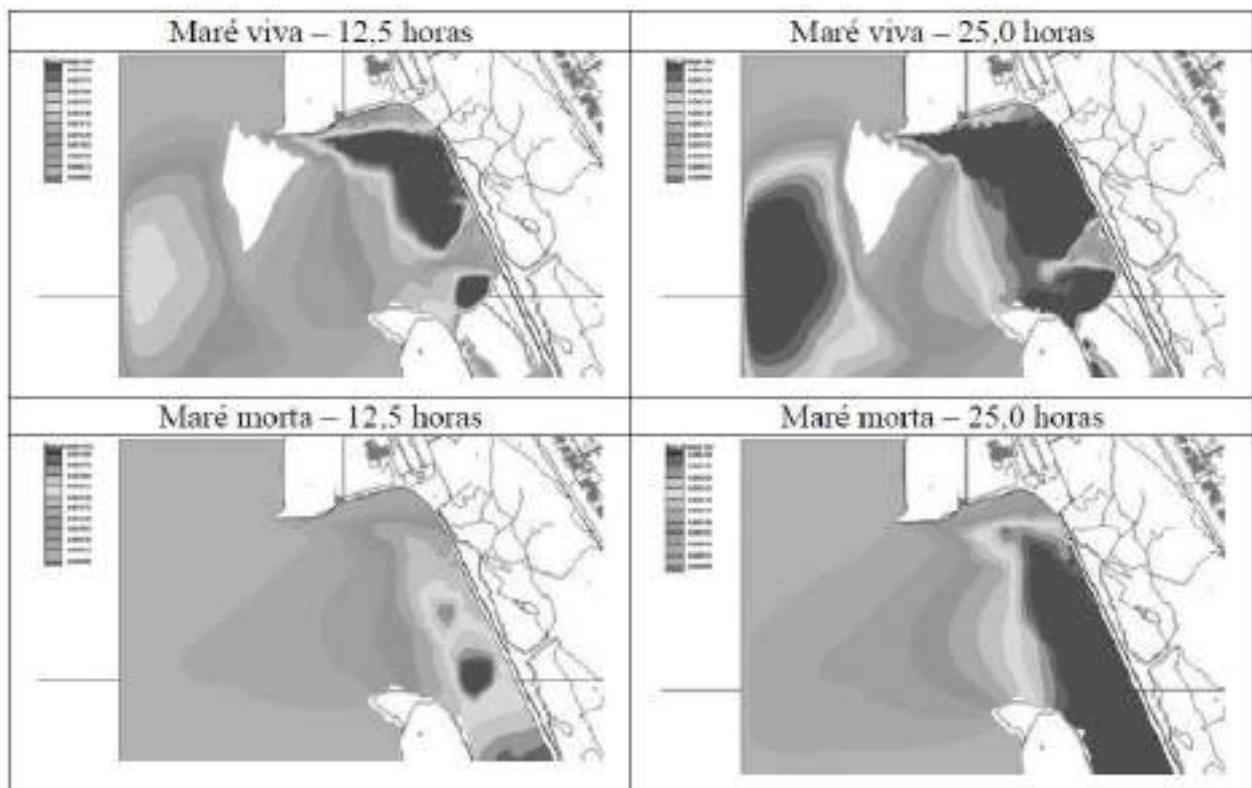


Figura 33 - Modelo local de transporte sedimentar: deposição de sedimentos para várias condições de maré [2].

Os estudos realizados permitiram fazer uma abordagem inicial dos fenómenos que estão na origem das alterações morfodinâmicas mais significativas na embocadura do rio Cávado ocorridas na presença de correntes de vazante associadas às marés e aquando da ocorrência de cheias [2].

[1] Nemus (2003). Estudo do Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Barra do Cávado [Relatório Não Técnico].

[2] Pinho, J.L.S. (2005). Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado.

### 3. ANÁLISE COMPARATIVA DE CASOS SIMILARES

#### 3.1. Introdução

As zonas costeiras apresentam morfologias e hidrodinâmicas distintas como consequência de condições locais climáticas, fluviais, marinhas, sedimentológicas e topográficas. Desta forma, a análise de outros casos similares (embocaduras) nacionais e internacionais tem como principal objetivo comparar e avaliar possíveis soluções a implementar na zona em estudo, mais ajustadas e otimizadas às condições locais. Para esse efeito, serão apresentados alguns casos nacionais e internacionais de embocaduras com características semelhantes às do caso de estudo.

#### 3.2. Casos nacionais

##### 3.2.1. Ria de Aveiro

A zona costeira de Aveiro sofreu uma evolução morfológica muito significativa ao longo dos séculos. Em consequência da atividade agrícola da zona entre o rio Minho e o rio Douro, foi realizada a desflorestação de grandes áreas, tendo o solo ficado menos protegido, o que originou um incremento significativo no fornecimento sedimentar ao litoral. O sentido N-S da deriva litoral na fachada oeste de Portugal, permitiu que os sedimentos fossem deslocados para sul. A Figura 34 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 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.

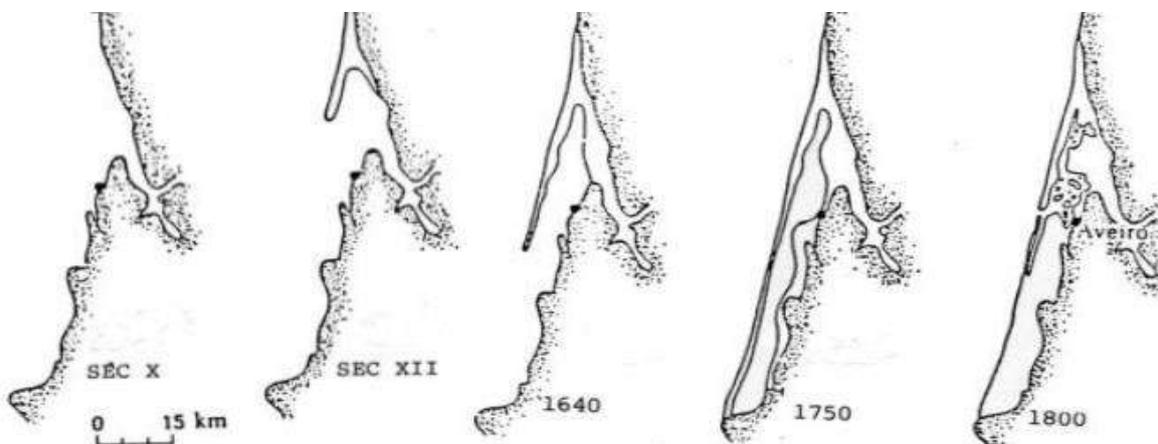


Figura 34 - Evolução da zona costeira de Aveiro.

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 as marés se propagam, originando uma variação de área da lagoa desde 66 a 83 km<sup>2</sup>. A profundidade de água média é de 1 m, com a exceção dos canais de navegação, onde a profundidade varia entre os 5 e os 10 m. Para tal, 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 de propagação 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 [1,2].

Por forma a melhorar as condições de acesso ao porto de Aveiro e proteger a ria da ação direta das ondas, foram construídos, na primeira metade do séc. XX, dois quebramares convergentes em ambos os lados do canal. Na década de 80, procedeu-se à extensão do quebramar norte, o que afetou significativamente a alimentação sedimentar da costa a sotamar do quebramar sul. A Figura 35 e a Figura 36 ilustram a disposição dos quebramares construídos e a evolução da ria no final do séc. XX e no início do séc. XXI.

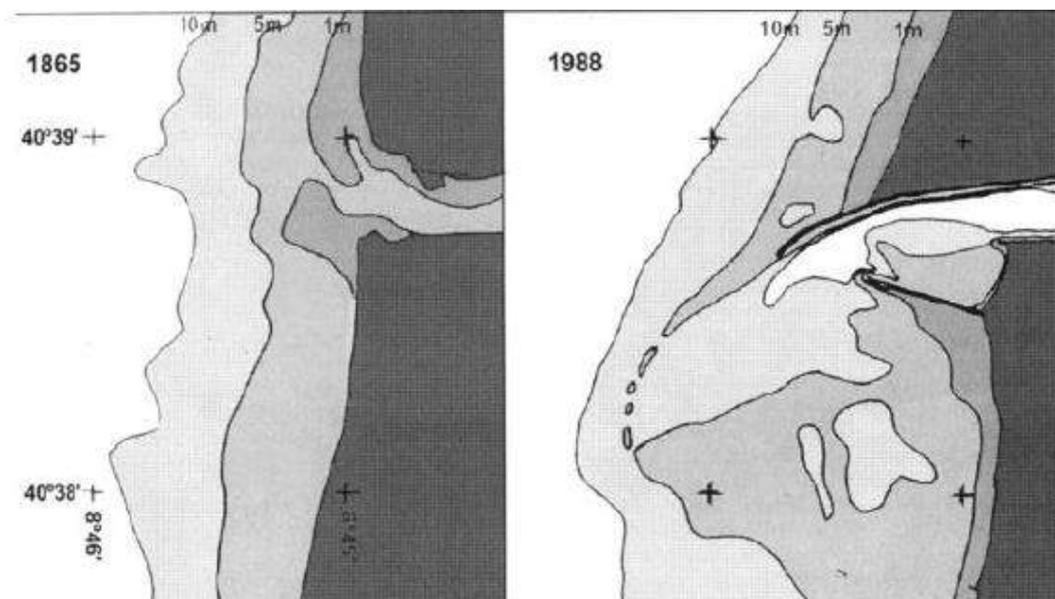


Figura 35 - Canal de entrada para a Ria de Aveiro: à esquerda, em 1865, antes da construção dos quebramares, e à direita, em 1988, após a última extensão do quebramares [3].



Figura 36 - Fotografia aérea da ria de Aveiro, 2010: 1) quebramar norte; 2) quebramar sul; 3) porto de Aveiro (Google Earth).

Na frente litoral a sul da barra foram construídos esporões, com o objetivo de atenuar o processo de erosão. Adicionalmente, são realizadas periodicamente alimentações artificiais dos materiais dragados do canal de navegação, a fim de controlar o volume sedimentar. Sendo a profundidade de água na ria muito pequena, os canais estreitos e existindo uma superfície de água extensa, é provável que, face às alterações climáticas, o nível médio da água do mar suba e os efeitos nesta zona possam ser agravados, nomeadamente as características da propagação das marés, a magnitude dos fenómenos de erosão e a frequência de ocorrência de inundações [1,2,3].

### 3.2.2. Estuário do rio Douro

A restinga do rio 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. Este corpo costeiro natural formou-se devido à acumulação de areias e materiais 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 e recuos para o interior do estuário. Com o objetivo de impedir o processo erosivo na restinga, de proteger as margens e de melhorar as condições do canal de navegação, construíram-se entre os séculos XIX e XXI várias obras de defesa costeira.

Atualmente, o estuário do rio Douro possui o seguinte conjunto de obras costeiras (Figura 37): a norte, o molhe de Felgueiras – a infraestrutura mais antiga deste sistema, construída em 1970 – 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. A Figura 38 apresenta a evolução das infraestruturas marítimas na embocadura do rio Douro [5].



**Figura 37 - Fotografia aérea da embocadura do rio Douro: 1) molhe de Felgueiras; 2) molhe do Touro; 3) molhe norte; 4) quebramar destacado; 5) cabedelo [4].**

A área do cabedelo é maior no verão que no inverno. Isto deve-se aos caudais fluviais no verão serem menores, reduzindo a velocidade de escoamento, de tal modo que se verifica uma maior sedimentação nesse período do ano. O recuo da linha da costa no sentido oeste-este já era visível antes da construção dos molhes, no início do século XXI. 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 minimizada em grande parte da restinga e as consequências dos eventos extremos tornaram-se menos críticas [6,7].



Figura 38 - Evolução da embocadura do rio Douro (Google Earth).

### 3.2.3. Ria Formosa, Algarve

A ria Formosa é um sistema de ilhas-barreira localizado no sul de Portugal, no Algarve. Este sistema é composto por dunas, penínsulas (Ancão a oeste e Cacela a leste) e cinco ilhas barreira (Barreta, Culatra, Armona, Tavira e Cabanas). Estende-se por 50 km da costa e possui seis entradas (Ancão, Faro-Olhão, Armona, Fuzeta, Tavira e Lacém, Figura 39), que são responsáveis pelos processos de interação entre os sistemas lagunares e o Oceano Atlântico. Importa referir que as entradas de Faro-Olhão e Tavira foram criadas artificialmente por ação humana, através da construção de molhes [8,9].

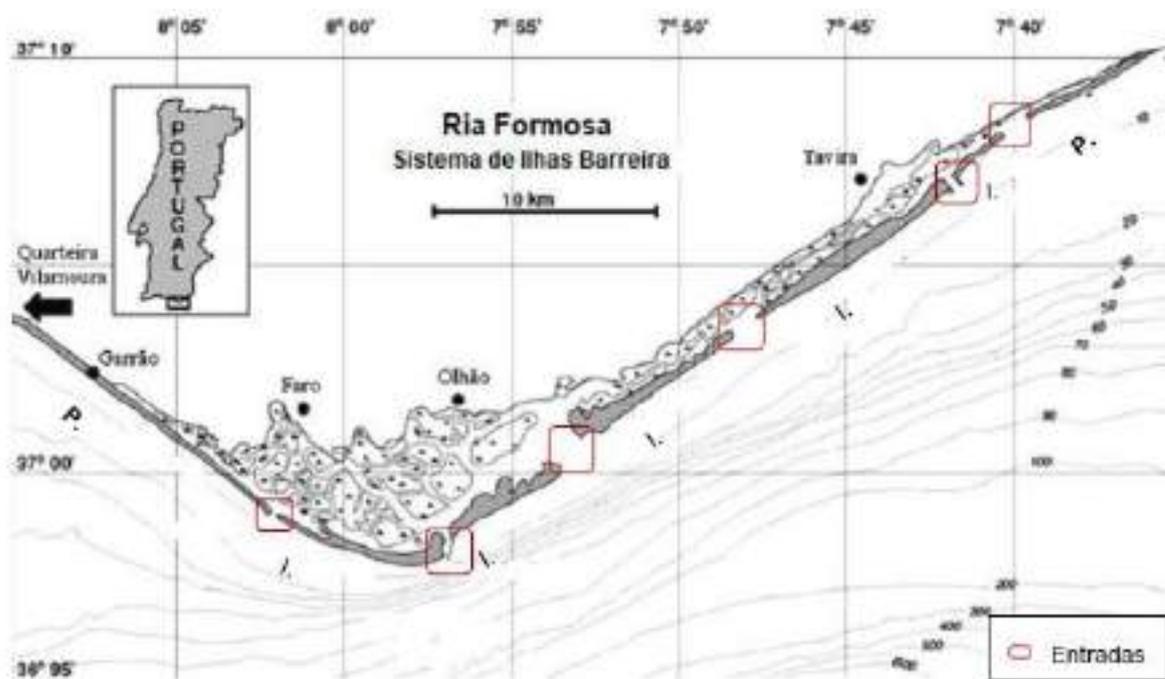


Figura 39 - Caracterização do sistema de ilhas-barreira da ria Formosa: penínsulas, ilhas barreiras e entradas [8].

A morfodinâmica das ilhas-barreira é muito variável em função da ação da agitação marítima e das marés. A subida do nível médio da água do mar origina uma migração dos sistemas dunares em direção a terra. As marés são mesotidais, apresentando amplitudes 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 este (Cacela) apresenta condições de agitação marítima mais amenas.

Estas geoformas estão diretamente expostas à subida do nível médio da água do mar e às tempestades, causas estas que têm originado variações no nível de erosão ao longo do tempo [8].

Adicionalmente, a ocupação humana veio agravar os fenómenos erosivos no sistema dunar, uma vez que os sistemas bióticos, outrora robustos, foram perdendo a sua resiliência e tornaram o solo cada vez mais instável. Esta ocupação começou no final do século XIX, por pequenas comunidades piscatórias. No entanto, a colonização e o interesse turístico intensificaram-se e tornaram estas ilhas cada vez mais vulneráveis. Salieta-se ainda que a construção das entradas artificiais teve 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 de Tavira sofreu assoreamentos de tal modo significativos que necessitou de várias intervenções de dragagem para manter as condições de navegabilidade [9].

#### **3.2.4. 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 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 este. O banco de O'Bril, Figura 40, apresenta, de modo geral, um comportamento idêntico ao das barras da costa Algarvia, isto é, a embocadura está orientada a oeste.



**Figura 40 - Embocadura do rio Guadiana, 2019: 1) molhe de poente; 2) Banco de O'Bril (Google Earth).**

Esta geoforma evolui para nascente até um limite que, posteriormente, sofre rotação, desencadeando a acumulação de sedimentos no lado este da margem Espanhola. A acreção de sedimentos nesta margem foi crescendo ao longo das décadas, embora com algumas flutuações.

Neste sentido, e por forma a mitigar os problemas associados à navegação no canal principal, foram construídos dois molhes, um em cada lado da embocadura: o molhe poente, com 2040 m de comprimento, e o molhe nascente submerso com 900 m de comprimento. A acumulação arenosa da deriva litoral progrediu 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 para reduzir os impactos da ocorrência de cheias, diminuiu tanto 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 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 [10].

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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].

[5] Teodoro, A. C.; Pinto, Francisco Taveira (2011). *Análise da Evolução Morfológica da Restinga do rio Douro*. ISSN 978-989-95557-4-7.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Vila-Concejo, 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.

[10] 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.

### 3.3. Casos internacionais

#### 3.3.1. Florence, Oregon, Estados Unidos da América

A cidade de Florence é atravessada pelo rio Siuslaw, cuja geometria do trecho final é idêntica à do rio Cávado na zona da foz, uma vez que na proximidade da embocadura, o canal principal do rio é paralelo à linha de costa (Figura 41). Além disso, na embocadura existe um sistema arenoso de grande dimensão protegido por um conjunto de dois quebramares de taludes com orientações perpendiculares à linha de costa.

Após a implementação deste conjunto de estruturas de proteção, o canal de navegação tem mantido a profundidade mínima, garantindo, assim, a circulação de embarcações. Neste local, a agitação marítima tem uma incidência tendencialmente proveniente de oeste, com alturas de onda significativas a rondar os 4 m (Figura 43b). A caracterização das condições de vento é apresentada na Figura 43a e a amplitude máxima de maré tem um valor próximo dos 3 m [6]. O caudal máximo registado no rio é de 645 m<sup>3</sup>/s [1]. As estruturas construídas apresentam uma elevada extensão, ou seja, acompanham em grande parte o intradorso da restinga (Figura 42). Desta forma, essas estruturas não permitem que a restinga recue face aos eventos extremos e ao aumento do nível médio da água do mar. Por último, estas estruturas de defesa costeira permitem a criação de uma zona mais calma no interior do estuário e, dessa forma, reduzem o grau de exposição da frente urbana de Florence.

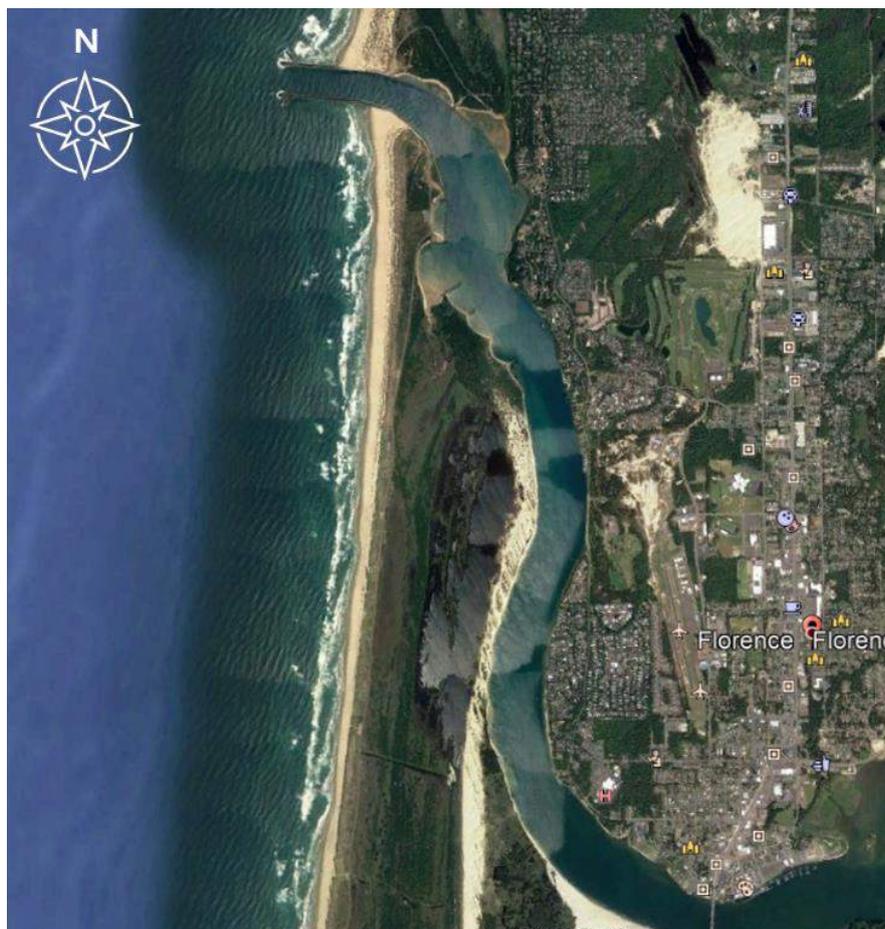


Figura 41 - Restinga da foz do rio Siuslaw, em Florence (Google Earth).



Figura 42 - Estruturas de proteção da restinga da foz do rio Siuslaw (Google Earth).

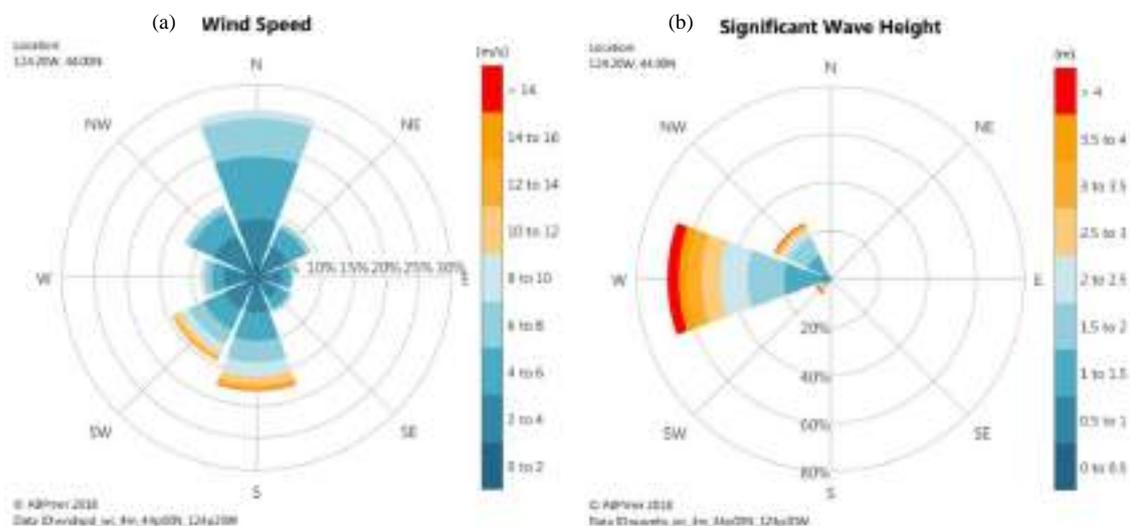


Figura 43 - (a) Rosa dos ventos e (b) rosa das alturas de onda significativas em Florence [5].

### 3.3.2. Barview, Oregon, Estados Unidos da América

A cidade de Barview localiza-se na costa oeste dos Estados Unidos da América e nela desagua o rio Wilson (Figura 44). Este rio tem uma extensão de 53 km e uma bacia hidrográfica com uma área de 500 km<sup>2</sup>. Além disso, apresenta uma descarga fluvial média de cerca de 33 m<sup>3</sup>/s, sendo que o caudal máximo registado foi de 356 m<sup>3</sup>/s [1]. Este rio tem a particularidade de desaguar numa lagoa com uma extensão de cerca de 10 km, mesmo antes de contornar a cidade de Barview. Esta lagoa, denominada Tillamook Bay, é paralela à linha de costa e, ao chegar a Barview, redireciona-se perpendicularmente à mesma.

A embocadura do rio Wilson está protegida por duas estruturas rígidas e orientadas perpendicularmente à agitação marítima incidente, constituídas por enrocamento no seu manto resistente (Figura 44). Essas estruturas apresentam geometrias diferentes. A estrutura sul, pela sua extensão de cerca de 7 km, tem como principal objetivo reter e evitar o recuo da restinga. Por este motivo, esta estrutura acompanha grande parte da restinga pelo lado interior e, assim, desempenha a função de barreira de contenção que impede o transporte de sedimentos para o interior da lagoa.



Figura 44 - Restinga da foz do rio Wilson, localizada em Barview (Google Earth).

O quebramar norte interrompe o transporte litoral, mas, em conjunto com o quebramar sul, proporciona a existência de um canal de navegação protegido e possivelmente com a profundidade necessária para a navegação de todas as embarcações. A agitação marítima é predominantemente do quadrante oeste e apresenta alturas de onda significativas entre 2 e 4 m (Figura 45b). A amplitude máxima de maré está próxima dos 3.4 m [6]. A caracterização das condições de vento é apresentada na Figura 45a.

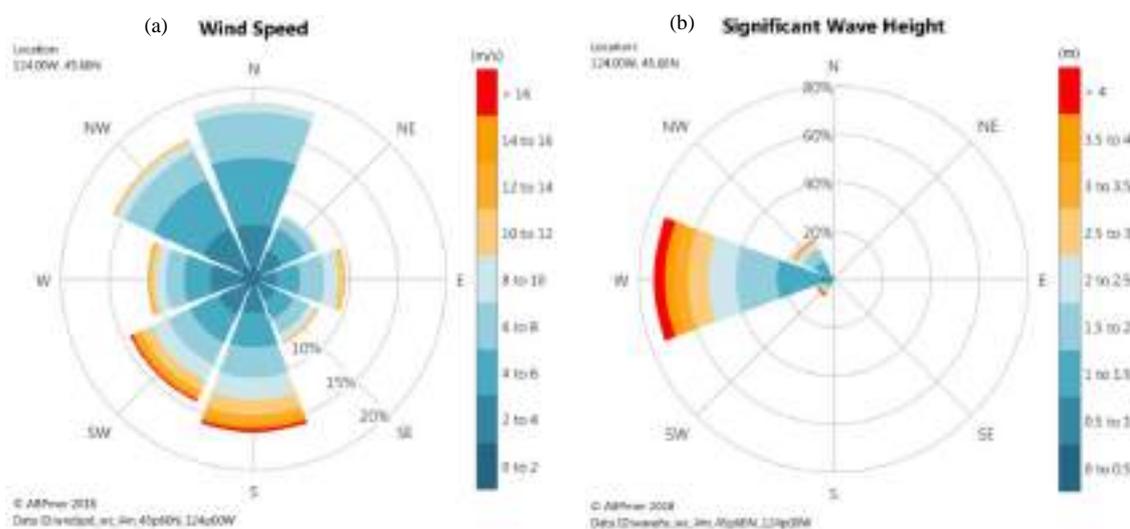


Figura 45 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Barview [5].

### 3.3.3. Chosei, Japão

A cidade de Chosei localiza-se na costa este do Japão, sendo atravessada pelo rio Ichinomiya antes de desaguar no Oceano Pacífico, Figura 46. Este rio tem uma extensão de 37.3 km e a sua bacia hidrográfica tem uma área de cerca de 222 km<sup>2</sup>. Além disso, apresenta uma elevada dinâmica sedimentar aquando da mudança de direção do seu leito, principalmente na chegada à foz, onde existe uma acumulação acentuada de sedimentos. No entanto, devido à interação entre a agitação marítima e a descarga fluvial, o local onde ocorre essa acumulação não é fixo, podendo deslocar-se para o interior do estuário ou para o oceano, face à magnitude do caudal fluvial ou aos eventos de tempestade, que têm vindo a ocorrer com maior frequência.



Figura 46 - Restinga do rio Ichinomiya, localizada em Chosei (Google Earth).

A foz do rio Ichinomiya é uma zona com condições de agitação marítima calmas, na qual as alturas de onda significativas são usualmente inferiores a 2 m e provenientes do quadrante este (Figura 47b), com as condições de vento caracterizadas na Figura 47a. De referir ainda que a amplitude máxima de maré não ultrapassa os 1.9 m [6]. As estruturas existentes na foz do rio Ichinomiya foram construídas com os seguintes objetivos: garantir um canal de navegação com a profundidade mínima para as embarcações e a fixação da restinga, que é garantida pelo quebramar sul da foz do rio. Essas duas estruturas não estão orientadas perpendicularmente à linha de costa, evitando assim que a deriva litoral (proveniente de sul) seja interrompida na sua totalidade.

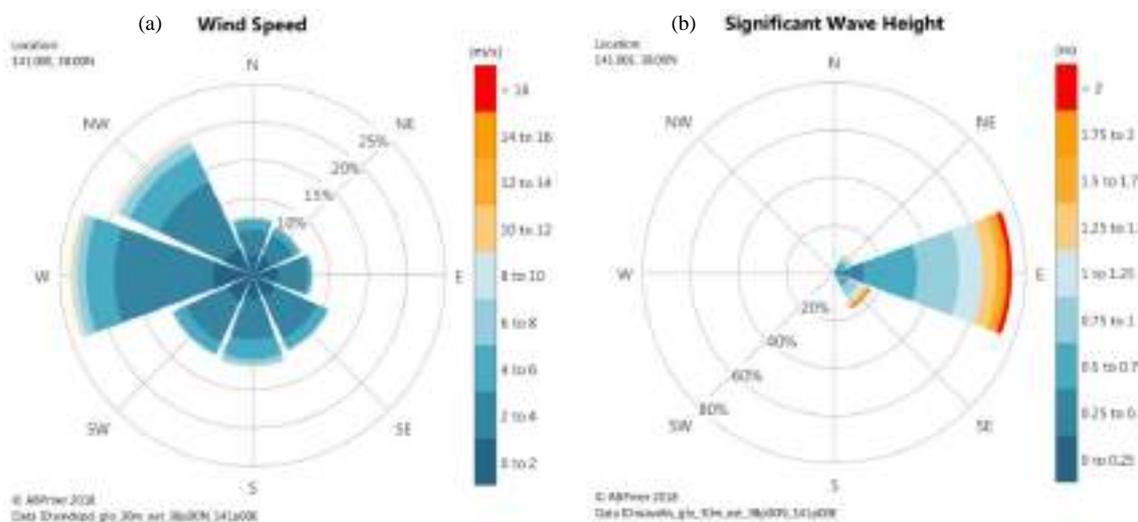


Figura 47 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Chosei [5].

### 3.3.4. Brighton, Oregon, Estados Unidos da América

A cidade de Brighton está localizada junto do rio Nehalem, na costa oeste dos Estados Unidos da América. O rio Nehalem, com uma extensão de 191 km e uma bacia hidrográfica com 2210 km<sup>2</sup>, desagua no oceano Pacífico. A agitação marítima é predominantemente proveniente do quadrante oeste e tem alturas de onda significativas que não ultrapassam os 4 m (Figura 48b). A caracterização das condições de vento é apresentada na Figura 48a. A amplitude máxima de maré é de cerca de 3.54 m [6] e o caudal máximo registado é de cerca de 157 m<sup>3</sup>/s [1].

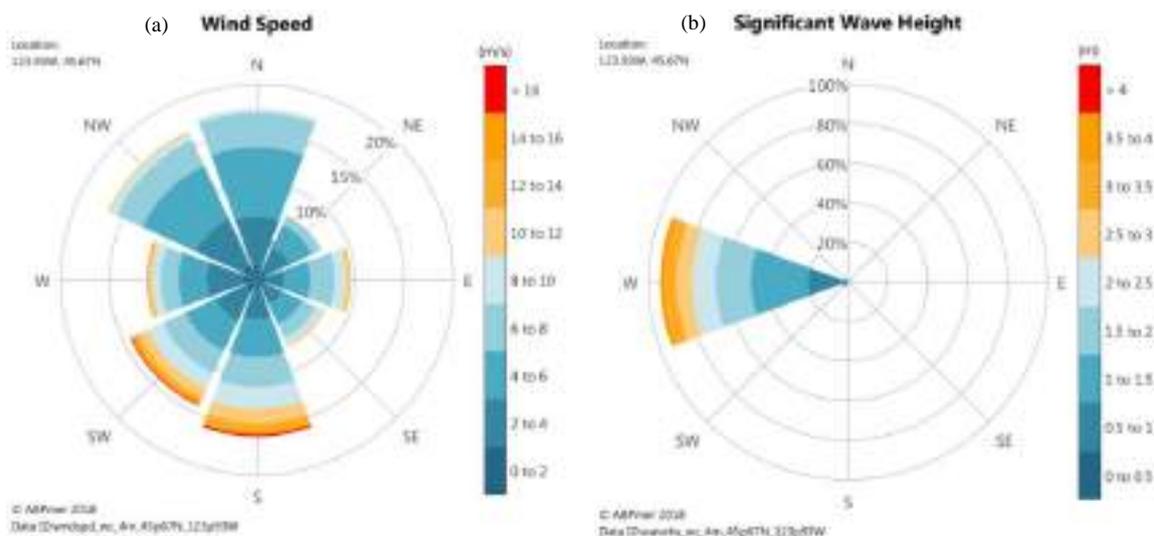


Figura 48 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Barview [5].

A embocadura do rio apresenta duas estruturas artificiais de proteção costeira implementadas segundo uma orientação quase perpendicular à linha de costa (Figura 49). Esta não perpendicularidade, tal como já foi referido nos casos anteriores, tem como principal propósito garantir o transporte sedimentar ao longo da costa. Neste caso, segundo imagens satélite, concluiu-se que a deriva litoral não é unicamente proveniente de uma direção, uma vez que a linha de costa a norte e a sul das estruturas está exatamente no mesmo alinhamento. Ambos os quebramares têm a mesma extensão, sendo que o quebramar norte se estende por parte do intradorso da restinga, o que mais uma vez proporciona a retenção do transporte de sedimentos mobilizados pela agitação marítima incidente. O quebramar sul estende-se para o interior do estuário, fixando a margem sul do rio e, assim, fixando também a largura do canal de navegação. Ao longo dos anos, verificou-se alguma acumulação de sedimentos junto ao quebramar norte e dentro do canal de navegação. As estruturas de proteção são constituídas por blocos de enrocamento colocados de uma forma irregular, característica que proporciona uma maior dissipação da energia proveniente da agitação marítima.



Figura 49 - Restinga da foz do rio Nehalem, localizada em Brighton (Google Earth).

### 3.3.5. Guano Rock, Oregon, Estados Unidos da América

A cidade de Charleston localiza-se na margem sul do rio Coos, na costa oeste dos Estados Unidos da América. O rio Coos tem uma extensão de 8 km e a sua bacia hidrográfica possui uma área de 1900 km<sup>2</sup>. O caudal máximo registado no rio foi de cerca de 300 m<sup>3</sup>/s [2]. Esta zona costeira está exposta a agitação marítima proveniente do quadrante noroeste e com alturas de onda significativas máximas de 4 m. A Figura 50 caracteriza também as condições locais de vento.

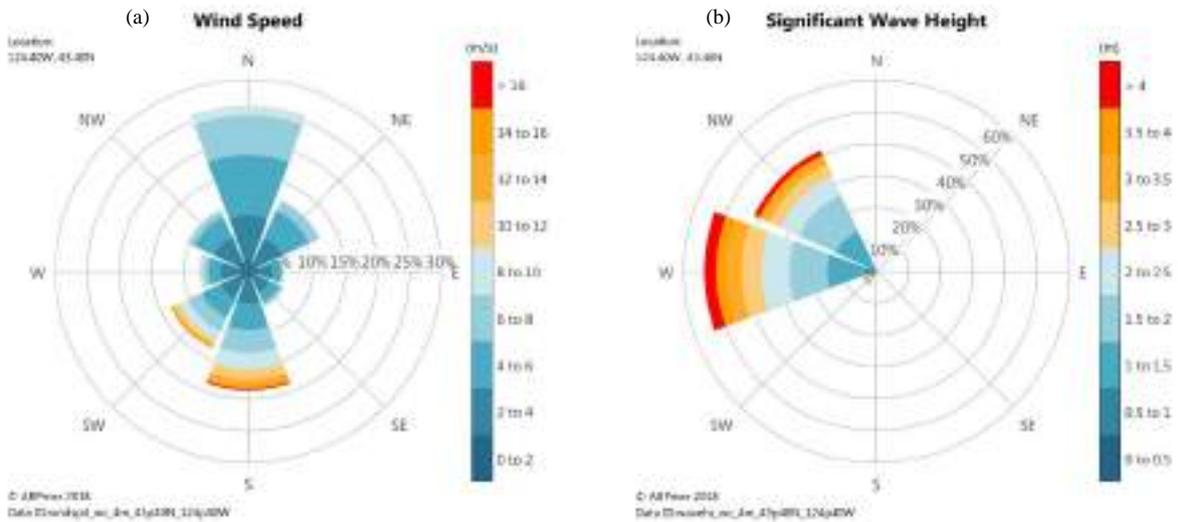


Figura 50 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Guano Rock [5].

A amplitude máxima da maré registada foi de 3.51 m [6]. Uma vez que no estuário do rio Coos existe um porto (Figura 51), é fundamental garantir a navegabilidade no canal de acesso ao porto. Com este intuito, a embocadura do rio possui duas estruturas de proteção costeira constituídas por blocos de enrocamento colocados de forma irregular, que assim garantem a existência de um canal de navegação e ainda evitam o recuo da restinga.



Figura 51 - Restinga do rio Coos, localizada em Guano Rock (Google Earth).

Na entrada do porto existe uma acumulação de sedimentos, o que significa que o canal de navegação poderá necessitar de dragagens periódicas para manter a profundidade de água de serviço. Na imagem de satélite é visível que a deriva litoral ocorre de nordeste para sudoeste.

### 3.3.6. Southport, Gold Coast, Austrália

O rio Nerang atravessa a cidade de Southport, localizada na Gold Coast, Austrália, possui uma extensão de 62 km e a sua bacia hidrográfica tem uma área de 490 km<sup>2</sup>. O caudal máximo registado nos últimos anos foi de 1460 m<sup>3</sup>/s [3]. Na foz deste rio a agitação marítima é predominantemente do quadrante este e tem alturas de onda significativas máximas de 2 m (Figura 52b). As condições de vento são ilustradas na Figura 52a. A amplitude máxima de maré registada foi de 1.66 m [6].

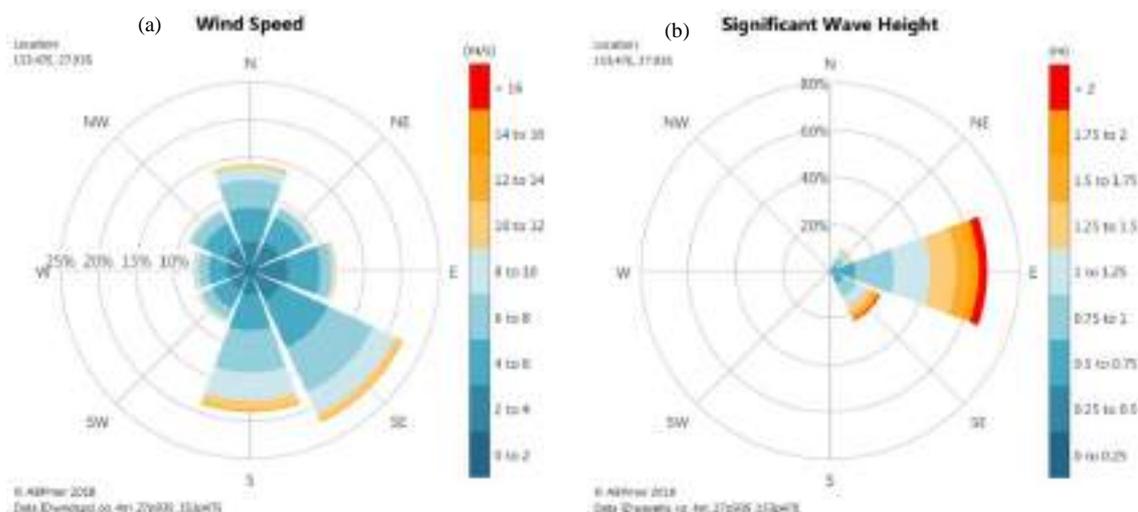


Figura 52 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Southport [5].

A foz do rio Nerang está limitada, tanto a norte como a sul, por duas restingas bastante volumosas e com uma elevada densidade de vegetação (Figura 53).

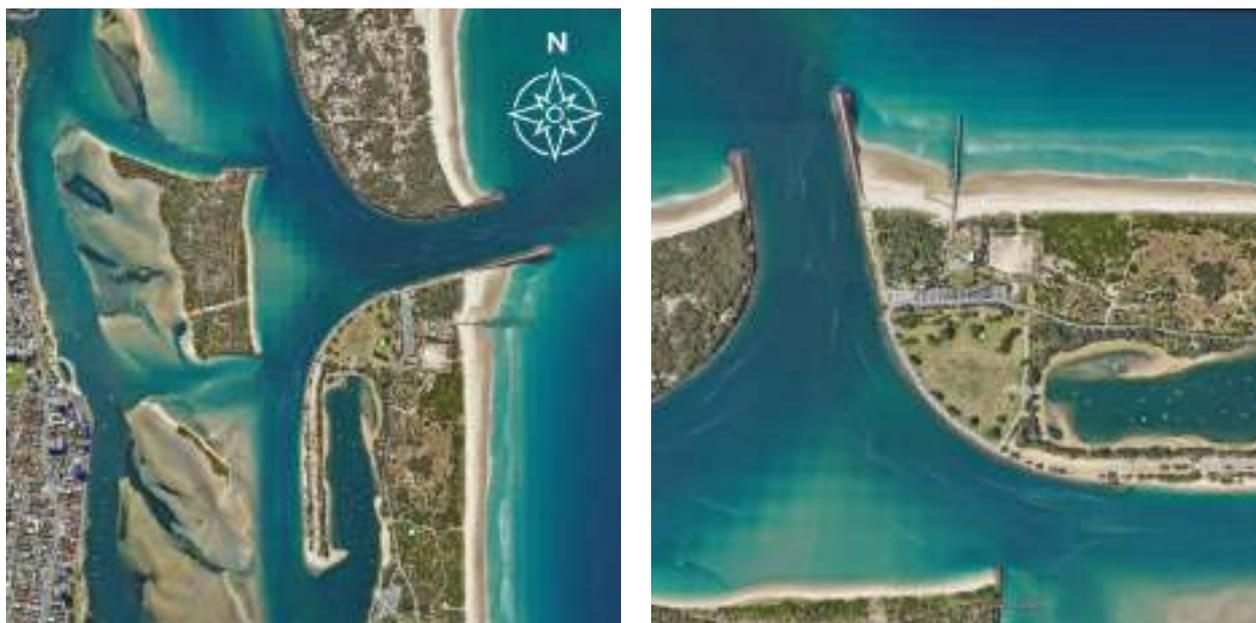
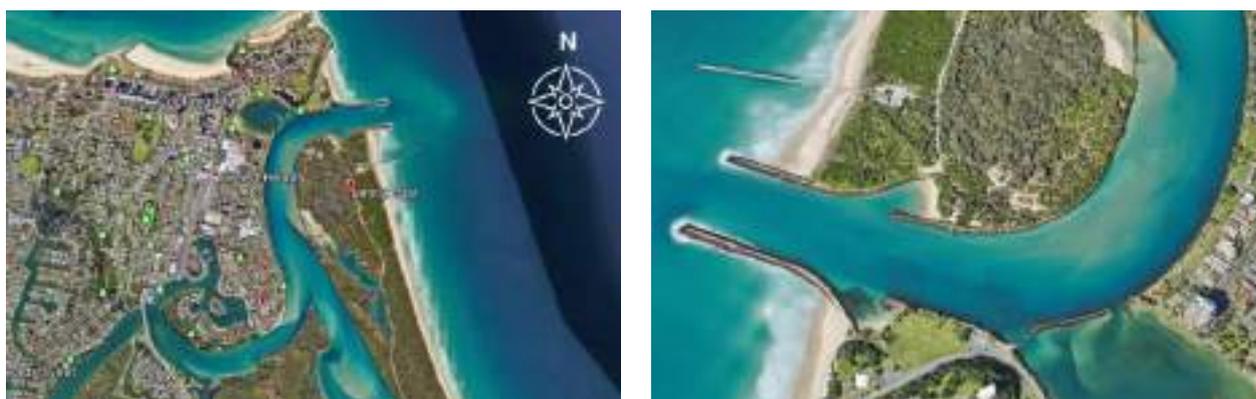


Figura 53 - Restinga da foz do rio Nerang, localizada em Southport (Google Earth).

Para fixar essas restingas e evitar que recuem face à incidência da agitação marítima característica e à possível ocorrência de eventos extremos, foram construídas duas estruturas artificiais que acompanham, ambas, grande parte do intradorso das respetivas restingas, Figura 53. Tal como aconteceu nos casos anteriormente descritos, a existência de portos situados no interior do estuário torna necessário garantir uma profundidade de água mínima nos respetivos canais de navegação. As profundidades do canal de navegação variam ao longo do tempo, devido à ocorrência de erosão e deposição de sedimentos. Deste modo, é essencial que haja uma constante monitorização do mesmo e, através de dragagens, repor a profundidade mínima para garantir a navegabilidade no canal.

### 3.3.7. *Letitia, Gold Coast, Austrália*

O rio Tweeds atravessa e acompanha o banco dunar Letitia ao longo de cerca de 8 km. Este rio localiza-se na Gold Coast, a sul de Brisbane na costa este da Austrália, possui um comprimento de 78 km e uma bacia hidrográfica com uma área de 1055 km<sup>2</sup>. Mais uma vez é necessário garantir a navegabilidade no canal de navegação, ou seja, assegurar uma profundidade mínima. Neste local foram construídas duas estruturas de defesa costeira, que acompanham todo o intradorso da restinga, e com o manto resistente constituído por blocos de enrocamento colocados de forma irregular, potenciando uma maior dissipação da energia da agitação marítima incidente. Face à construção das estruturas de proteção costeira, foi possível evitar o recuo da restinga, Figura 54. De referir também que estes quebramares possivelmente garantiram a profundidade mínima necessária para a navegabilidade do canal.



**Figura 54 - Restinga da foz do rio Tweeds, localizada em Letitia (Google Earth).**

A costa Este da Austrália é caracterizada por apresentar uma deriva litoral proveniente de sudeste. A agitação marítima incide predominantemente do quadrante este com alturas de onda significativas de cerca de 2 m (Figura 55b). As condições de vento são caracterizadas na Figura 55a. A amplitude máxima de maré registada foi de 1.66 m [6].

### 3.3.8. *Viladaíde, Espanha*

O rio Masma, com uma extensão total de 46.2 km e uma bacia hidrográfica com uma área de 290 km<sup>2</sup>, desagua na ria de Foz, onde se situam duas pequenas cidades, Viladaíde e Foz. Na ria de Foz estão localizados dois pequenos portos, pelo que será fundamental garantir a navegabilidade no canal até à foz do rio. Em algumas imagens de satélite é visível que esta zona apresenta um transporte sedimentar bastante intenso, o que exige uma monitorização do canal com alguma frequência e ainda dragagens periódicas.

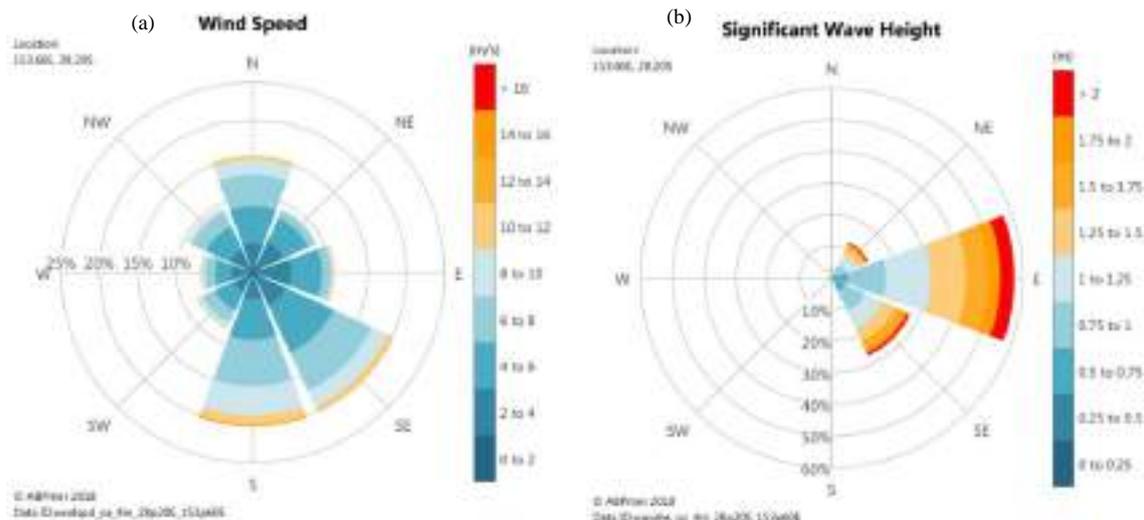


Figura 55 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Letita [5].

Tal como nos casos anteriores, a interação rio-oceano é bastante dinâmica, o que origina uma grande movimentação sedimentar, Figura 56. As amplitudes das marés vivas no norte de Espanha são elevadas, na ordem dos 4.5 m.



Figura 56 - Localização de Viladaíde (Google Earth).

A foz do rio Masma é caracterizada por condições de agitação marítima provenientes do quadrante noroeste com alturas de onda significativas de 2 m e por condições de vento ilustradas na Figura 57. Na margem direita da ria de Foz, existe um banco dunar que está impedido de se movimentar para o interior do estuário devido à estrutura artificial que acompanha todo o seu intradorso.

Na margem esquerda do rio, onde estão localizados os dois portos, existe um quebramar de taludes que delimita o canal de navegação. Através da análise deste caso, foi possível concluir que, para garantir a navegabilidade no canal, é essencial a presença de estruturas artificiais a delimitar uma das margens do canal e ainda, com alguma periodicidade, a realização de dragagens para evitar possíveis alterações ou acumulação de sedimentos no mesmo.

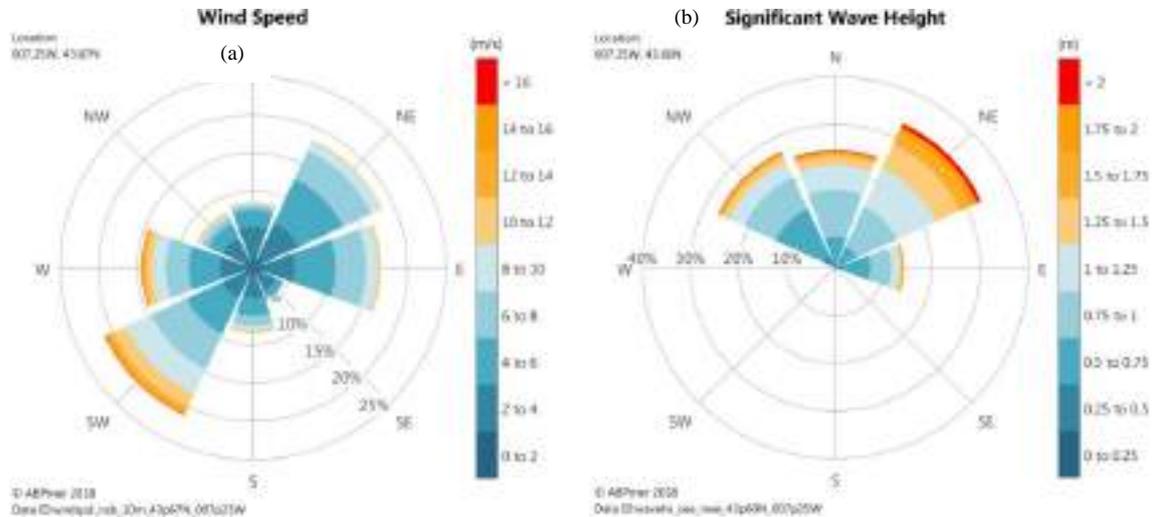


Figura 57 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Viladaíde [5].

### 3.3.9. Liñero, Espanha

A ria de Villaviciosa desagua no mar Cantábrico. Na sua margem esquerda situa-se a cidade de Liñero. Esta zona está exposta a agitação marítima maioritariamente proveniente dos quadrantes noroeste e nordeste, com alturas de onda significativas máximas de 4 m (Figura 58b). O caudal máximo registado à chegada à foz foi 382 m<sup>3</sup>/s [4]. A amplitude máxima das marés-vivas assemelha-se ao caso de estudo anterior, tem um valor de cerca de 4.5 m. As condições de vento estão caracterizadas na Figura 58a.

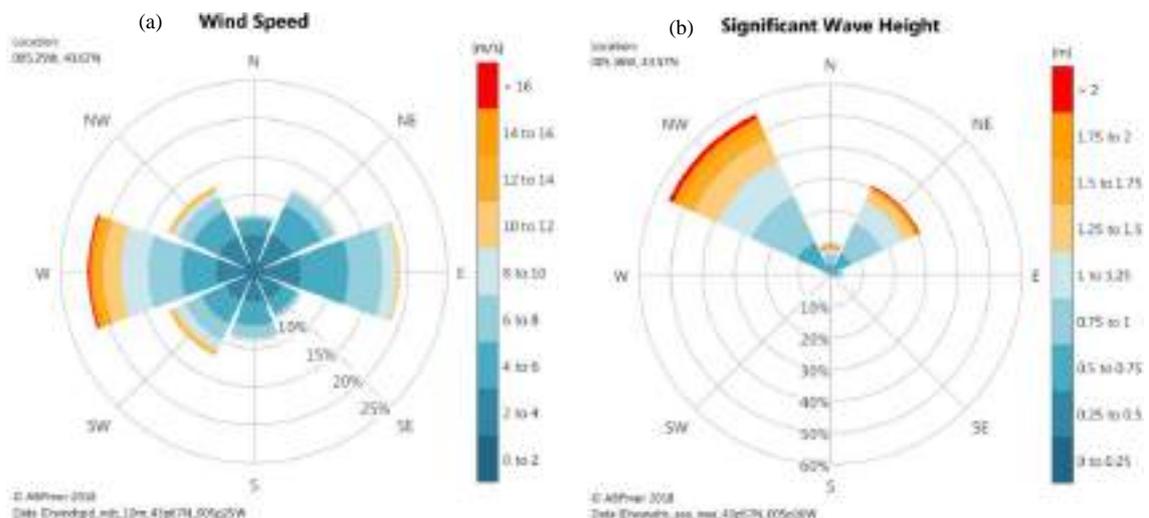


Figura 58 - (a) Rosa do vento e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Liñero [5].

A ria de Villaviciosa tem na sua margem esquerda um pequeno porto e, por isso, torna-se necessário garantir a navegabilidade até à foz. Com o intuito de proporcionar a profundidade mínima necessária à navegação, foram construídas duas estruturas artificiais, Figura 59.

Ainda assim, é de prever que se realizem dragagens com alguma periodicidade. As estruturas implementadas acompanham em grande parte as duas margens da ria de Villaviciosa até ao porto, que se situa a cerca de 1200 m da foz da ria.



Figura 59 - Localização de Liñero e respetivas estruturas (Google Earth).

### 3.3.10. Morro Bay, Estados Unidos da América

A cidade de Morro Bay localiza-se nos Estados Unidos da América, na costa oeste. Nesta zona está situada uma baía com cerca de 6 km de extensão que apresenta uma restinga que protege a frente urbana da cidade. Este banco dunar e a própria cidade estão expostos à agitação marítima do quadrante oeste, com alturas de onda ligeiramente superiores a 2 m (Figura 60b), e ainda às condições de vento caracterizadas na Figura 60a.

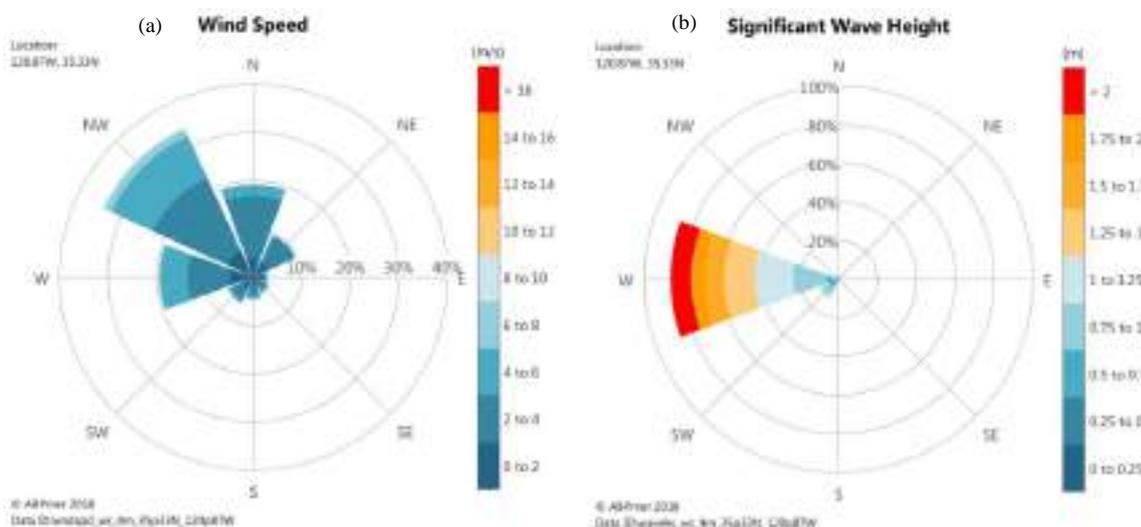


Figura 60 - (a) Rosa dos ventos e (b) Rosa das alturas de onda significativas em Morro Bay [5].

A entrada para a baía apresenta três estruturas de proteção, que proporcionam condições adequadas de navegabilidade para o interior (Figura 61). Todo o manto resistente das estruturas é constituído por blocos de enrocamento colocado de forma irregular. Através de imagens de satélite, é visível a presença do canal de navegação, sendo a sua margem esquerda limitada pela terceira estrutura de enrocamento que acompanha o intradorso da restinga. A implementação deste conjunto de estruturas de proteção costeira permite garantir a navegabilidade do canal de navegação, reduzir o grau de exposição da frente urbana da cidade e ainda evitar um possível recuo do banco dunar.

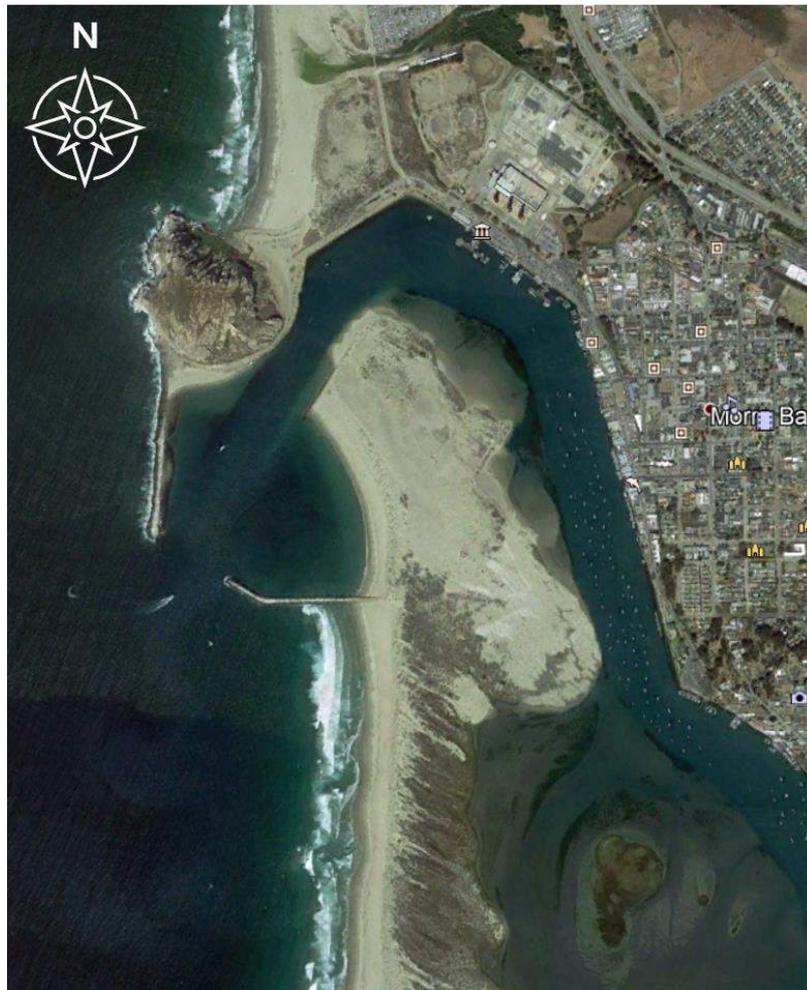


Figura 61 - Localização da restinga do Morro Bay (Google Earth).

### 3.3.11. Lagoa de Patos, Brasil

A Lagoa dos Patos está localizada na costa sul do Brasil (entre 30° - 32° S) e possui um comprimento de cerca de 250 km, uma largura de 40 m, uma profundidade de água média de 5 m e uma área de aproximadamente 10 360 km<sup>2</sup>. O sistema lagunar apresenta uma orientação NW-SE e uma morfologia delimitada por uma barreira arenosa constituída por depósitos sedimentares terciários e quaternários.

O estuário é do tipo microtidal, sendo que a amplitude de maré pode atingir 2 m durante os períodos de tempestade. Nos períodos chuvosos o escoamento da água doce também é significativo, podendo atingir cerca de 10 000 m<sup>3</sup>/s. Neste sentido, a evolução morfológica neste estuário é predominantemente devida à ação fluvial e dos ventos. Enquanto os ventos de NE favorecem o escoamento fluvial, os de SE e SW geram um escoamento orientado para o interior da lagoa, aumentando o nível da água.

Os processos mencionados foram os principais responsáveis pela evolução 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, com aproximadamente 4 km de comprimento. No entanto, há alterações morfológicas em curso ao longo da barreira nas proximidades do molhe este (Figura 62) [7].

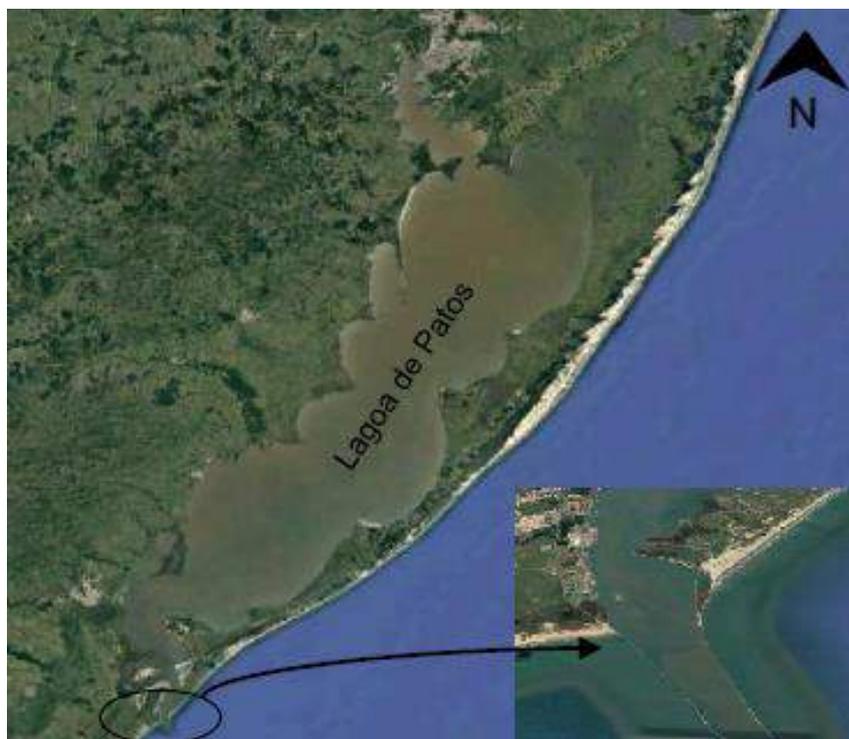


Figura 62 - Lagoa de Patos (Brasil) e localização dos molhes convergentes (Google Earth).

- [1] (2004). *U.S. Geological Survey Water Resources Data—Oregon*. Surface Water 1: 713-753.
- [2] Eidam, E. F., et al. (2020). *Impacts of 150 Years of Shoreline and Bathymetric Change in the Coos Estuary, Oregon, USA*. *Estuaries and Coasts*.
- [3] (2015). *Nerang River Catchment Hydrological Study*.
- [4] Cantabria, I. Asistencia Técnica a La Elaboración De Un Estudio Sobre La Adaptación Al Cambio Climático De La Costa Del Principado De Asturias.
- [5] Date Explorer. 2020. ABPmer. Data de acesso (22-10-2020) <https://www.seastates.net/>
- [6] Aplicação AyeTides. Data de acesso (01-11-2020) <https://www.hahnsoftware.com/>
- [7] Antqueira, 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.

### 3.4. Considerações finais

No capítulo 3 foram analisados quinze casos de estudo nacionais e internacionais com características morfológicas e hidrodinâmicas semelhantes às da restinga de Ofir, em Esposende. Em todos os casos de estudo, a intensa e complexa dinâmica sedimentar associada às interações rio – oceano, conduziu à necessidade de construção de estruturas artificiais para fixar a embocadura do estuário e estabilizar a(s) restinga(s) associadas.

As estruturas de proteção implementadas nos vários locais analisados têm as seguintes características: (i) secção transversal em taludes, com os blocos de enrocamento dispostos de uma forma irregular para potenciar a dissipação da energia das ondas; (ii) implantação das obras de fixação da embocadura com uma orientação próxima da perpendicular à linha de costa, contudo não exatamente perpendicular, para permitir a existência de algum transporte sedimentar ao longo da costa; (iii) essas estruturas estendem-se para o intradorso da restinga, fixando assim as margens do trecho final do rio e a largura do canal de navegação, criando ainda condições adequadas para a retenção dos sedimentos mobilizados pela ação da agitação marítima.

Por fim, importa referir que apesar do aparente sucesso das intervenções costeiras analisadas, algumas imagens de satélite evidenciam a existência de transporte sedimentar intenso, sendo assim necessária a monitorização frequente, sobretudo do canal de navegação, e a realização de dragagens periódicas.

## 4. DADOS BASE

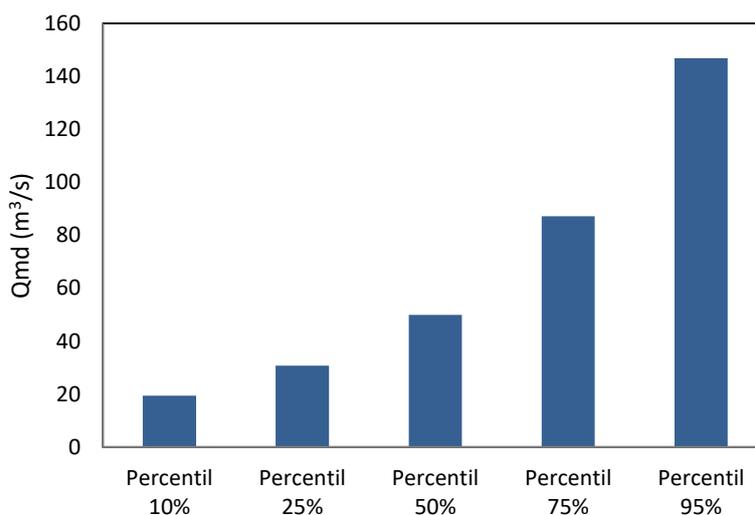
### 4.1. Caudais do rio Cávado

No sentido de avaliar a grandeza dos caudais do rio Cávado, foram analisados os caudais registados na estação hidrométrica de Barcelos (estação 04F/02H) de 1978 a 2002, com recurso aos dados do SNIRH. Apresentam-se de seguida vários valores característicos de caudais fluviais no rio Cávado para que, posteriormente, seja possível analisar diferentes cenários de escoamento.

A estação hidrométrica de Barcelos está integrada na bacia hidrográfica do rio Cávado e é da responsabilidade da Autoridade Nacional da Água. Esta estação pertence ao distrito de Braga, está implantada no local de coordenadas  $X=159108.969$  e  $Y=506595.959$ , e abrange uma bacia com cerca de  $1434 \text{ km}^2$  de área [1]. Nos registos dos caudais médios diários da estação de Barcelos, com cerca de 7419 valores, verificou-se a existência de vários dias sem informação disponível. Essas falhas podem estar associadas a avarias na estação.

Numa primeira fase, pretendeu-se aferir se a zona em estudo se enquadrava com o padrão nacional, ou seja, quais os meses mais húmidos e mais secos. A Tabela B.1 do Anexo B apresenta as médias dos caudais médios diários referentes a cada mês. Esta análise só pretende validar o que já é naturalmente conhecido, ou seja, que os meses de janeiro, fevereiro e dezembro são os meses mais húmidos (meses de inverno), e os de verão são os mais secos.

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-se o caudal médio diário máximo de  $735.85 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura B.1 do Anexo B). Quanto maior a percentagem, menor será o número de dias, ao longo do período em análise, com caudais de valor igual ou superior ao valor que limita esse patamar. Para um percentil de 95%, o caudal obtido foi de  $146.85 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 63 e Tabela 5). É possível verificar que mais de metade dos caudais médios diários registados são inferiores a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , Tabela 5.



**Figura 63 - Percentis dos caudais médios diários registados na estação de Barcelos no período 1978 - 2002.**

**Tabela 5 - Análise dos percentis da estação de Barcelos.**

Percentil	Caudal médio diário (m <sup>3</sup> /s)	Nº de dados iguais ou superiores ao percentil
10%	19.36	7048
25%	30.74	6677
50%	49.87	5564
75%	87.16	1855
<b>95%</b>	<b>146.85</b>	<b>371</b>

Os dados foram também analisados de forma a determinar o valor máximo do caudal médio diário para um determinado período de retorno. Para tal, recorreu-se à função de distribuição de Gumbel que implica a utilização dos valores extremos existentes na amostra, ou seja, os valores máximos anuais dos caudais médios diários. Dos dados fornecidos pelo SNIRH, foram considerados apenas os relativos a anos que possuíam a maioria dos dados relativos à época húmida. Assim, foram excluídos três anos hidrológicos, nomeadamente 1991/1992, 1992/1993 e 1993/1994 (Tabela B.2 do Anexo B). Tendo por base a função de distribuição de Gumbel, uma função de distribuição para análise de extremos, determinou-se o valor máximo anual do caudal médio diário para um dado período de retorno, através de:

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

em que  $X$  representa o valor correspondente a um determinado período de retorno  $T_R$ ,  $\bar{x}$  e  $s$  a média e o desvio padrão da amostra, respetivamente.

Para o conjunto de dados em estudo, obteve-se uma média de 286.3 m<sup>3</sup>/s e um desvio padrão de 178.4 m<sup>3</sup>/s. A Tabela 6 apresenta os caudais obtidos para períodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 30 e 50 anos. De referir que o caudal obtido para um período de retorno de 50 anos foi de 748.8 m<sup>3</sup>/s.

**Tabela 6 - Caudais para diferentes períodos de retorno de acordo com a distribuição de Gumbel.**

TR (anos)	Q (m <sup>3</sup> /s)
5	414.7
10	519.1
15	578.0
20	619.2
30	676.8
<b>50</b>	<b>748.8</b>

Nos dados fornecidos pelo SNIRH também constavam os caudais instantâneos máximos anuais dos anos que se apresentam na Tabela 7. Uma vez que há valores apenas para seis anos não consecutivos, a análise de extremos perde representatividade e fiabilidade. De qualquer forma, para servir como termo de comparação, a função de distribuição de Gumbel foi novamente aplicada e os resultados da análise são apresentados na Tabela 8. Uma vez que se trata de valores de caudal instantâneo, é natural que os valores obtidos sejam superiores aos apresentados anteriormente, tendo-se estimado para um período de retorno de 50 anos, um caudal de 1277.11 m<sup>3</sup>/s, valor que está associado a uma incerteza elevada.

Tabela 7 - Caudais máximos instantâneos anuais registados na estação de Barcelos (SNIRH).

Ano Hidrológico	Nível Instantâneo Máximo Anual (m)	Caudal Instantâneo Máximo Anual (m <sup>3</sup> /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 8 - Caudais para diferentes períodos de retorno com base nos registos diretos do SNIRH.

T <sub>R</sub> (anos)	Q (m <sup>3</sup> /s)
5	717.70
10	892.47
15	991.08
20	1060.12
30	1156.56
<b>50</b>	<b>1277.11</b>

Em síntese, tendo por base a análise dos dados conhecidos, foi possível obter os seguintes caudais fluviais de referência:

- O caudal médio diário máximo registado é de 735.85 m<sup>3</sup>/s (Figura B.1 do Anexo B);
- O caudal médio diário para o percentil de 95% é de 146.85 m<sup>3</sup>/s (Tabela 5 e Figura 63);
- O caudal médio diário máximo anual é de 748.8 m<sup>3</sup>/s, para um período de retorno de 50 anos (Tabela 6), tendo por base os registos válidos obtidos para o período entre 1978 e 2002.

De modo a validar a ordem de grandeza dos caudais obtidos a partir da análise dos registos da estação hidrométrica de Barcelos, apresentam-se os seguintes valores, adotados em diferentes estudos:

- O caudal médio diário turbinado pela barragem da Caniçada é de 40 m<sup>3</sup>/s [2];
- O caudal médio diário anual na foz do estuário do rio Cávado é de 71 m<sup>3</sup>/s [3];
- O caudal máximo anual para a barragem da Caniçada é superior a 200 m<sup>3</sup>/s [4].

[1] Snirh (2020). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos:  
<https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.2>

[2] Silva, J. (2006). Contributos para a Calibração de um Modelo Hidrodinâmico do Estuário do Rio Cávado. Universidade do Minho.

[3] 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.

[4] Pinho, J.L.S. (2005). Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado.

## 4.2. Agitação Marítima e Vento

O conhecimento das condições da agitação marítima é muito relevante para a análise das condições hidrodinâmicas e morfológicas numa frente costeira, merecendo assim uma avaliação cuidada. Nesta secção apresenta-se a análise que auxilia na escolha das características da agitação marítima que serão consideradas nas fases subsequentes deste estudo.

As características da agitação marítima são determinadas com recurso a boias ondógrafo. Atualmente, o Instituto Hidrográfico dispõe de várias boias em Portugal continental, mas dada a sua localização em relação ao caso de estudo, para esta análise foram considerados apenas 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 de Portugal, a aquisição é efetuada por períodos de 30 minutos quase contínuos.

As condições médias globais e médias sazonais foram caracterizadas tendo por base a altura de onda significativa ( $H_s$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e a direção de propagação associada, no período compreendido entre julho de 1993 e dezembro de 2007 [1]. A Figura 64 apresenta a série temporal da altura de onda significativa no período em análise. Em relatório posterior, esta análise será atualizada até ao ano dos registos mais recentes.

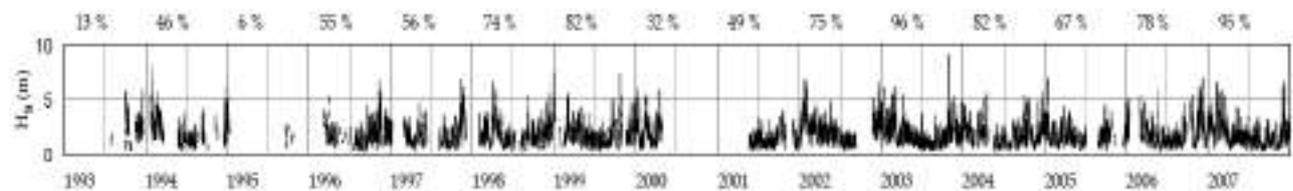


Figura 64 - Série temporal da altura de onda significativa, período 1993-2007 [2].

Na Figura 64 são apresentadas as percentagens anuais de registos válidos. Como é possível verificar, os registos efetuados ao longo do período considerado apresentam 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 funcionamento da boia.

As condições médias globais revelaram que as alturas de onda significativas mais frequentes são de 1 a 2 m (46% das ocorrências), a frequência de valores superiores a 2 m é de 24%, os períodos de calma (alturas inferiores a 1 m) correspondem a 17% e que apenas 1.2% dos registos correspondem a alturas de onda superiores a 5 m. O valor máximo da altura de onda significativa registado no período em análise foi de 9.2 m. Relativamente ao período de pico, cerca de 84% dos registos estão compreendidos 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 associadas aos octantes de NW-WNW [1].

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 apresentou 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 7 e 11 s. Salienta-se que os valores de pico superiores a 14 s ocorrem com maior frequência nos meses de inverno [1].

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 possuíssem mais de 40% de registos válidos. Foram consideradas quatro posições gráficas,

obtendo-se valores relativamente distintos para os quatro períodos de retorno. A Tabela 9 apresenta o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de correlação ( $r$ ) para cada posição gráfica considerada:

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

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

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

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

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

**Tabela 9 - Qualidade do ajuste da função de distribuição de Gumbel para diferentes posições gráficas [2].**

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

A Tabela 10 apresenta as alturas de onda significativas associadas aos diferentes períodos de retorno. A posição gráfica que permitiu um melhor ajuste foi a primeira, originando, contudo, alturas de onda mais baixas.

**Tabela 10 - Alturas de onda significativas associadas aos períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos [2].**

	$\frac{i}{N}$	$\frac{i}{N+1}$	$\frac{i+0.44}{N+0.12}$	$\frac{i-2/5}{N+1/5}$
$H_{10}$	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

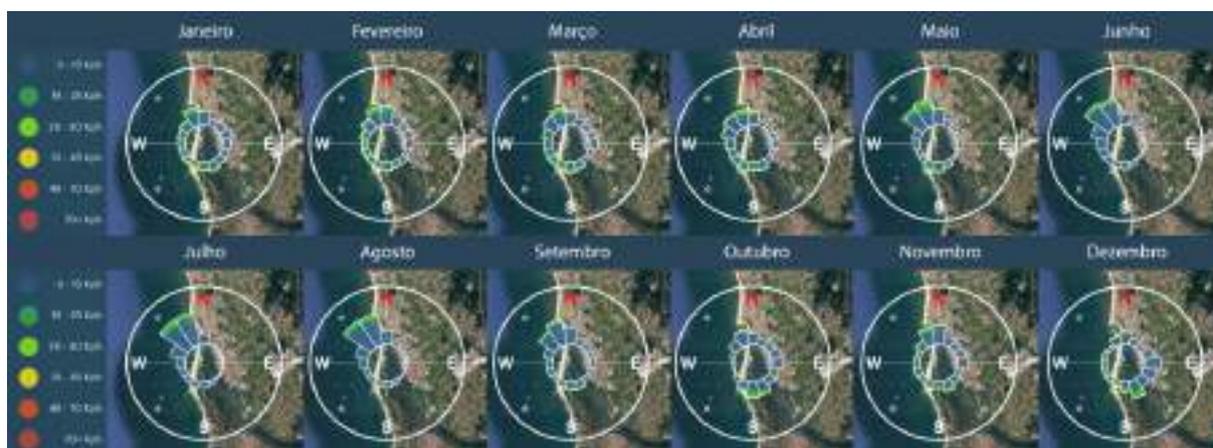
Adicionalmente, os registos entre 1993 e 2007 também permitem caracterizar a direção da agitação marítima, sendo possível concluir que o quadrante de noroeste (NW) é o predominante. Em situações de temporal e nos períodos de inverno são registadas alturas de onda significativas e períodos de pico mais elevados, com predominância dos octantes NW e WNW. Esta direção da agitação marítima justifica o movimento norte - sul da deriva litoral da costa oeste Portuguesa [1,3].

Relativamente às características do vento, embora possa ter localmente uma direção muito variável, é predominantemente proveniente de NW. A Figura 65 mostra o comportamento médio do vento (direção e intensidade) no período compreendido entre 2012 e 2019.



**Figura 65 - Direção e intensidade média do vento, na localidade de Esposende, para o período de 2012 a 2019 (Aplicação Windy).**

O período que apresenta velocidades médias de vento superiores a 30 km/h, mais propenso a coincidir com a ocorrência de temporais, vai de janeiro a abril e de outubro a dezembro. Em termos médios mensais, o vento de NW tende a ser o mais dominante no período de maio a setembro, sendo a direção mais difusa na restante parte do ano (Figura 66).



**Figura 66 - Direção e intensidade média mensal para o período entre 2012 e 2019 (Aplicação Windy).**

- [1] Silva, R (2013). Regime de Ventos e de Agitação Marítima junto ao Porto de Leixões.
- [2] Silva, R. et al. (2008). A Importância de alguns Parâmetros Hidromorfológicos em Estudos de Modelação das Zonas Costeiras. 3<sup>as</sup> Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. FEUP: 978-989-95557-2-3.
- [3] PLN, Polis Litoral Norte (2016b). Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado.

### 4.3. Marés

A oscilação periódica do nível médio da água do mar, devido aos efeitos combinados da rotação da Terra e das ações atrativas exercidas pela Lua e pelo Sol, influenciadas pela batimetria e geomorfologia local, denomina-se maré astronómica. As marés podem ser classificadas de acordo com a sua amplitude em microtidal, mesotidal ou macrotidal.

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 designa-se por maré viva. Por oposição, a menor diferença de amplitude da maré é conhecida como maré morte.

Na costa portuguesa, as marés astronómicas são semidiurnas, 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 11, referidas em relação ao Zero Hidrográfico.

**Tabela 11 - Características das marés para Esposende no 1º trimestre de 2020 [1].**

PM (máx)	BM (min)	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 do Porto de Viana do Castelo, publicada pelo Instituto Hidrográfico (Tabela 12). Além disso, foi efetuada a concordância de marés entre o Porto de Viana do Castelo e Esposende: + 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 12 - Características das marés para o Porto de Viana do Castelo em 2015 [2].**

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 do nível da água do mar relativo às marés astronómicas, designadamente 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 médio do mar define-se como uma oscilação temporária do nível da água do mar em resultado de uma diminuição da pressão atmosférica ou da ação de ventos intensos e persistentes em direção à costa, podendo ocorrer ao longo de horas ou mesmo dias. A ocorrência simultânea de marés vivas e sobrelevações meteorológicas origina níveis extremos que resultam em inundações e recuo na linha da costa, bem como 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 esse motivo que, no âmbito da proteção costeira, se devem realizar simulações de médio a longo prazo que tenham em consideração as variações do nível médio da água do mar e cenários futuros de subida desse nível. Dias e Taborda (1988), Parry (2000), Andrade e Freitas (2002) e o Instituto Hidrográfico preveem que até 2100 haja uma subida do nível médio da água do mar de, no mínimo, 10 cm, podendo em caso extremo alcançar os 60 cm [2,3].

Admitindo para Esposende um valor médio entre os apresentados pelos autores mencionados (cerca de + 0.30 m), o nível máximo atingido pela água seria de 4.30 m ZH ( $PM_{\text{máx}} + SS = 4.00 + 0.30 = + 4.30$  m).

No projeto de reabilitação do molhe Norte do rio Cávado foi considerada uma sobrelevação igual a +0.54 m, relativa a Cascais, e ainda uma subida adicional do nível médio da água do mar de valor igual a +0.26 m, correspondente ao cenário mais pessimista definido em 2007 pelo Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (IPPC). Tendo por base os dados apresentados na Tabela 12, obteve-se um valor para o nível máximo atingido pela água de:  $+ 3.95 + 0.54 + 0.26 = + 4.75$  m (ZH).

[1] Tabela de Marés (2020).

Disponível em <https://tabuademares.com/pt/braga/esposende>. [Consultado a 15-04-2020].

[2] PLN (2016b). Reabilitação do molhe Norte da embocadura do rio Cávado. Polis Litoral Norte.

[3] Ferreira, Ó.; Dias, J.; Taborda, R. (2008). Implications of Sea-Level Rise for Continental Portugal. *Journal of Coastal Research*. 242: 317-324.

## 4.4. Sedimentos

### 4.4.1. Campanhas anteriores

A recolha de amostras e posterior análise dos sedimentos 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 será avaliado segundo os critérios de qualidade da 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 repostado 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 um 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. No entanto, em caso de necessidade imperativa, os dragados deverão ser encaminhados para tratamento prévio e/ou deposição em aterro de resíduos devidamente autorizado, sendo proibida a sua imersão.

A Tabela 13 apresenta as campanhas realizadas no estuário do rio Cávado, solicitadas pela Polis Litoral Norte ao Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ). As amostras realizadas 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 com 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 em que foi anteriormente detetada. A não existência de Mercúrio em todas as amostras analisadas permitiu concluir que a quantidade de metal pesado existente anteriormente nesse local foi desaparecendo, tendo surgido devido a uma ação pontual. A 12 de agosto de 2016 recolheram-se mais quatro amostras no canal de navegação. Os resultados obtidos permitiram demonstrar que os sedimentos do canal de navegação podem ser dragados e depositados no meio aquático, em locais sujeitos a erosão ou utilizados para alimentação artificial das praias adjacentes [1,2,3].

**Tabela 13 - Recolha de sedimentos no estuário do Cávado e resultados obtidos.**

	10/08/2011	22/02/2012	12/08/2016
Entidade responsável pela recolha de sedimentos	Xavi-Sub	Xavi-Sub	MultiSub
Entidade que realizou os ensaios laboratoriais	ISQ	ISQ	ISQ
Nº de amostras recolhidas	51	-	4
Localização da recolha	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 principais	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

O estudo realizado pela Faculdade de Ciências em 2013 compreendeu a recolha de 16 amostras mensais entre fevereiro de 2009 e setembro de 2010, em 5 secções ao longo do estuário (E1, E2 e E3 na margem e E1a e E3a dentro do canal), apresentadas na Figura 67, e tinha como objetivo caracterizar a distribuição espacial e sazonal da biodiversidade epibêntica com base na temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido, precipitação e tipo de sedimentos [4].

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

O valor mais elevado de precipitação diária ocorreu em dezembro de 2009 (65 mm). Os níveis mais elevados de precipitação verificam-se durante os meses de inverno e primavera, ou seja, os meses mais húmidos do ano. Este facto ilustra que o sistema estuarino do Cávado se assemelha aos restantes estuários da costa Portuguesa.

A análise granulométrica (ver Anexo C) revelou que as estações E1, E1a e E2 apresentam mais de 85% de gravilha, ou seja, sedimentos 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, aspeto comum nas secções mais próximas da embocadura de um estuário, pois grande parte dos sedimentos

de maior dimensão são depositados a montante. A Estação E3 é aquela que apresenta maior variação granulométrica [4].



**Figura 67 - 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 [4].**

A Figura 68 ilustra a localização dos pontos de amostragem relativos 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 por Silva [5] aos sedimentos do estuário do rio Cávado, os locais de recolha de amostras foram a praia Suave-Mar e a praia de Ofir, e os ensaios realizados em laboratório basearam-se na NP EN 933-1.



**Figura 68 - Localização geográfica dos pontos de amostragem (Google Earth).**

As curvas granulométricas obtidas para esses locais permitem conhecer a distribuição das partículas dos 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.

A tendência central da distribuição das partículas é determinada através do parâmetro  $D_{50}$ , que consiste no diâmetro da malha do peneiro no qual ficam retidos 50% dos sedimentos, em peso. A Tabela 14 resume o valor  $D_{50}$  das partículas ao longo do estuário do rio Cávado. Pode verificar-se que a foz do rio Cávado é essencialmente caracterizada por areias, variando entre areia média a fina. A montante da doca de recreio existe 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 do tipo arenoso.

**Tabela 14 - Caracterização dos sedimentos na foz do rio Cávado.**

Referência	Localização	$D_{50}$ (mm)	Tipo de Sedimentos
[5]	Suave Mar	0.60	Areia Média
	Ofir	0.35	Areia Fina
[1]	EA1	0.28	Areia Média
	EA2	0.35	Areia Média
	EA3	0.40	Areia Média
	EA4	0.55	Areia Média
[2,3]	ESPB	0.02-2	Areia
	ESPC	0.02-2	Areia
	ESPR	0.02-2	Areia
	ESPP	0.02-2	Areia
[4]	E1	> 2.00	Gravilha
	E1a	> 2.00	Gravilha
	E2	> 2.00	Gravilha
	E3	1.65	Areia Grossa
	E3a	> 2.00	Gravilha

[1] ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2016). Caracterização Físico-Química de Sedimentos da Foz do rio Cávado [Relatório de Monitorização Ambiental].

[2] ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2012). Caracterização Físico-Química dos Sedimentos a Dragar no Porto de Esposende [Relatório de Monitorização Ambiental].

[3] ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2011). Caracterização Físico-Química dos Sedimentos a Dragar no Porto de Esposende [Relatório de Monitorização Ambiental].

[4] 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.

[5] Silva, J. (2006). Contributos para a Calibração de um Modelo Hidrodinâmico do Estuário do Rio Cávado. Universidade do Minho.

#### **4.4.2. Campanha de recolha de sedimentos de 2021**

Tendo como objetivo complementar a informação existente acerca dos sedimentos que circulam no canal do Rio Cávado e na área de praia situada na vizinhança da sua foz, tendo em vista a utilização desta informação em modelação numérica, foi realizada uma campanha de colheita de amostras de

sedimentos nos dias 19 e 20 de abril de 2021.

Esta campanha destinou-se, também, a atualizar a informação existente face aos levantamentos anteriormente descritos, pois as amostras mais recentes foram colhidas em 2016. O material sedimentar recolhido destinou-se exclusivamente para análise dimensional, não tendo sido feita qualquer análise relativa a parâmetros de contaminação.

A recolha de sedimentos foi realizada nos dias 19 e 20 de abril, de acordo com o plano de amostragem ilustrado na Figura 69.



Figura 69 – Plano de amostragem de sedimentos do Rio Cávado e na praia situada na vizinhança da sua foz (nos pontos a vermelho não ocorreu qualquer colheita por questões de segurança).

A recolha de sedimentos nas áreas emersas foi realizada nos primeiros 5 centímetros de superfície, com recurso a uma pequena pá rasa. As colheitas de sedimento nas zonas imersas foram realizadas a partir de uma pequena embarcação, usando como meio de colheita uma draga Ponar PG produzida pela empresa Aquatic Biotechnology (<https://aquaticbiotechnology.com>).

As amostras foram processadas no laboratório de análise sedimentar do Departamento de Ciências da terra da Universidade do Minho. O tratamento iniciou-se por um período de secagem em estufa para eliminação da água. Nas amostras mais finas foi feito um tratamento com hexametáfosfato de sódio, no sentido de evitar a adesão ou floculação das partículas. Dada a diferente natureza do material, as amostras mais grosseiras foram processadas por crivagem, recorrendo a uma coluna de crivos ASTM, com incrementos de  $1/2\phi$  ( $\phi$ ), de acordo com a Tabela 15.

**Tabela 15 – Coluna de crivos ASTM.**

	Diâmetro da malha	
	mm	$\phi$
<b>Crivo 1</b>	32.000	-5.0
<b>Crivo 2</b>	22.630	-4.5
<b>Crivo 3</b>	16.000	-4.0
<b>Crivo 4</b>	11.310	-3.5
<b>Crivo 5</b>	8.000	-3.0
<b>Crivo 6</b>	5.660	-2.5
<b>Crivo 7</b>	4.000	-2.0
<b>Crivo 8</b>	2.830	-1.5
<b>Crivo 9</b>	2.000	-1.0
<b>Crivo 10</b>	1.410	-0.5
<b>Crivo 11</b>	1.000	0.0
<b>Crivo 12</b>	0.707	0.5
<b>Crivo 13</b>	0.500	1.0
<b>Crivo 14</b>	0.354	1.5
<b>Crivo 15</b>	0.250	2.0
<b>Crivo 16</b>	0.177	2.5
<b>Crivo 17</b>	0.125	3.0
<b>Crivo 18</b>	0.088	3.5
<b>Crivo 19</b>	0.062	4.0
<b>Prato</b>	<0.062	4.5

As amostras mais finas, após desfloculação, foram analisadas com um granulómetro laser do tipo MasterSizer 3000 da Malvern Panalytical (<https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000>).

Os resultados provenientes das amostras analisadas por crivagem foram processados recorrendo ao programa SEDMAC/SEDPC [6], no sentido de obter os diversos parâmetros estatísticos resultantes da distribuição da população sedimentar de cada amostra. Os parâmetros estatísticos resultantes das amostras analisadas por granulómetro laser, foram processadas pelo software MasterSizer3000, fornecido com o dispositivo.

Os resultados da análise, relativos ao parâmetro D<sub>50</sub>, encontram-se resumidos na Tabela 16.

**Tabela 16 – Resultados da análise sedimentar (2021)**

Amostra	Coordenadas				D50	Método Analítico
	PT-TM06/ETRS89		WGS84			
	X	Y	Longitude	Latitude		
1	-54940.904	208069.545	-8.7915179	41.5400923	--	Crivos ASTM
2	-54921.649	207988.422	-8.7912797	41.5393633	1.021	Crivos ASTM
3	-54898.455	207909.984	-8.7909946	41.5386587	1.068	Crivos ASTM
4	-54852.349	207800.191	-8.7904322	41.5376733	0.708	Crivos ASTM
5	-54948.72	207756.463	-8.791583	41.537273	0.786	Crivos ASTM
6	-54978.715	207864.444	-8.7919522	41.5382432	0.834	Crivos ASTM
7	-55010.176	207969.832	-8.7923389	41.5391898	0.812	Crivos ASTM
8	-55030.474	208073.441	-8.7925916	41.5401212	--	Crivos ASTM
9	-55053.984	207720.089	-8.792841	41.5369383	--	Crivos ASTM
10	-55081.951	207838.819	-8.793187	41.5380054	--	Crivos ASTM
11	-55114.289	207935.418	-8.7935833	41.5388728	--	Crivos ASTM
12	-55134.698	208046.674	-8.7938381	41.5398731	--	Crivos ASTM
13	-54677.104	207352.97	-8.7882916	41.5336589	0.622	Crivos ASTM
14	-54595.548	207171.292	-8.7872979	41.5320288	0.188	Crivos ASTM
15	-54703.989	207130.337	-8.7885935	41.5316527	0.815	Crivos ASTM
16	-54507.837	206988.046	-8.7862304	41.530385	0.143	Crivos ASTM
17	-54649.613	206921.843	-8.7879231	41.5297792	0.133	Crivos ASTM
18	-54628.493	206741.068	-8.7876536	41.5281531	0.0639	Granulómetro Laser
19	-54399.846	206786.274	-8.7849183	41.5285757	0.149	Crivos ASTM
20	-54619.517	206501.424	-8.7875243	41.5259962	0.0634	Granulómetro Laser
21	-54012.2	206110.468	-8.7802132	41.5225175	2.652	Crivos ASTM
22	-53931.68	206243.246	-8.7792605	41.5237183	2.456	Crivos ASTM
23	-53732.471	205783.465	-8.7768329	41.5195922	1.535	Crivos ASTM
24	-53765.965	205599.547	-8.7772177	41.5179341	2.849	Crivos ASTM
25	-52020.134	204956.516	-8.7562486	41.5122599	0.0708	Granulómetro Laser
26	-52313.216	204922.236	-8.7597562	41.5119322	5.888	Crivos ASTM
27	-52629.219	204961.271	-8.7635447	41.512263	3.395	Crivos ASTM
28	-52879.522	205058.705	-8.7665514	41.5131237	4.241	Crivos ASTM
29	-53179.756	205262.293	-8.7701656	41.5149368	4.506	Crivos ASTM
30	-55033.947	206664.964	-8.7925044	41.5274402	0.37	Crivos ASTM
31	-55015.603	206852.865	-8.7923018	41.5291332	0.341	Crivos ASTM
32	-54981.485	207052.88	-8.7919113	41.5309363	0.295	Crivos ASTM
33	-54932.816	207297.503	-8.7913505	41.533142	0.321	Crivos ASTM
34	-55080.754	208363.249	-8.7932206	41.542727	0.341	Crivos ASTM
35	-55056.163	208609.31	-8.7929485	41.544944	0.33	Crivos ASTM
36	-55017.343	208834.468	-8.7925038	41.5469738	0.315	

[6] Henriques, R.F. (2004) SEDMAC/SEDPC: An application to support particle size analysis of unconsolidated sediments. *32nd International Geological Congress, Abstracts Vol., pt. 1, abs. 154–6, 726.*

#### 4.5. Geologia e Geomorfologia de Esposende

O setor costeiro em estudo encontra-se inserido na folha 5C (Barcelos) da cartografia geológica nacional à escala 1:50000. É incluído também na Folha 1 da cartografia geológica nacional à escala 1:200000 (Figura 70 e Figura 71).

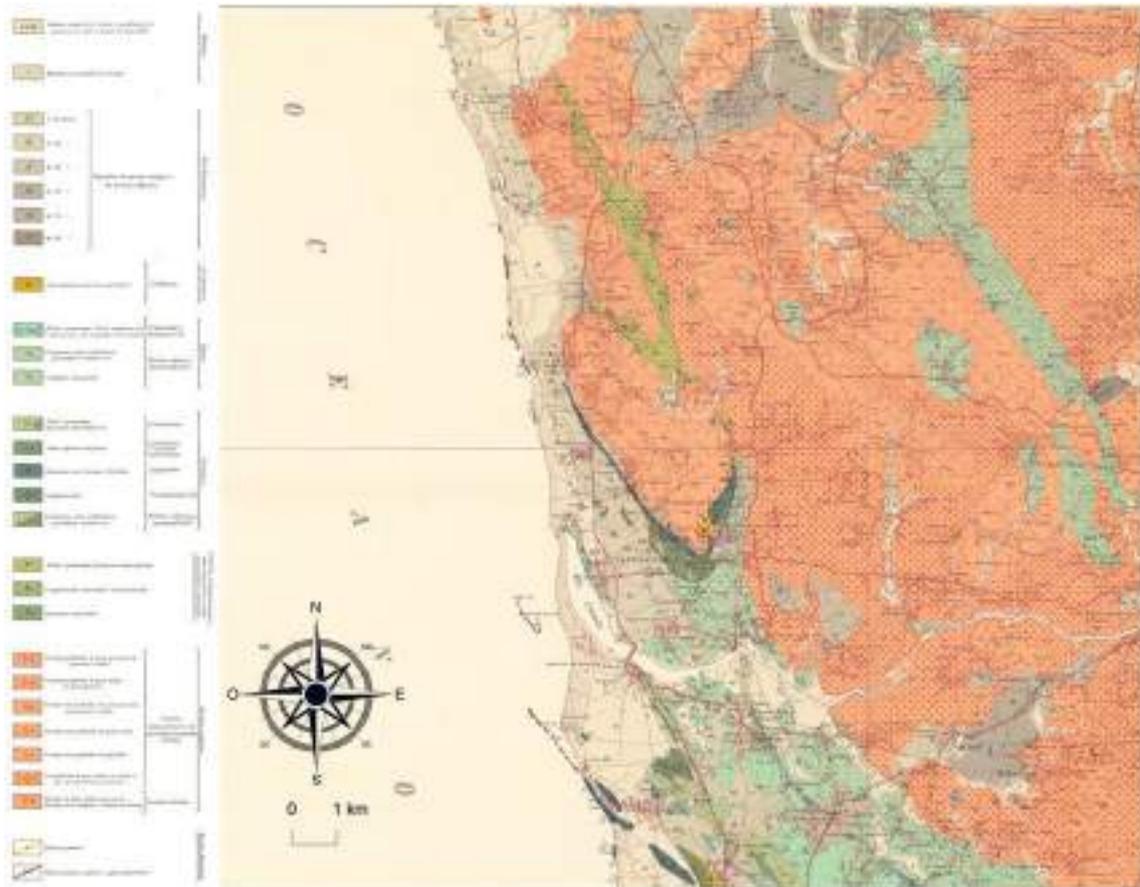


Figura 70 - Carta geológica 1:50000 da área de Esposende.

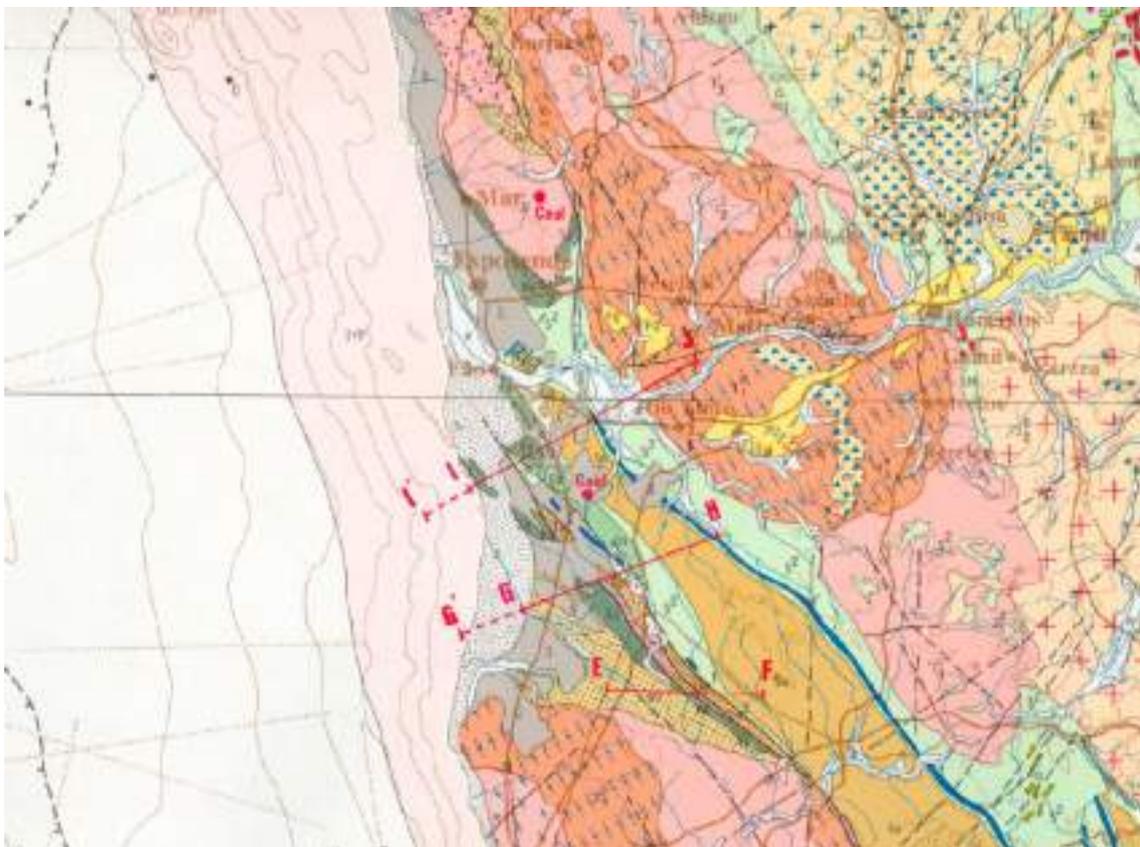


Figura 71 - Extrato da Folha 1 da Carta geológica 1:200000 da área de Esposende.

Este setor integra-se na Zona Centro Ibérica (ZCI) do zonamento morfológico e tectónico do Maciço Ibérico (Figura 72).



Figura 72 - Zonas morfológicas e tectónicas em Portugal (adaptado de Lotze, 1945).

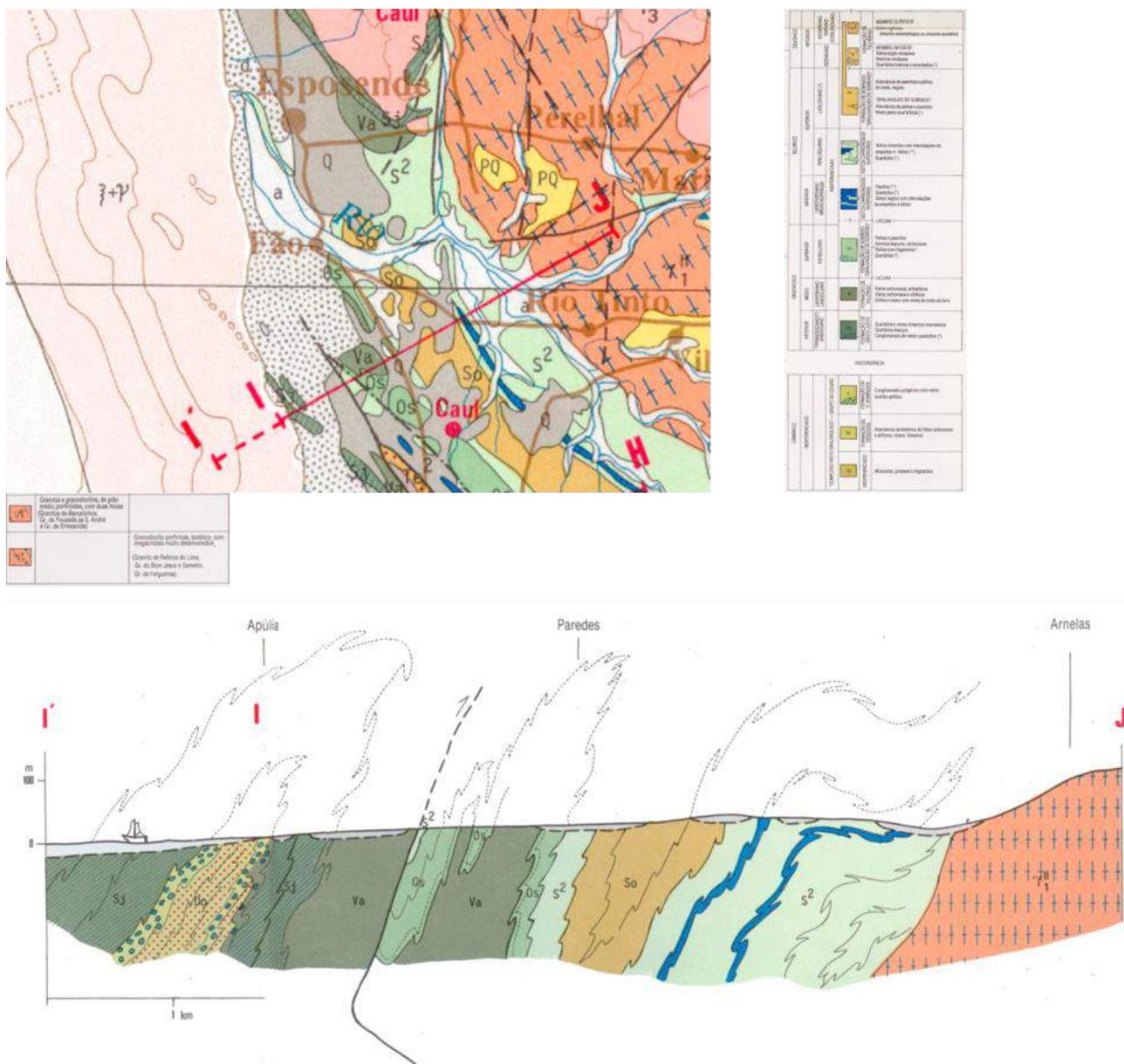
Os limites com as zonas envolventes correspondem a uma transição suave na parte nordeste (NE), a partir do flanco do anticlinório do Olho de Sapo. A sudoeste (SW) encontra-se a faixa de compressão Portalegre-Ferreira do Zêzere. A oeste, o contacto estabelece-se através da falha Porto-Tomar. Em termos litoestratigráficos, esta zona é caracterizada pela existência de formações metassedimentares de idade paleozoica com idades até ao carbonífero superior (continental).

O pré-câmbrico bem documentado está ausente, com exceção de um afloramento de gnaiss do tipo Olho de Sapo na região de Miranda do Douro. O magmatismo foi muito intenso sendo os granitoides hercínicos comuns, com textura e mineralogia muito variável, aflorando em manchas muito extensas. Em termos tectónicos, esta zona foi sujeita a deformações muito intensas com frequentes estruturas dobradas, sendo a região mais montanhosa de Portugal. Trata-se de uma região em que existem importantes jazigos minerais que foram explorados no passado.

O setor da foz do rio Cávado tem, como substrato rochoso, rochas meta-sedimentares da era paleozoica, integradas numa faixa que se prolonga desde Castro Daire, passado por Valongo (onde ocorre o conhecido Anticlinal de Valongo) até Viana do Castelo.

Neste pequeno sector predominam rochas do período câmbrio ao ordovício, dobradas em anticlinal, como se pode observar no flanco esquerdo no corte geológico I'-J (Figura 73) obtido a partir da Folha 1 da cartografia geológica 1:200000, junto à localidade de Apúlia. Estas rochas incluem a definição de uma antiforma que se estende de Viana do Castelo a Esposende.

Estas rochas metassedimentares estruturam-se em camadas, definindo planos alinhados NW-SE. As litologias mais resistentes à erosão, nomeadamente os quartzitos, os conglomerados ou os migmatitos, tendem a ficar mais proeminentes, definindo estruturas tabulares alongadas que afloram em toda a região. Salientam-se os quartzitos que afloram por todo o sector, em especial na praia da Apúlia. Estas estruturas destacam-se também da cobertura sedimentar atual, quer na zona emersa como na imersa, podendo ser observados, durante a baixa mar, na praia de Esposende ou na praia de Cepães (Figura 74).



**Figura 73 - Corte geológico Apúlia-Arnelas, integrado na Folha 1 da cartografia geológica à escala 1:200000.**

Mais para o interior destacam-se os granitos e granodioritos, que constituem as zonas mais elevadas da região, como por exemplo o monte de S. Lourenço.



**Figura 74 - Vista aérea da praia de Cepães, sendo observáveis afloramentos rochosos de metassedimentos na zona de baixa mar.**

Já na zona imersa, a algumas centenas de metros da costa, a resistência de algumas destas litologias à abrasão marinha leva a que constituam leixões que são visíveis acima da superfície da água, como por exemplo os “Cavalos de Fão”, muito conhecidos localmente. A Figura 75 ilustra estes afloramentos rochosos. É possível também observar que estes afloramentos mantêm uma direção em planos NW-SE.



**Figura 75 - Afloramentos rochosos entre Pedrinhas e Apúlia (base fotográfica Apple Maps).**

Sobre o substrato rochoso ocorrem depósitos sedimentares, de idade quaternária, mais antigos, relacionados com a zona vestibular das linhas de água, principalmente do Rio Cávado, bem como depósitos marinhos mais antigos que os atuais, provavelmente relacionados com episódios transgressivos observados nos diversos períodos interglaciais (quentes) ocorridos no passado, em que o mar terá tido um nível superior ao atual, nomeadamente no último período interglaciar (Eemiano), ocorrido entre 130 000 e 115 000 anos atrás.

Ocorrem também depósitos mais recentes, relacionados com a atividade fluvial do Rio Cávado, bem como depósitos arenosos de dunas fósseis e dunas atuais.

Ocasionalmente ocorrem também pequenos depósitos de seixos ou cascalho. Estes depósitos têm geralmente espessura inferior a 20-30 m. Nas últimas décadas a praia desde o sul da Pedra Alta até Cepães tem apresentado persistência de coberturas de Seixos e Blocos rolados, com dimensões que oscilam predominantemente entre 1 e 15 cm. Estas partículas dominam a cobertura das praias neste sector a norte de Esposende. As partículas apresentam forte direção de imbricação, e desenvolvem facilmente degraus, evidenciando a ocorrência de diferentes episódios energéticos ou de maré. A presença dos inúmeros afloramentos rochosos junto às praias e a presença de seixos têm constituído defesas naturais que aumentam a resiliência deste sector aos processos dominantes de erosão costeira. Não evitam, contudo, que nesta zona ocorram locais de erosão severa, tais como a zona a sul da Pedra Alta, a Praia de Fieiro Alto, A praia de Belinho e das Marinhas, a praia da Bonança em Ofir, a praia das Pedrinhas e a praia de Cedovém. As praias desde o norte de Esposende até à Apúlia apresentam cobertura arenosa de grão fino a médio.

Em termos morfológicos, a parte emersa deste setor é caracterizada pela existência de praias baixas e arenosas, normalmente de pendor suave, com alguns afloramentos rochosos. Às praias sucedem dunas, cuja cota máxima raramente excede 10 a 15 m. Todo o sector é próximo do atual estuário do Cávado, que hoje desagua a norte de Esposende, com uma orientação terminal do leito próxima da orientação das rochas estratificadas (NW-SE), o que faz pressupor que estas poderão exercer algum controlo nesta orientação. Entre a parte terminal do rio Cávado e o mar, existe uma restinga arenosa que se vai tornando progressivamente mais estreita até à foz do rio. Esta estrutura encontra-se fixada por vegetação mais a sul, sendo esta progressivamente mais esparsa. A parte terminal da restinga é muito móvel, apresentando forma variável ao longo do tempo. Nas últimas três décadas a grande mobilidade sedimentar que se verifica neste local levou a vários episódios de recuo da ponta da restinga para sul ou da sua rotura, com mobilização de sedimento na direção da margem este do rio Cávado.

Até às montanhas mais interiores ocorrem zonas aplanadas designadas por terraços marinhos. São superfícies relativamente planas, geralmente estreitas e alongadas, horizontais ou de declive muito suave. Constituem plataformas onde o mar exerceu abrasão e aplanamento no passado e que estão situadas acima do nível do mar atual. A sua formação ocorreu em períodos interglaciais mais quentes que o atual (em curso), sendo que foram identificados na parte norte de Esposende, na base do conjunto de montes que se inicia junto ao monte de S. Lourenço, pelo menos dois destes terraços. O terraço mais baixo vai desde as praias atuais até sensivelmente à estrada nacional N<sup>o</sup>13. O segundo terraço, mais alto e mais antigo, vai desde a referida estrada até à base das montanhas. Há evidências de que a base dos granitos que contactam a este com os metassedimentos, seja uma arriba fóssil, nomeadamente a presença de solapas de erosão marinha.

A plataforma marinha tem um pendor suave sendo que a batimetria da costa em todo o Minho sugere a ocorrência de diversos níveis topográficos da plataforma marinha que terão funcionado como terraços marinhos no passado, quando o mar estava abaixo do nível atual. A praia, neste local, tem uma orientação aproximada N-S, quer na zona da restinga quer no sector da praia de Esposende, infletindo depois para uma orientação aproximada NNW-SSE na praia de Cepães.

[1] Lotze, F., 1945. Zur gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta: *Geotekt. Forsch.*, 6, p. 78-92.

## 4.6. Levantamento geofísico por métodos elétricos

### 4.6.1. Introdução

Com o objetivo de detetar a profundidade do *bedrock*, na faixa litoral correspondente ao extremo norte da Restinga de Ofir, foi adjudicada à empresa “SINERGEO - Soluções Aplicadas em Geologia, Hidrogeologia e Ambiente, Lda”, um trabalho de prospeção geofísica por métodos elétricos-resistividade elétrica. A determinação da profundidade das formações rochosas é importante para definir parâmetros relativos ao dimensionamento e estabilidade de possíveis estruturas que possam vir a ser construídas bem como determinar a espessura de sedimento passível de ser mobilizado na ponta da restinga.

Os trabalhos de campo ocorreram nos dias 12 e 13 de abril de 2021. A profundidade de investigação ultrapassou os 18 metros.

### 4.6.2. Localização

O trabalho de geofísica foi desenvolvido ao longo de 8 perfis, disposto no terreno de acordo com a Figura 76.



Figura 76 – Localização da área de estudo e posição dos perfis de levantamento geofísico.

### 4.6.3. Materiais e métodos

#### 4.6.3.1 Prospeção geoelectrica

A prospeção geoelectrica foi realizada através do método de tomografia eléctrica de superfície. O material utilizado foi um resistivímetro, modelo SYSCAL R1 Plus da marca IRIS Instruments e eléctrodos de aço inoxidável, colocados com um espaçamento de 5 metros. O tratamento de dados, nomeadamente a inversão geofísica, foi realizado com recurso ao *software* RES2DINV. O equipamento de resistividade utilizado permite a utilização de múltiplos arranjos de eléctrodos, sendo neste trabalho utilizado o arranjo Wenner-Schlumberger.



Figura 77 – Resistivímetro, modelo SYSCAL R1 Plus - IRIS Instruments (canto superior esquerdo); Cabo de perfil geofísico com eléctrodos (canto inferior esquerdo); Eléctrodo com isolamento por argila (direita).

#### 4.6.3.2 Acompanhamento topográfico

O acompanhamento topográfico, nomeadamente a implantação dos perfis, foi feito com recurso a um equipamento DGPS, Leica Viva GNSS-GS15, em modo RTK, no sistema PT- TM06/ETRS89.

#### 4.6.4. Resultados obtidos - resistividade eléctrica

A interpretação dos resultados obtidos permitiu identificar dois tipos de anomalias distintas. Os resultados obtidos, nomeadamente as pseudosecções decorrentes da inversão geofísica dos dados dos perfis geoelectricos realizados, são apresentados de seguida. A profundidade estimada do *bedrock* encontra-se assinalada com um tracejado preto, sendo que se afiguram duas situações geológicas concretas de execução de perfis distintas, que se definirão como “A” e “B”.

A situação “A” corresponde ao contexto de execução dos perfis 1 e 2, na base da restinga, em que foi feita a definição direta da assinatura geofísica do *bedrock* (alta resistividade relativa), face à assinatura da areia saturada com água salgada/salobra (baixa resistividade relativa).

A situação “B” corresponde ao contexto de execução dos restantes perfis, no topo da restinga, em que se obteve a assinatura geofísica da interface entre a areia (alta resistividade relativa) e o topo impermeável do *bedrock* (baixa resistividade relativa) ainda com água salgada.

A Figura 78 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 1.

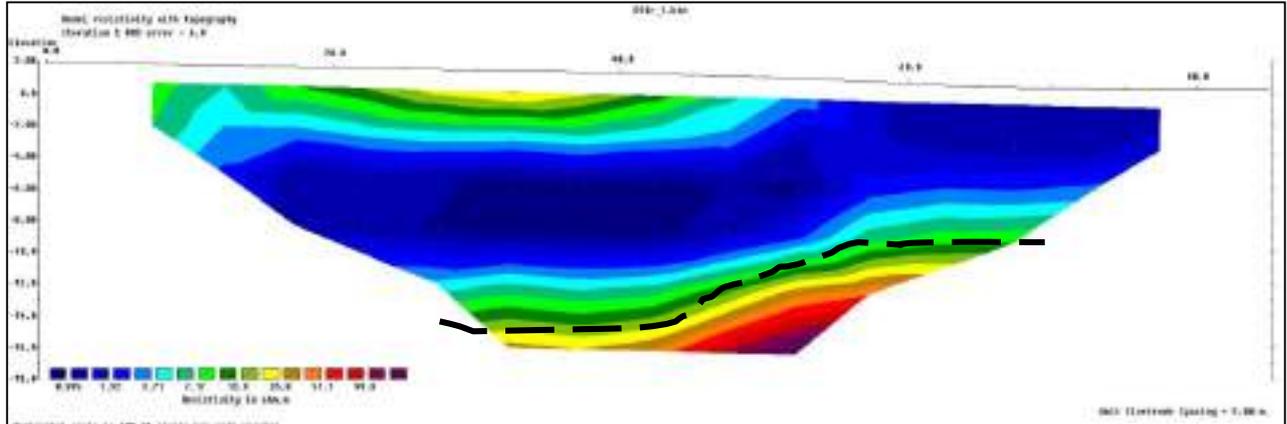


Figura 78 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 1 (situação “A”).

A Figura 79 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 2.

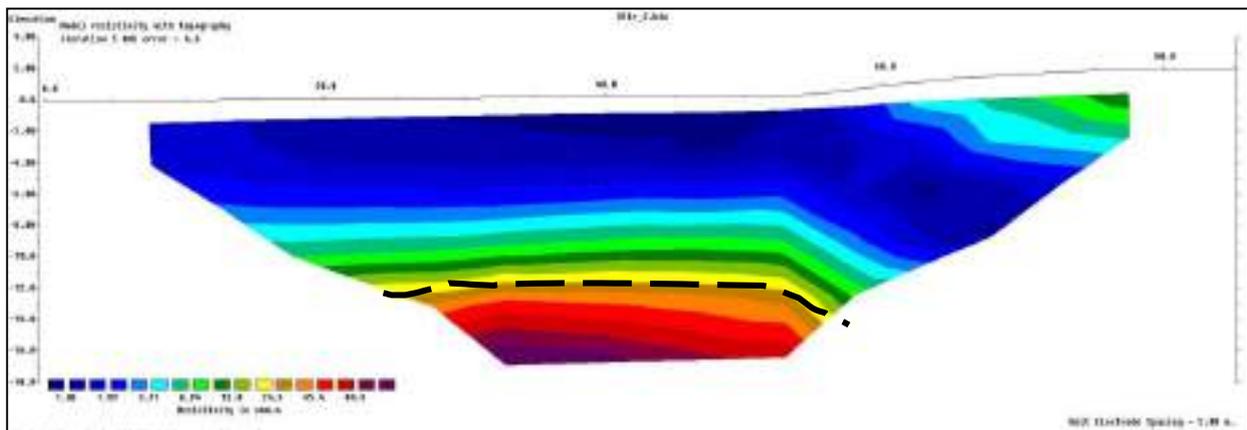


Figura 79 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 2 (Situação “A”).

A Figura 80 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 3.

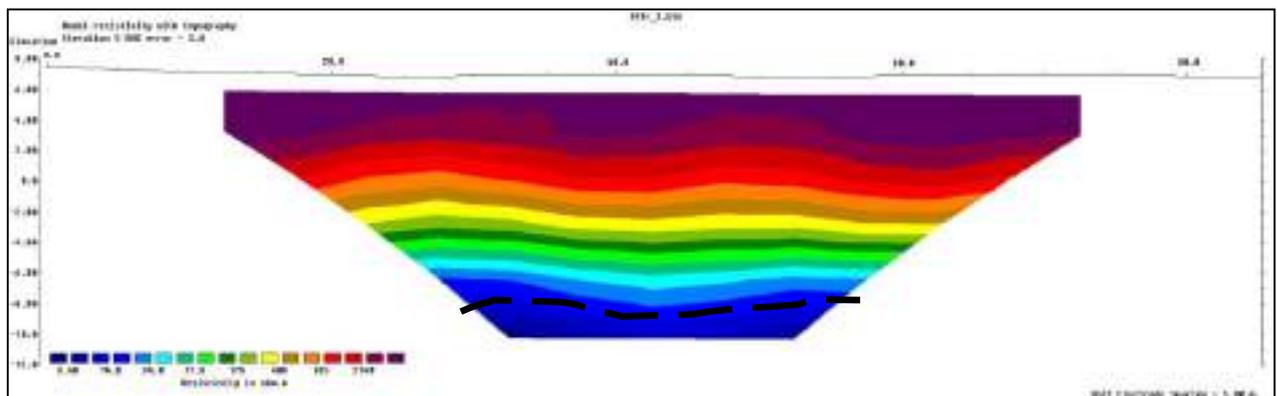


Figura 80 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 3 (situação “B”).

A Figura 81 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 4.

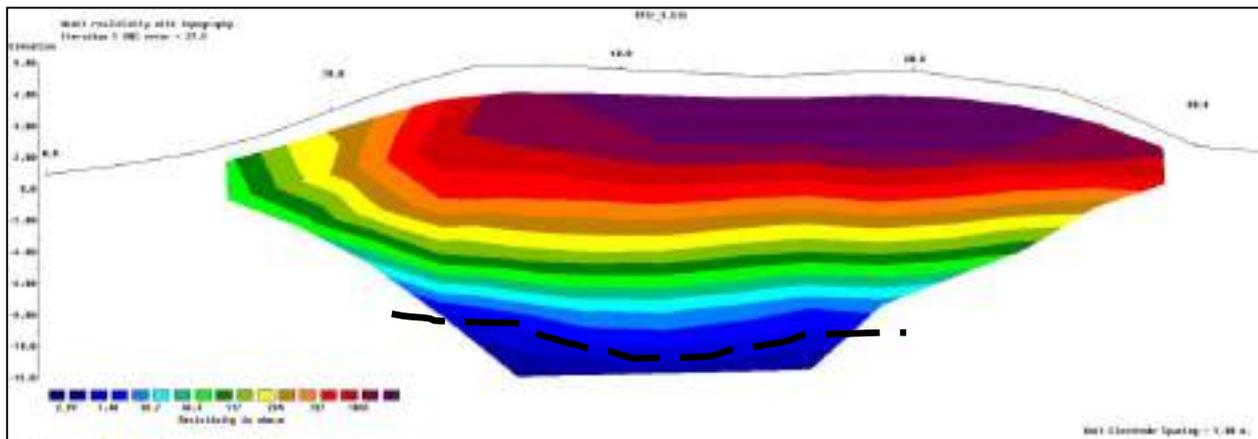


Figura 81 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 4 (situação “B”).

A Figura 82 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 5.

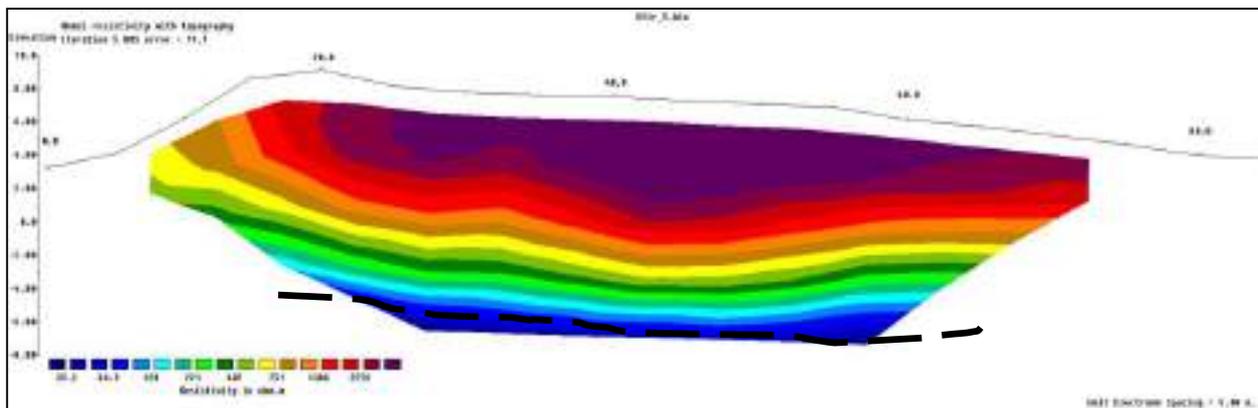


Figura 82 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 5 (situação “B”).

A Figura 83 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 6.

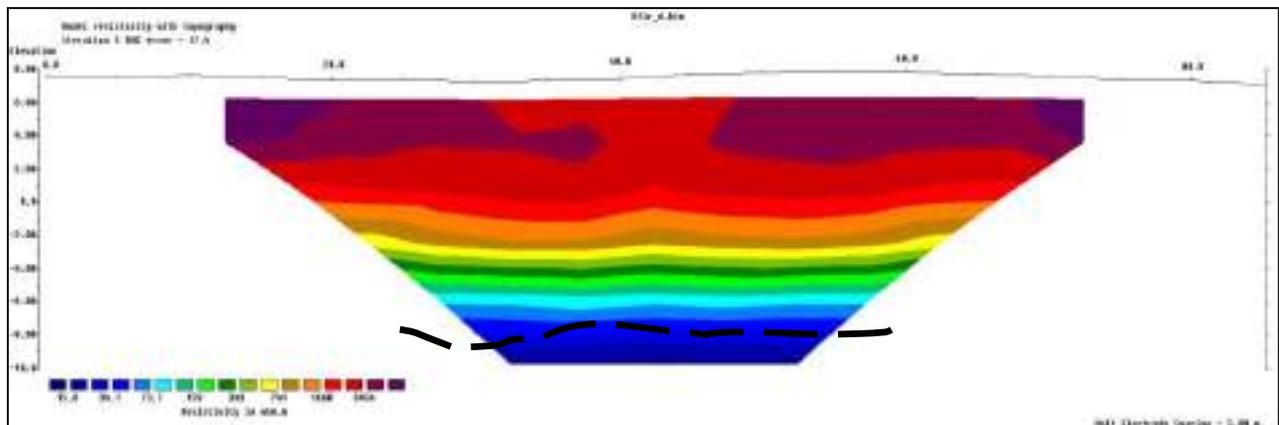


Figura 83 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 6 (situação “B”).

A Figura 84 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 7.

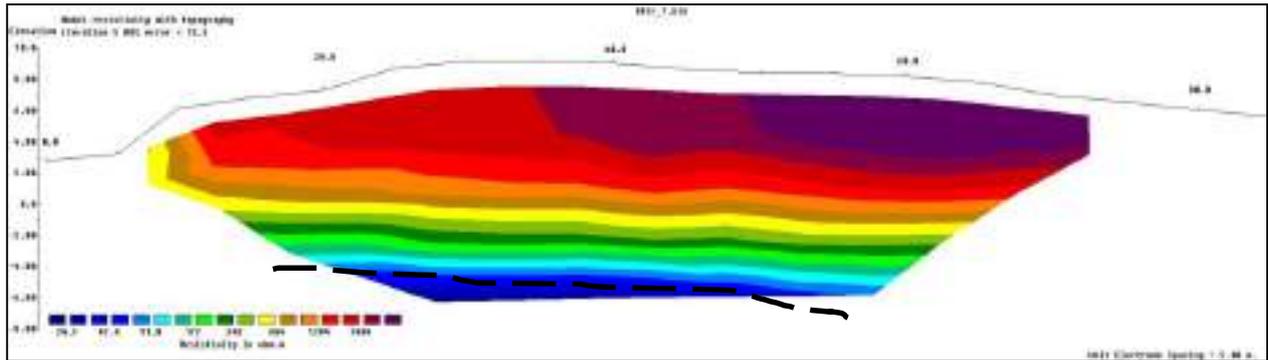


Figura 84 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 7 (situação “B”).

A Figura 85 representa a pseudosecção obtida após inversão geofísica dos dados do perfil 8.

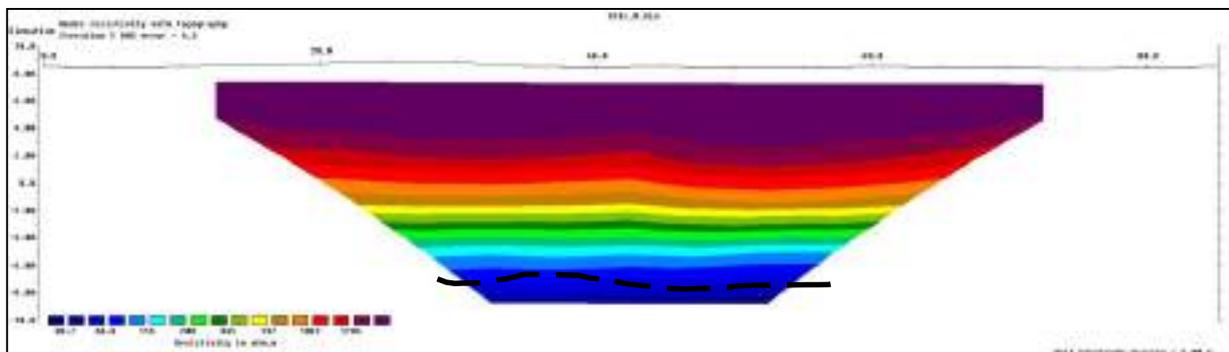


Figura 85 - Pseudosecção obtida após inversão do perfil 8 (situação “B”).

A síntese dos resultados obtidos, relativamente à profundidade do *bedrock*, é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Profundidade estimada para a presença do *bedrock*, em cada um dos perfis.

	Profundidade (P) estimada a partir da superfície (em metros)	Profundidade (P) a partir do nível do mar (em metros)
Perfil 1	12 < P < 14	≈ -12
Perfil 2	12 < P < 14	≈ -13
Perfil 3	≈ 16	≈ -10
Perfil 4	16 < P < 17	≈ -8
Perfil 5	≈ 17	≈ -8
Perfil 6	≈ 17	≈ -8
Perfil 7	≈ 17	≈ -6
Perfil 8	16 < P < 17	≈ -8

O trabalho realizado permitiu verificar a existência de interfaces de alta e de baixa resistividade aparente. A análise casuística dessas interfaces e respetivas assinaturas geofísicas permitiu inferir a profundidade do *bedrock* subjacente à Restinga de Ofir.

## 5. PROPOSTA DE SOLUÇÕES

### 5.1. Requisitos funcionais e justificação

A proposta de soluções alternativas para a restinga de Ofir e a avaliação destas em relação à situação de referência e ao cenário de não-intervenção, tem em consideração os seguintes Requisitos Funcionais (RF):

#### RF1. Manter o canal de navegação

A importância socioeconómica do porto de Esposende é bastante significativa a nível local; além do sector das pescas, é de considerar, com a mesma relevância e importância económica, o sector da náutica de recreio, o qual também gera receitas com importância significativa para a economia local.

As baixas profundidades de água da barra e do canal de acesso do rio Cávado, bem como as condições hidrodinâmicas de toda a zona, tornam a navegabilidade difícil e frequentemente perigosa. A forte dinâmica da restinga e os processos erosivos em curso, originam alterações significativas na batimetria da foz do rio Cávado (variabilidade da largura e profundidades ao longo do canal de navegação), que, por sua vez, tendem a agravar as já difíceis condições de navegabilidade e de circulação no interior do estuário.

As soluções alternativas equacionadas no presente estudo devem, assim, ter em vista a manutenção da barra e do canal de acesso do rio Cávado.

#### RF2. Reconstrução, reforço e manutenção da restinga

Os serviços de ecossistemas fornecidos pela restinga de Ofir podem dividir-se em três categorias essenciais, de acordo com as categorias estabelecidas em Millennium Ecosystem Assessment (2005) [1]: serviços de regulação, designadamente a proteção contra inundações; serviços de suporte, essenciais à manutenção de habitats costeiros valiosos; e serviços culturais, tais como benefícios estéticos e espirituais (turismo, valor recreativo, etc.).

Por isso, o robustecimento da restinga é essencial para garantir a continuidade do fornecimento desses serviços de ecossistemas.

#### RF3. Proteção da restinga

Além do valor ambiental intrínseco da restinga de Ofir, é necessário considerar o seu papel fundamental na manutenção, natural ou artificial, de uma barra principal no estuário do rio Cávado, por onde são canalizados os caudais de maré e fluviais. Qualquer rotura da restinga permite a fuga parcial desses caudais para barras secundárias, prejudicando a manutenção das condições de navegabilidade oferecidas pela barra principal.

Não obstante, a função mais importante desempenhada pela restinga atualmente é, muito possivelmente, a de proteção à frente marginal de Esposende, situada a uma cota média relativamente baixa em relação ao mar.

Assim, a situação atual de instabilidade da restinga coloca não só em causa a sustentabilidade de um valioso ecossistema costeiro e de uma infraestrutura portuária relevante para a economia local, mas também aumenta o grau de risco da frente marginal de Esposende face a galgamentos e inundações.

#### **RF4. Renaturalização da restinga**

No estudo de alternativas para a reconstrução, reforço, manutenção e proteção da restinga de Ofir será privilegiada a utilização de soluções resistentes combinadas com Soluções baseadas na Natureza. Uma vez reconstruída e reforçada a restinga, será proposto um plano adicional de renaturalização através da plantação de vegetação. A vegetação da área de estudo tem uma grande importância ecológica, confinando-se às áreas de sapal (estuário) e dunas (restinga). Nas dunas destacam-se o estorno (*Ammophila arenaria*) e o cardo-marítimo (*Eryngium maritimum*). No estuário do Cávado destacam-se, pela sua importância, algumas espécies do sapal, tais como a morraça (*Spartina marítima*) e o junco marítimo (*Juncus maritimus*). Salienta-se ainda a necessidade de criação, na frente dunar, de condições favoráveis para a ocorrência de feno-das-areias (*Elymus farctus*). Esta planta tem uma importância estratégica na gênese de dunas embrionárias e ocorre apenas em situações onde há alguma estabilidade e permanente enterramento da vegetação por sedimentos. É uma das primeiras espécies a desaparecer quando o aumento da erosão implica o aparecimento de arribas arenosas truncadas, com um grande ressalto de cota entre a praia e o topo daquelas.

A renaturalização tem como objetivo incrementar a qualidade do cordão dunar e áreas de sapal, nomeadamente ao nível das comunidades florísticas (aumento da abundância e riqueza específica) e da capacidade de suporte para a fauna, em particular a avifauna aquática, que utiliza este ecossistema como zona de refúgio, alimentação e reprodução, como é o caso da Andorinha-do-mar-anã (*Sterna albifrons*) e do Borrelho-de-coleira interrompida (*Charadrius alexandrinus*).

#### **RF5. Proteção da frente marginal de Esposende**

Apesar do dique longitudinal de enrocamento existente na margem direita, construído desde a barra até à posição agora ocupada pelo porto de recreio, diminuir o risco sobre a frente marginal de Esposende, a linha de defesa mais importante dessa frente marginal é a restinga de Ofir. Em termos práticos, a restinga funciona como um quebramar natural, limitando a exposição direta da frente marginal de Esposende à agitação marítima de elevada energia, e, dessa maneira, garantindo a tranquilidade do plano de água do estuário, a proteção das suas margens e do património edificado, assim como a manutenção das atividades económicas aí desenvolvidas. As soluções alternativas preliminares equacionadas no presente estudo devem, assim, ter em vista preservar essa função essencial da restinga de proteção da frente marginal de Esposende.

#### **RF6. Proporcionar acumulação de sedimentos**

O equilíbrio dinâmico da restinga pressupõe uma alimentação sedimentar que compense a capacidade de transporte dos agentes fisiográficos. A relação entre a capacidade de transporte e a alimentação determinam a variabilidade da posição e configuração do lado exterior da restinga.

As soluções alternativas preliminares equacionadas no presente estudo devem, assim, ter em vista não só o robustecimento da restinga, mas também a reconfiguração do banco exterior, particularmente junto à cabeça da restinga, de acordo com um alinhamento mais conforme à exposição local dominante.

Em paralelo, será estudada a possibilidade de localizar poços aluvionares no interior do estuário, os quais possam servir como manchas de empréstimo em alimentações futuras do banco exterior. Esses poços aluvionares são essenciais para a estratégia de manutenção da restinga porque se espera que, por um lado, o défice sedimentar que afeta este trecho litoral se venha a acentuar ainda mais no futuro e, por outro lado, as dragagens intensivas e continuadas ao longo de todo o estuário interior venham a ter impactes ambientais significativos para a fauna e a flora do próprio estuário.

## RF7. Permitir a deriva litoral N-S

Dadas as características morfológicas da embocadura e da zona do estuário adjacente, é expectável que, em termos médios, praticamente a totalidade do balanço sedimentar transportado pela deriva litoral transponha a embocadura para sul. Esta situação deve prevalecer nas soluções alternativas a equacionar no presente estudo.

### 5.2. Soluções baseadas na Natureza (SbN)

As Soluções baseadas na Natureza (SbN), tais como diques horizontais (Figura 86), ‘quebramares vivos’ (Figura 87), sapais construídos, entre outras (Figura 88), têm potencial para poderem diminuir os riscos costeiros associados a erosões e a inundações, ao mesmo tempo que dão suporte ao desenvolvimento de habitats marinhos e reforço às funções dos ecossistemas costeiros e estuarinos da restinga de Ofir e do parque Natural do Litoral Norte, oferecendo ainda oportunidades recreativas e contribuindo também para a qualidade paisagística de Esposende.



Figura 86 - Dique horizontal com um talude suave (e.g. 1V:30H) para possibilitar a migração de habitat ao longo do talude (adaptado de Engineering With Nature).



Figura 87 - Quebramar vivo é considerado uma medida estrutural, projetada para dar suporte aos habitats marinhos que se pretendem recuperar (adaptado de Engineering With Nature).

Dependendo do contexto local específico – por exemplo, no estuário, ao longo da costa, na barra do rio Cávado, na zona interior do estuário fora do canal de acesso, etc. – as SbN podem ser implementadas em substituição de outras medidas de reconstrução, reforço e manutenção da restinga, tais como medidas estruturais, ou em complemento destas.

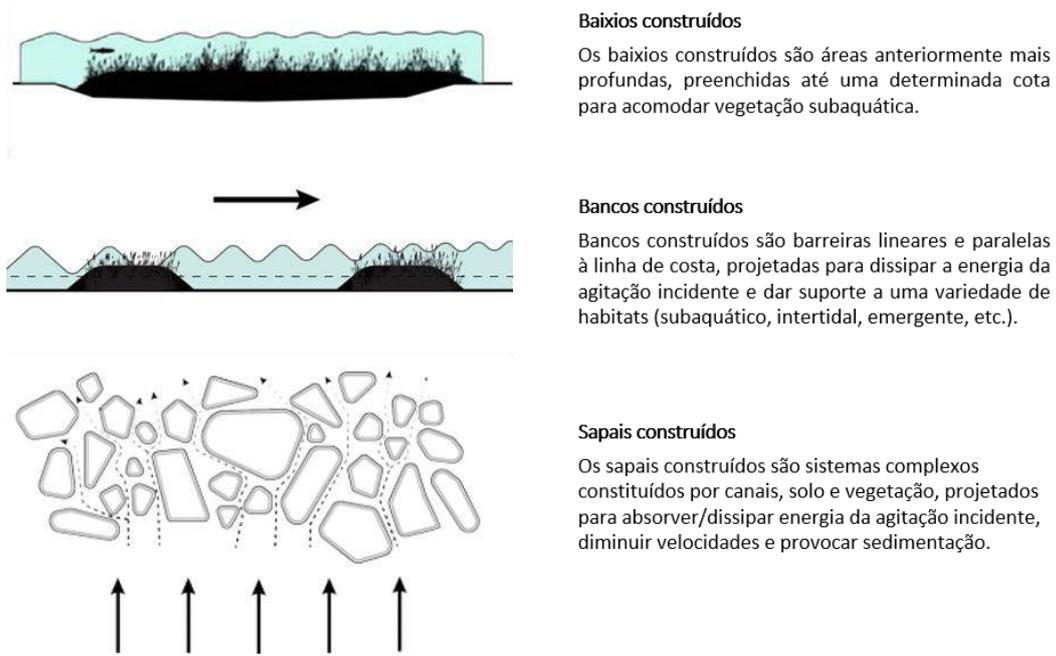


Figura 88 – Sapais, bancos e baixios construídos (adaptado de Engineering With Nature).

Neste contexto, definiu-se um *layout* geral de uma possível intervenção, designada alternativa preliminar 1, Figura 89 e Figura 90, que serve de base ao conceito geral, particularizado no *layout* apresentado na Figura 91.

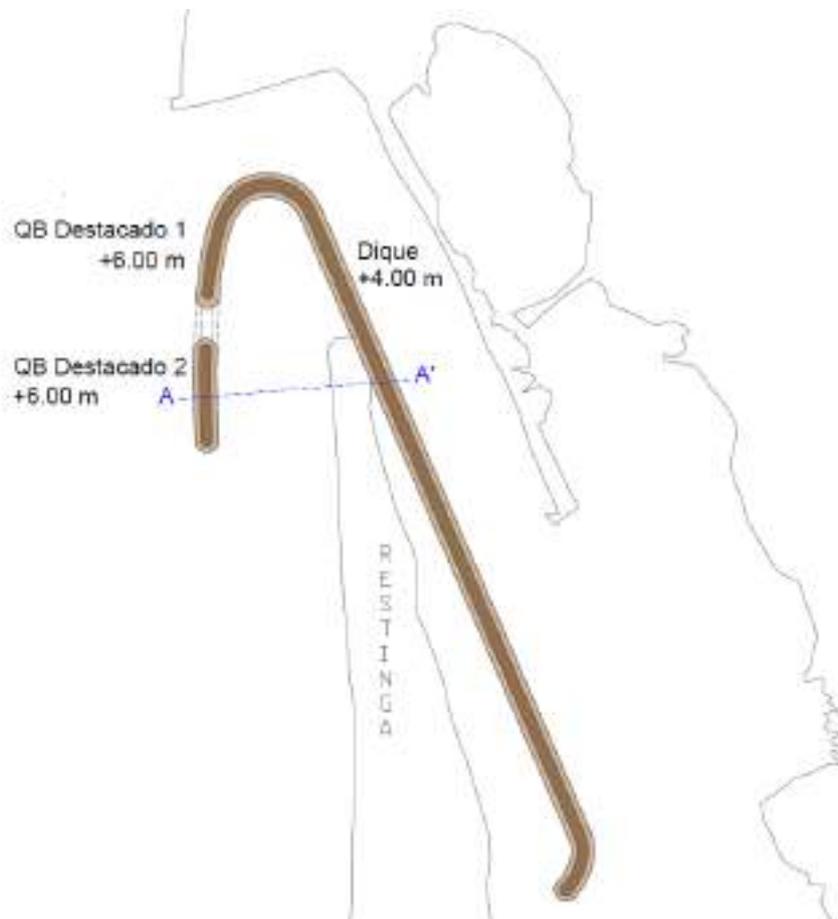


Figura 89 - Alternativa preliminar 1.



Figura 90 - Secção A-A' da alternativa preliminar 1.



Figura 91 - Alternativa preliminar 2 (não está à escala).

### 5.3. Considerações finais

De uma maneira geral, esta secção é indicativa dos tipos de medidas viáveis para a restinga de Ofir, de acordo com os requisitos funcionais definidos para o presente estudo. Em trabalhos futuros procurar-se-á refinar, testar e definir/dimensionar as alternativas com maior detalhe. Os próximos passos incluem:

- Interligar o processo iterativo de desenvolvimento, seleção e refinamento de alternativas com simulações em modelo numérico, tendo como objetivo estabelecer e comparar os benefícios de cada alternativa;
- Analisar e priorizar as SbN de acordo com as escalas espacial e temporal, ou seja, tendo em conta o espaço necessário para poderem ser construídas e o tempo que decorre até que os benefícios dessa construção possam ser atingidos plenamente;
- Análise multicritério, análise custo-benefício e análise custo-eficácia das diferentes alternativas consideradas, situação de referência e cenário de não-intervenção;

- Planeamento integrado, faseamento das SbN e das medidas estruturais a propor e monitorização, tendo em conta os requisitos funcionais definidos para o presente estudo e as necessidades, prioridades e interesses dos seus diferentes *stakeholders*;
- Análise adicional dos sistemas ecológicos, combinada com um estudo de como mitigar os impactes de curto-termo e maximizar os benefícios de longo-termo – por exemplo, benefícios de proteção costeira os quais se vão desenvolvendo lentamente;
- Consulta informal com diferentes stakeholders.

[1] <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>

## 6. MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 6.1. Introdução

A modelação numérica é atualmente uma ferramenta fundamental para simular detalhadamente diversos fenómenos da natureza, permitindo também obter resultados de grande importância em fase de projeto. Neste “*Estudo de caracterização de riscos e programa de intervenção para a proteção da restinga de Ofir e Barra do Cávado*” foram realizadas simulações numéricas com o *software* Delft3D. Esta ferramenta criada e desenvolvida pela Deltares, *The Netherlands*, tem aplicação em várias áreas, nomeadamente em estudos costeiros, fluviais e zonas estuarinas. Para esse efeito este *software* permite modelar vários processos físicos, tais como a dinâmica morfológica local, a propagação das ondas, a sua dissipação, a reflexão, a influência da rugosidade dos fundos, as correntes de maré, os caudais de descarga dos rios, entre outros, que serão descritos com maior detalhe nos subcapítulos seguintes.

O *software* Delft3D é composto por diversos módulos que permitem simular fenómenos hidrodinâmicos (Delft3D-FLOW), o transporte sedimentar (Delft3D-MORPHOLOGY), a propagação das ondas (Delft3D-WAVE), a qualidade da água (Delft3D-WAQ e Delft3D-PART) e ainda fenómenos ecológicos (Delft3D-ECO). Na Figura 92 estão indicados os diferentes módulos que o modelo numérico inclui.

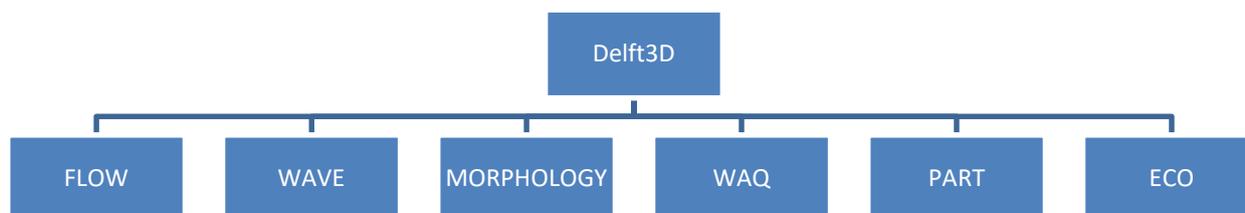


Figura 92 – Módulos integrados no *software* Delft3D.

Este *software* inclui também outros módulos de suporte à implementação do modelo numérico, ou seja, que têm como principal objetivo facilitar a construção da malha, tanto para o módulo FLOW como para o módulo WAVE, e realizar a interpolação da batimetria dos fundos na própria malha criada. Esses dois módulos são o Delft3D-RGFGRID [1] e o Delft3D-QUICKIN [2].

O pós-processamento de dados pode ser realizado através de um outro módulo integrado no *software* Delft3D, denominado Delft3D-QUICKPLOT [3]. Este módulo é uma interface entre o *software* Delft3D e o MATLAB que gere a parte dos resultados das simulações realizadas separadamente ou em conjunto com vários dos módulos indicados anteriormente.

### 6.2. Módulo Delft3D-FLOW

O Delft3D-FLOW é um dos módulos principais do *software* Delft3D e, por isso, pode ser usado em várias aplicações, nomeadamente na simulação do escoamento num rio, em lagos com elevada profundidade, na modelação do transporte sedimentar [4], de materiais e poluentes [5], em escoamentos provocados pela ação do vento [6] e da maré [7], descargas de rios [8] e ainda tsunamis [9]. De referir ainda que tem a capacidade de realizar simulações multidimensionais (2D e 3D), tendo por base as equações de *Navier Stokes* para fluídos incompressíveis em águas pouco profundas.

Admitindo a validade da hipótese de águas pouco profundas, a equação de conservação da quantidade de movimento para a direção vertical pode ser simplificada e reduzida à relação que traduz a distribuição da pressão hidrostática,  $p$ , dada pela seguinte equação,

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

em que  $\rho_w$  representa a massa volúmica da água do mar,  $g$  a aceleração da gravidade e  $z$  a direção vertical, segundo o sistema de coordenadas cartesiano.

Nestas condições, as acelerações do escoamento na direção vertical são pequenas quando comparadas com a aceleração da gravidade e podem por isso ser desprezadas [10].

As equações representativas da quantidade de movimento nas duas direções de um plano horizontal são as seguintes,

$$\frac{Du}{Dt} = fv - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} dz' + v_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + v_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{z'=z}^{z'=\zeta} \frac{\partial \rho_w}{\partial x} dz' + v_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + v_v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

em que  $\zeta$  representa a elevação da superfície livre da água do mar relativamente ao zero hidrográfico,  $f$  a força de Coriolis, e  $u$  e  $v$  as duas componentes da velocidade Euleriana nas respetivas direções  $x$  e  $y$ . Para além destes parâmetros,  $v_h$  e  $v_v$  representam os coeficientes da viscosidade da turbulência horizontal e vertical (*horizontal and vertical kinematic eddy viscosity coefficients*), respetivamente.

Este módulo resolve ainda a equação da conservação da massa assumindo a incompressibilidade do fluido, que é dada da seguinte forma,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)v]}{\partial y} = Q \quad (9)$$

em que  $Q$  representa a intensidade das fontes de massa por unidade de área.

O primeiro parâmetro associado à difusividade da turbulência horizontal (*horizontal eddy diffusivity coefficient*) e traduzido através da seguinte expressão,

$$D_h = D_{SGS} + D_h^{back} + D_v \quad (10)$$

em que  $D_{SGS}$  representa a escala da malha da difusividade horizontal,  $D_h^{back}$  o coeficiente de difusividade da turbulência horizontal não resolvida da mistura e, por último,  $D_v$  o coeficiente de difusividade da turbulência vertical, sendo que para simulações 2D este coeficiente é desprezado.

### 6.3. Módulo Delft3D-WAVE

O módulo Delft3D-WAVE permite simular a propagação da agitação marítima tendo em conta o seu espectro de energia e parâmetros característicos (e.g., altura de onda significativa, período de onda de pico, direção de propagação das ondas), através de um modelo numérico espectral de terceira geração denominado SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*). Este módulo apresenta diversas áreas de aplicação, nomeadamente as zonas costeiras (desde águas profundas até pequenas profundidades de água), as zonas estuarinas e ainda lagos [11].

No modelo SWAN a evolução do espectro de ondas é dada pela seguinte equação que expressa o balanço de energia espectral,

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (11)$$

em que:

$\frac{\partial}{\partial t} N$  representa a taxa local da variação da densidade da ação em função do tempo;

$\frac{\partial}{\partial x} c_x N$  e  $\frac{\partial}{\partial y} c_y N$  representam 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;

$\frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N$  representa a alteração da frequência relativa associada a variações de profundidade e correntes, com velocidade de propagação  $c_\sigma$  no espaço  $\sigma$ ;

$\frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta$  representa a refração induzida pela profundidade e corrente, com velocidade de propagação  $c_\theta$  no espaço  $\theta$ ;

$S = S(\sigma, \theta)$  representa a componente em termos de densidade energética que dá resposta à geração, dissipação e interação não linear das ondas.

O módulo Delft3D-WAVE calcula os diferentes parâmetros de onda, tais como as forças associadas à dissipação da energia, às tensões de radiação e ainda às velocidades orbitais de fundo. Estes resultados serão utilizados posteriormente no módulo Delft3D-FLOW e no módulo Delft3D-MORPHOLOGY.

A dissipação da energia das ondas pode ocorrer de diversas formas e pode ser quantificada através do somatório de três componentes principais, nomeadamente o “whitecapping”, o atrito com os fundos e, por último, a rebentação provocada pela redução da profundidade de água [11]. O primeiro parâmetro é dado pela seguinte equação,

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (12)$$

em que  $\Gamma$  representa um coeficiente que é função da declividade da onda,  $k$  o número de onda,  $\tilde{\sigma}$  e  $\tilde{k}$  uma frequência média e um número de ondas médio, respetivamente. O termo associado à dissipação de energia das ondas provocada pelo atrito com os fundos é dado pela seguinte equação,

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (13)$$

em que  $C_{bottom}$  representa o coeficiente de atrito com os fundos.

O terceiro e último parâmetro refere-se à dissipação originada pela rebentação das ondas e pode ser quantificado através de,

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (14)$$

em que  $E_{tot}$  e  $D_{tot}$  representam a taxa de dissipação da energia total associada à rebentação das ondas.

Sendo as tensões de radiação um parâmetro essencial para a caracterização do forçamento das ondas, o modelo SWAN resolve as seguintes equações relativas a duas direções ortogonais,

$$F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (15)$$

$$F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (16)$$

em que  $S$  representa o tensor das tensões de radiação:

$$S_{xx} = \rho g \int \left( n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right) E(\sigma, \theta) \quad (17)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \int n \sin \theta \cos \theta E(\sigma, \theta) \quad (18)$$

$$S_{yy} = \rho g \int \left( n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right) E(\sigma, \theta) \quad (19)$$

e  $n$  representa a relação entre a velocidade de grupo e a velocidade de fase.

#### 6.4. Módulo Delft3D-MORPHOLOGY

O módulo Delft3D-MORPHOLOGY tem como principal objetivo simular o transporte de sedimentos em zonas com sedimentos coesivos ou não coesivos. Todas as alterações morfológicas, tais como erosão costeira, deposição sedimentar e erosões localizadas junto a estruturas de proteção costeira são simuladas através deste módulo. Além disso, descreve ainda todo o transporte de sedimentos que ocorre tanto por arrastamento como por suspensão [10].

O transporte de sedimentos em suspensão é calculado através da seguinte equação que caracteriza o balanço de massa,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - \omega_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (20)$$

em que  $c$  representa a concentração em massa da fração dos sedimentos,  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes da velocidade do escoamento,  $\omega_s$  a velocidade de queda dos sedimentos e, por último,  $\varepsilon_{s,x}$ ,  $\varepsilon_{s,y}$  e  $\varepsilon_{s,z}$  representam a turbulência da difusividade para cada fração de sedimentos.

Para uma análise detalhada do transporte sedimentar, a direção do transporte de sedimentos por arrastamento pode ser calculada e representada através da seguinte expressão,

$$\tan(\varphi_\tau) = \frac{v - \alpha_I \frac{u}{U'} I_s}{u + \alpha_I \frac{v}{U'} I_s} \quad (21)$$

em que  $I_s$  representa a intensidade do escoamento secundário e  $\alpha_I$  é dado pela seguinte expressão,

$$\alpha_I = \frac{2}{\kappa^2} E_s \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (22)$$

em que  $\kappa$  representa a constante de Von Kármán,  $C$  a rugosidade de Chézy,  $U'$  a velocidade média do escoamento na coluna de água e  $E_s$  o efeito do escoamento em espiral. Para além deste parâmetro, que caracteriza o transporte sedimentar, importa fazer referência à erosão e deposição, ambos considerados de grande importância nos estudos associados a erosões localizadas e ainda locais de assoreamento, nomeadamente, em zonas costeiras e estuarinas. As equações representativas de tais fenómenos são dadas por,

$$E = MS(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) \quad (23)$$

$$D = w_s c_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \quad (24)$$

$$c_b = c \left( z = \frac{\Delta z_b}{2}, t \right) \quad (25)$$

em que  $E$  representa o fluxo erosivo,  $M$  o parâmetro de erosão definido pelo utilizador EROUNI,  $D$  o fluxo de deposição,  $w_s$  a velocidade de queda dos sedimentos,  $c_b$  a concentração média dos sedimentos no fundo da camada computacional e  $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e})$  uma função do tempo relativa à evolução da erosão, definida pelo seguinte sistema de equações,

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) \begin{cases} \left( \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,e}} - 1 \right), & \text{para } \tau_{cw} > \tau_{cr,e} \\ 0, & \text{para } \tau_{cw} \leq \tau_{cr,e} \end{cases} \quad (26)$$

Além disso,  $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d})$  representa uma função da evolução da deposição definida pelo seguinte sistema de equações,

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \begin{cases} \left( 1 - \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,d}} \right), & \text{para } \tau_{cw} > \tau_{cr,d} \\ 0, & \text{para } \tau_{cw} \leq \tau_{cr,d} \end{cases} \quad (27)$$

em que  $\tau_{cw}$  representa a tensão máxima de arrastamento junto ao fundo do mar, calculada pelo modelo de interação entre as ondas e as correntes,  $\tau_{cr,e}$  a tensão de arrastamento crítica de erosão e  $\tau_{cr,d}$  a tensão de arrastamento crítica de deposição.

### 6.5. Implementação do modelo numérico

A restinga de Esposende e o estuário do Rio Cávado, já caracterizados anteriormente, foram estudados com recurso à modelação numérica através do *software* Delft3D Flexible Mesh. Na Figura 93 é possível observar que este caso de estudo apresenta muitas peculiaridades, principalmente na embocadura do rio Cávado, onde se encontram já implantadas algumas estruturas de proteção costeira, nomeadamente diques e esporões.

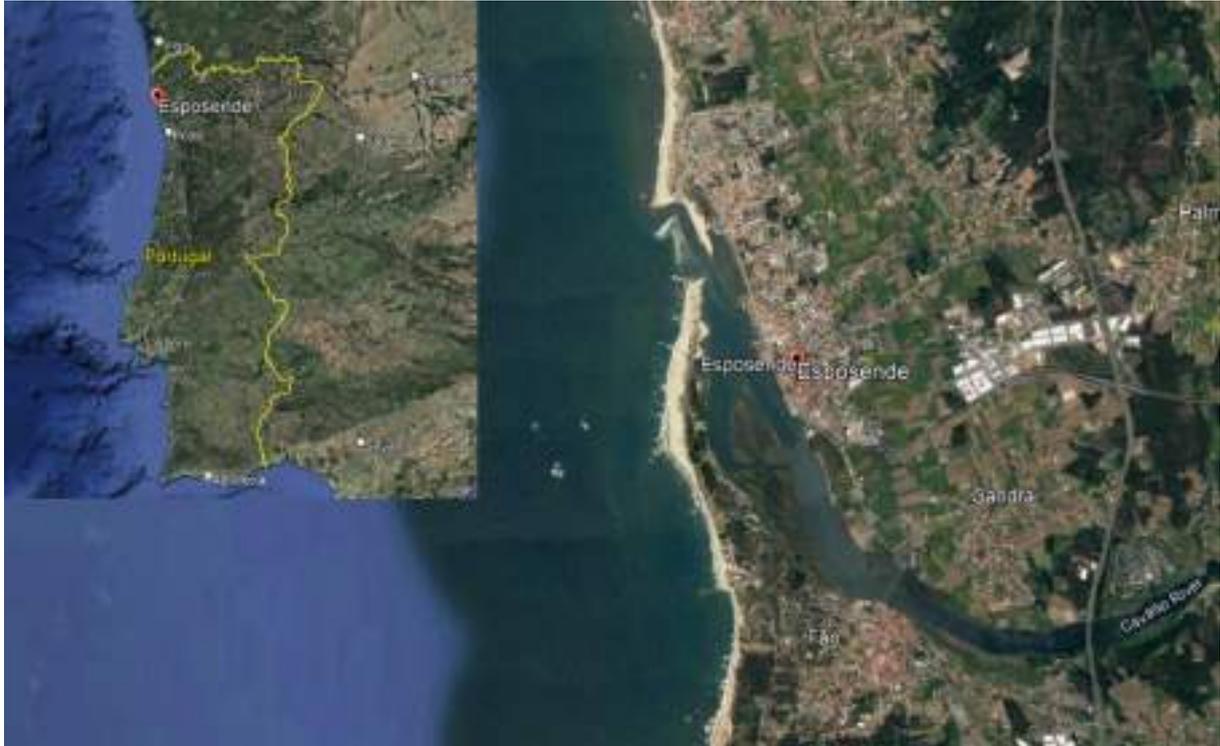


Figura 93 - Localização espacial do caso de estudo de Esposende (Google Earth).

Para a realização de uma análise detalhada e realista do problema em estudo e das soluções propostas para o mesmo, foi considerado o domínio representado, simplificada, na Figura 94, que abrange a área compreendida entre a ponte da autoestrada A28 e uma fronteira ao largo posicionada a cerca de 2 km da costa.

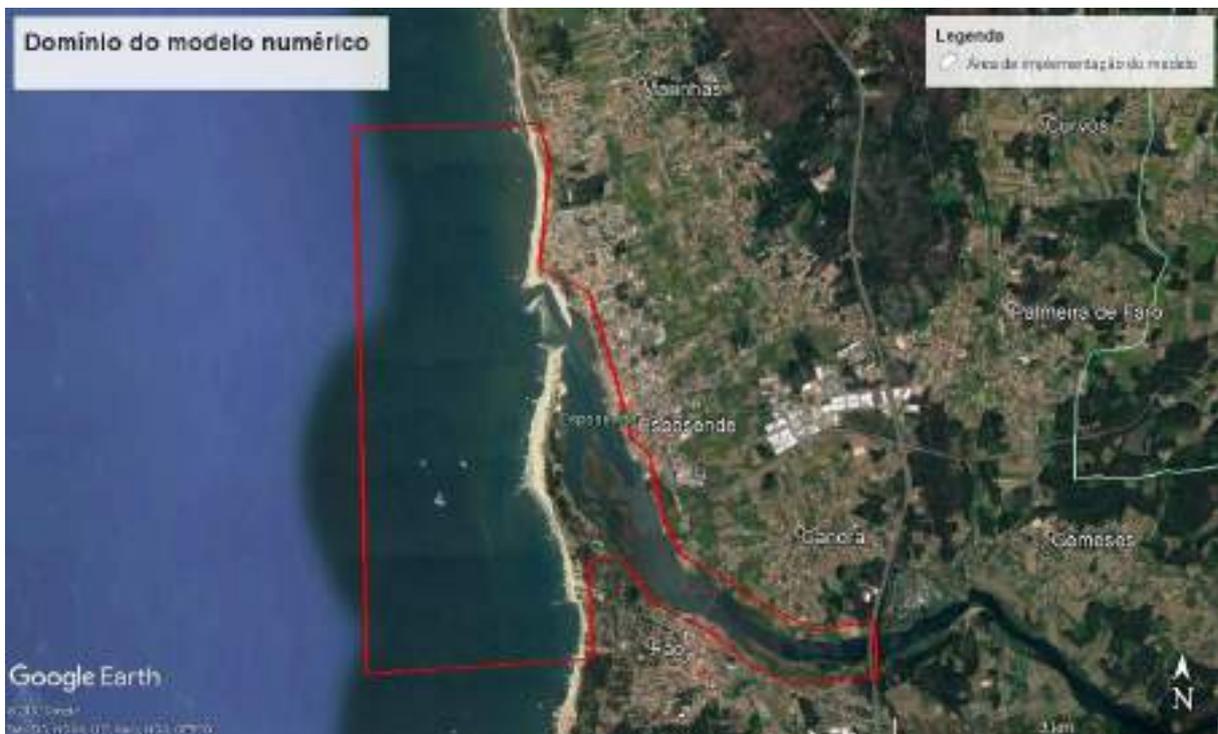


Figura 94 - Domínio do modelo numérico (esquemático).

O desenvolvimento do modelo numérico dividiu-se em várias fases, sendo que na primeira foram criadas as malhas que viriam a ser utilizadas, posteriormente, pelos módulos Delft3D-FLOW e Delft3D-WAVE. De referir ainda que o *software* Delft3D Flexible Mesh utiliza dois tipos diferentes de malhas nesses dois módulos. Posteriormente procedeu-se à definição dos parâmetros que completam o *setup* desses módulos e, por último, juntaram-se os dois módulos para correr as simulações. A restinga de Esposende foi integrada nas malhas criadas para esses dois módulos com o objetivo de estudar a morfodinâmica local para as várias condições hidrodinâmicas (agitação marítima, marés e escoamento fluvial), com e sem as soluções de proteção costeira propostas para o local, como se explica posteriormente.

No presente modelo numérico, para o módulo FLOW, criou-se uma malha não estruturada, ou seja, com células triangulares. Este tipo de malhas é usualmente recomendado para locais onde a direção do escoamento não é previsível e unidirecional. Desta forma e dada a grande dinâmica fluvial e marítima observadas na embocadura do rio Cávado, a utilização de uma malha não estruturada permite obter resultados com maior precisão e exatidão.

Na Figura 95 é possível observar a malha final utilizada no módulo FLOW. A presente malha apresenta uma resolução que varia espacialmente, com o objetivo de, primeiramente, garantir uma resolução adequada na zona de interesse e, em seguida, otimizar o tempo computacional exigido pelo software. Assim, a malha apresenta uma resolução de 65 m junto da fronteira mais ao largo, 5 m na zona da embocadura do rio Cávado e, por fim, 40 m na zona mais a montante do rio Cávado.



Figura 95 - Malha não estruturada usada no módulo FLOW (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Para além das vantagens anteriormente salientadas, este tipo de malhas permite ao utilizador contornar determinados obstáculos, nomeadamente estruturas de proteção costeira. Desta forma, as estruturas existentes na embocadura da foz do rio Cávado foram excluídas da malha, tal como é possível observar através da Figura 96.



Figura 96 - Detalhe da malha não estruturada usada no módulo FLOW (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Com efeito, recorrendo a malhas não estruturadas, é possível representar mais rigorosamente qualquer configuração que seja definida para as novas estruturas de proteção costeira depois de esquematizadas, por exemplo, através do *software* Autocad e devidamente georeferenciadas.

Seguidamente procedeu-se ao desenvolvimento de uma malha global (Figura 97) para o módulo WAVE que viria a propagar as condições de agitação desde as suas fronteiras ao largo até à zona em estudo.



Figura 97 - Malha global estruturada utilizada no módulo WAVE (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Foi gerada uma malha estruturada, uma vez que, de momento, a versão do software Delft3D Flexible Mesh apenas suporta esse tipo de malhas. No entanto, para contornar possíveis problemas de exatidão nos resultados e ainda otimizar algum tempo computacional, elaborou-se uma outra malha (Figura 98), com um domínio mais reduzido, que viria a receber as condições fronteira do domínio global (Figura 99). A resolução da malha global varia espacialmente, sendo que junto às fronteiras norte e sul tem uma resolução de 80 m e na zona da embocadura tem uma resolução de 20 m. A malha local apresenta uma resolução constante em todo o seu domínio e igual a 5 m. Todas estas malhas foram obtidas com recurso às ferramentas de geração de malhas do software Delft3D.



**Figura 98 - Malha local estruturada utilizada no módulo WAVE (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).**

Para além da construção das malhas necessárias a cada um dos módulos com o Delft3D-RGFGRID, foi ainda necessário definir a batimetria dos fundos nessas malhas, por forma a caracterizar corretamente a profundidade de água em cada uma das células das malhas. Assim, através da combinação de várias fontes, foi possível obter uma batimetria final com um domínio suficientemente grande que cobrisse a área de cada uma das malhas. A Figura 100 ilustra de uma forma geral a batimetria final que foi utilizada para este modelo numérico.

Os dados batimétricos utilizados neste trabalho foram obtidos de várias fontes, tais como: Carta Náutica, Polis Litoral Norte, Programa COSMO e Xavisub. Desta forma foi possível cobrir toda a zona de interesse do caso de estudo em análise. Importa referir que a resolução (densidades de pontos) dos levantamentos batimétricos utilizados é variável, sendo que na foz do rio Cávado a resolução é de 5 m (a área apresenta uma excelente resolução para a análise numérica de toda a hidro e morfodinâmica local).

De salientar, no entanto, que nas zonas mais afastadas da costa, os levantamentos vão perdendo resolução, porém, tal não deverá ter impacto negativo nos resultados obtidos, devido à distância à zona de interesse.

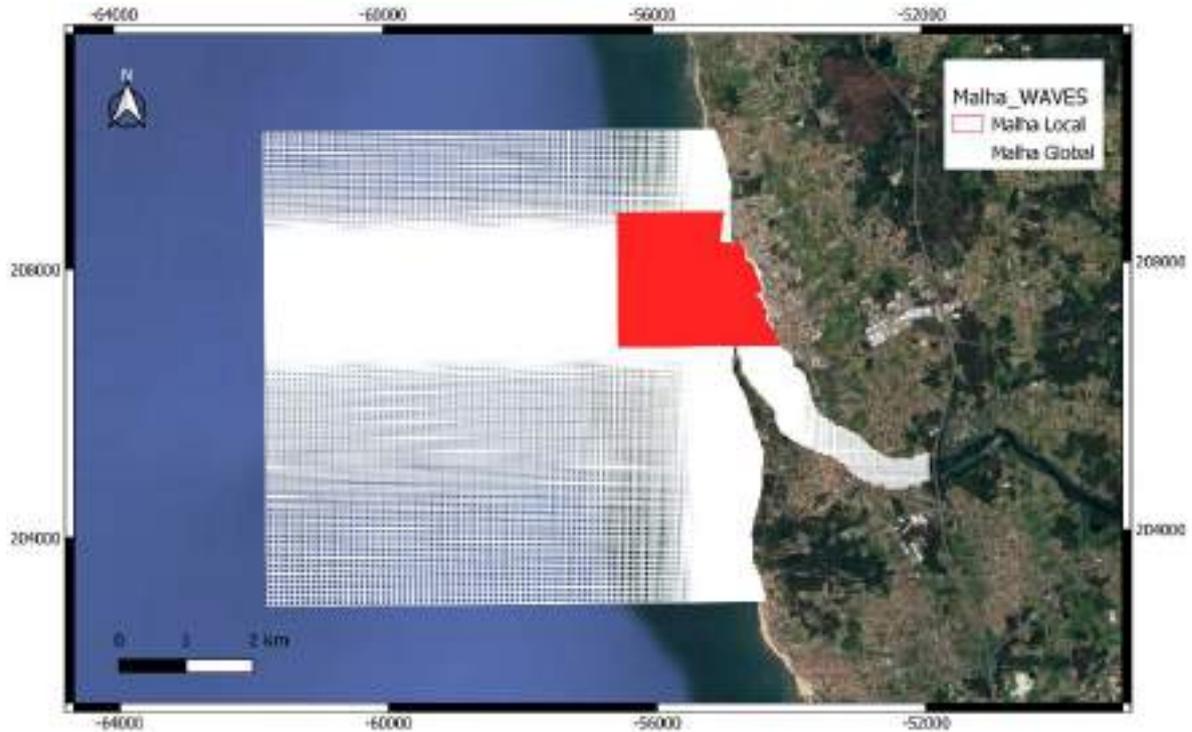


Figura 99 - Localização da malha local em relação à malha global do módulo WAVE (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

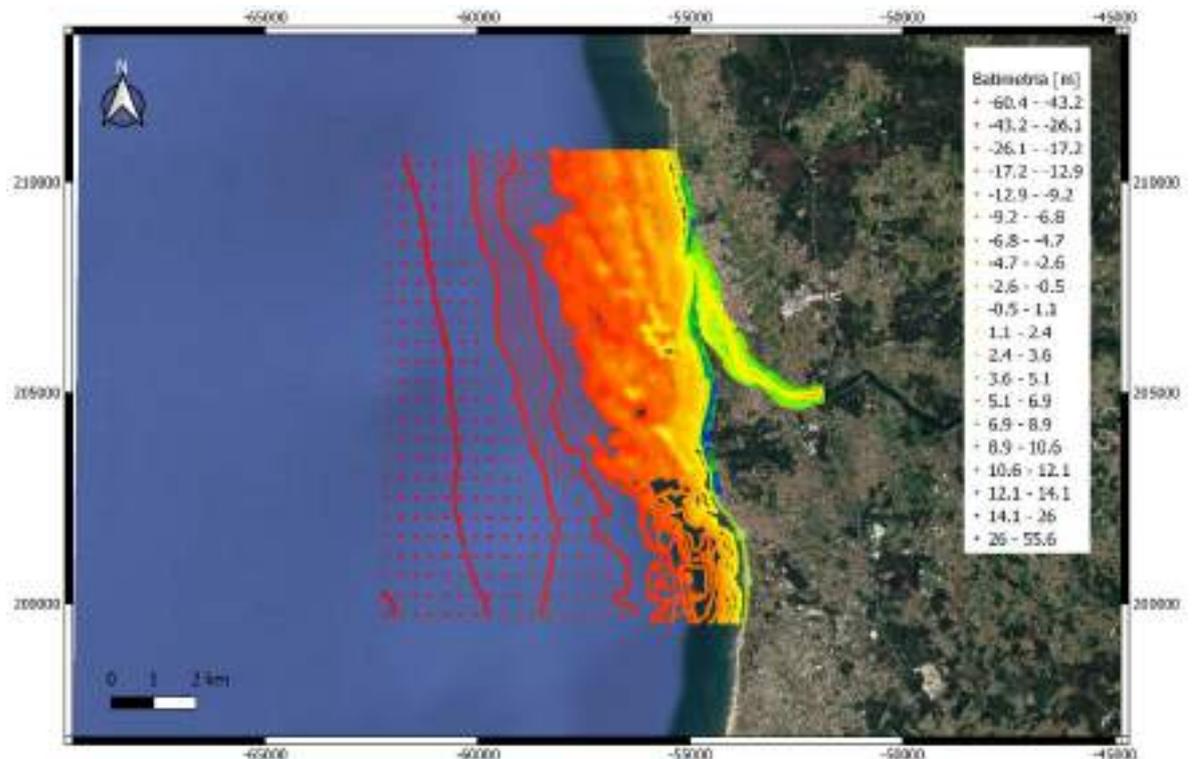


Figura 100 - Batimetria dos fundos (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Paralelamente à construção das malhas, foi necessário desenhar, através do *software* Google Earth Pro, os limites do domínio reproduzido numericamente. Este trabalho minucioso é de extrema importância no que diz respeito ao pormenor que se pretende dar à definição do modelo numérico, principalmente, quando o software em causa apresenta a possibilidade de gerar malhas não estruturadas.

A Figura 101 ilustra todos os limites utilizados no modelo numérico que representam com elevado detalhe as margens do rio Cávado, todas as estruturas existentes, as docas de recreio e de pesca e ainda os limites do sapal protegido pelos dois diques longitudinais.



**Figura 101 - Pormenor ilustrativo das margens do rio Cávado e estruturas existentes.**

Para além dos parâmetros físicos que é necessário especificar em cada um dos módulos, foi necessário incluir as estruturas de proteção costeira já existentes na embocadura do rio Cávado. Desta forma, tal como se apresentou na Figura 96, no módulo FLOW, essas estruturas foram implementadas através da remoção na própria malha.

Para além disso, no módulo WAVE, essas estruturas de proteção costeira foram também caracterizadas através de outros parâmetros, tais como a sua cota de coroamento e os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . As estruturas presentes no caso de estudo (Figura 102) foram assim devidamente caracterizadas e implementadas no modelo numérico. A Tabela 18 apresenta os valores utilizados na caracterização dessas estruturas.

**Tabela 18 – Parâmetros usados na implementação das estruturas de proteção costeira existentes.**

Estrutura	01	02	03
Cota de coroamento	+6.5 m	+5 m	+5 m
$\alpha$	2.6	2.6	2.6
$\beta$	0.15	0.15	0.15



**Figura 102 – Identificação e localização das estruturas de proteção costeira a implementar no modelo numérico (Google Earth).**

No estudo em modelo físico efetuado (ver Capítulo 7), para além da configuração atual da restinga de Ofir, foi também estudada uma solução de proteção costeira que preconiza a construção no local de novas estruturas de proteção.

Essas estruturas de proteção costeira foram implementadas no modelo numérico na segunda fase de simulações (Tabela 19). Desta forma, na Figura 103 é possível observar as três estruturas que foram implementadas nos modelos físico e numérico.

**Tabela 19 – Parâmetros usados na implementação das novas estruturas de proteção costeira.**

Estrutura	Quebramar Longitudinal	Quebramar Destacado 1	Quebramar Destacado 2
Cota de coroamento	+6 m	+4 m	+4 m
$\alpha$	2.6	2.6	2.6
$\beta$	0.15	0.15	0.15

Para além da inclusão das novas estruturas de proteção costeira, foi ainda necessário colocar sondas para que fosse possível comparar os resultados numéricos com os obtidos no modelo físico. Todas as sondas incluídas no modelo numérico estão apresentadas na Figura 104.

A Tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros utilizados na configuração final do modelo numérico. Esta configuração foi utilizada em todas as simulações realizadas e que seguidamente serão ilustradas através de imagens com os respetivos resultados obtidos nas simulações hidro e morfodinâmicas.

**Tabela 20 – Configuração final do modelo numérico.**

WAVE						
Fator de rebentação induzido pela profundidade		Atrito de fundo		Whitecapping	Refração	“Frequently shift”
Alpha	Gamma	Tipo	Coefficiente	Tipo		
1.0	0.73	JONSWAP	0.067	Homen <i>et al.</i>	Ativado	Ativado
FLOW						
Massa volúmica da água	Rugosidade de fundo		Rugosidade das paredes	Viscosidade e difusividade horizontal		
1024 kg/m <sup>3</sup>	Fórmula	Tipo	Condição de escorregamento	Tipo	Viscosidade horizontal	Difusividade horizontal
	Manning	Uniforme	Free	Uniforme	10	10
MORPHOLOGY						
Densidade de referência	Dados relativos a sedimentos não coesivos				Atualização da batimetria durante a simulação do módulo FLOW	
1600 kg/m <sup>3</sup>	Densidade específica	Densidade da parte seca	Diâmetro médio dos sedimentos	Espessura inicial da camada de sedimentos		Ativado
	2650 kg/m <sup>3</sup>	1600 kg/m <sup>3</sup>	0.00065 m	Tipo	Espessura inicial	
				Uniforme	0 m	
Fator de escala morfológico	Intervalo de criação antes de mudanças morfológicas	Profundidade mínima para o cálculo de sedimento	Fator de altura referenciado por Van Rijn		Limite da espessura do sedimento	
1	21600 s	0.1 m	1		0.05	
Fator de erosão das células secas adjacentes	Fator de concentração associado à corrente	Fator de magnitude do vetor de transporte associado à corrente	Fator de transporte por suspensão associado às ondas		Fator de transporte por arrastamento associado às ondas	
1	1	1	0.25		0.25	



Figura 103 - Localização espacial das novas estruturas de proteção costeira (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

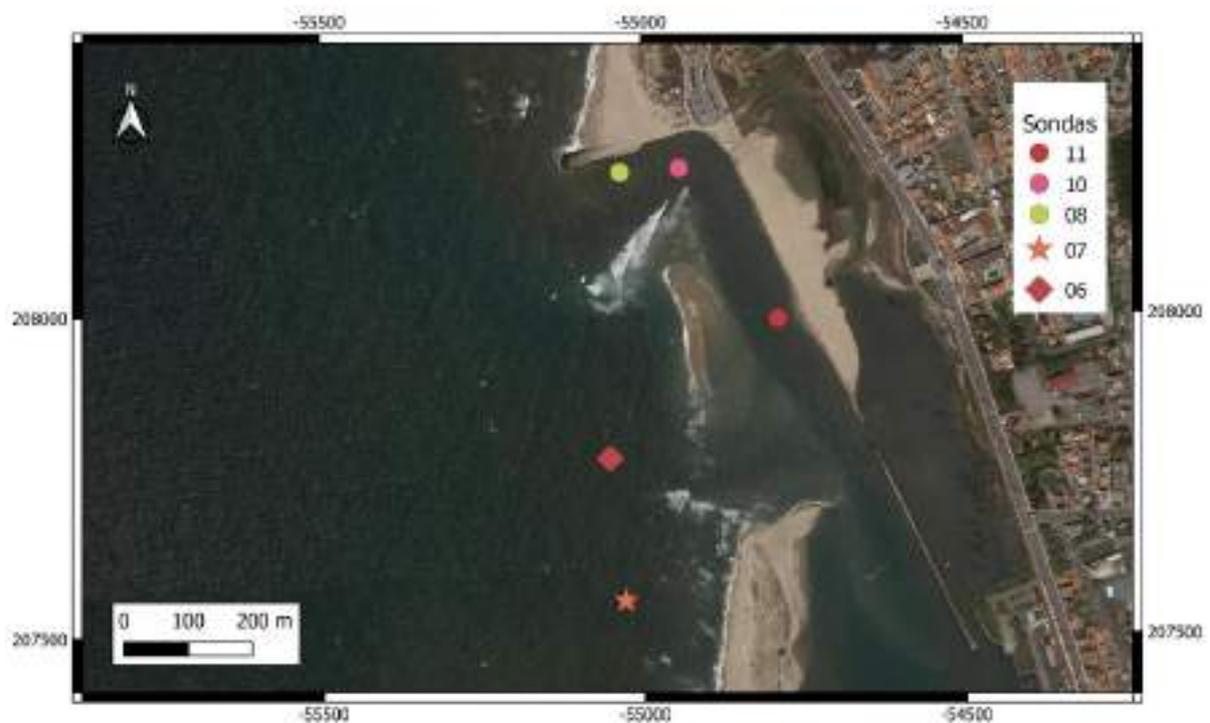


Figura 104 - Localização das sondas para monitorização dos níveis de água.

### 6.6. Calibração e Validação do Modelo Numérico

O modelo numérico foi calibrado e validado recorrendo a dados de campo (protótipo) e a resultados do estudo em modelo físico (ver Capítulo 7).

Os dados de campo referem-se a trajetórias de flutuadores lançados em diferentes locais espacialmente distribuídos pelo caso de estudo em análise, no dia 14 de julho de 2021, pelo Instituto Hidrográfico, mais concretamente na foz do rio Cávado e na frente marítima da restinga de Ofir. De referir que as trajetórias seguidas por esses dispositivos flutuantes no período em análise não só permitiram validar a magnitude da velocidade do escoamento como também a direção do mesmo e a qualidade da malha desenvolvida para os módulos FLOW e WAVE.

A validação de resultados numéricos com base nas trajetórias de flutuadores é mais desafiante e difícil que as realizadas habitualmente com base em medições pontuais de dispositivos e sensores instalados numa posição fixa.

De facto, a trajetória dos flutuadores vai depender das condições hidrodinâmicas que estes encontram, em cada passo de tempo computacional, ao longo do seu trajeto. Assim, pequenas diferenças iniciais, podem resultar em trajetórias irrealistas com o flutuador a terminar numa posição muito diferente da real.

De referir também que a batimetria utilizada no presente estudo (Figura 100) não é, naturalmente, coincidente com a batimetria existente no dia em que a campanha de monitorização foi realizada. Devido às condições locais, e como foi já explicado anteriormente, a restinga de Esposende apresenta grande dinamismo, com a morfologia local a variar significativamente no tempo.

No processo de calibração do modelo foi ajustada a rugosidade de fundo, sectorialmente, de forma a ter em consideração a heterogeneidade local dos fundos e foram reproduzidas as condições hidrodinâmicas locais ocorridas no período da campanha em termos de níveis de maré, condições de agitação marítima, ventos e caudais fluviais.

A título de exemplo, a Figura 105 e a Figura 106 apresentam os resultados obtidos para dois flutuadores que foram lançados na foz do rio Cávado. É apresentada a trajetória seguida pelos flutuadores (*drifters*) lançados no local e aquela que foi obtida com base nos resultados das simulações numéricas.



Figura 105 - Flutuador WL122: validação da trajetória (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

As diferenças de trajetória observadas são justificadas pelas razões anteriormente apresentadas, mas sobretudo pelo facto de o levantamento batimétrico utilizado como base no estudo não coincidir com o do dia em que a campanha foi realizada. Assim, era expectável a existência de diferenças entre os valores observados e os calculados numericamente.



Figura 106 - Flutuador WL128: validação da trajetória (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Para além da análise das trajetórias de dois flutuadores lançados na embocadura do rio Cávado, nesta secção é também analisado o movimento de um terceiro flutuador lançado na frente marítima da restinga de Ofir, de forma a abranger uma área do modelo diferente da anterior. A trajetória desse flutuador foi também comparada com a trajetória calculada através do modelo numérico e está ilustrada na Figura 107. Tendo em conta os resultados obtidos, considerou-se que o modelo numérico reproduzia com suficiente rigor as condições hidrodinâmicas locais, pese embora as limitações existentes (identificadas anteriormente) em termos de dados de base. Deste modo, deu-se como concluída esta primeira fase de validação do modelo numérico.

Para além desta fase de calibração e de validação do modelo numérico, os resultados numéricos foram ainda comparados com os resultados experimentais do modelo físico testado no âmbito deste estudo, com o intuito de aumentar o nível de confiança no modelo numérico, que será posteriormente utilizado posteriormente para simular a hidrodinâmica e a morfodinâmica local para novas condições de teste.

Para tal foram reproduzidas as condições analisadas no estudo experimental (ver secção 7.5.3 e Tabela 25) para os cenários: (i) atual e (ii) com as novas estruturas de proteção costeira. Os resultados obtidos foram comparados com os registos das sondas de níveis hidrodinâmicos posicionadas nas localizações 6 e 7. Na Figura 108 é possível observar que existe alguma discordância entre resultados experimentais e numéricos (+/- 20%) em termos de propagação da agitação marítima nos modelos. Neste contexto é importante referir que é difícil modelar numericamente, com precisão, as condições fronteira do modelo físico e que os seus resultados estão afetados por efeitos de escala, embora a importância dos mesmos

para as conclusões obtidas seja considerada reduzida devido ao planeamento e às medidas que foram tomadas durante a fase de execução dos trabalhos experimentais.



Figura 107 - Flutuador WL142: validação da trajetória (Sistema de coordenadas: ETRS89 / Portugal TM06).

Tendo em conta os resultados de ambas as validações do modelo numérico, pode considerar-se que o modelo reproduz com suficiente rigor a hidrodinâmica e morfodinâmica locais, pelo que poderá ser usado para analisar de forma detalhada as dinâmicas da zona em estudo, nomeadamente na embocadura da foz do rio Cávado.

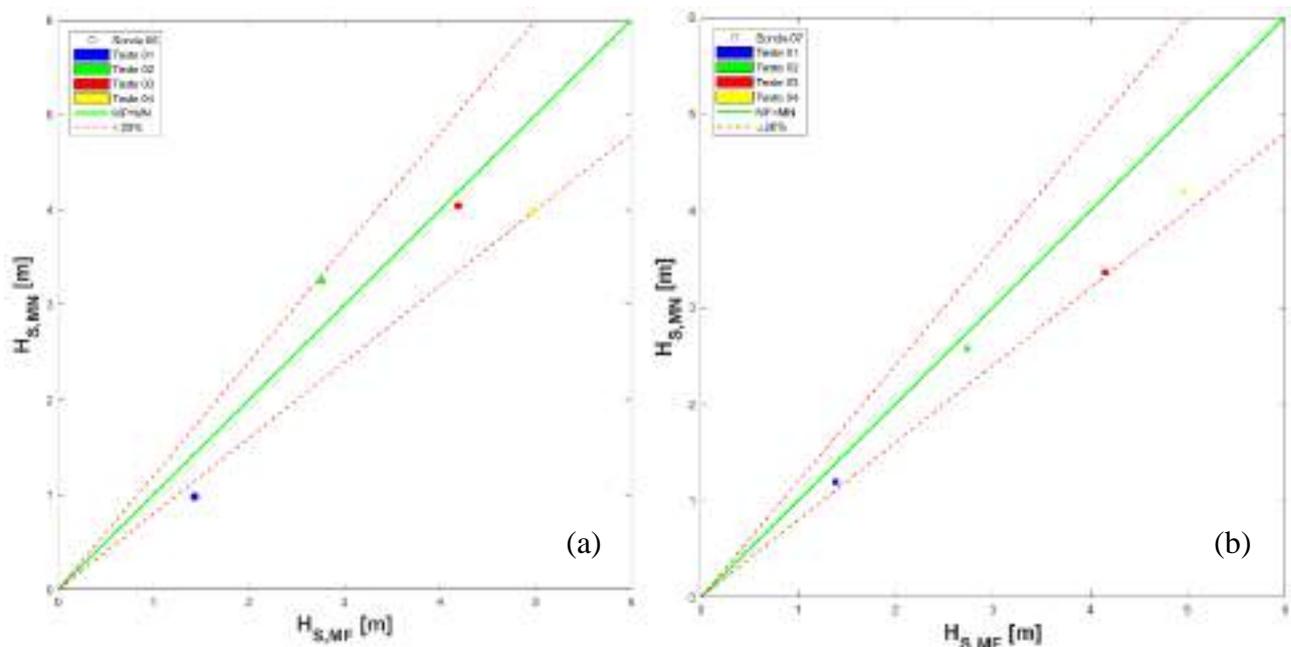


Figura 108 - Validação do modelo numérico (MN) através do modelo físico (MF), sem estruturas de proteção costeira: (a) Sonda 06, (b) Sonda 07.

## 6.7. Cenários Simulados

Numa primeira fase o estudo numérico teve como principal objetivo simular condições de descarga fluvial e de agitação marítima iguais às condições testadas em modelo físico (Capítulo 7) para, posteriormente, ser possível comparar os resultados obtidos em termos de hidro e morfodinâmica, com e sem as novas estruturas de proteção costeira. Desta forma foram testados: quatro níveis de água (maré), quatro alturas de onda significativa ( $H_s$ ) e quatro períodos de onda de pico ( $T_p$ ), Tabela 21. A direção de incidência da agitação marítima (WNW) e o caudal fluvial foram considerados constantes durante os testes. A duração dos testes corresponde, sensivelmente, à geração de 1200 ondas.

**Tabela 21 – Cenários simulados com e sem as novas estruturas de proteção costeira.**

Teste ID	Nível de maré	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	Caudal [ $m^3/s$ ]	Duração [h]	
01	BMAV	+0.50	2.5	8	154	2.28
02	NM	+2.00	3.5	10	154	2.84
03	PMAV	+3.50	4.5	14	154	3.98
04	Nível extremo	+4.50	5.0	16	154	4.55

## 6.8. Análise da Hidro e Morfodinâmica

### 6.8.1. Configuração atual da restinga de Ofir

A análise detalhada da hidrodinâmica na foz do rio Cávado permitirá obter conclusões importantes sobre as zonas da restinga e do canal de navegação mais dinâmicas (em termos de potencial para a ocorrência de erosões e de acreções) e em maior risco. Para além da análise da hidrodinâmica, será também dada especial atenção às alterações morfológicas, para que se possa perceber as principais tendências de erosão e acreção em toda a área em estudo.

A primeira simulação foi realizada para agitação marítima com uma altura de onda significativa de 2.5 m e um período de pico de 8 s (Teste ID 01). Para além disso, foi simulado um caudal fluvial constante de  $154 m^3/s$  e o nível de água foi considerado igual ao nível de BMAV (Tabela 21). Os resultados referentes a esta primeira simulação encontram-se na Figura 109 e na Figura 110.

Na Figura 109 é possível observar que para o nível de água de baixa-mar as velocidades de escoamento são maiores em duas zonas distintas, nomeadamente no trecho final do canal criado entre o intradorso da restinga e o extradorso do dique longitudinal existente no estuário do rio Cávado, e entre o esporão norte e a extremidade da cabeça da restinga. Assim, nestas duas zonas, as velocidades do escoamento têm magnitudes de aproximadamente 1.3 m/s e 1.5 m/s, respetivamente. De salientar que, para estas condições, a barlar da restinga, não se observam velocidades de escoamento muito elevadas, o que poderá indicar a existência de menor capacidade de transporte sedimentar e/ou baixas taxas de erosão nessa mesma zona. Em contrapartida, nas duas zonas anteriormente referidas, são expectáveis maiores taxas de erosão e acreção.

As zonas com velocidades de escoamento superiores a 1 m/s são aquelas que têm um maior transporte sedimentar – intradorso e cabeça norte da restinga. Após esta análise mais geral, através da Figura 110, é possível identificar e analisar, com maior detalhe, as zonas onde ocorre maior transporte sedimentar. Por exemplo, é possível observar a formação de um delta na área entre a cabeça do esporão norte e a

extremidade norte da restinga. Além disso, ambas as margens esquerda e direita do canal de navegação apresentam alguma erosão.

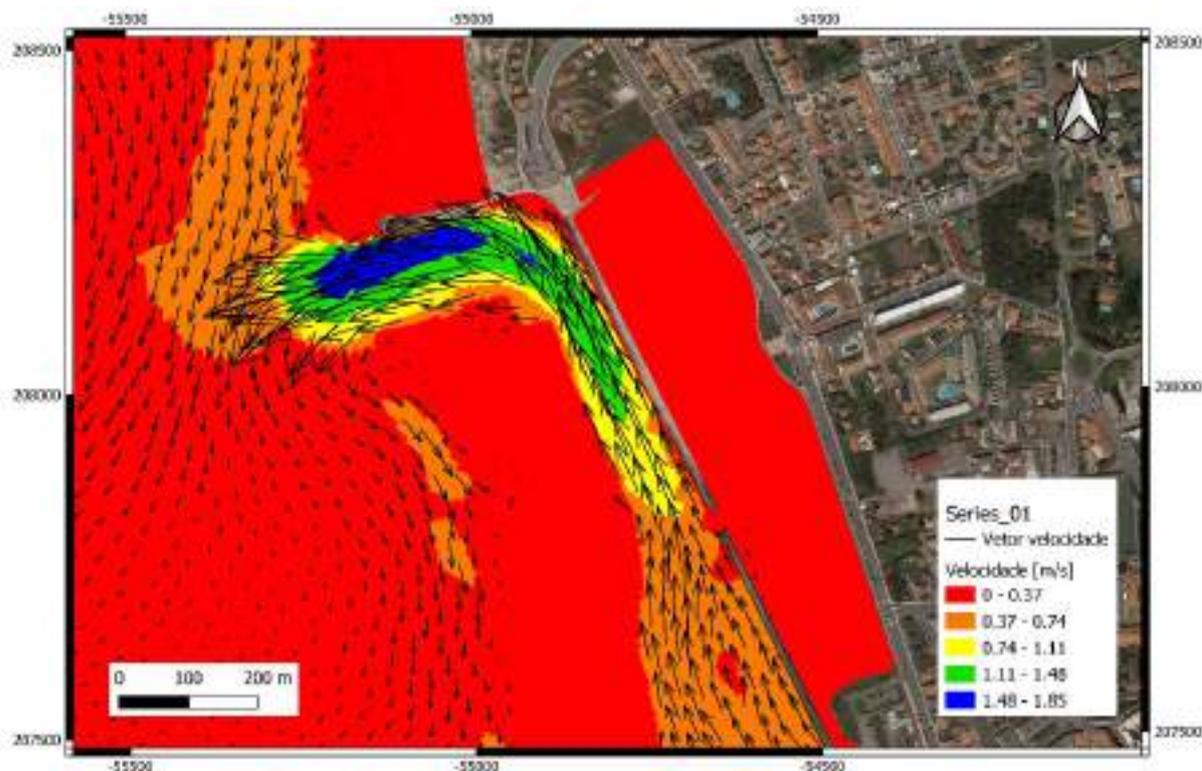


Figura 109 – Mapa da velocidade do escoamento para o teste 01 sem as novas estruturas.

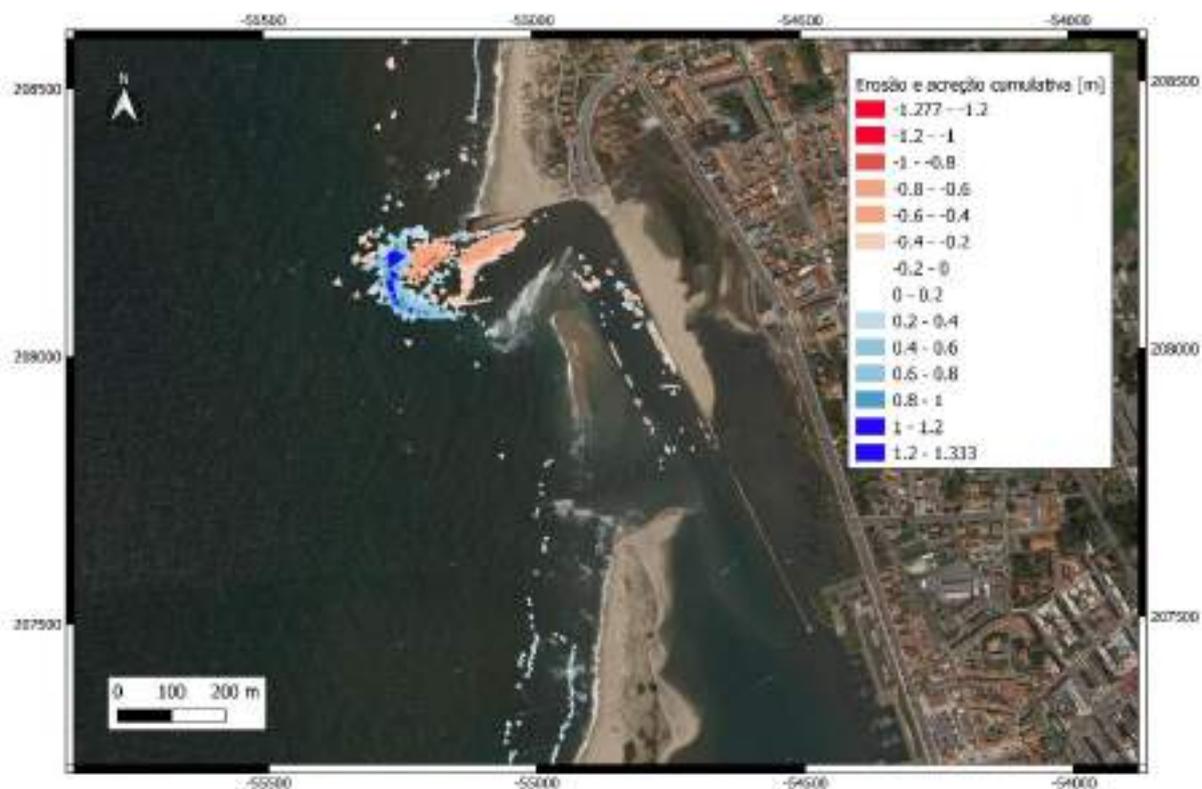


Figura 110 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após teste 01 sem as novas estruturas.

O teste 02 é caracterizado por uma altura de onda significativa de 3.5 m, um período de pico de onda de 10 s e um caudal fluvial constante de 154 m<sup>3</sup>/s (Tabela 21). Neste teste foi considerado o nível de água

correspondente ao nível médio da água do mar. A Figura 111 e a Figura 112 apresentam as velocidades do escoamento e as erosões e acreções cumulativas, respetivamente.

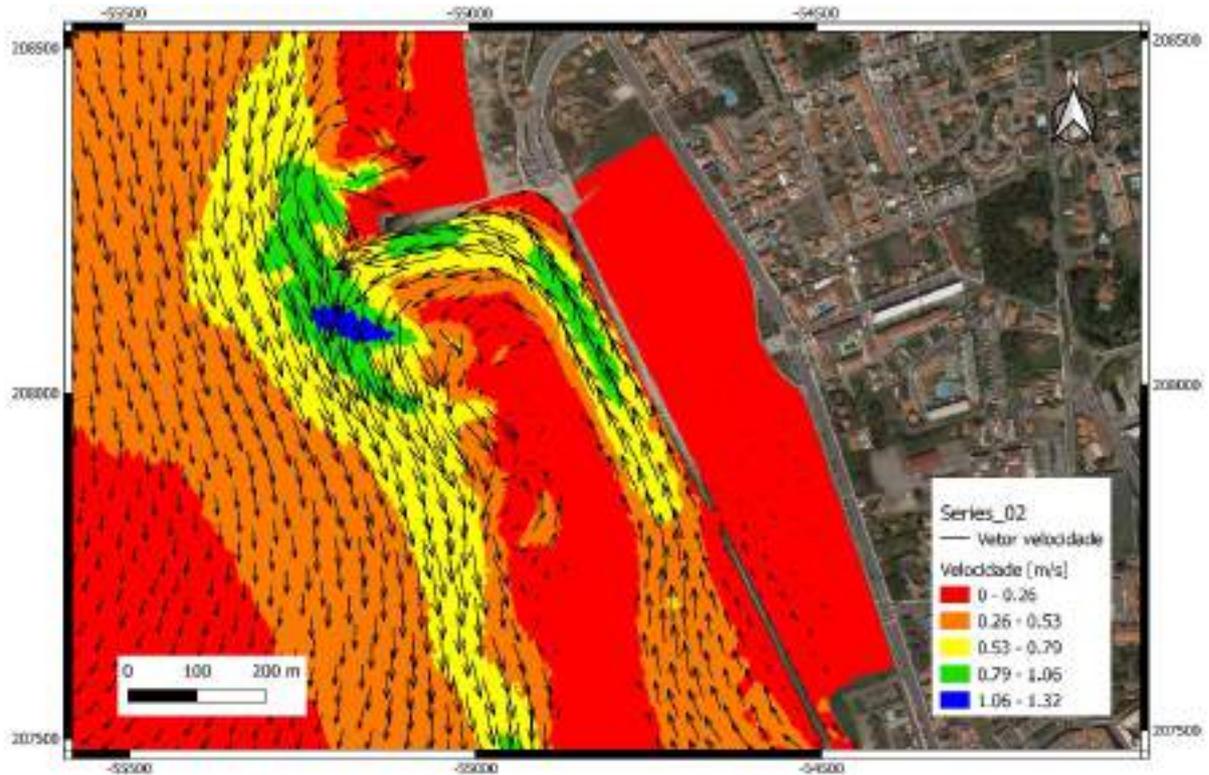


Figura 111 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 02 sem as novas estruturas.



Figura 112 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após o teste 02 sem as novas estruturas.

A Figura 111 mostra que com o aumento do nível de água para o NM, as zonas com maiores velocidades de escoamento se deslocam para o exterior da embocadura do rio Cávado. É possível concluir que, face à simulação anterior, a extremidade norte da restinga fica consideravelmente mais exposta às dinâmicas envolventes.

Para além disso, e dado que o nível de água simulado aumentou, seria expectável que a extremidade norte da restinga ficasse mais submersa e exposta a agitação marítima com maiores alturas significativas de onda. É também de salientar que o talude de barlamar da restinga ficou mais exposto à agressividade do meio marítimo. Consequentemente, nesta simulação ocorreu um maior transporte sedimentar, Figura 112. Por outro lado, pode observar-se que a restinga começa a recuar numa direção ortogonal à linha de costa, Figura 112. Assim, é possível concluir que, devido ao aumento do nível de água e ao aumento da altura de onda significativa, neste teste observou-se uma maior dinâmica junto à embocadura do rio Cávado, nomeadamente a ocorrência de maiores velocidades de escoamento e consequente transporte sedimentar, resultando em fenómenos de erosão e acreção mais intensos.

No terceiro teste, e ainda sem as novas estruturas de proteção costeira implantadas, o nível de água foi aumentado para o correspondente a uma preia-mar de águas vivas, a altura de onda significativa para 4.5 m e o período de pico para 14 s (Tabela 21). Os resultados finais desta simulação são apresentados na Figura 113 e na Figura 114.

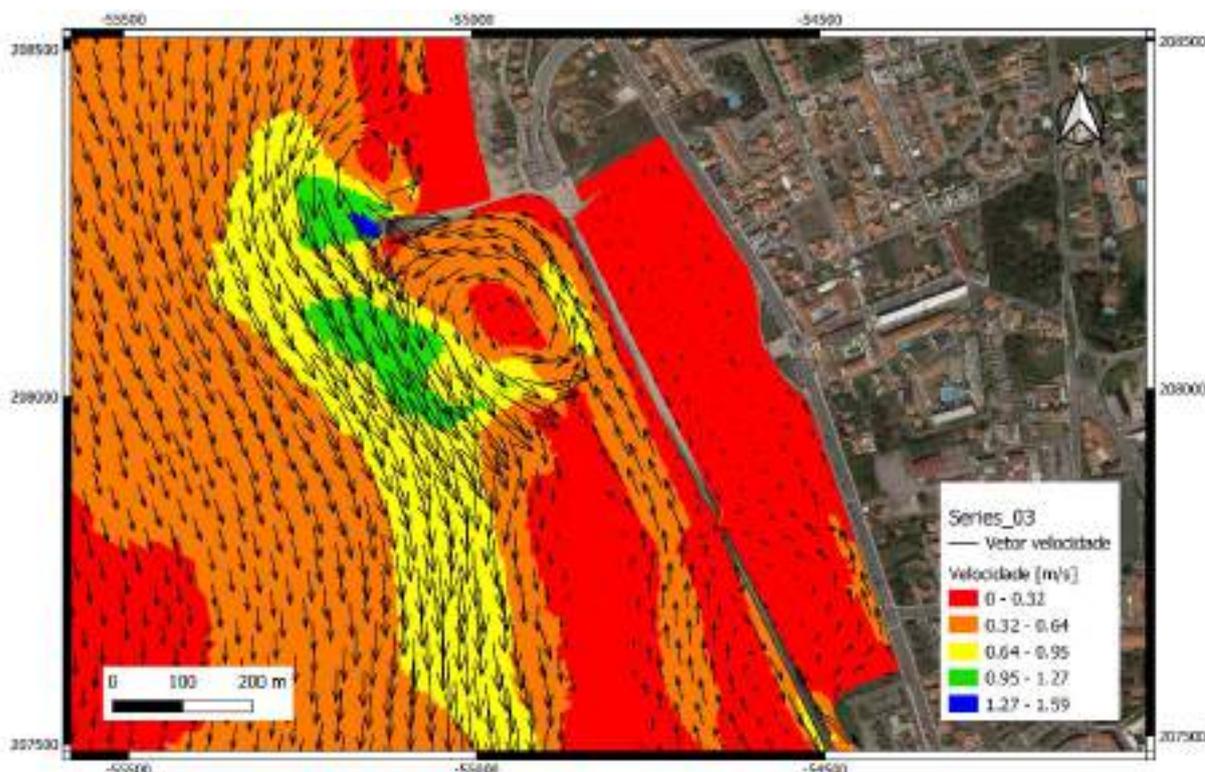


Figura 113 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 03 sem as novas estruturas.

A Figura 113 mostra que a extremidade norte da restinga de Ofir sofre galgamentos que proporcionam o aparecimento de um canal secundário. Isto significa que durante a preia-mar, e para uma configuração topo-hidrográfica próxima da atual, a restinga está bastante vulnerável a condições de agitação marítima severas. Por esse motivo, o seu recuo progressivo ao longo do tempo e consequente rotura são cenários muito prováveis, e que até já ocorreram no passado recente. Para as condições simuladas, a cabeça da restinga apresenta, em seu redor, velocidades de escoamento na ordem de 1 m/s. Observa-se também

uma recirculação na zona da cabeça da restinga que tira partido do canal secundário criado. Há ainda a registar escoamentos relevantes na massa de água abrigada pelos diques longitudinais do estuário.

Em termos de alterações morfológicas, a Figura 114 mostra que a profundidade de água e a largura do canal de navegação diminuem devido à acreção que se observa a barlamar dos diques longitudinais ao longo das simulações. De referir que, tal como aconteceu na simulação anterior, a restinga continuou o seu movimento de translação em direção ao canal de navegação.

É também de referir a ocorrência de erosão no talude interno da restinga com o arrastamento das areias para o canal de navegação, em parte devido aos intensos galgamentos ocorridos. Estes resultados numéricos estão de acordo com o conhecimento que se tem dos problemas locais e corroboram também as conclusões que foram obtidas nos estudos em modelo físico já realizados. Em síntese, as condições hidrodinâmicas que foram simuladas neste teste 3 tendem a alterar a posição da restinga e a promover o assoreamento do canal de navegação.



Figura 114 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após teste 03 sem as novas estruturas.

Através dos resultados desta simulação, é possível concluir que, devido à fragilidade da restinga face às dinâmicas marítima e fluvial, será necessário proteger o intradorso da mesma, implementar uma solução que promova a retenção local de areias evitando que estas se depositem no canal de navegação e ainda definir uma estratégia periódica de dragagem desse canal, se necessário, com o objetivo de garantir a existência de boas condições de navegabilidade ao longo dos anos.

A quarta simulação foi realizada para um nível de água extremo que resulta de combinar uma preia-mar de águas vivas com uma maré meteorológica, uma altura de onda significativa de 5.0 m e um período de pico para 16 s (Tabela 21). Os seus resultados obtidos são apresentados na Figura 115 e Figura 116.

Na Figura 115 é possível observar que a extremidade norte da restinga ficou submersa e ainda mais exposta à dinâmica conjunta da descarga fluvial e da agitação marítima. Para esta condição observou-se um aumento das velocidades de escoamento em zonas mais recuadas da restinga.

De referir novamente a ocorrência de um padrão de recirculação na extremidade norte da restinga, agora mais acentuado e mais intenso que no teste anterior. Esta grande dinâmica local está, pois, na origem das grandes transformações morfológicas que a restinga de Ofir tem experimentado ao longo do tempo.

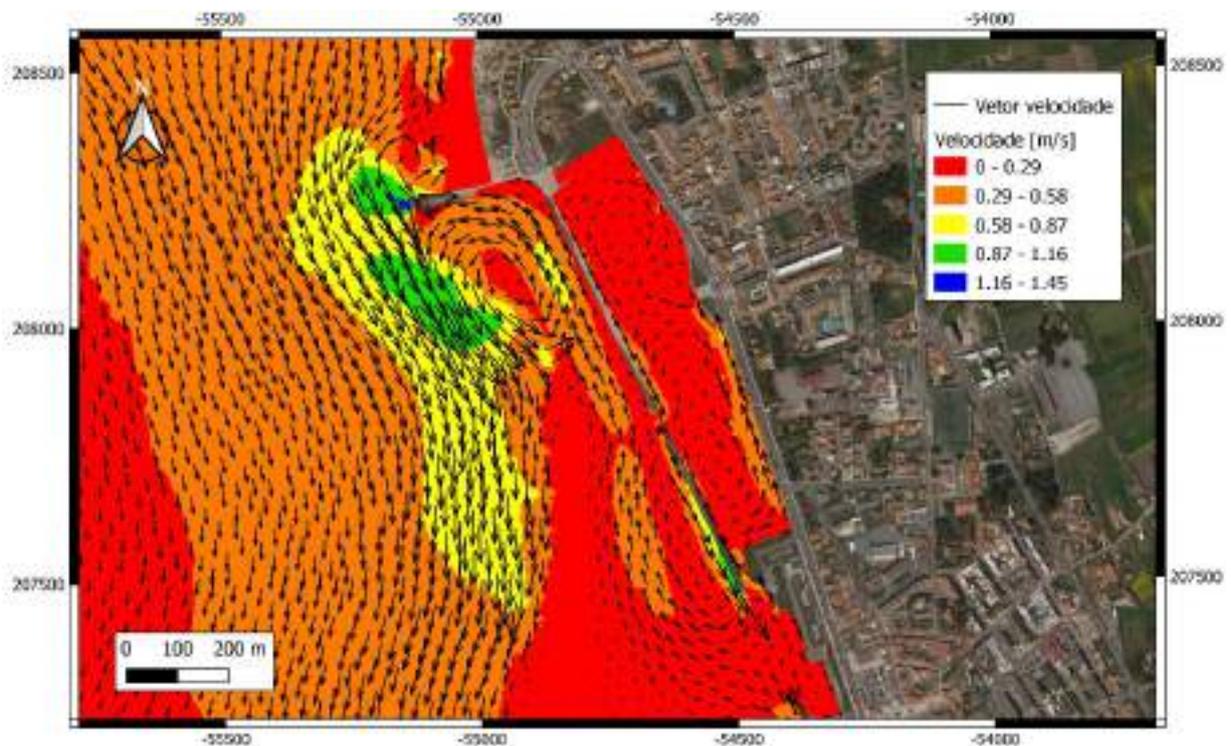


Figura 115 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 04 sem as novas estruturas.

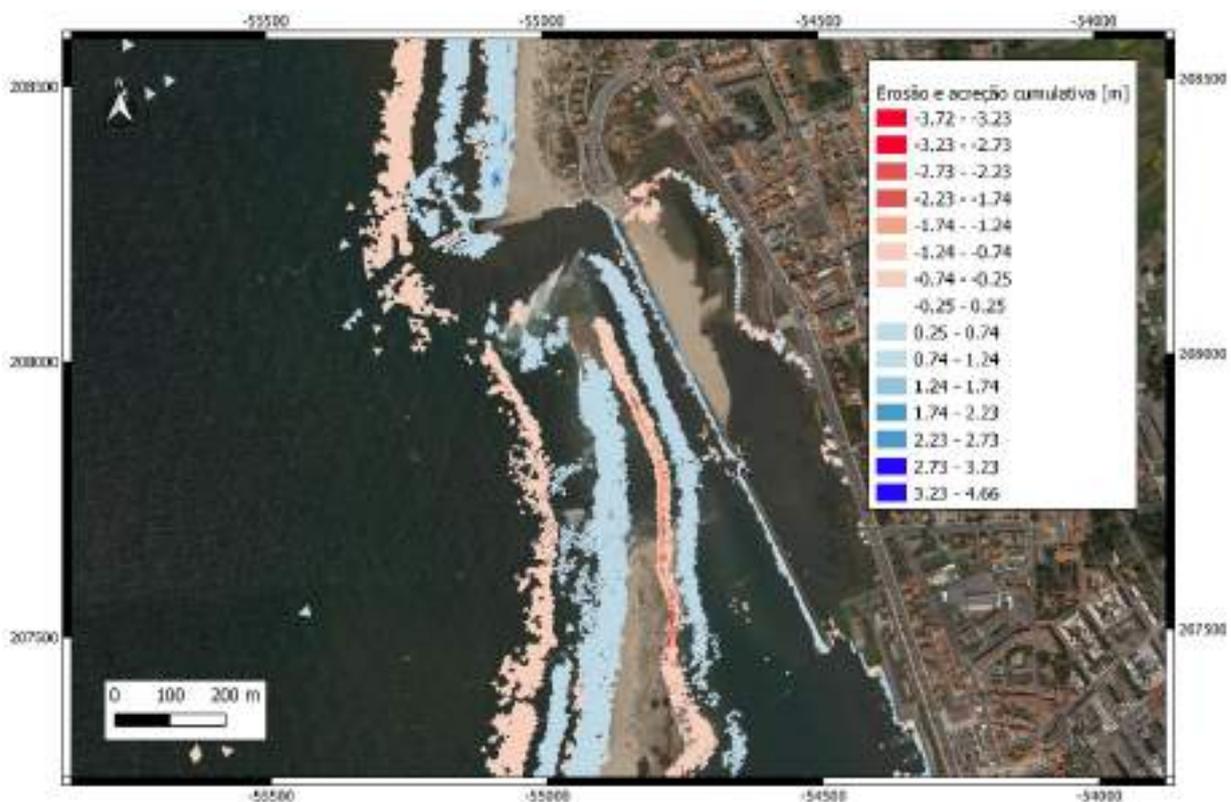


Figura 116 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após o teste 04 sem as novas estruturas.

Assim, tendo em conta a direção e a magnitude dos vetores velocidade do escoamento, pode concluir-se que o lado de barlar da restinga se encontra atualmente bastante exposto e vulnerável, o que leva à necessidade de proporcionar condições de maior tranquilidade na zona da cabeça da restinga, ou seja, a uma redução das alturas de onda significativas. Essas soluções serão analisadas a seguir.

Em termos morfológicos (Figura 116), é de salientar o agravamento dos problemas que foram descritos anteriormente, nomeadamente o assoreamento e o estreitamento do canal de navegação assim como o recuo da restinga.

Para finalizar a análise dos resultados dos testes realizados para a configuração topo-hidrográfica atual da restinga, na Figura 117 apresentam-se várias imagens ilustrativas das alterações morfológicas no final de cada simulação.

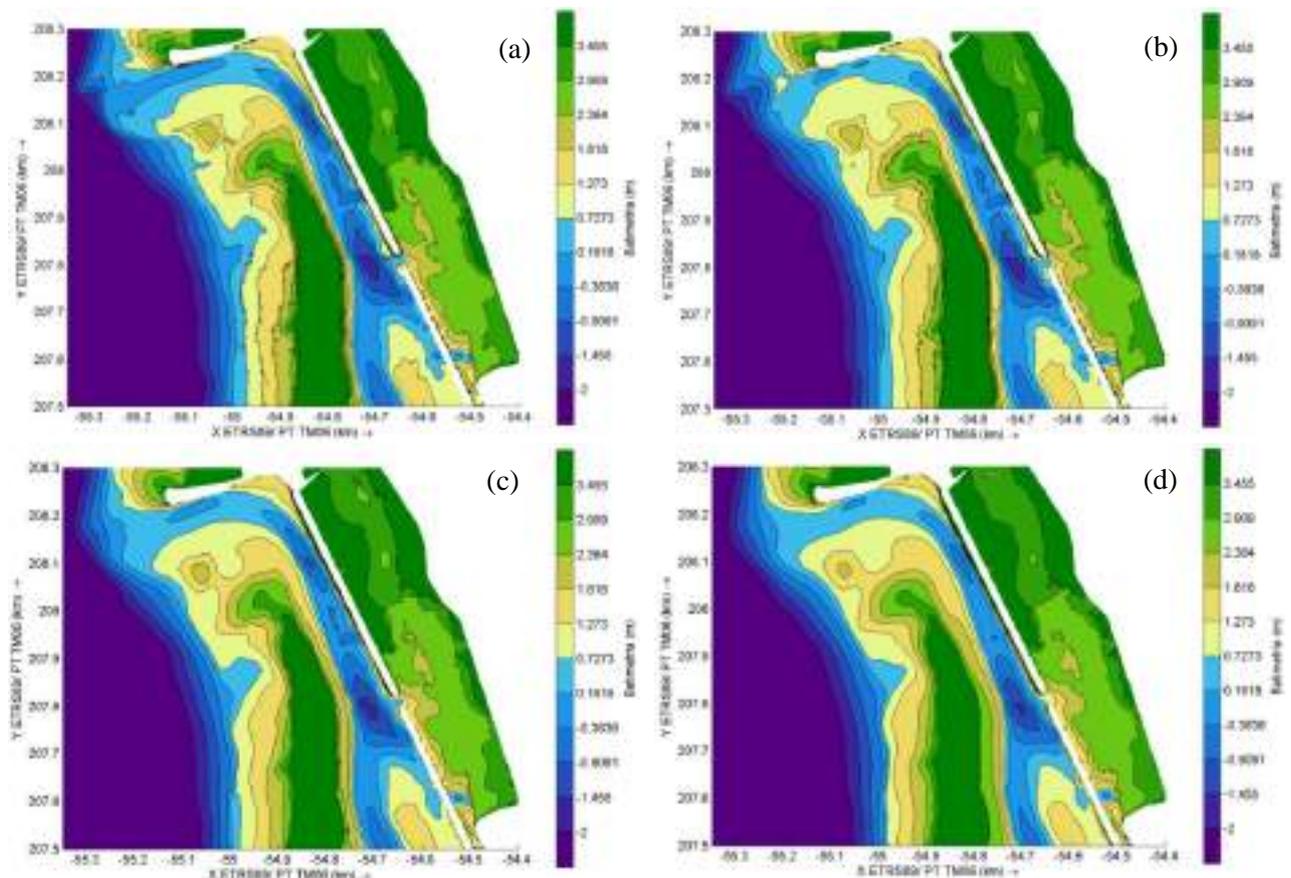


Figura 117 - Alterações morfológicas sem estruturas após: (a) teste 01; (b) teste 02; (c) teste 03; e (d) teste 04.

Desta forma, é possível analisar em maior detalhe as principais tendências observadas após cada uma das simulações e ainda comparar com as tendências observadas durante os testes em modelo físico. Os resultados numéricos obtidos permitem destacar duas importantes conclusões: o canal de navegação sofreu assoreamento e um estreitamento (redução de largura) devido à progressiva acreção verificada no local; e a extremidade norte da restinga foi sofrendo alterações no seu posicionamento, recuando em direção ao dique longitudinal 2, tal como foi observado nos ensaios em modelo físico.

### 6.8.2. Situação após a construção de novas estruturas de proteção

Depois do estudo anterior, realizado para a configuração atual da restinga de Ofir, foram implementadas no modelo numérico as novas estruturas de proteção costeira, tal como foi realizado no modelo físico. Para além disso, a topo-hidrografia da restinga foi redefinida de forma a representar uma configuração mais robusta do que a atual (situação ideal), tendo como base a configuração implementada no modelo físico. Posteriormente foram simuladas consecutivamente as mesmas quatro condições apresentadas na Tabela 21.

Os resultados obtidos após a primeira simulação são apresentados na Figura 118 e na Figura 119, sendo possível observar as alterações em termos de hidrodinâmica que as novas estruturas induzem. Verificou-se que a inclusão de um dique longitudinal paralelo ao intradorso da restinga resultou no aumento da velocidade do escoamento desde o início do dique longitudinal 1 até à foz do rio Cávado, Figura 118. Para estas condições, especialmente durante a baixa-mar, a inclusão dos dois quebramares destacados não resulta em mudanças significativas na velocidade de escoamento na zona a sotamar das mesmas, provavelmente devido à reduzida profundidade de água.

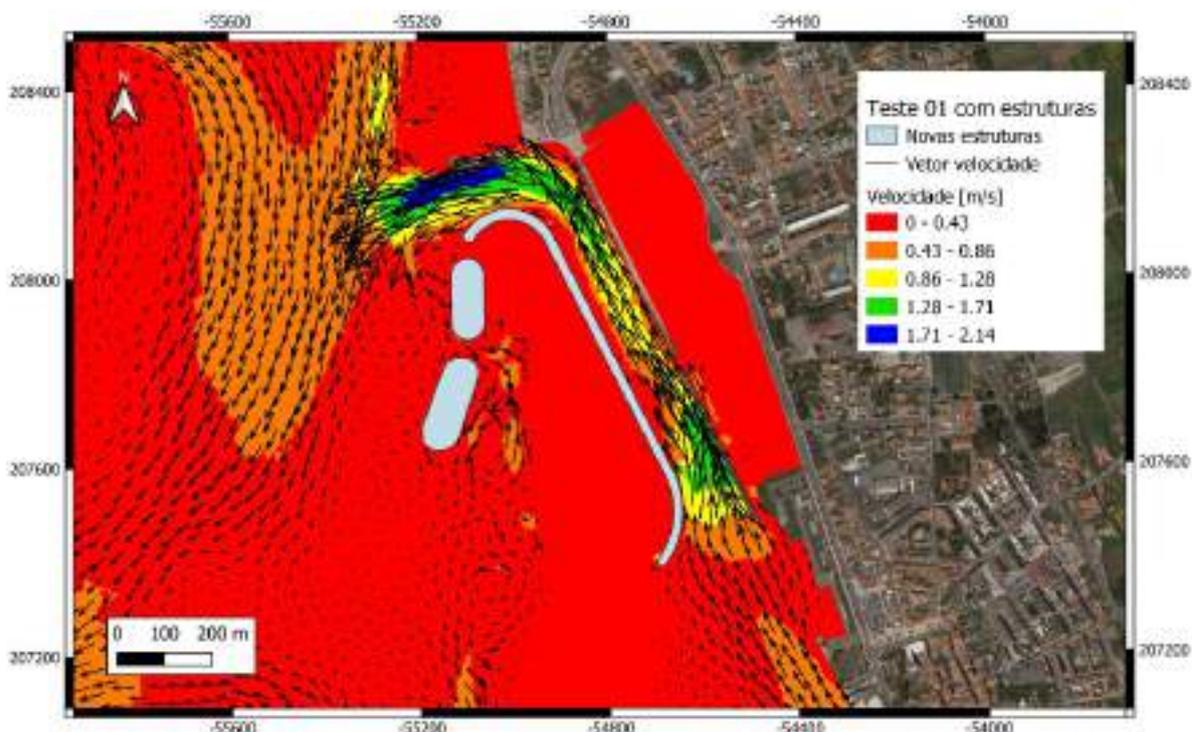


Figura 118 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 01 com as novas estruturas.

Relativamente ao transporte sedimentar, no canal de navegação as diferenças são ligeiras. Embora após a construção do dique longitudinal a margem esquerda esteja menos sujeita a fenómenos de erosão e acreção comparativamente ao cenário sem estruturas, o mesmo não acontece junto à margem direita. É de salientar que se antecipa que o efeito produzido pela colocação do dique longitudinal no intradorso da restinga seja mais eficaz para níveis de água elevados e condições de agitação mais energéticas. Por outro lado, é possível constatar que passou a ocorrer mais acreção junto à foz do rio Cávado, dando assim origem a um delta mais volumoso comparativamente com a primeira simulação, sem as estruturas de proteção costeira.



Figura 119 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após o teste 01 com as novas estruturas.

O teste 2 foi realizado para uma altura de onda significativa de 3.5 m, um período de onda de pico de 10 s, um caudal fluvial de 154 m<sup>3</sup>/s e o nível médio da água do mar (Tabela 21), condições para as quais já é possível observar alterações hidrodinâmicas na zona a sotamar dos dois quebramares destacados. A Figura 120 e a Figura 121 apresentam os resultados obtidos em termos de escoamento e de transporte sedimentar, respetivamente.

A Figura 120 mostra que a velocidade do escoamento junto à restinga é mais reduzida após a construção dos dois quebramares destacados. A direção do escoamento na zona a sotamar dos dois quebramares destacados é maioritariamente paralela à restinga, tal como anteriormente, originando um transporte de sedimentar para sul. O segundo quebramar destacado proporciona o desenvolvimento de um vórtice a sotamar do mesmo, aparentemente mais forte do que o observado anteriormente sem as estruturas, que posteriormente se poderá refletir na formação de um saliente, tal como foi possível observar no final dos testes do modelo físico, devido também à influência das correntes de difração.

A Figura 121 apresenta as alterações morfológicas que resultaram dos processos de erosão e acreção cumulativa verificados durante o teste 2. Os resultados mostram que há uma acumulação de sedimentos a barlamar do intervalo entre o dique longitudinal e o primeiro quebramar destacado. Para além disso, é visível a ocorrência de acreção junto aos mantos resistentes dos dois quebramares destacados, o que se poderá justificar, em parte, pelo talude suave dessas estruturas e elevada rugosidade do seu manto. Esse material irá contribuir, posteriormente, de alguma forma, para a deriva litoral. Por fim, é de notar a acreção de sedimentos na zona protegida pelas estruturas destacadas, ou seja, já existe uma tendência de acumulação de sedimentos que com o tempo poderá provocar um aumento do volume da restinga de Ofir. Antes da implantação dos dois quebramares destacados, nessa área, verificava-se a ocorrência simultânea de erosão e acreção. Mas para sul, no talude de barlamar da restinga continua a verificar-se a ocorrência de zonas de erosão intercaladas com zonas de acreção, no entanto, com a colocação das novas estruturas, o volume de material movimentado é consideravelmente menor.

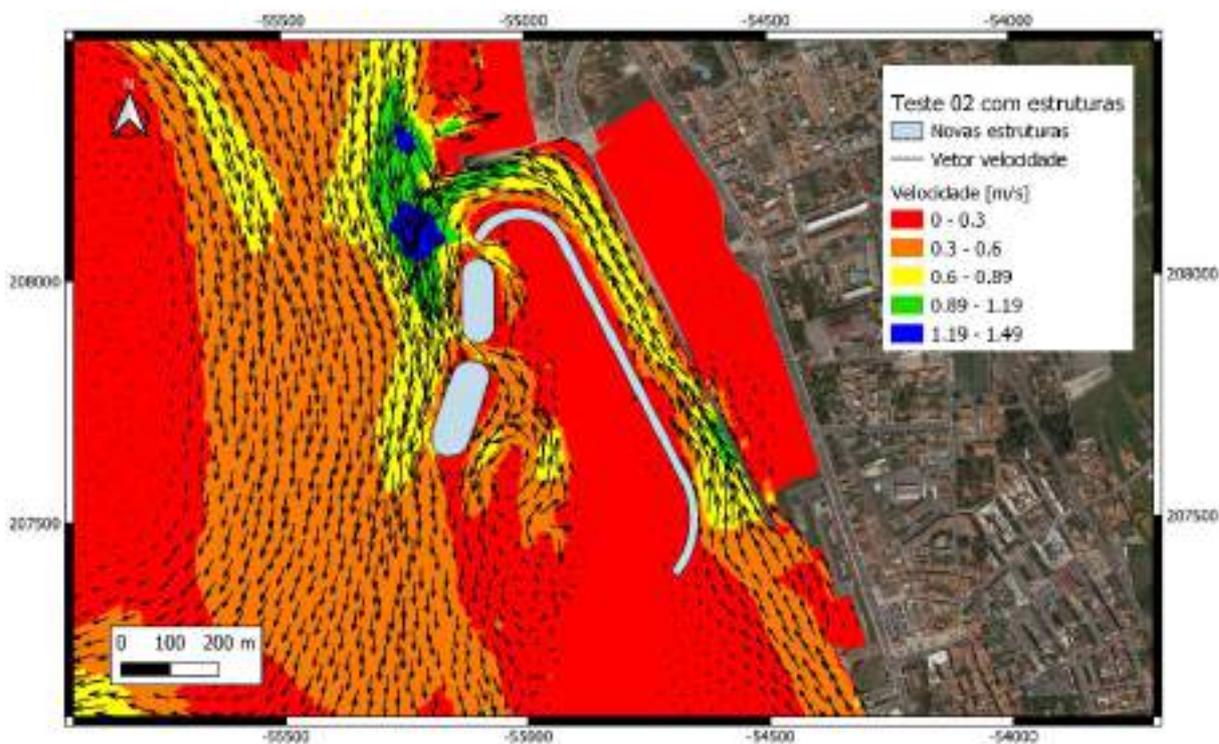


Figura 120 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 02 com as novas estruturas.

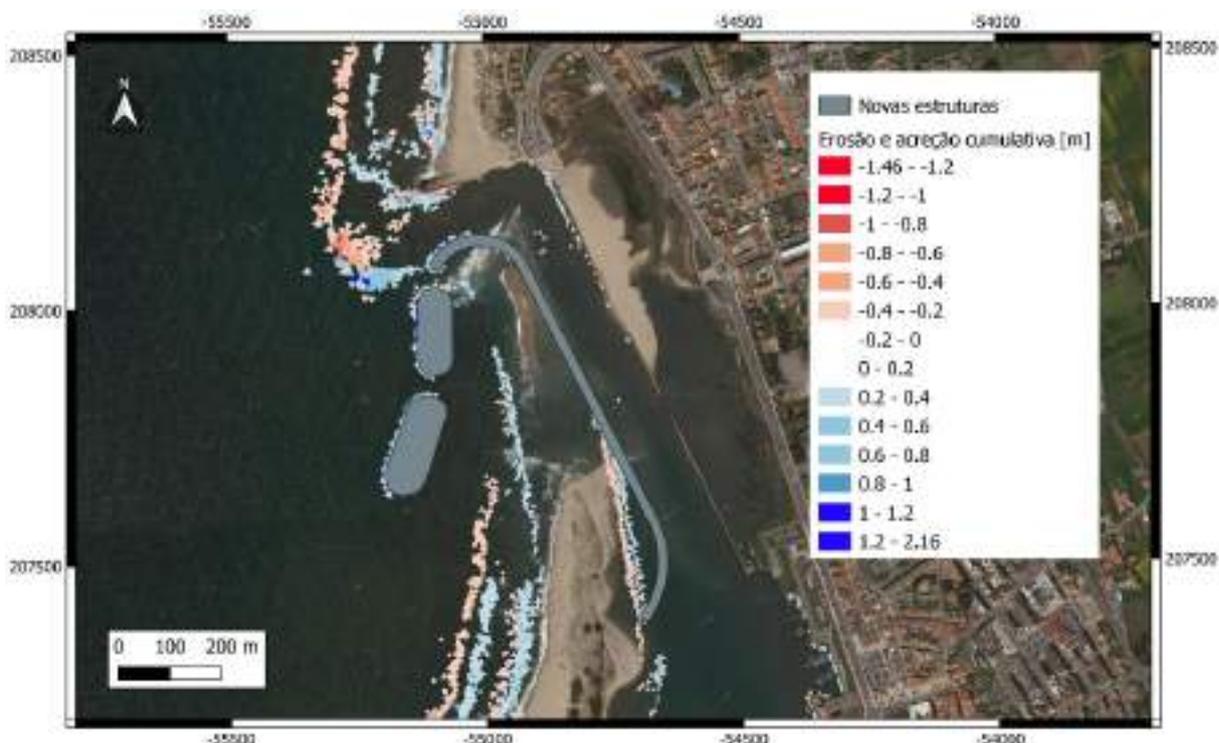


Figura 121 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após teste 02 com as novas estruturas.

Comparativamente com os resultados das simulações realizadas sem as novas estruturas de proteção costeira (Figura 112), há a registar uma melhoria substancial da dinâmica sedimentar ao longo do canal de navegação, pois os fenómenos de erosão e acreção anteriormente observados no local praticamente deixaram de existir, em particular junto à margem esquerda. É assim de salientar o efeito produzido pela colocação do dique longitudinal no intradorso da restinga, bem como a dissipação da energia das ondas provocada pelos quebramares destacados exteriores, reduzindo-se assim os episódios de galgamento

da restinga, que são responsáveis pelo arrastamento de grandes volumes de material para o interior do canal de navegação.

O teste 3, correspondente à simulação de uma preia-mar de águas vivas e de um estado de agitação marítima caracterizado por uma altura de onda significativa de 4.5 m e de um período de onda de pico de 14 s (Tabela 21), permite obter novas conclusões em relação às alterações hidrodinâmicas (Figura 122) e morfodinâmicas (Figura 123) do caso de estudo.

No que diz respeito à hidrodinâmica na embocadura do rio Cávado, a Figura 122 mostra que a presença dos dois quebramares destaca a atenuação da magnitude da velocidade do escoamento na direção normal à restinga, não interrompendo, contudo, a corrente de deriva litoral. Comparativamente com a situação atual (Figura 113), as estruturas propostas permitem eliminar o padrão de recirculação que se verificava sobre a extremidade norte da restinga e que, uma vez formado, conduziria a prazo à sua destruição.

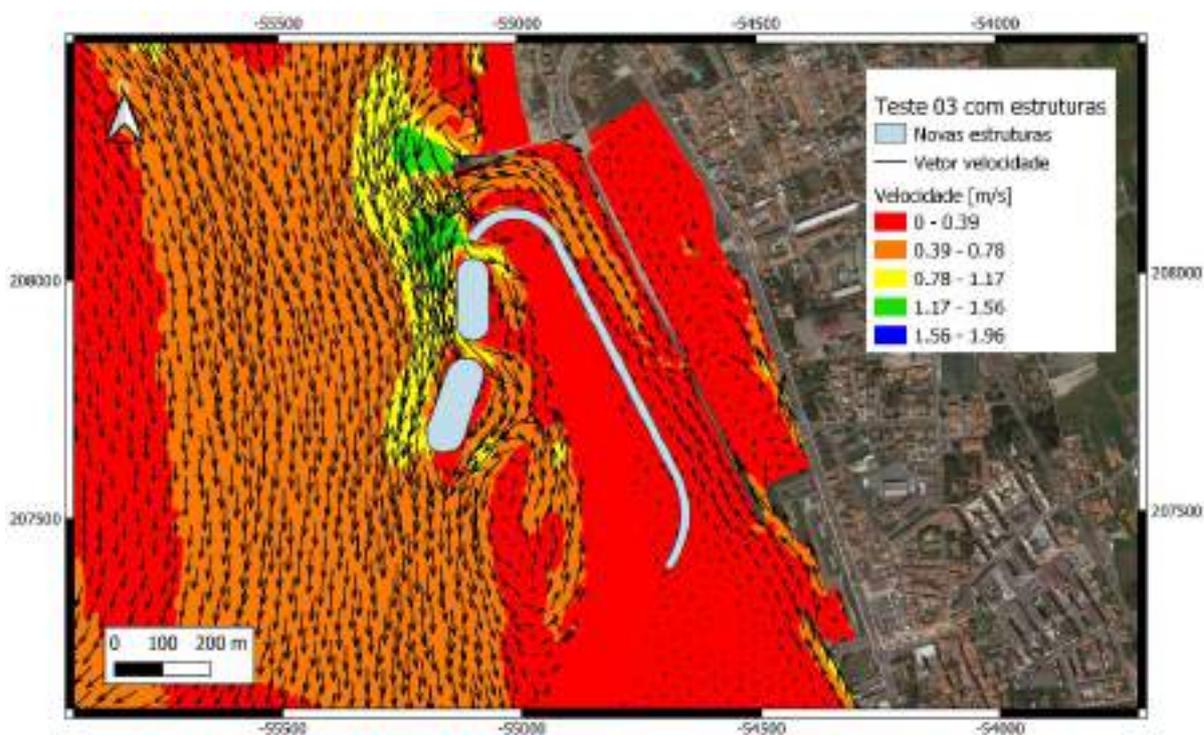


Figura 122 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 03 com as novas estruturas.

A formação de um vórtice a sotamar do segundo quebramar destacado (Figura 122) poderá fazer com que os sedimentos que são transportados, desde a embocadura do rio até à zona a sotamar dos dois quebramares, fiquem retidos nessa mesma zona. Assim, o reforço dunar será algo que esta combinação de estruturas poderá proporcionar a longo prazo para as condições simuladas.

Analisando agora em pormenor as alterações morfológicas apresentadas na Figura 123, é de referir que os sedimentos acumulados na embocadura do rio Cávado parecem ter sido transportados para sul, para uma zona mais próxima do intervalo entre o dique longitudinal e o primeiro quebramar destacado. Estes resultados evidenciam uma tendência, ainda que ligeira, de movimentação dos sedimentos para a zona a sotamar das novas estruturas de proteção. Para além disso, no final deste teste, foram identificadas várias zonas de acreção, nomeadamente junto às cabeças norte e sul dos quebramares destacados, no extradorso da restinga e na extremidade este do dique longitudinal.

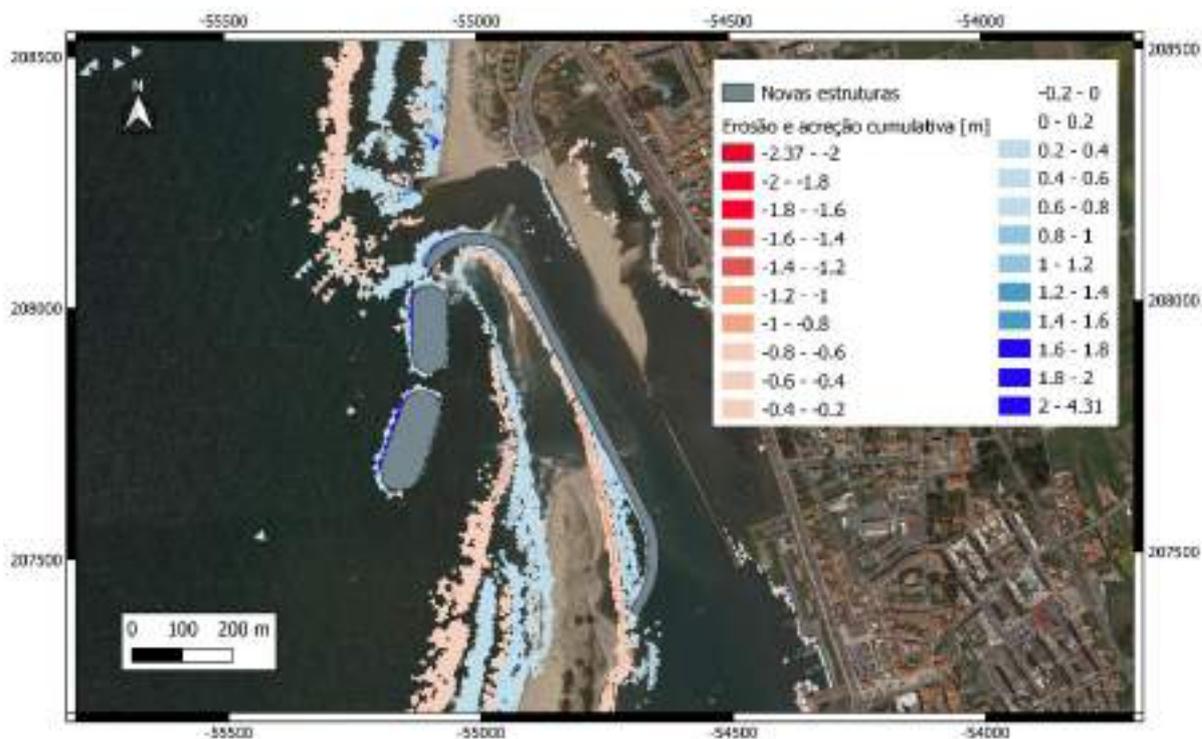


Figura 123 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após o teste 03 com as novas estruturas.

Face aos resultados anteriores, obtidos para a situação atual, as novas estruturas, mais do que promover uma acreção a sotamar, parecem sobretudo contribuir para a manutenção e estabilização das condições existentes, podendo observar-se uma extensa área a sotamar das mesmas sem alterações relevantes da batimetria dos fundos (Figura 123). Por fim, importa realçar, novamente, o papel do dique longitudinal na prevenção do assoreamento do canal de navegação, tal como referido anteriormente. Com efeito, a deposição de sedimentos passa a ocorrer na zona a barlamar desse dique.

A quarta simulação, realizada para um nível de água extremo, uma altura de onda significativa de 5.0 m e um período de onda de pico para 16 s (Tabela 21), apresenta resultados hidrodinâmicos (Figura 124) diferentes dos anteriores, embora, em contrapartida, os resultados morfológicos se assemelhem muito aos obtidos no teste 3. Para as condições simuladas existe um aumento da velocidade de escoamento nos intervalos entre o dique longitudinal e o quebramar destacado 1 e entre o quebramar destacado 1 e 2. Desta forma, é expectável que, para estas condições de agitação marítima e de descarga fluvial, ocorra um maior transporte sedimentar com o sentido e a direção ilustrados na Figura 124.

De referir também que, para estas condições de teste extremas, a construção das novas estruturas de proteção impede que o padrão de recirculação anteriormente observado sobre a extremidade norte da restinga ocorra.

Relativamente ao transporte sedimentar, é possível observar na Figura 125 que o extradorso da restinga de Ofir começa a ganhar volume devido ao fenómeno de acreção que ocorre desde a sua extremidade norte até ao limite inferior da imagem. O volume de material acumulado no local após a implantação das novas estruturas parece ser menor que o ocorrido para a configuração atual da restinga, pelo que os quebramares destacados parecem estar a contribuir mais para a manutenção das condições atuais que para o reforço da restinga.

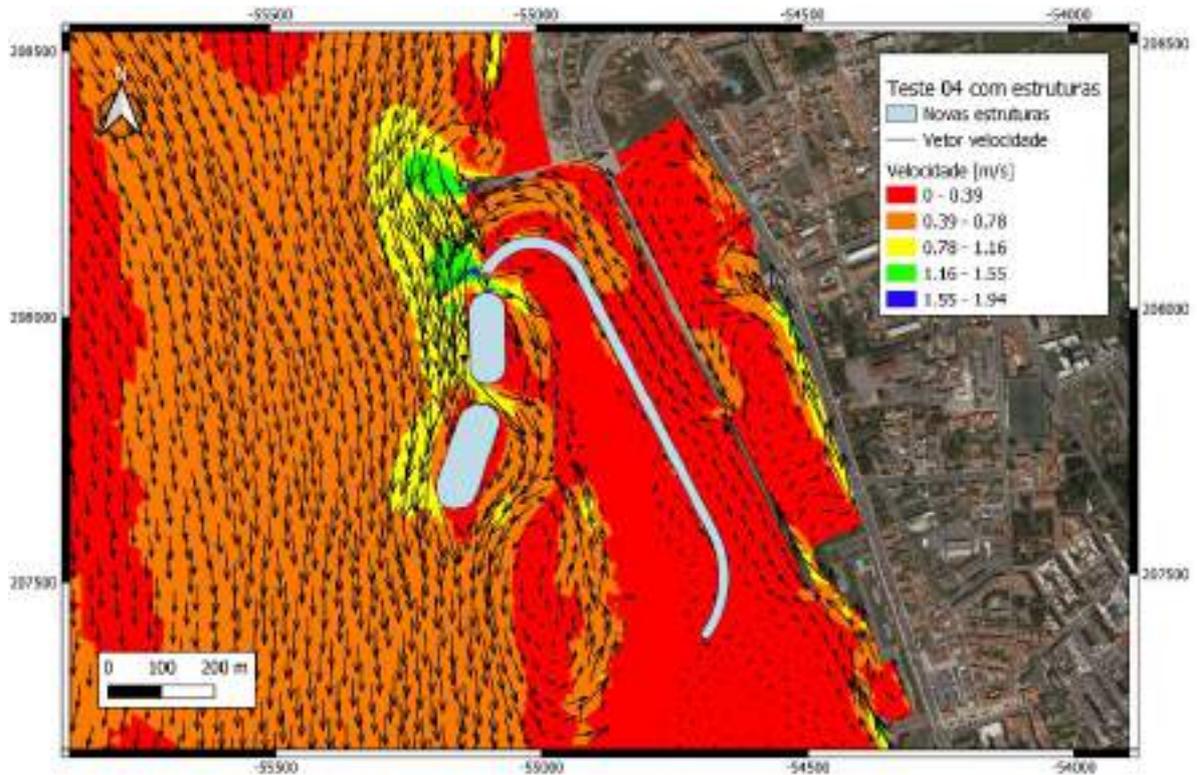


Figura 124 - Mapa da velocidade do escoamento para o teste 04 com as novas estruturas.

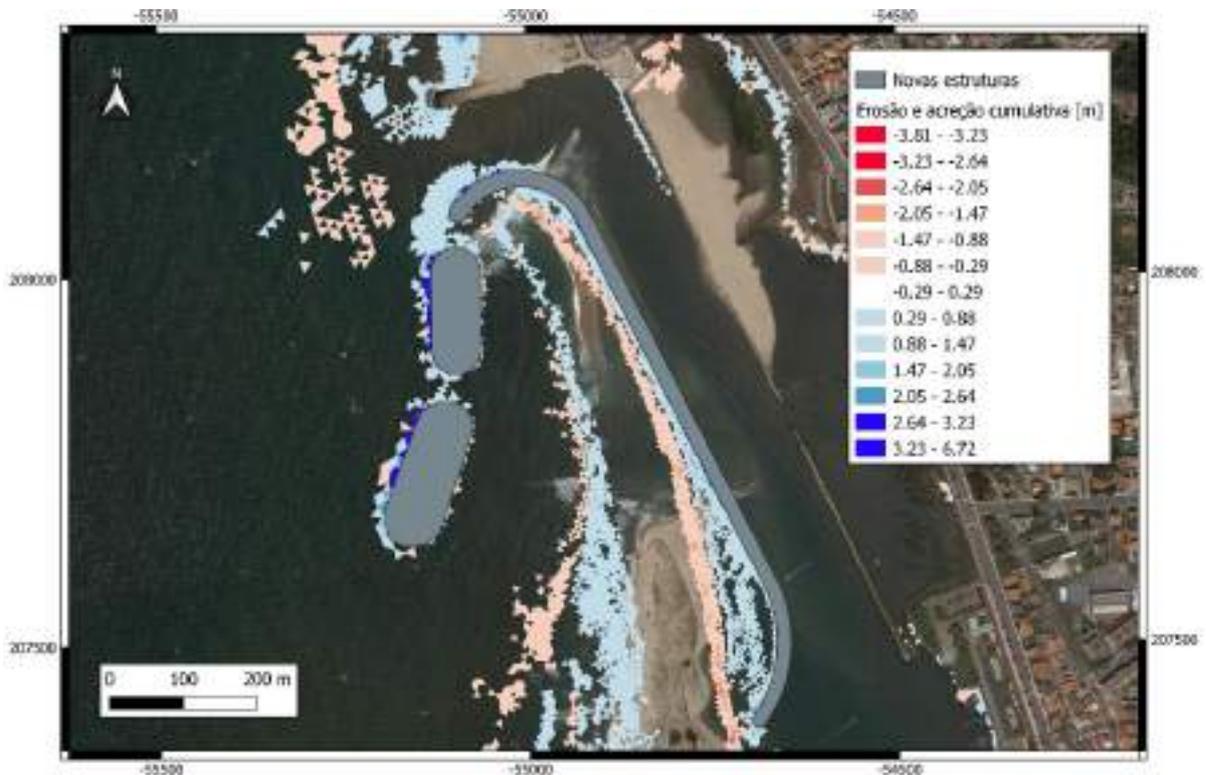


Figura 125 - Mapa de erosões e acreções cumulativas após o teste 04 com as novas estruturas.

Importa aqui relembrar que na segunda série de testes, *i.e.*, após a construção das novas estruturas de proteção costeira, se optou por considerar uma nova configuração da restinga, mais robusta que aquela que atualmente se verifica no local (configuração considerada inicialmente). A análise de resultados deve ter isso em consideração. Por último, importa referir que após esta simulação, o canal de navegação

permaneceu com a sua configuração batimétrica inicial, o que demonstra a eficácia da solução proposta na prevenção do assoreamento do canal.

Para finalizar a análise morfodinâmica, a Figura 126 apresenta a evolução batimétrica da embocadura do rio Cávado e da restinga de Ofir. Desta forma, é possível salientar algumas conclusões importantes relacionadas com a inclusão das estruturas de proteção costeira propostas para o local. Primeiramente, é de referir que o canal de navegação manteve a sua configuração base em termos de largura, porém, junto ao esporão norte, o canal de navegação sofreu alguma acreção, embora não muito significativa. Assim, é de salientar que as intervenções propostas terão um impacto positivo no esforço de dragagem a realizar no futuro.

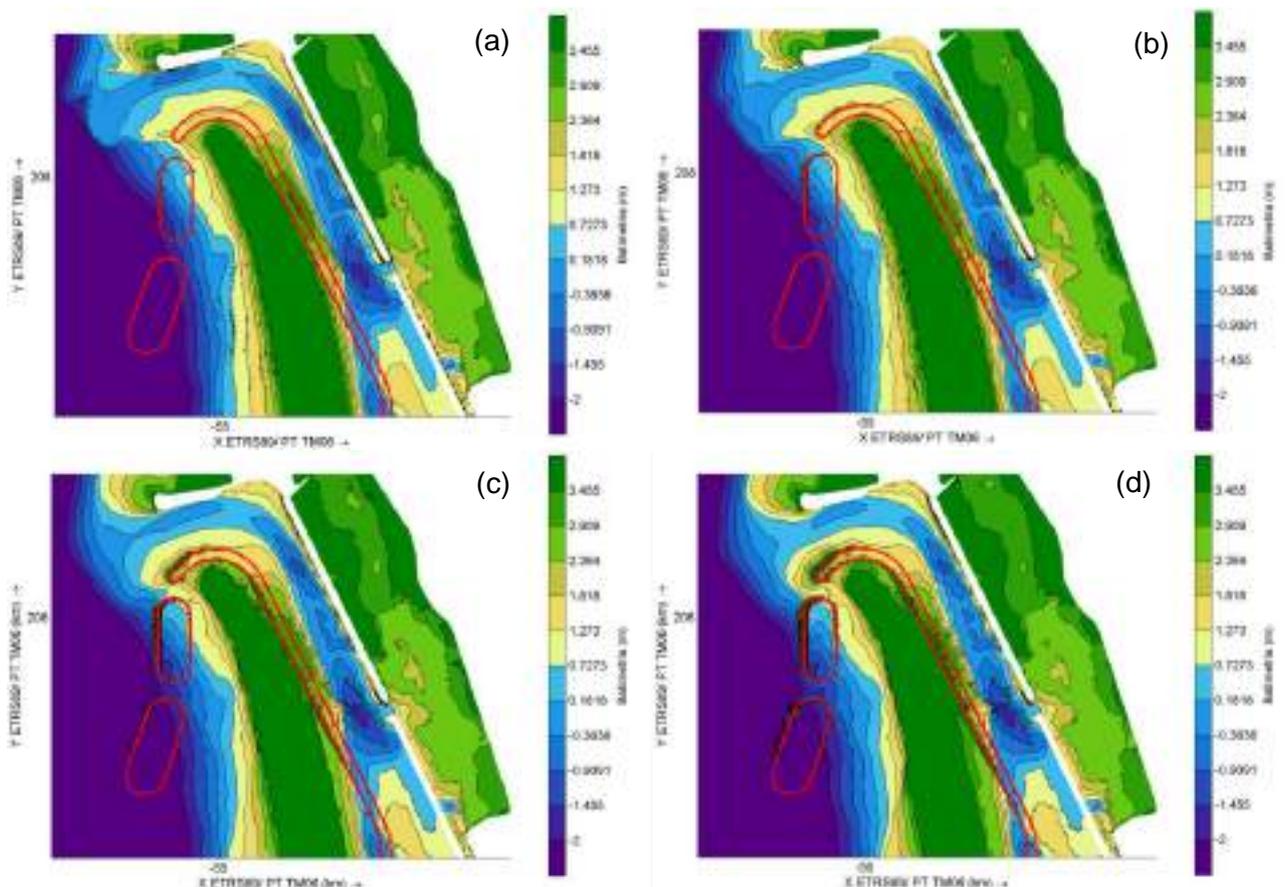


Figura 126 - Alterações morfológicas com estruturas após: (a) teste 01; (b) teste 02; (c) teste 03; e (d) teste 04.

Importa referir que os sedimentos que se situavam junto do talude de barlar do dique longitudinal foram transportados progressivamente para o interior da zona protegida pelos quebramares destacados. Por último, a colocação do dique longitudinal permitiu que ocorresse uma retenção de sedimentos no seu intradorso e dessa forma foi possível dar início ao processo de reforço dunar.

### 6.9. Conclusões e considerações finais

As simulações realizadas com e sem as estruturas de proteção costeira propostas para a embocadura do rio Cávado, permitiram, de uma forma geral, analisar as principais influências em termos de hidro e morfodinâmica nas zonas próximas da extremidade norte da restinga.

As principais tendências morfológicas para as condições simuladas sem as novas estruturas foram: estreitamento do canal de navegação, assoreamento (diminuição da profundidade de água) no canal de

navegação e movimento de translação da extremidade norte da restinga para o interior do canal de navegação. De referir ainda que após uma análise detalhada das principais alterações morfológicas ficou comprovada a necessidade de proteger o intradorso da restinga de Ofir.

De facto, nas atuais condições, a realização de dragagens periódicas no canal de navegação é essencial para garantir a profundidade mínima necessária à navegabilidade nesse canal e assegurar o acesso aos portos de recreio e de pesca localizados no interior do estuário.

Após a implementação das novas estruturas de proteção costeira, nomeadamente um dique longitudinal e dois quebramares destacados, foi possível concluir que existe uma tendência para que os sedimentos sejam transportados para a zona de sotamar dos quebramares destacados. Assim, ao longo do tempo, prevê-se que exista um reforço sedimentar da restinga de Ofir. Por outro lado, verificou-se que o dique longitudinal conseguiu evitar que a restinga se deslocasse para o interior do canal de navegação. Para além disso, a profundidade do canal de navegação ao longo das simulações manteve-se relativamente constante. Por fim é importante referir que para as condições testadas a principal entrada de sedimentos na zona a sotamar dos quebramares destacados ocorre a norte, entre o dique longitudinal e o primeiro quebramar destacado.

Relativamente aos resultados finais das alterações morfológicas de cada série de simulações numéricas, é possível concluir que as tendências observadas foram qualitativamente idênticas às que tinham sido observadas no estudo em modelo físico realizado no Laboratório de Hidráulica da FEUP.

## Referências

- [1] Deltares (2011). Delft3D-RGFGRID. *Generation and manipulation of regular and curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE*. Delft.
- [2] Deltares (2011). Delft3D-QUICKIN. *Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness*. Delft.
- [3] Deltares (2011). Delft3D-QUICKPLOT. *Visualisation and animation program for analysis of simulation results*. Delft.
- [4] Brakenhoff, L., et al. (2020). *From Ripples to Large-Scale Sand Transport: The Effects of Bedform-Related Roughness on Hydrodynamics and Sediment Transport Patterns in Delft3D*. *Journal of Marine Science and Engineering* 8(11).
- [5] Trang, C. T. T., et al. (2020). *Assessment of the environmental carrying capacity of pollutants in Tam Giang-Cau Hai Lagoon (Viet Nam) and solutions for the environment protection of the lagoon*. *Sci Total Environ*: 143130.
- [6] Song, H., et al. (2020). *Nonlinear tide-surge-wave interaction at a shallow coast with large scale sequential harbor constructions*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 233.
- [7] Murshid, S. and G. Mariotti (2021). *Geometry of natural and engineered tidal inlets*. *Coastal Engineering* 164.
- [8] Dempwolff, L.-C., et al. (2020). *Hydrodynamic Cross-Scale Archaeology at a Roman River Harbour*. *Water* 12(12).
- [9] Kurniawan, A., et al. (2020). *Analyzing Tsunami Hazard using Numerical Modelling: Study Case Palu, Sulawesi Tengah, Indonesia*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 982.

[10] Deltares (2011). *Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Delft.

[11] Deltares (2011). *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves in SWAN*. Delft.



## 7. MODELAÇÃO FÍSICA

### 7.1. Introdução

Dada a complexidade dos sistemas estuarinos, devido às características hidrodinâmicas e morfológicas desses sistemas, recorre-se habitualmente a modelos físicos para complementar análises mais teóricas e para validar modelos numéricos. Os modelos físicos são versões à escala reduzida dos sistemas em estudo – o protótipo. Os resultados obtidos com esses modelos, depois de transpostos para o protótipo, permitem tirar conclusões sobre as dinâmicas do mesmo.

O estudo experimental (Tarefa 6) teve como objetivo analisar a hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar da restinga de Ofir, estuário do rio Cávado e área adjacente, antes e após a implementação das novas intervenções de proteção e reforço propostas no âmbito deste estudo. Pretendeu-se assim, em ambiente controlado, estudar o comportamento e as dinâmicas desse complexo sistema costeiro e estuarino, em particular face a eventos extremos, bem como analisar a eficácia das soluções propostas.

Numa primeira fase foi analisada a viabilidade de algumas soluções técnicas idealizadas para simular o complexo sistema constituído pela restinga de Ofir e pelo estuário do rio Cávado no tanque de ondas da FEUP. Posteriormente, a situação atual desse sistema costeiro-estuarino foi analisada para diferentes condições hidrodinâmicas (i.e., estados de mar e níveis de maré). Importa referir que a configuração da restinga de Ofir foi ajustada de modo a ficar mais robusta e com uma forma mais próxima da ideal, uma vez que no levantamento de julho de 2020 a mesma se encontrava numa situação já muito fragilizada. Por fim, foi estudado o cenário que considera a implementação do conjunto de intervenções e estruturas de proteção propostas no âmbito do presente estudo. A sequência de testes (condições hidrodinâmicas) foi repetida por forma a ser possível comparar os resultados dessas duas fases do estudo, i.e., sem e com as novas soluções de proteção e reforço.

Importa referir que as características do modelo físico construído e estudado, assim como as condições de teste (i.e., alturas de onda significativas, períodos de onda de pico, direção de incidência da agitação marítima e níveis de água) consideradas, foram definidos com base nos resultados e conclusões obtidos nas anteriores fases do estudo.

### 7.2. Instalação Experimental

O estudo experimental foi realizado no tanque de ondas da Seção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, Figura 127. Esta infraestrutura tem 28,0 m de comprimento, 12,0 m de largura e 1,2 m de altura, estando equipada com um sistema de geração de agitação marítima do tipo multi-elementos com capacidade para absorver as ondas refletidas pelos modelos testados. Na extremidade do tanque oposta à do sistema de geração de ondas foi instalada uma praia de dissipação da energia das ondas constituída por enrocamento de diferentes tamanhos. A Figura 127 apresenta a planta do tanque de ondas e a área utilizada nos testes.

Como se explica a seguir, a par do sistema de geração de agitação marítima, foi ainda usado um sistema de aquisição de dados de agitação marítima, que permite a medição e o registo da elevação instantânea da superfície livre da água. Ambos os sistemas são controlados e monitorizados a partir de uma sala de controlo. Entre séries de testes foi ainda efetuado o levantamento da batimetria dos fundos recorrendo a um sistema Laser Scanner.



Neste trabalho, os estados de agitação marítima foram reproduzidos tendo por base a forma espectral de Jonswap. Este equipamento tem ainda incorporado um sistema ativo de absorção de reflexões que neste trabalho não foi utilizado pois o modelo físico testado é pouco refletivo, não se justificando por isso a sua utilização.

### 7.3.2. Sistema de aquisição de agitação marítima

O sistema de aquisição de agitação marítima consiste num conjunto de sondas hidrodinâmicas ligadas a dois módulos de aquisição (Figura 126), por sua vez ligados a um computador. As sondas de níveis hidrodinâmicos foram colocadas no tanque nos pontos onde se pretendia caracterizar as condições de agitação marítima (e.g., altura de onda significativa e período de pico). Estas consistem em duas varetas verticais condutoras que geram uma diferença de potencial que depende do seu grau de submersão, que após uma calibração prévia são convertidos em registos instantâneos da elevação da superfície livre da água. A calibração dessas sondas foi realizada diariamente.



Figura 129 – Sonda hidrodinâmica colocada no seu suporte (a), os dois módulos de aquisição (b).

A Figura 130 apresenta as sondas durante o processo de calibração com recurso a um reservatório. Na sala de controlo, o computador comunica com as sondas através dos módulos de interface e do software de aquisição e análise de dados – o HR Wave DAQ. Neste terminal gerem-se os processos necessários à boa execução dos testes, tais como a calibração das sondas, a aquisição, monitorização e análise de dados relativos aos estados de mar gerados.



Figura 130 – Reservatório para calibração das sondas hidrodinâmicas.

### 7.3.3. Sistema Laser Scanner FARO® FOCUS

O sistema Laser Scanner Faro® Focus S foi utilizado entre séries de testes para fazer o levantamento 3D da batimetria dos fundos para posteriormente se analisarem as dinâmicas sedimentares dos fundos do modelo físico. Este sistema (Figura 131) permite criar imagens 3D precisas, completas e foto-realistas de qualquer ambiente ou objeto em apenas alguns minutos através de um método denominado LIDAR (“*Laser Imaging Detection and Ranging*”). O sistema Faro® Focus S está equipado com sensores que permitem o seu bom funcionamento, nomeadamente uma bússola, um inclinómetro e um GPS, podendo ser acedido remotamente por um dispositivo ligado à rede *wifi* do próprio sistema. O utilizador pode ainda optar por várias configurações em termos de qualidade de imagem e de resolução.



Figura 131 – Sistema Faro® Focus S.

A resolução máxima do sistema Faro® Focus utilizado é de 40963x17067 pontos por scan (concentração de pontos por levantamento). O parâmetro “qualidade” influencia a velocidade de rotação do sistema em torno do seu eixo vertical. Uma menor velocidade de rotação corresponde a uma melhor qualidade de imagem com menos ruído. Estes parâmetros interferem na duração de um levantamento.

Num determinado levantamento dificilmente se consegue obter toda a informação espacial necessária devido ao posicionamento do laser scanner. É, portanto, necessário recorrer a vários varrimentos obtidos a partir de locais diferentes e posteriormente cruzar a informação de cada um para gerar o levantamento total. Para o efeito, é necessário colocar marcadores em pontos fixos e de modo a que sejam captados nos vários levantamentos. Depois, com o software Faro® Scene, faz-se a junção de levantamentos que vão dar origem ao levantamento final.

Neste trabalho, para cada levantamento, foi realizado o varrimento a partir de três locais diferentes. Cada um desses varrimentos foi realizado com a resolução máxima e qualidade média, o que correspondia a uma duração de cerca de 30 min por varrimento. De realçar também que o sistema Faro® Focus permite a realização do levantamento com cores.

#### **7.3.4. Sistema de recirculação de água**

Neste trabalho foram utilizadas duas bombas hidráulicas para simular o escoamento fluvial no estuário do rio Cávado. Para reproduzir os caudais menores foi utilizada uma bomba modelo Pedrollo Top 3 GM ligada a uma conduta flexível com 30 mm de diâmetro e aproximadamente 10 m de comprimento total. Para os maiores caudais foi utilizada a bomba Lowara DOMO 20 T/B ligada a uma conduta flexível com 53 mm de diâmetro de 15 m de comprimento total. Na extremidade desta conduta flexível foi colocada uma válvula para possibilitar o ajuste do caudal descarregado às condições de escoamento previamente determinadas.

#### **7.3.5. Estabilizador de escoamento e descarregador de caudal sólido**

De forma a reproduzir convenientemente as condições de escoamento no estuário do rio Cávado foram construídos dois dispositivos: um estabilizador do escoamento para o caudal líquido e um descarregador de caudal sólido (Figura 132). Como a velocidade da água à saída do sistema de recirculação era muito elevada, foi necessário criar um dispositivo que permitisse tranquilizar o escoamento no trecho inicial do estuário do rio Cávado. Esse dispositivo consistiu num canal metálico, divergente, no interior do qual foi instalada uma sequência de filtros usando placas perfuradas em forma de “favo de abelha” para dissipar a energia do escoamento.



**Figura 132 – Estabilizador de escoamento (esquerda) e descarregador de caudal sólido (direita).**

O descarregador de caudal sólido foi usado nos testes realizados para os caudais fluviais mais elevados, sendo constituído por dois recipientes, preenchidos com areia, apoiados num suporte metálico e dotados de uma saída inferior perfurada. O caudal de areia descarregado (caudal sólido) no escoamento líquido foi controlado pela dimensão e disposição de orifícios praticados na saída perfurada. Esses furos foram previamente dimensionados para obter um caudal próximo do pretendido.

#### **7.3.6. Indicadores de direção do escoamento**

Neste estudo experimental, para a determinação da direção do escoamento foram utilizadas “bandeiras” (Figura 133), que consistiam num suporte de madeira (o mais fino possível para não interferir com o escoamento) com uma tira de plástico na extremidade. Essas “bandeiras” foram colocadas em vários pontos de interesse do modelo. Estas bandeiras tinham como objetivo apenas auxiliar na interpretação visual do escoamento no modelo físico.



Figura 133 – Bandeiras instaladas no modelo e sondas hidrodinâmicas.

### 7.3.7. Guias para a construção do modelo físico

Para a materialização da batimetria dos fundos recorreu-se à utilização de varetas apoiadas em blocos cúbicos de cimento colados no fundo do tanque de ondas. Em cada vareta estava marcado o valor da cota dos fundos no ponto onde ela estaria colocada. Para construção das estruturas fixas (quebramares e diques) recorreu-se a moldes em plástico (Figura 134).



Figura 134 – Varetas de nível e moldes para a construção de estruturas fixas.

### 7.3.8. Areia, brita e enrocamento

Devido à reduzida dimensão dos sedimentos existentes no protótipo, se se procedesse à transposição direta dessas dimensões para as escalas geralmente pequenas usadas nos estudos em modelo físico, esses sedimentos passariam a ter um comportamento físico diferente do observado na realidade. Neste trabalho, na reprodução dos fundos da zona costeira em estudo, foi usada areia de sílica da SIBELCO Portuguesa Lda., com um diâmetro médio do grão de 0.273 mm e uma baridade de 1037 kg/m<sup>3</sup>. Existe, portanto, um fator de distorção a ter em conta nos resultados, que se considera não por em causa os objetivos estabelecidos para o presente estudo experimental.

A brita e o enrocamento existente está agrupado por dimensões médias dentro de determinados intervalos. No núcleo das várias estruturas foi utilizada brita com dimensões médias de 4 a 10 mm enquanto no manto resistente das diversas estruturas de proteção foi utilizada brita de 10 a 20 mm.

## 7.4. Modelo físico

### 7.4.1. Escala geométrica do modelo físico

Na escolha da escala geométrica a usar no estudo em modelo físico foram tidos em conta vários fatores, nomeadamente a área disponível no tanque de ondas para a construção do modelo. A escala geométrica 1/100 foi a selecionada pois é aquela que apresenta um melhor compromisso entre a área de estuário e a extensão do trecho costeiro que se pretendia representar no modelo, e os efeitos de escala, que serão tanto maiores quando mais reduzidas forem as dimensões do modelo em relação ao protótipo.

Outro dos fatores considerados na escolha da escala foi o caudal do rio Cávado a reproduzir. Com efeito, é necessário que o sistema de recirculação (em particular as bombas hidráulicas), à escala selecionada, tenha capacidade para reproduzir os valores de caudal selecionados para este estudo, compreendidos entre 150 e 800 L/s. Utilizando o critério de semelhança de *Froude*, a escala da variável caudal,  $\lambda_Q$ , relaciona-se com a escala geométrica,  $\lambda_l$ , através de,

$$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2} \quad (1)$$

Na Tabela 22 apresenta-se a relação entre os caudais no modelo e no protótipo para diferentes escalas geométricas de acordo com o critério de *Froude*.

**Tabela 22 – Caudais no rio Cávado (protótipo vs modelo físico para diferentes escalas geométricas).**

Escala Geométrica	Caudais no estuário do rio Cávado (m³/s)							
	150	250	350	450	550	650	750	800
	Caudais a assegurar pelo sistema de recirculação (L/s)							
1/60	5.38	8.97	12.55	16.14	19.72	23.31	26.9	28.69
1/80	2.62	4.37	6.11	7.86	9.61	11.36	13.1	13.98
1/100	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50	6.50	7.50	8.00
1/120	0.95	1.58	2.22	2.85	3.49	4.12	4.75	5.07

A utilização da escala geométrica de 1/60 implicaria a utilização no modelo físico de caudais que seriam difíceis de reproduzir pelo sistema de recirculação. Por outro lado, seria difícil controlar a descarga desse caudal de forma a evitar erosões localizadas significativas no local de descarga, devido à velocidade do escoamento. A escala geométrica de 1/100 foi considerada a mais apropriada, uma vez que os caudais necessários se encontram entre 1,5 L/s e 8,0 L/s.

No entanto, a escala 1/100 coloca outros desafios, nomeadamente uma maior dificuldade em reproduzir com precisão as cotas altimétricas dos fundos (um centímetro no modelo físico representa um metro no protótipo). Nestas condições, um pequeno erro na execução da batimetria pode-se refletir numa grande distorção da realidade. Neste caso em estudo, esse problema é particularmente importante pois a área tem uma variação altimétrica muito pouco pronunciada: a cota mínima ronda os - 5 m e a máxima é de aproximadamente +7 m.

#### 7.4.2. Área reproduzida no estudo experimental

Tendo por base o trabalho de caracterização da restinga de Esposende, realizado no âmbito do projeto, considerou-se importante reproduzir no modelo físico de fundos móveis: o esporão norte, a embocadura do rio Cávado, o trecho a sul da restinga numa extensão superior a 500 m e o trecho final do estuário do rio Cávado. Importa ainda referir que, face ao conhecimento atual da dinâmica deste trecho costeiro, se considerou ainda importante a reprodução, no modelo físico, do regime de escoamento fluvial no trecho final do rio Cávado. A Figura 135 apresenta a área em planta reproduzida no tanque de ondas, que inclui um trecho da restinga de Ofir com aproximadamente 800 m e uma frente costeira com cerca de 1050 m de extensão.



Figura 135 – Área do caso de estudo reproduzida no tanque de ondas da FEUP.

A análise das condições de agitação marítima permitiu concluir que mais de 90% dos registos ao largo de Leixões correspondiam às direções NW, WNW e NNW, sendo a direção NW a mais frequente. No entanto, devido à batimetria dos fundos junto à costa, por efeito do fenómeno de refração, a direção de propagação das ondas sofre rotação do sentido anti-horário tendendo a ficar mais perpendicular à linha de costa. Assim, optou-se por construir o modelo físico da restinga de Ofir posicionado de maneira a que a agitação marítima gerada incidisse nele com a direção WNW. De referir ainda que agitação marítima com períodos de pico e alturas de onda significativa elevadas aparecem com frequência com a direção WNW.

#### 7.4.3. Batimetria dos fundos

A morfologia dos fundos no estuário do rio Cávado e da restinga de Ofir é extremamente dinâmica devido à sua composição quase exclusivamente sedimentar e à exposição as ações marítimas e fluviais. Neste trabalho, foi necessário estabelecer uma condição inicial para os testes experimentais. Assim, tendo por base dois levantamentos batimétricos recentes, optou-se por reproduzir uma configuração da restinga de Ofir ligeiramente alterada em relação à sua situação atual, adaptando a volumetria de forma a que esta tivesse uma configuração mais robusta e mais próxima do ideal.



linhas guia foram posteriormente posicionadas varetas verticais apoiadas em blocos fixos ao fundo do tanque, cada uma com a indicação da cota dos fundos no local. Foram usados mais de cem pontos de controlo de cotas. A escolha desses pontos foi determinada pela análise de perfis da restinga e zona adjacente, criados para os alinhamentos das guias traçadas no fundo do tanque.

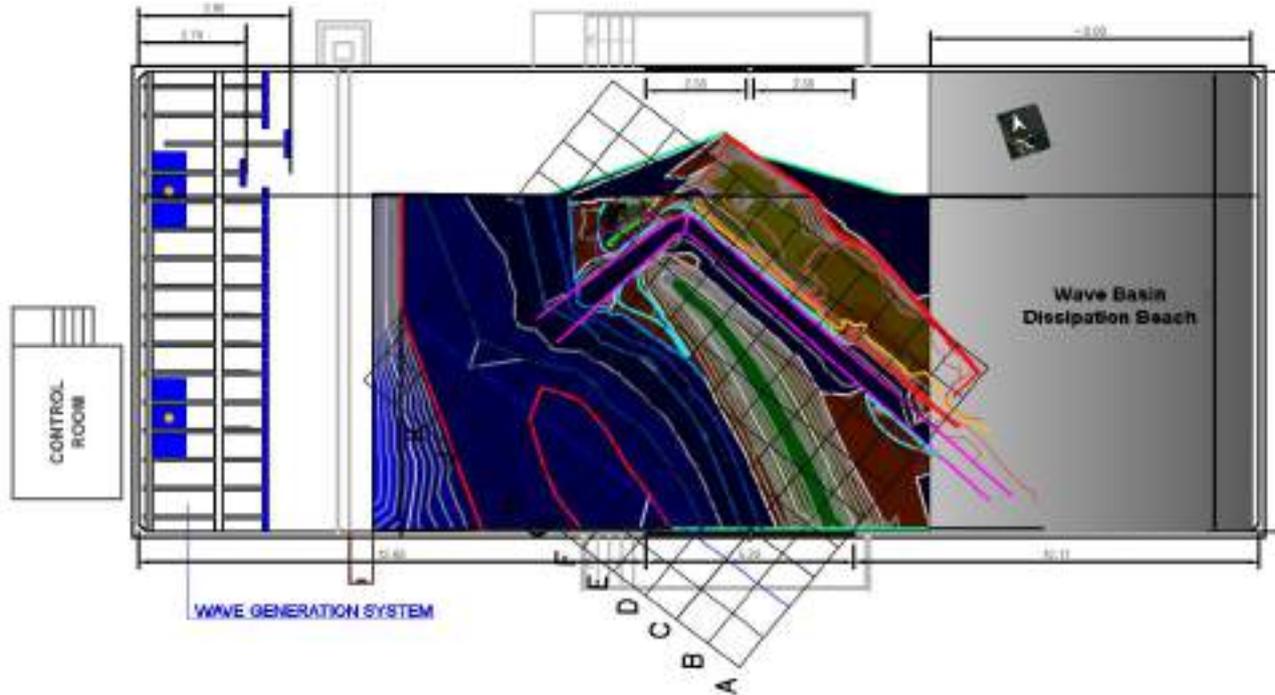


Figura 137 – Guias para a construção do modelo físico sobre as quais foram traçados perfis cotados.

A Figura 138 apresenta, a título exemplificativo, o perfil traçado sobre a linha guia “F”. A vermelho pode-se ver o traçado “real” e a preto uma versão ajustada do mesmo que determina o traçado final do perfil. O processo foi reproduzido para traçar os perfis de “A” a “M” apresentados na Figura 137.

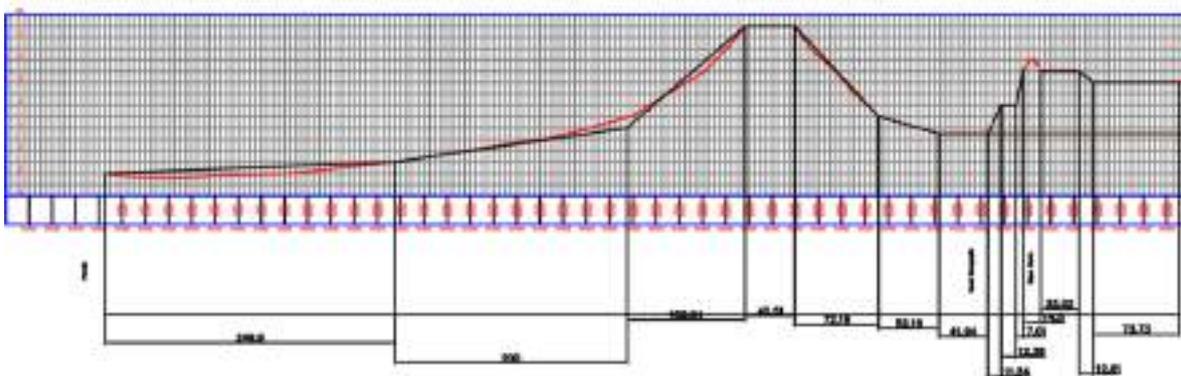
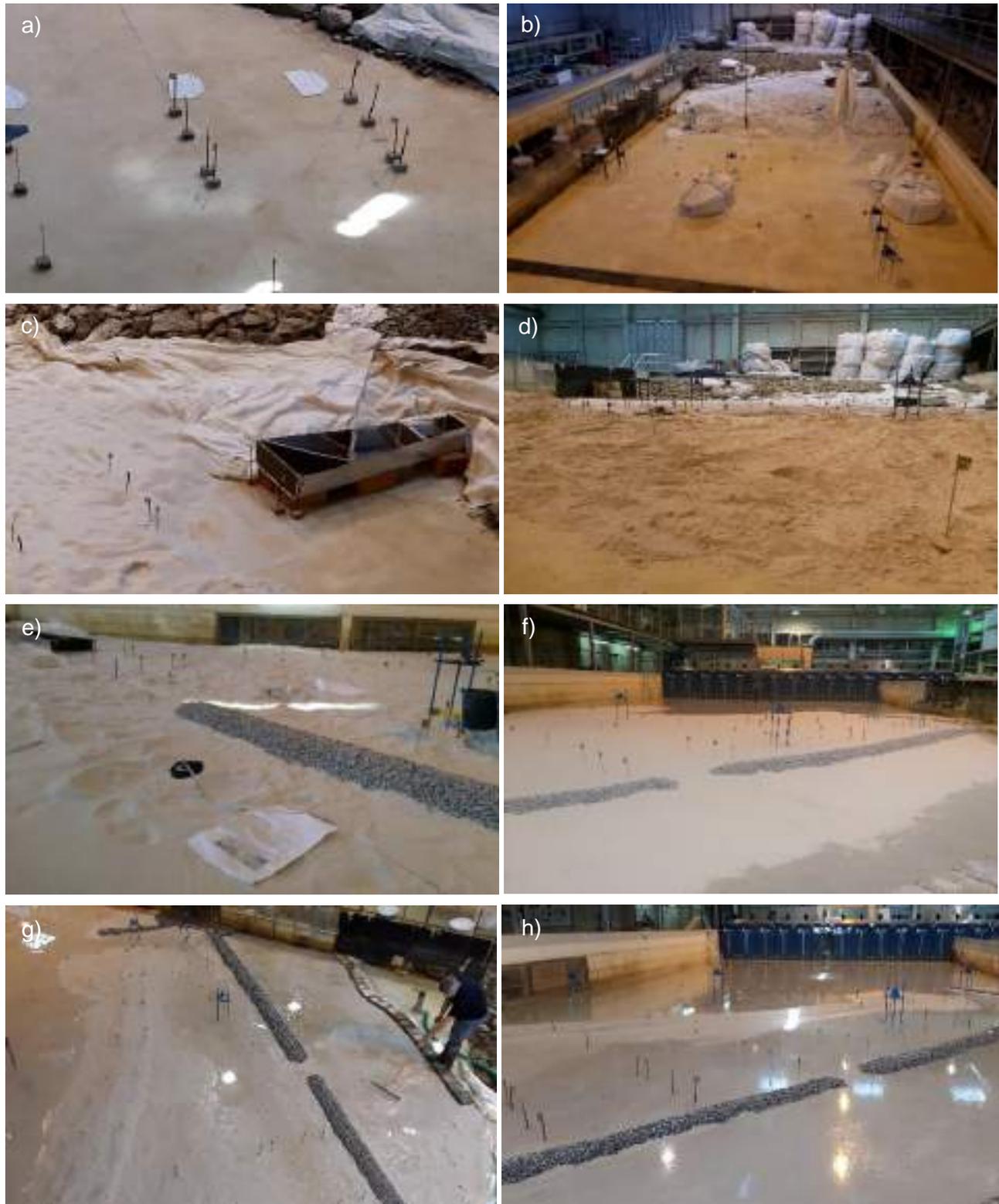


Figura 138 – Perfil transversal da linha guia “F”.

Na Figura 139 são apresentadas as principais etapas do processo de construção do modelo físico no tanque de ondas.



**Figura 139 – Construção do modelo físico: a) marcação das linhas guia e colocação das varetas com as cotas dos fundos; b) colocação das sondas e enchimento com areia; c) instalação do estabilizador de escoamento; d) alisamento da batimetria; e) colocação de estruturas fixas, i.e., diques e quebramares; f) enchimento com água para acerto de cotas; g) novos acertos; h) enchimento com água para o primeiro teste.**

A Figura 140 apresenta, em maior detalhe, alguns dos pontos de referência usados para a reprodução da batimetria dos fundos, bem como o dispositivo construído com o objetivo de promover a estabilização do escoamento fluvial no estuário do rio Cávado.

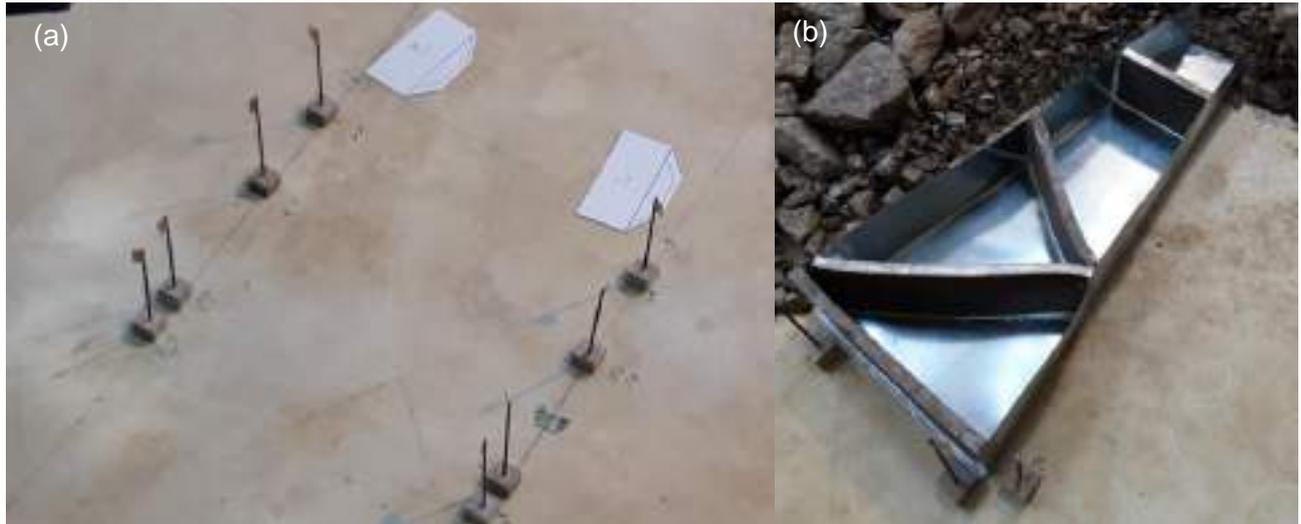


Figura 140 – Pontos de referência para marcação da batimetria dos fundos (a) e dispositivo usado para estabilização do escoamento fluvial no estuário do rio Cávado (b).

As estruturas em enrocamento foram construídas tendo como referência perfis elaborados em plástico. Deve-se referir que o peso dos blocos de enrocamento usados nestas estruturas foi sobredimensionado pois neste trabalho não se pretendia analisar a sua estabilidade, mas apenas ter em consideração a sua influência na dinâmica do estuário e da restinga. Para a execução das estruturas recorreu-se a brita e enrocamento de diferentes dimensões, selecionado de forma a representar as diferentes camadas das estruturas e a sua permeabilidade e características refletoras. As secções transversais das estruturas existentes são apresentados na Figura 141 enquanto a Figura 142 mostra a construção do dique interior.

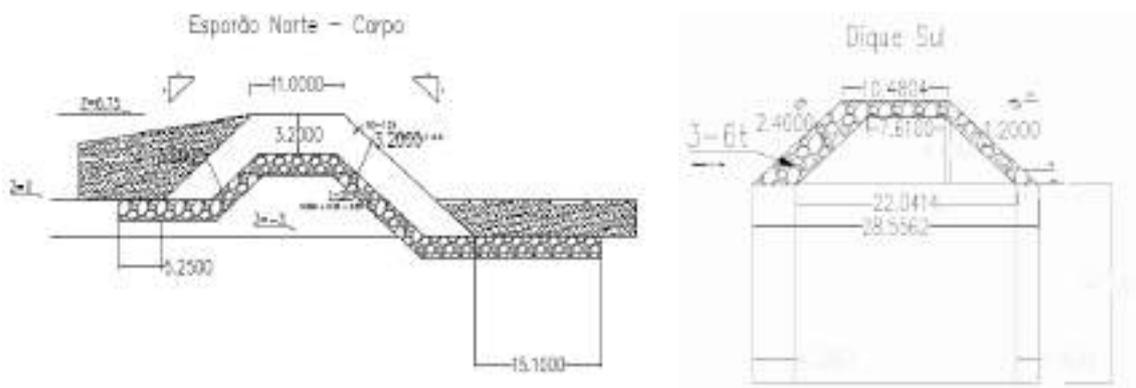
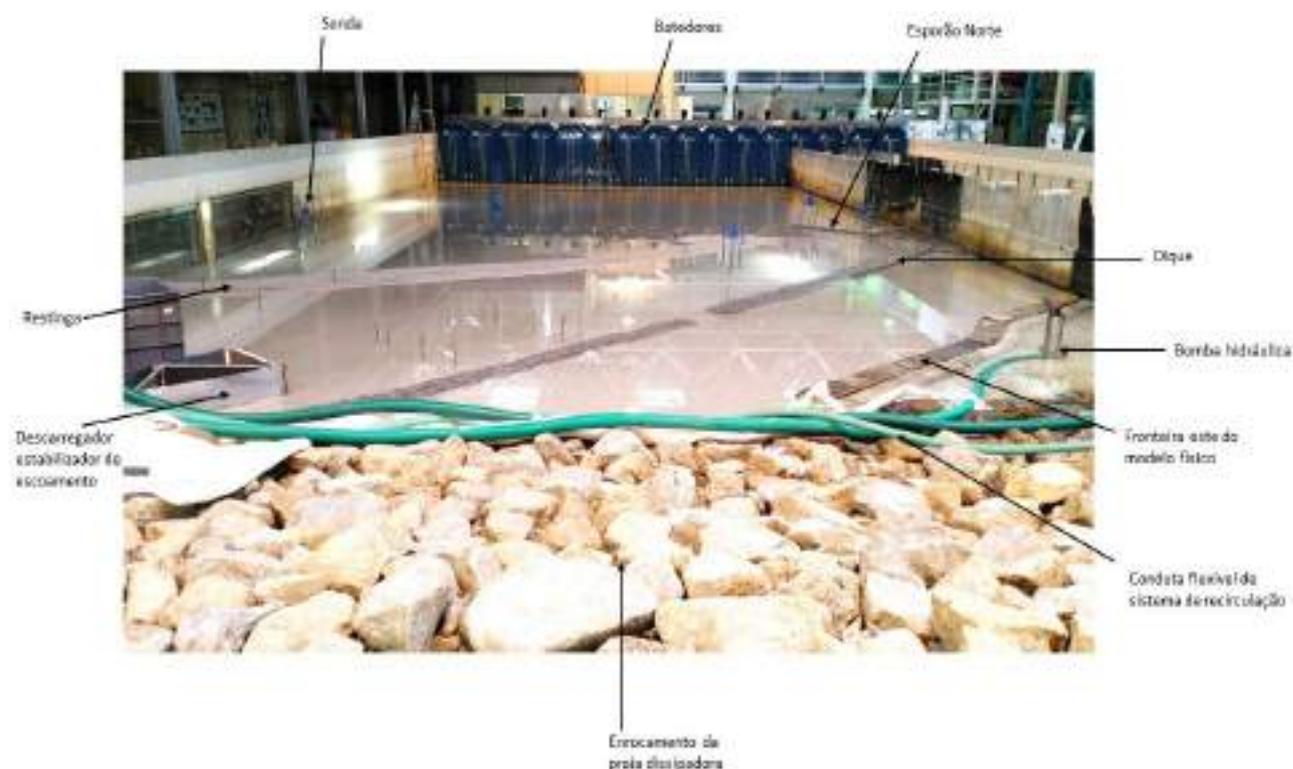


Figura 141 – Desenho do perfil transversal do corpo do esporão e do dique longitudinal.



Figura 142 – Dique longitudinal: construção com as diferentes camadas de enrocamento.

A Figura 143 apresenta o modelo físico da restinga de Ofir e estuário do Cávado depois de construído no tanque de ondas da FEUP.



**Figura 143 – Modelo físico da restinga de Ofir e estuário do Cávado depois de construído no tanque de ondas.**

A Figura 144 apresenta, de outra perspetiva, uma vista geral do modelo físico 3D de fundos móveis da restinga e do estuário do rio Cávado para o cenário relativo à situação sem intervenção de proteção. É possível identificar o molhe norte situado na embocadura do estuário, os diques longitudinais interiores em enrocamento, bem como o sistema utilizado para simular os caudais descarregados pelo rio Cávado. De referir, novamente, que a configuração da restinga apresentada não é a atual, mas a que resultou da adaptação de levantamentos recentes, de forma a que a restinga apresentasse uma configuração mais robusta e próxima da configuração ideal.

#### **7.4.5. Sondas de níveis hidrodinâmicos**

Foram utilizadas dez sondas de níveis hidrodinâmicas para aquisição de dados de agitação marítima em diferentes locais do modelo físico, tendo sido utilizados os canais 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Por forma a simplificar, as sondas foram denominadas S1, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, respetivamente (Figura 145).

A posição das sondas no modelo físico foi definida de modo a ser possível caracterizar as condições de agitação marítima a barlar da restinga (sondas S6 e S7 a sul e S4 e S5 a norte, perto da embocadura e lateralmente ao canal de navegação), na embocadura (sondas S8 e S10) e no interior do estuário (sondas S11 e S12). A sonda S10 foi colocada num ponto particularmente crítico pois encontrar-se numa curva a 90° do leito do rio. As sondas de níveis hidrodinâmicos permitem medir as condições de agitação marítima geradas com uma precisão de  $\pm 0.40$  mm. Tendo em conta que o modelo físico foi construído à escala geométrica 1/100, esse valor corresponde a  $\pm 4$  cm em valores de protótipo.



Figura 144 – Vista geral do modelo físico 3D de fundos móveis da restinga e do estuário do Rio Cávado.

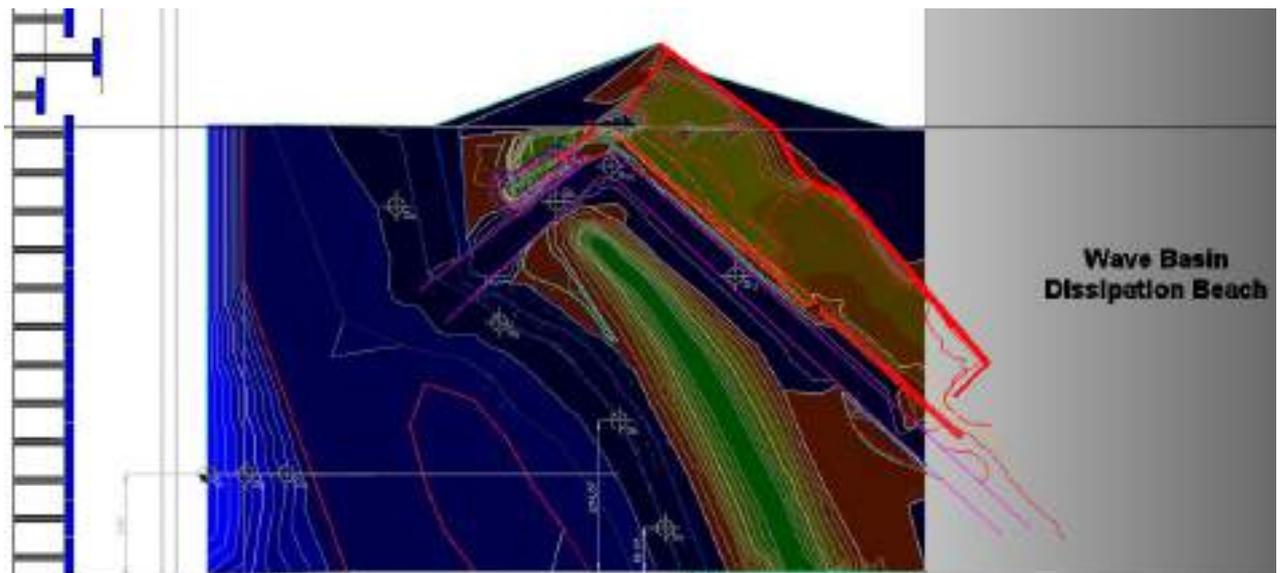


Figura 145 – Localização das sondas hidrodinâmicas instaladas no modelo físico.

## 7.5. Condições de teste e procedimento experimental

### 7.5.1. Introdução

A aleatoriedade de eventos que podem ocorrer torna impossível prever a sequência de ações a que a restinga vai estar sujeita no futuro. Ciclos de maré conjugam-se com estados de agitação marítima que se propagam-se em direção à costa sofrendo a influência da batimetria e das condições atmosféricas e meteorológicas. Do lado do estuário, o caudal fluvial depende das características da bacia hidrográfica e das chuvas que a alimentam.

No estudo experimental considerou-se agitação marítima proveniente do quadrante WNW, por se supor ser a mais relevante para os objetivos do presente estudo. As séries de teste foram estabelecidas de modo a incluir as seguintes fases:

1. Meio ciclo de maré, entre uma baixa-mar e uma preia-mar de águas vivas, com a altura de onda significativa e o período de onda de pico a aumentar com o nível de maré (profundidade de água), e caudal fluvial correspondente ao valor que é excedido, em média, 10% do tempo nos meses entre outubro e março;
2. Nível de água extremo (preia-mar de águas vivas combinada com uma sobre-elevação do nível médio da água do mar de origem meteorológica – maré meteorológica – 4.50 m ZH), condições de agitação marítima também extremas, limitadas pela profundidade de água local, e caudal fluvial corresponde ao valor que é excedido, em média, 10% do tempo nos meses entre outubro e março;
3. Nível médio da água do mar, combinado com condições de agitação marítima moderadas e o valor do caudal fluvial associado a um período de retorno de 50 anos, incluindo caudal sólido;
4. Nível máximo de preia-mar de águas-vivas (+4.00 m ZH), combinado com condições de agitação marítima extremas e um caudal fluvial também extremo, mas inferior ao valor relativo a um período de retorno de 50 anos, e incluindo caudal sólido.

O objetivo das fases 1 e 2 era forçar alterações morfológicas na restinga, fragilizando-a o mais possível e analisar a sua resiliência. Na fase 3, o objetivo passou por tentar restaurar a restinga para uma forma mais próxima da inicial. A inclusão de caudal sólido no rio é justificada pelo facto de situações de cheia o transporte sedimentar se tornar mais relevante. Uma vez que com os testes inicialmente programados a restinga não recuperou como se esperaria, optou-se por prolongar esta fase 3 de testes para tentar observar alterações mais significativas na restinga. A fase 4, por fim, visou induzir alterações ainda mais significativas na restinga de Ofir.

O estudo experimental incluiu a análise de dois cenários distintos:

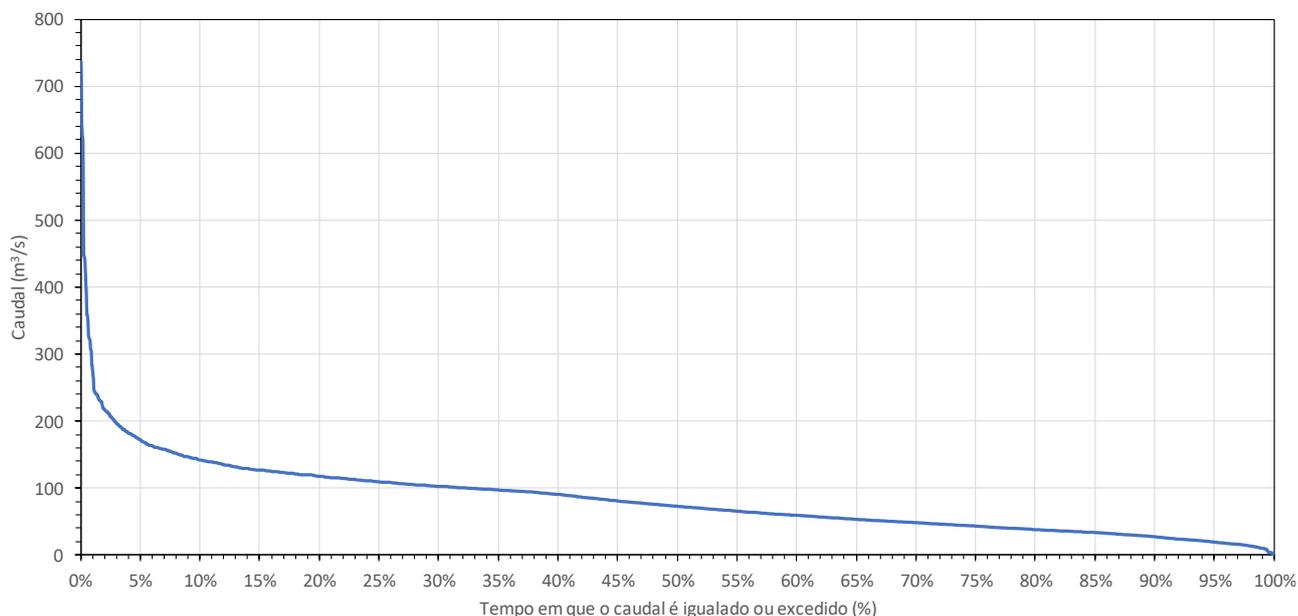
- Cenário 1: configuração idealizada para a restinga de Ofir, sem qualquer tipo de intervenção de proteção;
- Cenário 2: configuração da restinga testada no Cenário 1, mas com uma intervenção de proteção.

### 7.5.2. Definição de variáveis hidrodinâmicas

O regime de escoamento no rio Cávado foi analisado tendo em conta os dados da estação hidrométrica de Barcelos. Atualmente desativada, o Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos apresenta para essa estação 7418 registos para o período de 1979 a 2002, embora com algumas falhas.

A Figura 146 apresenta a curva de duração do caudal médio diário considerando apenas os meses de

outubro a março no período compreendido entre os anos hidrológicos de 1979/80 a 2001/02. O valor do caudal que é excedido, em média, 10% do tempo foi estimado em 140 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 146 – Curva de duração do caudal médio diário. Meses de outubro a março no período compreendido entre os anos hidrológicos 1979/80 e 2001/02.**

Aos valores de caudal do rio Cávado, em regime médio e extremo, foi aplicado um fator corretivo de +10% para ter em consideração a diferença de áreas entre a bacia associada à estação de Barcelos e a correspondente ao estuário do rio Cávado, Tabela 23. Considerou-se que em termos de precipitação as diferenças seriam pouco relevantes.

**Tabela 23 – Caudais considerados no estudo em modelo físico.**

Condição de escoamento	Q <sub>estação hidro</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>corrigido</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>Modelo</sub> (L/s)
Caudal excedido em 10% do tempo no inverno	140.0	155.0	1.55
Caudal associado a período de retorno de 50 anos	722.0	805.0	8.05
Caudal intermédio	-	625.0	6.25

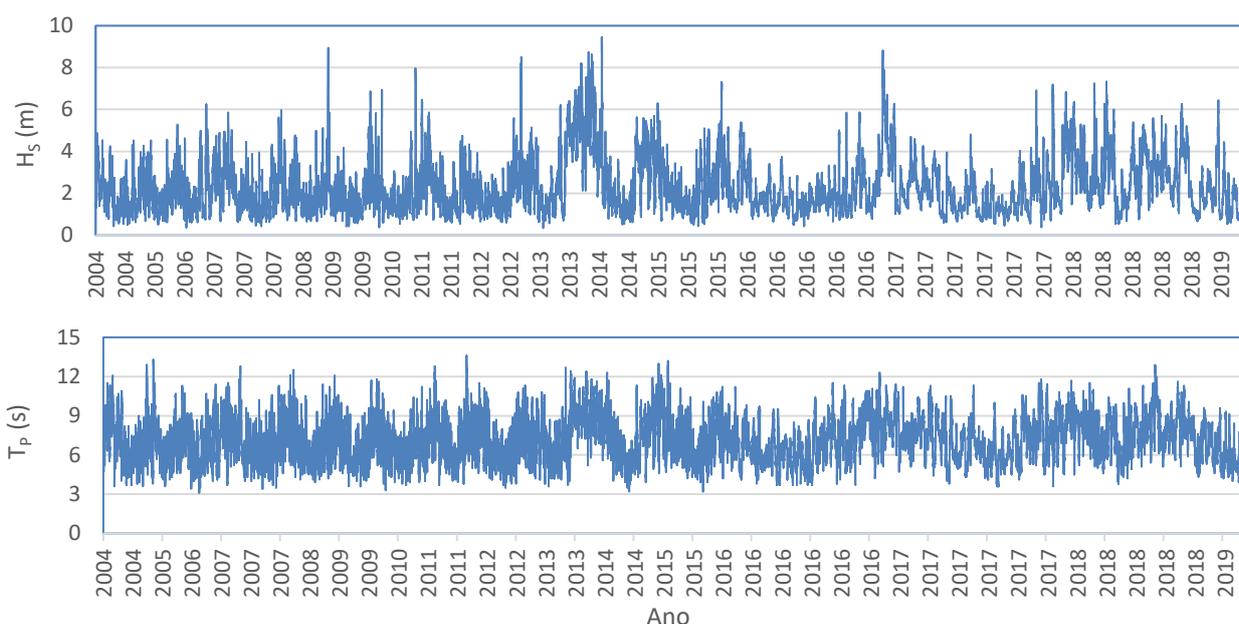
Os valores calculados, transpostos para o modelo físico segundo o modelo de semelhança utilizado, são 1.54 L/s para o caudal médio e 7.94 L/s para o caudal máximo. Para o regime de “extremos” intermédio no modelo considerou-se o caudal de 6.25 L/s.

Para estimar a grandeza do caudal sólido utilizou-se, como referência, o valor de 0.2×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/ano (GTL, 2014) e admitiu-se que cerca de 75 a 80% desse volume anual seria transportado nos períodos de cheia. Atribuiu-se, então, o valor de 0.6 L/h, em valores de modelo, para o caudal sólido.

Tendo em consideração a localização do caso de estudo, considerou-se o valor de 0.5 m para a situação de baixa mar de águas-vivas, 2.0 m para o nível médio, 3.5 m para a preia-mar de águas-vivas e 4.5 m para uma situação extrema considerando fatores meteorológicos muito desfavoráveis e também tendo em conta, de certa forma, a previsão de subida do nível médio das águas do mar estimado pelo IPCC.

As condições de agitação marítima foram definidas tendo como base os dados da boia ondógrafo de Leixões. Os registos dessa boia são efetuados de 3 em 3 h, durante períodos de 30 min. Quando a altura de onda significativa é superior a 5 m (designado por temporal na costa oeste portuguesa) a aquisição é efetuada em períodos de 30 min quase contínuos.

Como já foi referido anteriormente, as direções predominantes não o NW, WNW e NNW, sendo a direção NW a mais frequente. Ainda que o fenómeno da refração seja responsável por uma rotação da direção das ondas no sentido anti-horário na sua propagação até à costa, foi feita uma breve análise dos registos dessa boia ao largo para a direção WNW. A Figura 147 apresenta os valores de  $H_s$  e  $T_p$  considerando apenas a direção WNW.



**Figura 147 – Registo da boia de Leixões para o período de 2004 a 2019 considerando apenas a direção WNW: (a) altura de onda significativa  $H_s$  e (b) período de onda de pico,  $T_p$ .**

Na Tabela 24 apresenta-se uma análise estatística dos registos da boia de Leixões para o período de 2004 a 2019, considerando apenas a direção WNW. O maior valor registado de  $T_p$  foi de 18,2 s, a média foi 11,78 s e o valor mais frequente foi 11,8 s. O máximo valor de  $H_{m0}$  foi de 9,45 m e a média 2,27 m. O período médio variou entre os 13,6 s e os 3,10 s e teve um valor médio de 7,16 s.

**Tabela 24 – Análise estatística dos dados da boia de Leixões para o período de 2004 a 2019 considerando apenas a direção WNW (281,25°-303,75°).**

	$H_{m0}$ (m)	$T_{02}$ (s)	$T_p$ (s)	Dir WNW (°)
<b>Desvio</b>	1.27	1.68	2.27	6.17
<b>Máx</b>	9.45	13.60	18.20	303.00
<b>Média</b>	2.27	7.16	11.78	293.79
<b>Mediana</b>	1.92	7.00	11.80	294.00
<b>Mín</b>	0.34	3.10	4.00	282.00
<b>Moda</b>	1.54	5.60	12.50	302.00

Tendo por base os resultados apresentados, as características do modelo físico e os objetivos definidos para o estudo experimental, as condições de agitação marítima máximas reproduzidas foram limitadas pela profundidade de água local.

A caracterização apresentada anteriormente serviu de base à definição dos valores de referência a usar no estudo experimental.

### 7.5.3. Plano de testes

O plano de testes do estudo experimental foi subdividido em quatro séries de testes consecutivas, que foram aplicadas quer na análise do cenário 1 – configuração idealizada da restinga de Ofir, sem qualquer tipo de intervenção de proteção, quer do cenário 2 – configuração da restinga testada no Cenário 1, mas com intervenções de proteção.

A Tabela 25 apresenta as condições de teste de cada uma dessas 4 séries. A duração de cada teste é apresentada quer em valores de modelo físico quer no protótipo, de acordo com o critério de semelhança adotado e a escada selecionada, em que 1 min. no modelo corresponde a 10 min. no protótipo.

Na série 1 pretendeu-se simular um aumento do nível de maré acompanhado de um agravamento das condições de agitação marítima. De forma a simular um mínimo de cerca de 1200 ondas em cada teste, a sua duração depende do  $T_p$  considerado. Considerou-se o caudal fluvial de 1,54 L/s, correspondente a 154 m<sup>3</sup>/s no protótipo. Estas condições representam uma situação relativamente comum no inverno marítimo e o objetivo era observar o comportamento da restinga nesta situação.

A finalidade da série de testes 2 era forçar alterações morfológicas na restinga, daí a adoção de valores extremos quer para o nível de água, quer para a agitação marítima. O valor do caudal foi mantido por se tratar de uma situação associada a valores reduzidos de caudal sólido potencialmente mais desfavorável para a restinga. Teoricamente caudais mais baixos transportam menos sedimentos para a foz causando um défice de sedimentos.

A série de testes 3 tinha como objetivo analisar se a restinga seria capaz de recuperar, ainda que não totalmente, a sua configuração inicial, após as transformações provocadas pelas séries de testes 1 e 2. Assim, foram consideradas condições de agitação marítima mais tranquilas em contraponto com caudais fluviais extremos. Ao caudal líquido do rio foi adicionado caudal sólido. Como após os testes iniciais não se observaram alterações morfológicas significativas na restinga, continuou-se a testar com condições semelhantes, mas ligeiramente menos energéticas. Assim, o valor de  $H_s$  foi reduzido para tentar acelerar o processo de regeneração da restinga, mantendo os restantes parâmetros inalterados. No último teste desta sequência (teste 11) baixou-se também o nível médio da água em 1.0 m.

A última série de testes incluiu as condições mais adversas fisicamente possíveis no protótipo. O objetivo era causar transformações ainda mais significativas na restinga de Ofir e, eventualmente, a sua rotura. Nestes testes adotou-se um nível de água característico de preia-mar de águas vivas e no último (teste 16) ainda se acrescentou uma sobrelevação de 0.5 m. Nestes testes foram reproduzidas condições de agitação marítima com alturas de onda significativas entre os 5 m e os 7 m associadas a períodos de onda de 18s. No interior do estuário, diminuiu-se o caudal líquido do rio e manteve-se o caudal sólido.

Tabela 25 – Condições de teste consideradas em cada uma das séries de testes.

Série	Teste	Nível de maré	Agitação Marítima		Caudal		Duração do teste	
			$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Protótipo (m <sup>3</sup> /s)	Modelo (L/s)	Modelo (min)	Protótipo (h)
1	1	BMAV	2.5	8			13.65	2.28
	2	NM	3.5	10	154	1.54	17.07	2.84
	3	PMAV	4.5	14			23.89	3.98
2	4		5.0	16			27.31	4.55
	5	Nextremo	5.5	18	154	1.54	30.72	5.12
	6		6.0	18			30.72	5.12
3A	7		2.5	10	825	8.25	17.07	2.84
			2.5					
	8	NM	2.5					
			2.5					
3B	9		1.5					
	10		1.5	10	825	8.25	68.0	11.33
	11	NM - 1	1.5					
4	12		5.0	18			122.9	20.5
	13		6.0	18			61.44	10.2
	14	PM	6.0	18	630	6.3	30.72	5.12
	15		7.0	18			122.9	20.5
	16	PM+0.5	7.0	18			30.72	5.12

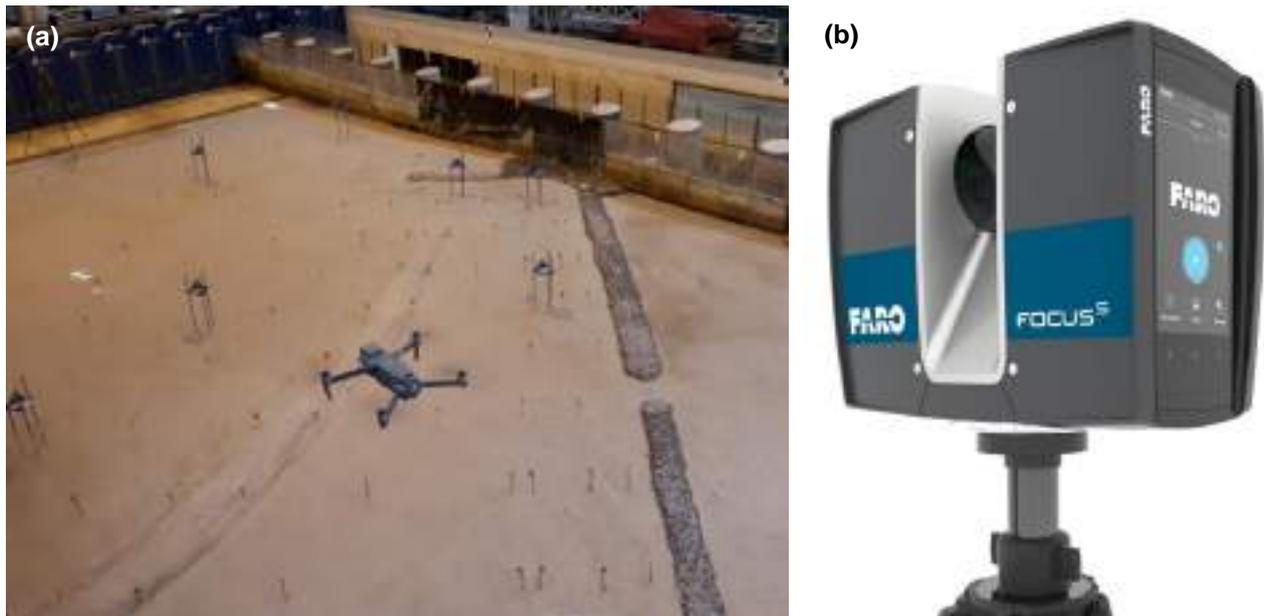
#### 7.5.4. Procedimento experimental e medições

O trabalho experimental teve início com o estudo do modelo físico que reproduzia o cenário 1, ou seja, a configuração idealizada da restinga de Ofir, sem qualquer tipo de intervenção de proteção adicional. No final das séries de testes descritas na Tabela 25 procedeu-se à reconstrução do modelo e instalaram-se as estruturas de proteção costeira preconizadas para o local, para voltarem a ser repetidas as quatro séries de testes, com a mesma sequência temporal, de forma a ser possível comparar o comportamento da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado.

Durante os testes foi medida a elevação da superfície livre da água em diferentes locais no modelo físico. Tendo por base os objetivos definidos para o estudo experimental, nomeadamente a obtenção de dados para a calibração e validação dos resultados do estudo numérico, assim como da própria intervenção a propor, considerou-se importante realizar a medição das condições de agitação marítima em 10 locais distintos:

- À saída do sistema de geração de ondas – 3 sondas;
- Na zona frontal à restinga e à embocadura do rio Cávado – 4 sondas;
- Na zona do estuário do rio Cávado – 3 sondas.

Foram realizados ainda vários levantamentos batimétricos, quer utilizando meios terrestres (um sistema Laser Scanner de alta resolução), quer aéreos (*drone* dotado de câmara de alta resolução), Figura 148. Foram também recolhidos elementos audiovisuais durante os testes (fotografias e vídeos).



**Figura 148 – Levantamento aéreo por *drone* do modelo físico (utilizando como complemento aos levantamentos terrestres com sistema *Laser scanner*) (a) e sistema laser scanner (b).**

No modelo físico, ao longo dessas quatro séries de testes, as alterações morfológicas da batimetria dos fundos foram cumulativas. Portanto, os levantamentos batimétricos com o sistema laser scanner foram realizados:

- Após a construção do modelo físico;
- Após a conclusão dos testes relativos a uma série de testes;
- No final dos testes.

O modelo físico foi reconstruído aquando da transição do Cenário 1 – sem intervenção de proteção, para o Cenário 2 – com intervenção de proteção. Na reconstrução do modelo foram usadas e controladas as referências altimétricas construídas para a primeira fase do estudo.

## **7.6. Resultados do estudo experimental**

### **7.6.1. Introdução**

Como referido anteriormente, o trabalho experimental foi dividido em duas fases, cada uma com quatro séries de testes. Em termos de resultados, numa primeira fase, são analisados os registos das sondas de níveis hidrodinâmica e a hidrodinâmica local junto às estruturas. Posteriormente, é feita a análise das modificações na batimetria dos fundos.

A análise comparativa das condições de agitação marítima em diferentes zonas e entre testes é realizada apenas com base nos registos de 5 sondas consideradas representativas, 2 fora do estuário e 3 no seu interior (Figura 149): a sonda S4, situada perto da zona de geração; a sonda S7 localizada a barlamar da restinga; a sonda S10 localizada na embocadura; a sonda S11 posicionada no “cotovelo” perto da embocadura; e a sonda S12 localizada no interior do estuário. Estas 5 sondas localizam-se em pontos estratégicos e permitem caracterizar os níveis de agitação nos locais mais importante do modelo físico. Nesta secção do relatório apenas se vão considerar quatro testes (dois sem estruturas de proteção e os correspondentes com estruturas) dos 32 efetuados, relativos a condições hidrodinâmicas moderadas e extremas.



Figura 149 – Localização das sondas no modelo físico.

### 7.6.2. Análise da hidrodinâmica e morfodinâmica - condições moderadas

O teste 2 foi realizado para o nível médio da água do mar e agitação marítima caracterizada por uma  $H_s$  de 3,5 m e um  $T_p = 10$  s, condições consideradas moderadas para a zona em questão. Para essas condições, a restinga, partindo de uma configuração inicial robusta, manteve a sua forma e funcionalidade aparentemente inalteradas. Não se observaram galgamentos ao longo do corpo dunar nem alterações morfológicas relevantes na sua cabeça.

Na Figura 150 apresentam-se gráficos comparativos da altura de onda significativa e do período de pico para os cenários sem as novas estruturas (SE) e com (CE), para cada sonda, e na Tabela 26 os valores que dão origem a essa comparação. Na Figura 151 apresentam-se as séries temporais da elevação da superfície livre da água nos locais das sondas 4, 7, 10, 11 e 12, para as séries de teste sem estruturas e com estruturas, e na Figura 152 os correspondentes espectros de energia.

A sonda S4, situada junto ao sistema de geração, é a que regista a maior altura de onda significativa e energia ( $m_0$  – momento espectral de ordem zero). À medida que a onda progride em direção à costa vai dissipando essa energia na interação com os fundos e, a dado momento, por rebentação. Os espectros estimados para a sonda 4, com e sem estruturas, deveriam ser idênticos e ter valores de  $m_0$  próximos, pois as condições de teste são as mesmas e a sonda S4 encontra-se bastante afastada das estruturas adicionadas, pelo que a presença destas não deverá afetar de forma relevante as condições de agitação no local da sonda. As diferenças encontradas (Figura 150, Tabela 26, Figura 152) podem ser justificadas por eventuais pequenas imprecisões na construção do modelo, bem como pelo facto de os dois modelos físicos mostrarem uma evolução da batimetria dos fundos diferente. Quanto aos valores de  $T_p$  para sonda S4, com e sem estrutura, estes, tal como seria de esperar, estão próximos. A altura de onda significativa espectral está relativamente próxima nos dois casos e dentro de valores expectáveis.

A sonda S7 situa-se a barlar da restinga e, por esse motivo, seria de esperar que as características das ondas que atingem este ponto fossem diferentes das registadas na S4, uma vez que a agitação já entrou numa zona de menor profundidade de água (com maior influência dos fundos que eventualmente podem causar rebentação da onda antes desta atingir a sonda S7). Por outro lado, a reflexão das ondas na restinga e/ou no quebramar destacado é também de ter em conta. As ondas refletidas vão-se somar à que se propaga em direção à restinga. Como se esperava, em relação à sonda S4, observa-se uma diminuição sensivelmente para metade do valor de  $m_0$  (energia). O período de pico,  $T_p$ , teve um ligeiro aumento e observou-se o aparecimento no espectro de um novo pico correspondente a maiores períodos e, conseqüentemente, maiores comprimentos de onda, Figura 152.

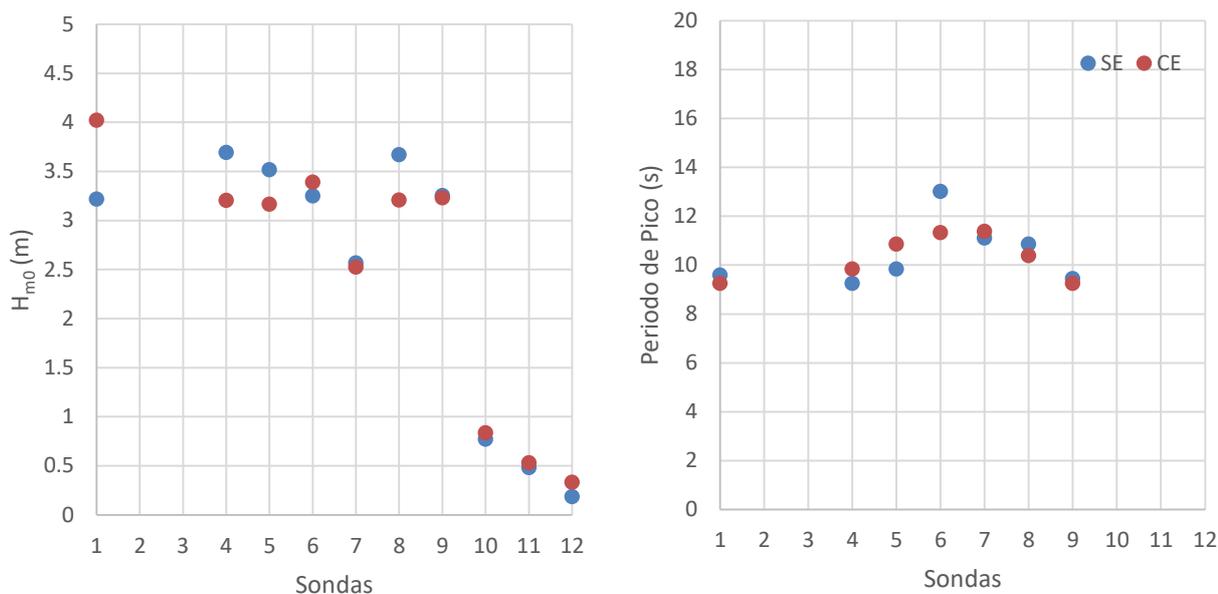


Figura 150 – Comparação da altura de onda significativa (esquerda) e período de pico (direita) entre as séries sem estruturas (SE) e com (CE) para cada sonda no teste 2.

Tabela 26 – Altura de onda significativa ( $H_{mo}$ ), período de pico ( $T_p$ ) e período médio ( $T_{m0,2}$ ) para as séries sem estruturas e com estrutura por sonda (Teste 2, Nível médio;  $H_s = 3,5$  m,  $T_p = 10$  s; caudal fluvial =  $155$  m<sup>3</sup>/s).

Sondas	Sem Estruturas				Com Estruturas			
	mo	$H_{mo}$	$T_{m0,2}$	$T_p$	mo	$H_{mo}$	$T_{m0,2}$	$T_p$
1	0.648	3.222	8.248	9.597	1.011	4.023	8.152	9.259
4	0.854	3.697	8.171	9.259	0.643	3.208	8.139	9.843
5	0.774	3.52	8.218	9.843	0.627	3.167	8.139	10.87
6	0.661	3.253	7.319	13.021	0.719	3.393	6.888	11.338
7	0.413	2.571	6.271	11.111	0.399	2.528	6.448	11.39
8	0.843	3.673	6.752	10.87	0.644	3.211	7.283	10.395
9	0.663	3.256	7.809	9.452	0.653	3.233	7.82	9.259
10	0.037	0.774	9.568	89.286	0.044	0.84	6.505	54.945
11	0.014	0.484	17.54	89.286	0.017	0.533	8.51	89.286
12	0.002	0.189	43.563	--	0.007	0.334	28.987	147.059

Na fase de testes com estruturas, um dos quebramares destacados está posicionado entre a sonda S7 e a restinga, Figura 153. Comparando os espectros da sonda S7 para as duas situações não se observa uma influência relevante dessa estrutura nos resultados, Figura 152. Poder-se-iam esperar diferenças devido à reflexão no talude de barlar da estrutura, mas tal não se verifica. De referir que se observa que um número significativo de ondas galga essa estrutura que apresenta um talude com uma inclinação suave, rugosa e porosa, e, portanto, dissipativa.

Na Figura 151 pode-se observar a diminuição da agitação marítima quando esta se desloca da zona de geração para o interior do estuário. Não se observam, para as condições testadas, variações relevantes, quando se comparam os registos das sondas da fase de testes sem estruturas com a fase análoga com estruturas.

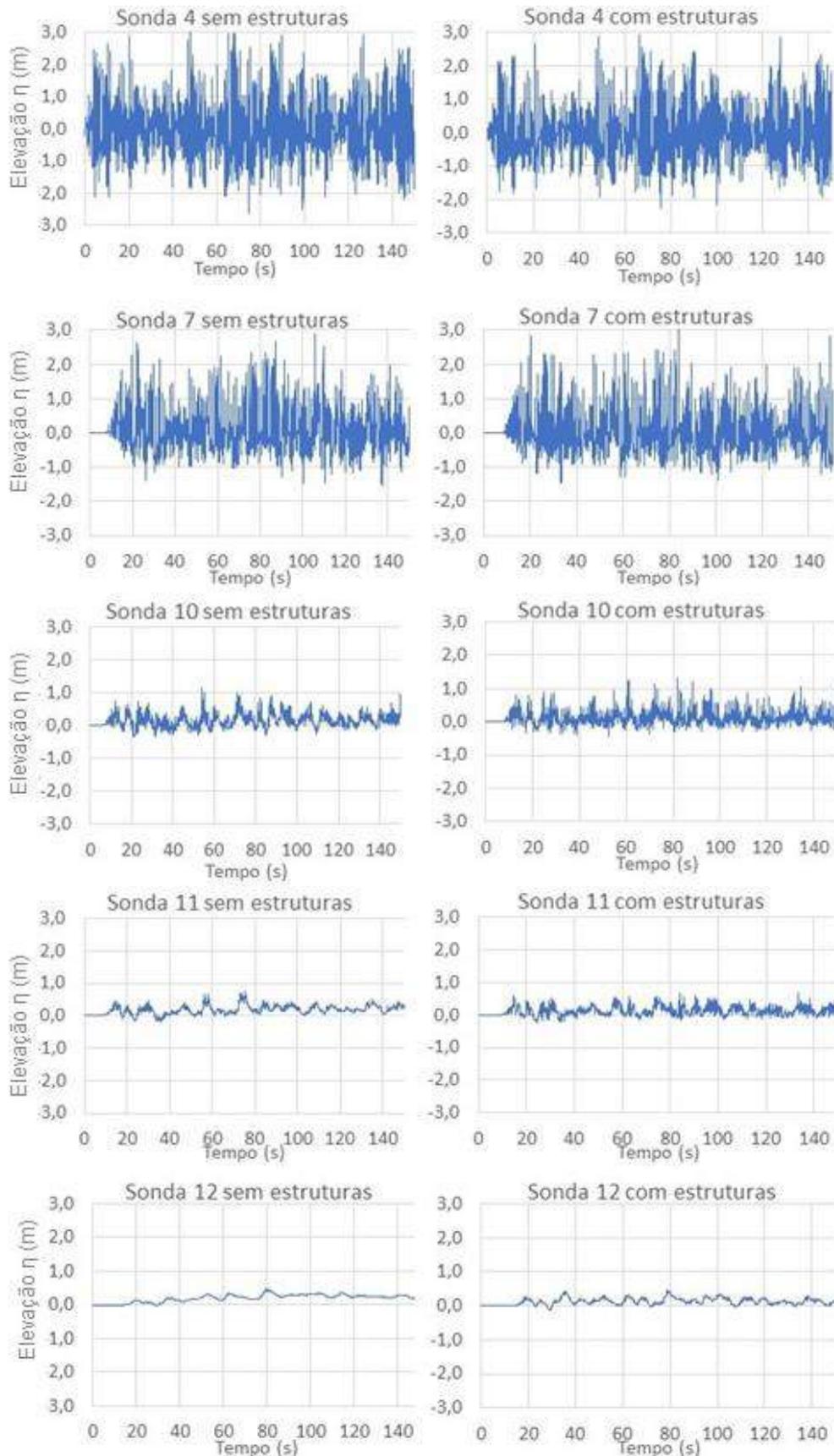
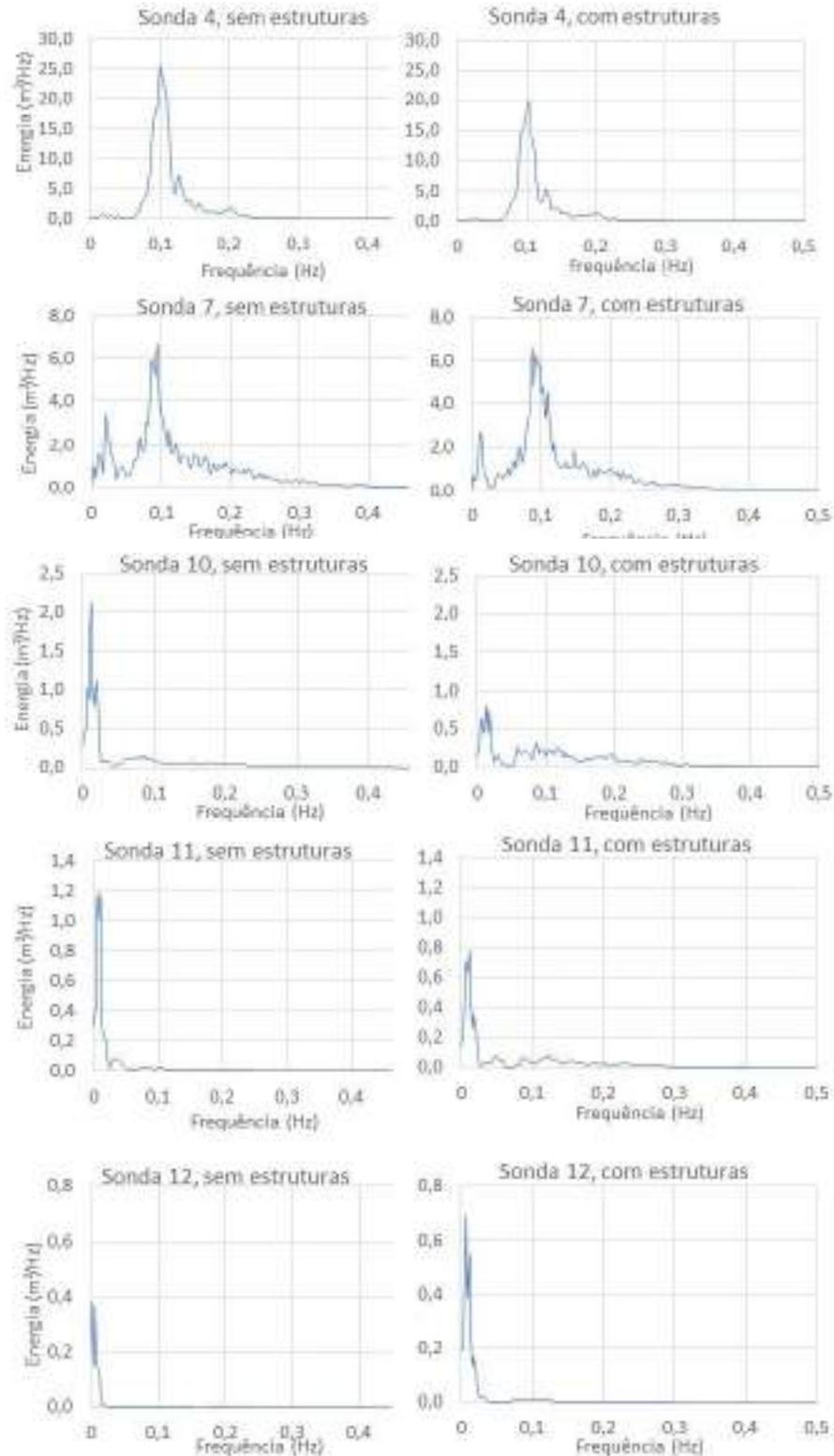


Figura 151 – Elevação da superfície livre nas sondas 4, 7, 10, 11,12 para as condições do teste 2, sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).



**Figura 152 – Comparação de espectros de energia de ondas para as zonas das sondas 4, 7, 10, 11 e 12 na fase de teste 2, sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).**

As sondas S10, S11 e S12 foram posicionadas dentro do estuário do rio Cávado, Figura 149. A análise dos registos dessas sondas dá uma ideia da propagação da agitação marítima para o interior do estuário, Figura 151, observando-se uma diminuição da altura de onda da embocadura para o interior do estuário.



**Figura 153 – Posição da sonda S7 relativamente ao quebramar destacado.**

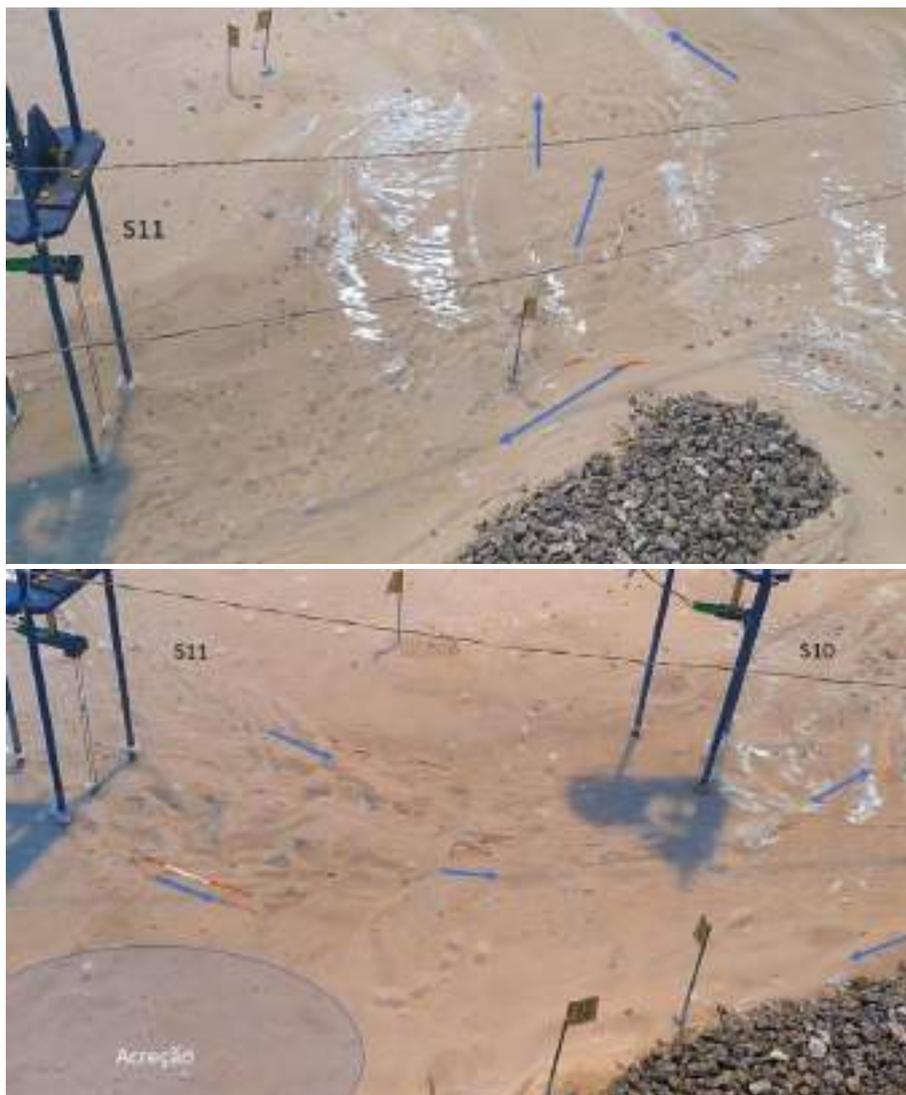
A sonda S10 foi posicionada num local de sobreposição das oscilações da superfície livre associadas à agitação marítima e ao caudal fluvial. Nesse local, comparativamente às sondas localizadas em locais de maior profundidade de água, observa-se uma diminuição significativa da energia ( $m_0$ ) e da altura de onda significativa espectral. Os valores da frequência de pico são também menores, traduzindo-se num aumento do período de pico, Figura 152.

A sonda S11 encontra-se posicionada imediatamente antes da embocadura, no sentido de jusante, junto ao cotovelo desenhado pela margem artificializada do rio. Nessa zona ocorreu acreção de sedimentos junto à margem direita, devido às características do escoamento a montante dessa curva a 90° (Figura 154) e também devido a uma corrente no sentido de jusante para montante, que se forma junto à margem direita. Na Figura 154 pode-se observar também o sentido do escoamento no canal de navegação e o aparecimento de ripples nos fundos.

A sonda S12 está localizada no interior do estuário (Figura 149). Nesse local, as oscilações da superfície livre da água praticamente não sofrem influência da agitação marítima, pelo que resultam principalmente do escoamento fluvial. Observaram-se, porém, perturbações residuais de baixa energia.

Da análise da Figura 150 e Tabela 26 pode-se concluir que:

- i) Analisando os valores das sondas S1, S4 e S5 das fases de teste sem estruturas e com estruturas, e, tendo em conta as suas posições no modelo físico, a agitação marítima gerada corresponde ao pretendido, tanto em termos de período de pico como de altura de onda significativa;
- ii) As sondas S10, S11 e S12, no interior do estuário, apresentam valores da elevação da superfície livre da água bastante inferiores aos observados ao largo, sendo estes ligeiramente superiores nos testes com estruturas de proteção. Tal situação pode dever-se ao canal formado pelos diques paralelos na fase de testes com estruturas, nomeadamente devido ao fenómeno da reflexão;
- iii) A sonda S7 não registou diferenças significativas entre as fases de testes.



**Figura 154 – Sentido e direção do escoamento na embocadura do rio Cávado (teste 2, sem estruturas).**

Na Figura 155 pode-se observar o sentido e a direção predominante dos escoamentos durante o teste na zona da embocadura. Aparentemente, na zona central da embocadura (sobre o canal de navegação), o sentido do escoamento é para o exterior. Ao sair do estuário, o escoamento sofre uma rotação para a esquerda na direção para Sul (no protótipo), direção essa coincidente com a deriva litoral. Contudo, a sotamar do esporão norte observa-se que o sentido de escoamento é para o interior do estuário, causado possivelmente pela difração da onda em torno da cabeça da estrutura.

No interior do estuário observam-se dois sentidos opostos de escoamento (Figura 155): na zona central (coincidente com o canal de navegação), o sentido é o mesmo do escoamento fluvial, no entanto, junto às fronteiras laterais, aparenta ser inverso.

No teste experimental com estruturas de proteção pode-se observar que no interior do estuário o sentido de escoamento parece ter sido regularizado devido ao confinamento do mesmo entre 2 diques paralelos, Figura 156. No exterior observa-se a difração das ondas nas extremidades das estruturas e galgamentos esporádicos dos quebramares destacados. Ao centro da embocadura, o sentido de escoamento é para jusante (para o exterior) e, aparentemente, o escoamento de sentido inverso que existia no cenário sem estruturas, tem mais dificuldade em se estabelecer, apesar de ocasionalmente ainda se verificar.



Figura 155 – Sentido e direção do escoamento superficial no interior do estuário (teste 2, sem estruturas).



Figura 156 – Sentido e direção do escoamento: (esquerda) escoamento geral; (direita) pormenor do escoamento na embocadura (teste 2, com estruturas).

Na Figura 157 pode-se observar que para as condições de teste consideradas (nível médio;  $H_S = 3.5$  m;  $T_p = 10$  s; caudal fluvial =  $155$  m<sup>3</sup>/s) não existe galgamento na restinga. As maiores ondas que se espraiam no talude a barlar não atingem o coroamento da restinga, inicialmente definido à cota +8.0 m ZH.

Nos testes com as estruturas começa a formar-se um saliente no tardo dos quebramares destacados. Por outro lado, a fronteira do modelo físico criada pela parede do tanque de ondas, aparentemente, faz com que, após o espraiamento da onda, esta, na sua fase descendente, se desloque para norte. Este efeito, aliado ao galgamento do quebramar e à difração provocada pela sua extremidade sul, poderá justificar, localmente, o movimento de sedimentos, Figura 158. Neste caso, trata-se de um efeito de laboratório que resulta do facto de existir uma fronteira física (a parede do tanque de ondas) que não existe na realidade e provoca os efeitos referidos.

A Figura 159 apresenta a forma da restinga no final da primeira série de testes permitindo comparar as transformações ocorridas nos cenários sem estruturas e com estruturas. O recuo da cabeça da restinga é apenas visível no cenário 1, ou seja, sem a implantação das estruturas de proteção. No cenário 2, aparentemente, começam-se a formar salientes a sotamar dos quebramares destacados que poderão futuramente evoluir para tómbolos.



Figura 157 – Restinga de Esposende vista de Sul para Norte (teste 2, sem estruturas).



Figura 158 – Fronteira com a parede sul do tanque de ondas e sentido aparente de escoamento (teste 2, com estruturas).



Figura 159 – Forma da restinga no fim da 1ª série de testes sem estruturas (esquerda) e com estruturas (direita).

### 7.6.3. Análise da hidrodinâmica e morfodinâmica - condições extremas

O teste 16 foi o último teste realizado e correspondeu a uma situação extrema em termos de condições de agitação marítima ( $H_s = 7.0$  m e  $T_p = 18$  s), conjugada com um nível de maré extremamente elevado (preia-mar de águas vivas com sobrelevação de 0.50 m) e um caudal fluvial muito superior ao regime médio de escoamento ( $630$  m<sup>3</sup>/s).

Para este teste, nos espectros de energia, pode observar-se a presença de uma quantidade de energia ( $m_0$ ) significativamente superior à observada nos testes anteriores, tal como era expectável, Tabela 27. A Figura 160 mostra que nas sondas localizadas na zona de geração são registadas  $H_s$  entre 7 e 8 m, enquanto no interior do estuário os valores são da ordem de 1 m ou inferiores, tanto na fase de testes sem estruturas como na fase de testes com estruturas.

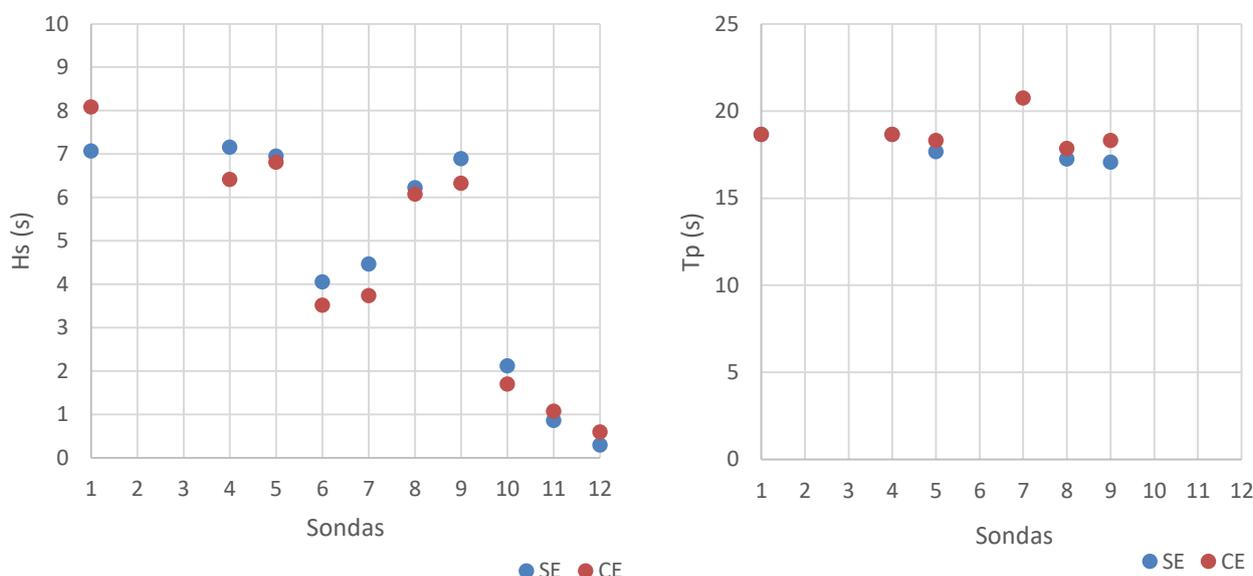


Figura 160 – Altura de onda significativa (esquerda) e período de pico (direita) nos testes sem estruturas (SE) e com (CE) para cada sonda no teste 16.

Tabela 27 – Valores de altura de onda significativa ( $H_{m0}$ ), período de pico ( $T_p$ ) e período médio ( $T_{m0,2}$ ) para as séries sem estruturas e com estrutura por sonda.

Sondas	Sem estruturas				Com Estruturas			
	$m_0$	$H_{m0}$	$T_{m0,2}$	$T_p$	$m_0$	$H_{m0}$	$T_{m0,2}$	$T_p$
1	3.121	7.066	9.71	18.6	4.087	8.086	9.34	18.6
4	3.201	7.157	9.70	18.6	2.573	6.416	9.07	18.6
5	3.021	6.952	9.73	17.7	2.900	6.812	8.85	18.3
6	1.026	4.051	8.18	250	0.773	3.516	7.67	263
7	1.246	4.464	7.28	46.7	0.874	3.739	7.29	20.7
8	2.421	6.223	8.26	17.2	2.306	6.074	8.44	17.9
9	2.968	6.891	9.67	17.1	2.502	6.326	9.69	18.3
10	0.280	2.116	8.00	161	0.180	1.697	7.72	172
11	0.047	0.861	11.7	156	0.072	1.073	8.00	172
12	0.006	0,289	17.3	---	0.022	0.592	20.3	172

Em relação aos períodos de pico verifica-se que se mantêm idênticos nos testes sem estruturas e com estruturas, sofrendo em ambas as situações um aumento quando a onda se propaga para o interior do estuário, devido à transferência de energia para as baixas frequências do espectro e à dissipação de energia nas altas frequências, Tabela 27.

Na fase de testes sem estruturas de proteção foram observados, durante o teste 16, vários galgamentos da restinga assim como das estruturas existentes (diques longitudinais interiores e esporão norte), Figura 161. Na série de testes com as estruturas de proteção verifica-se que, com a exceção da parte exterior do novo dique que contorna a cabeça da restinga, todas as novas estruturas se encontram submersas, dado que a sua cota de coroamento foi fixada em +4.00 m para minimizar o impacto visual das mesmas. Para este cenário observam-se também galgamentos no corpo da restinga, embora com muito menor frequência, e apenas localizados na zona de abertura entre os dois quebramares destacados e a sul do quebramar localizado mais a sul (Figura 161).



Figura 161 – Galgamentos observáveis na fase de testes sem estruturas (esquerda) e com estruturas (direita) do teste 16 (Nível de Água Extremo + 0.5;  $H_s = 7$  m;  $T_p = 18$  s; Caudal fluvial =  $630$  m<sup>3</sup>/s).

A Figura 162 e a Figura 163 apresentam a elevação da superfície livre da água e os espectros de energia na zona das sondas 4, 7, 10, 11 e 12 para os cenários sem e com as novas estruturas, respetivamente.

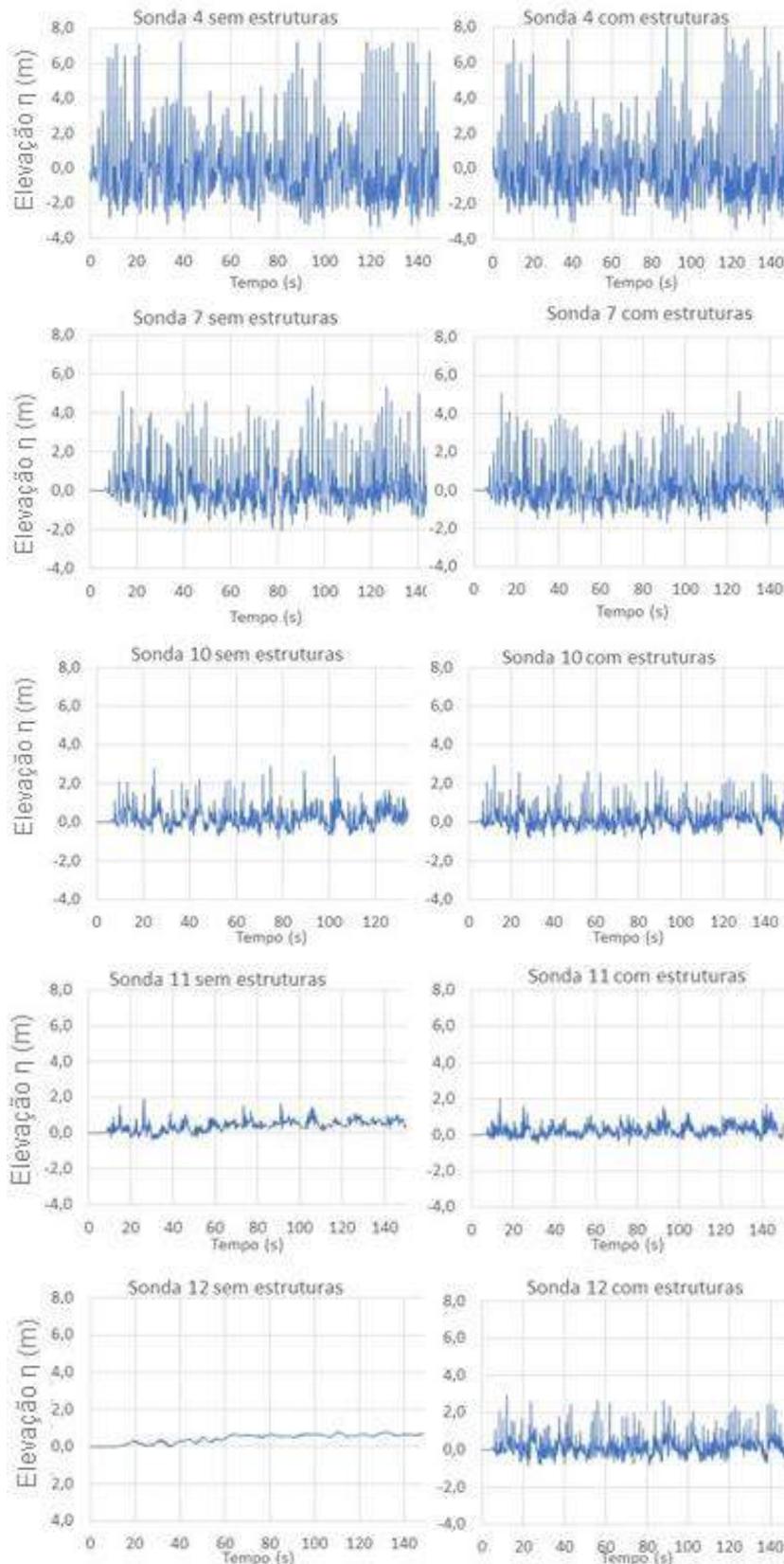


Figura 162 – Elevação da superfície livre nas sondas 4, 7, 10, 11 e 12 para o teste 16, sem as estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).

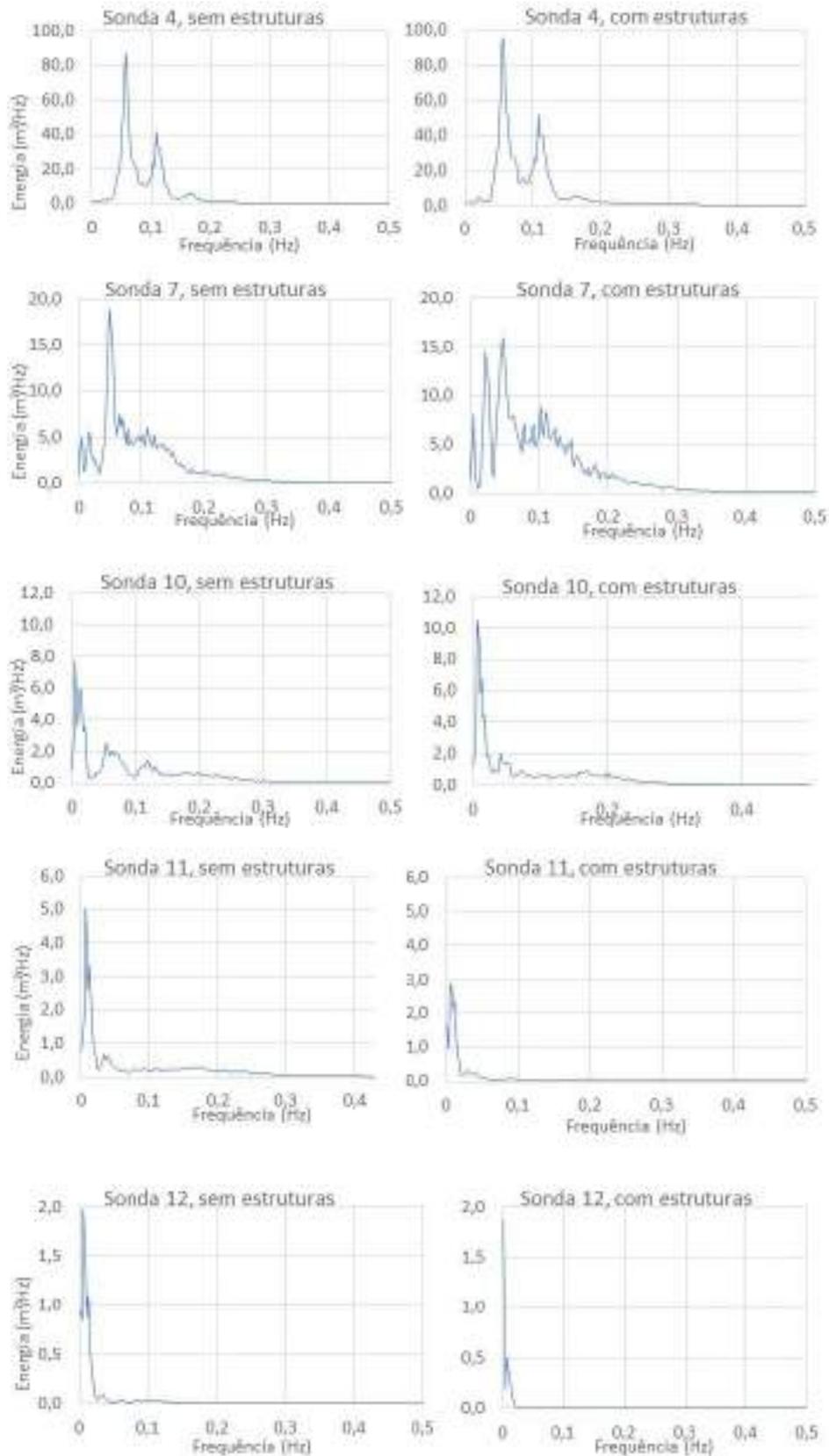


Figura 163 – Espectros de energia de ondas para as zonas das sondas 4, 7, 10, 11 e 12 para o teste 16, sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).

A configuração que a restinga apresentou no final das quatro séries de testes é a apresentada na Figura 164. É possível constatar que para uma sequência de condições de agitação marítima, níveis de água e caudais iguais ao longo dos 16 testes realizados, a restinga de Ofir evoluiu de forma bastante diferente.



**Figura 164 – Forma da restinga no final das séries de testes sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).**

A Figura 164 mostra que a solução proposta conferiu uma maior estabilidade à restinga, principalmente na zona da cabeça e embocadura. No entanto, a forma apresentada pela restinga no final da série de testes sem estruturas parece mais “natural”, como era de esperar. O facto de a restinga, nos testes sem estruturas, ter suportado toda as solicitações que lhe foram impostas pode levar a concluir que a função protetora face à agitação marítima que desempenha está assegurada, desde que a cota de coroamento seja fixada na cota de 8 m pelo menos (como no caso deste modelo físico). No entanto, é importante referir que as condições testadas em laboratório, embora extremas, correspondem a um curto período de tempo em valores de protótipo. Assim, a ação prolongada de solicitações inferiores às testadas pode levar, como já aconteceu no passado, à rotura da restinga. Por outro lado, importa também lembrar que no estudo experimental foram introduzidas simplificações em relação à realidade, por exemplo, no estudo experimental apenas foi considerada uma direção de incidência das ondas e não foi considerado o efeito do vento.

Pese embora o referido, as transformações morfológicas observadas na cabeça da restinga, no cenário sem estruturas de proteção, podem ser bastante problemáticas, nomeadamente em relação a condições de segurança para a navegação através da embocadura ou no que concerne ao assoreamento do canal de navegação.

Estes problemas, que são bem conhecidos das populações locais, ficam aparentemente resolvidos com a instalação das novas estruturas de proteção. Com efeito, verificou-se que os quebramares destacados servem de primeira barreira contra a ação das ondas, evitando o enfraquecimento da restinga de Ofir e minimizando os galgamentos. Por outro lado, o novo dique longitudinal interior, ao contornar a cabeça da restinga, não apenas impede que ocorra o assoreamento do canal de navegação e a migração da restinga para o interior do estuário, como também fixa e estabiliza a sua cabeça.

#### **7.6.4. Análise das principais transformações morfológicas**

Nesta secção apresentam-se as principais transformações morfológicas observadas na restinga de Ofir e no estuário do rio Cávado, nas séries de testes realizadas para o cenário 1 – sem as novas estruturas de proteção e para o cenário 2 – com as novas estruturas de proteção.

As Figura 165 a Figura 167 mostram a evolução da restinga de Ofir nos testes realizados para o cenário 1. A configuração quase retilínea idealizada para a restinga, bem visível no início dos testes (Figura 165), contrasta com a forma curvilínea que a mesma adquiriu no decorrer do trabalho (Figura 166).

Nesta primeira fase de testes é de salientar a redução da largura da cabeça da restinga e a sua migração para o interior do estuário do rio Cávado, devido, principalmente, à ação da agitação marítima, nos testes realizados para as condições mais energéticas e os níveis de água mais elevados, que permitem que ondas de maior altura se aproximem da costa. Pode também observar-se que a recuperação da restinga nos testes realizados para as condições de agitação marítima menos energéticas e com caudais fluviais elevados (incluindo o caudal sólido) era consideravelmente mais lenta comparativamente à rapidez com que a mesma se moldou face às condições de agitação marítima mais energéticas.



**Figura 165 – Início dos testes experimentais: cenário 1, sem intervenção de proteção.**



Figura 166 – Modelo físico na fase final das séries de testes realizadas para o Cenário 1 (sem intervenção de proteção).

A maior largura da restinga no trecho mais a sul, junto à parede lateral do tanque de ondas (Figura 166), resulta do transporte de sedimentos induzido pela obliquidade da incidência da agitação marítima ser de norte para sul (*i.e.*, da esquerda para a direita no tanque de ondas). Assim, os sedimentos mobilizados pelas ondas e correntes são deslocados para essa fronteira do modelo. A configuração em “S” adquirida pela restinga revelou-se bastante resiliente, mesmo na série de testes final, com ondas de grande altura e níveis de água elevados.



**Figura 167 – Configuração da restinga de Ofir no final das séries de testes realizadas para o Cenário 1 (sem intervenção de proteção).**

Importa acrescentar que os resultados e conclusões obtidos, embora realistas, não reproduzem, de uma forma rigorosa, o que acontece na realidade, devido às simplificações que é necessário introduzir neste tipo de estudos experimentais. Com efeito, a direção de incidência das ondas permaneceu inalterada ao longo das quatro séries de testes e a variação do nível de água foi feita em patamares, e não de forma gradual, como ocorre na realidade. Por outro lado, as condições de tempestade foram mantidas até que se observassem modificações morfológicas relevantes no modelo físico de fundos móveis. A Figura 167 a configuração da restinga de Esposende no final das séries de testes realizadas para o Cenário 1.

As Figura 168 a Figura 171 referem-se aos testes realizados para o cenário 2 e mostram a evolução da restinga após a introdução da intervenção de proteção, constituída por dois quebramares destacados e um dique longitudinal interior que, contornando a restinga pelo seu intradorso, se prolonga para o exterior fixando a sul a embocadura do estuário do rio cavado (Figura 168).



Figura 168 – Modelo físico construído para o cenário 2 que contempla um dique interno de guiamento e quebramares destacados externos de coroamento a cota baixa. Solução preliminar ainda não otimizada.



Figura 169 – Modelo físico durante os testes experimentais da fase 2 (com intervenção de proteção).



Figura 170 – Modelo físico durante os testes experimentais da fase 2, evidenciando a configuração da restinga na zona protegida pelos quebramares destacados.

Nos testes com a intervenção de proteção pode observar-se a formação de salientes na zona posterior dos quebramares destacados e um recuo relativamente acentuado da linha de costa na zona entre os quebramares. A cabeça da restinga sofreu também um recuo para o interior, ficando mais frágil na zona da cabeça e entre os quebramares. Neste caso, a análise dos resultados obtidos deve também ter em consideração as simplificações introduzidas no modelo físico, designadamente a direção de incidência da agitação marítima (neste caso fixa) e a variação, em patamares, do nível de água durante os testes realizados.

Os resultados experimentais obtidos neste estudo são de grande utilidade para a validação dos modelos numéricos, bem como para orientar o processo de conceção e projeto final das intervenções de proteção da restinga de Ofir, eventualmente com menor volumetria (mais otimizada), maior eficácia e uma melhor integração no ambiente natural.



Figura 171 – Configuração da restinga de Ofir no final das séries de testes realizadas para o cenário 2 (com as intervenções de proteção).

### 7.6.5. Análise dos levantamentos com sistema Laser Scanner

Neste trabalho recorreu-se ao Faro® Focus para obter levantamentos 3D de alta-resolução da batimetria dos fundos após cada série de testes (Tabela 25). Nesta secção apresentam-se resultados processados com recurso ao *software* CloudCompare, desenvolvido para análise de nuvens de pontos. De referir que cada um dos levantamentos obtidos possui em média mais de 100 000 000 pontos. O tratamento desses pontos exige uma elevada capacidade de processamento.

A comparação entre levantamentos será feita, sobretudo, nos testes realizados com as novas estruturas, tendo sido analisadas em mais detalhe as alterações morfológicas na embocadura do rio Cávado e junto aos dois quebramares destacados. Nas secções anteriores já se discutiram as principais transformações morfológicas observadas nos testes com e sem as estruturas de proteção propostas. A Figura 172 é referente ao início da fase de testes com as novas estruturas de proteção, que serve de referência. De seguida apresentam-se os levantamentos obtidos com o sistema laser scanner, em conjunto como uma figura onde se visualizam as alterações de fundos para cada série de testes.



**Figura 172 – Nuvem de pontos processada pelo CloudCompare (levantamento inicial - testes com estruturas).**

No final da primeira série de testes pode observar-se uma ligeira acreção no tardez dos 2 quebramares destacados e uma ligeira erosão no talude de barlar da restinga na zona das aberturas entre as novas estruturas (Figura 173). Para além disso, verificou-se a existência de erosão na zona mais a sul, mas, neste caso, possivelmente devido à presença da parede lateral do tanque de ondas - limite físico (efeito de laboratório que não representa a realidade).

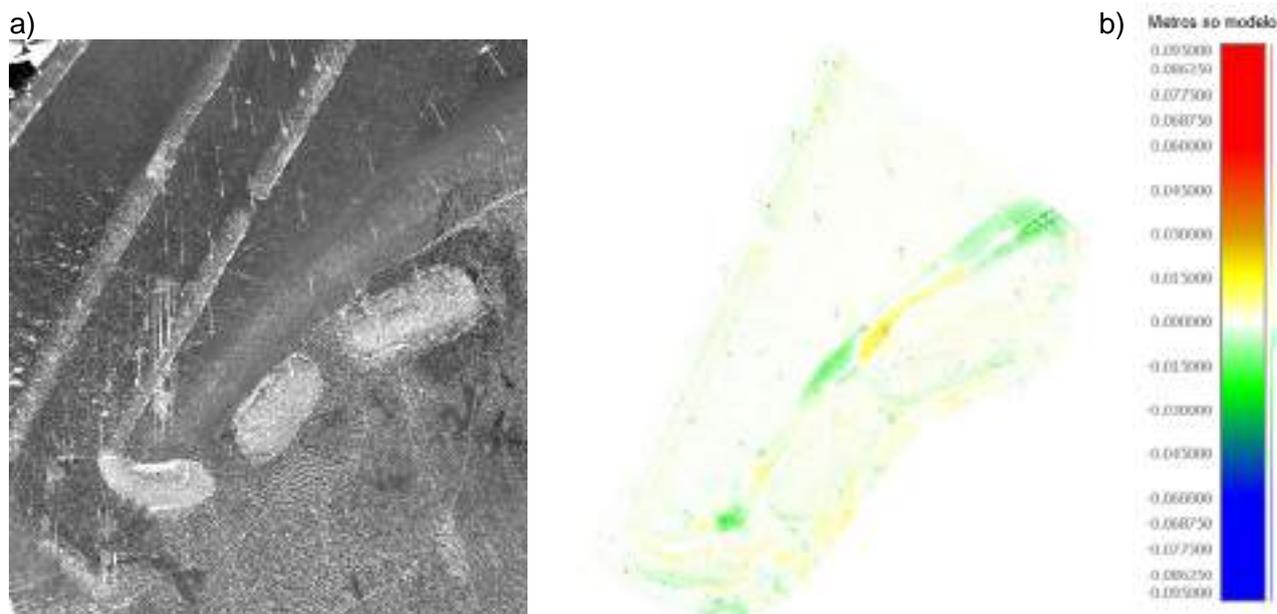


Figura 173 – Restinga no estado inicial (a) e alterações ocorridas entre a situação inicial e o final da primeira série de testes (b).

No final da segunda série de testes, devido ao aumento do nível de água e agravamento das condições de agitação marítima, verificou-se que os processos de erosão e acreção se intensificaram em relação à série anterior, precisamente nas zonas anteriormente identificadas (Figura 174). Observou-se também uma ligeira tendência para a cabeça da restinga recuar, tal como se tinha observado nos testes sem as novas estruturas de proteção, no entanto, com uma magnitude muito inferior.

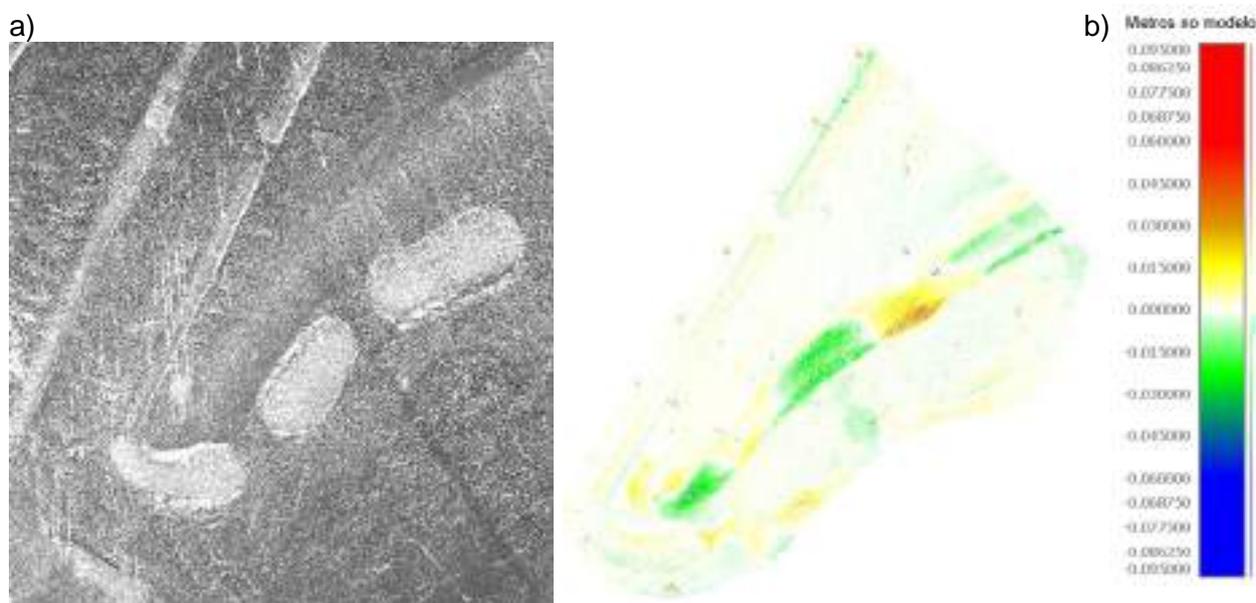


Figura 174 – Restinga antes do início da segunda série de testes (a) e alterações ocorridas durante a segunda série de testes (b).

A Figura 175 apresenta a variação morfológica ocorrida durante a série de testes 3. As alterações foram mais reduzidas que anteriormente, no entanto, a figura não é muito clara. Verifica-se que ocorrer acreção e erosão ligeira na zona mais a sul da restinga. As transformações na zona da cabeça da restinga vão de encontro ao observado, com erosão a barlamar e acreção a sotamar.

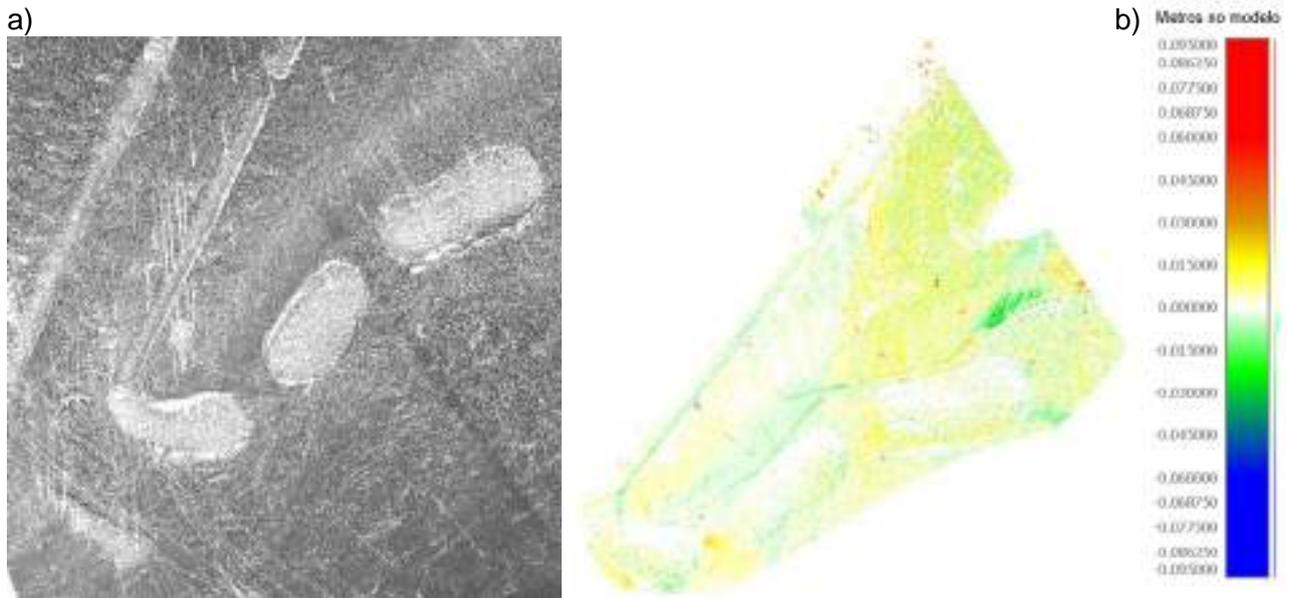


Figura 175 – Restinga antes da terceira série (a) e alterações ocorridas durante a terceira série de testes (b).

Entre a terceira e a quarta série (Figura 176), observa-se erosão no talude de barlamar da restinga, na zona de abertura entre quebramares, e acreção (mais significativa que anteriormente) na zona da cabeça e no tardez dos quebramares, formando um saliente (quase tómbolo). No corpo da restinga observa-se também a ocorrência de acreção, possivelmente potenciada pela existência do novo dique interior, que retém os sedimentos transportados pelas ondas que galgam a restinga.

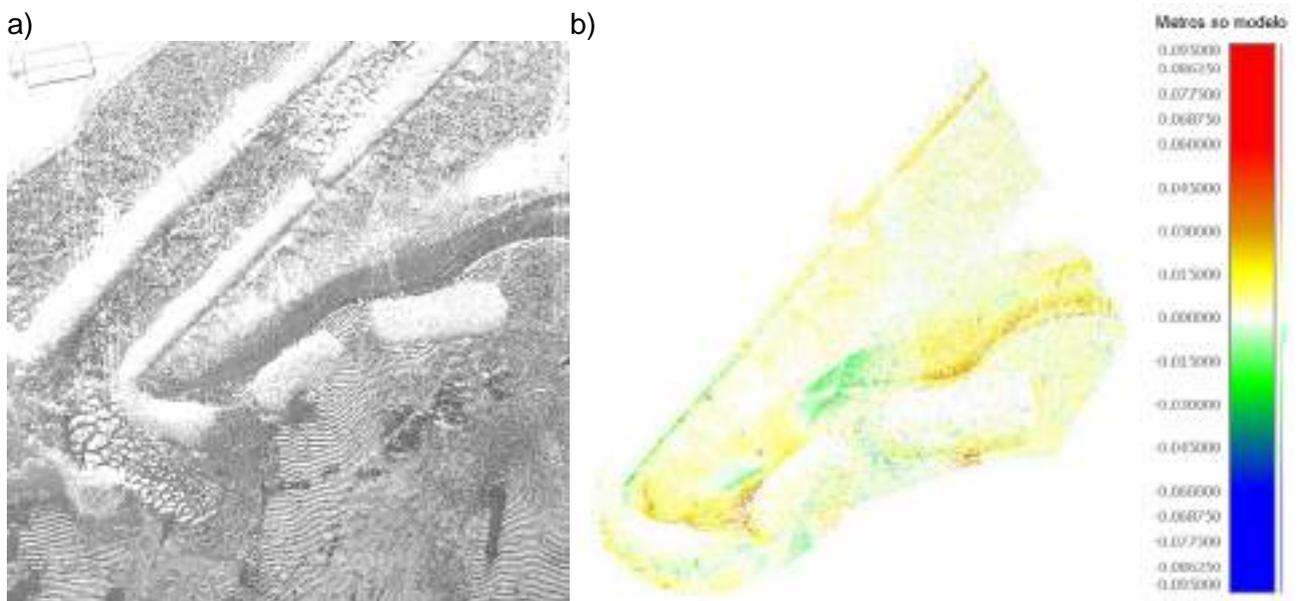


Figura 176 – Nuvem de pontos a) Restinga antes da última série; b) alterações ocorridas durante a quarta série de testes.

Na Figura 177 pode-se analisar a modificação da restinga ao longo das quatro série de testes. É visível o aumento de volume da restinga, a formação dos tómbolos no tardez dos quebramares destacados e a formação de baías nas zonas adjacentes às aberturas entre quebramares. Na Figura 178 é possível observar, com mais detalhe, as zonas de erosão e acreção.

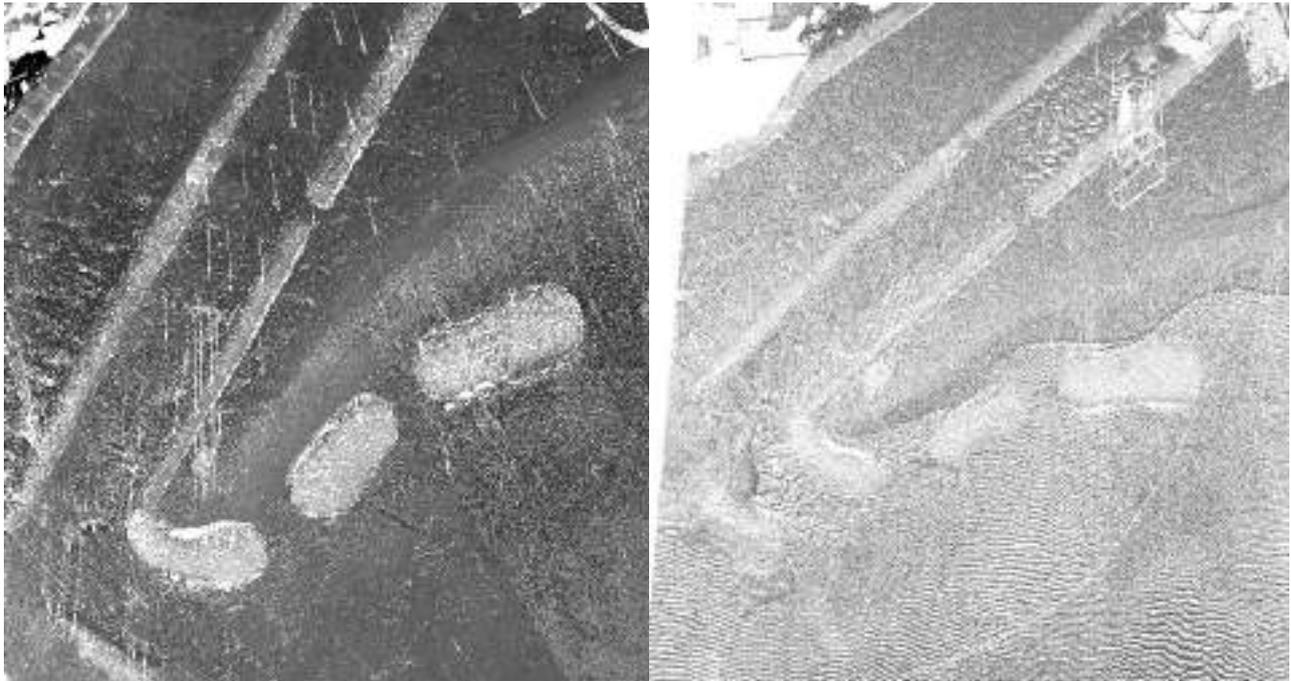


Figura 177 – Situação inicial da restinga (esquerda) e a final, após todos os testes da segunda fase (direita).

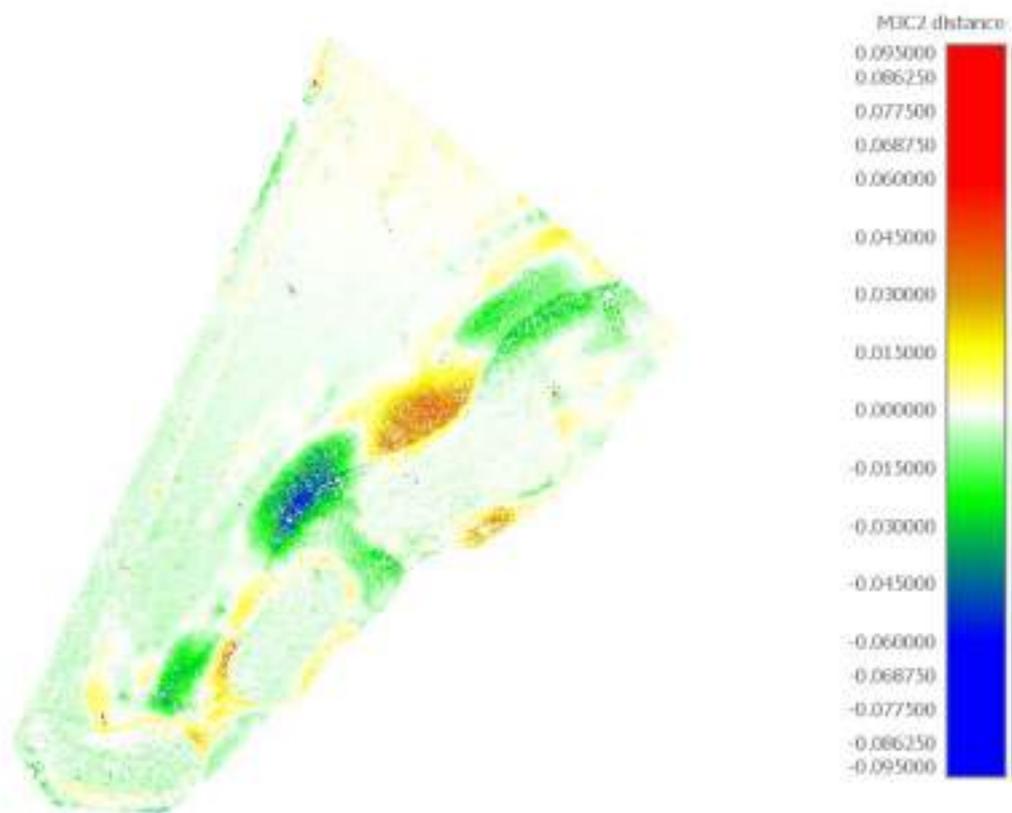
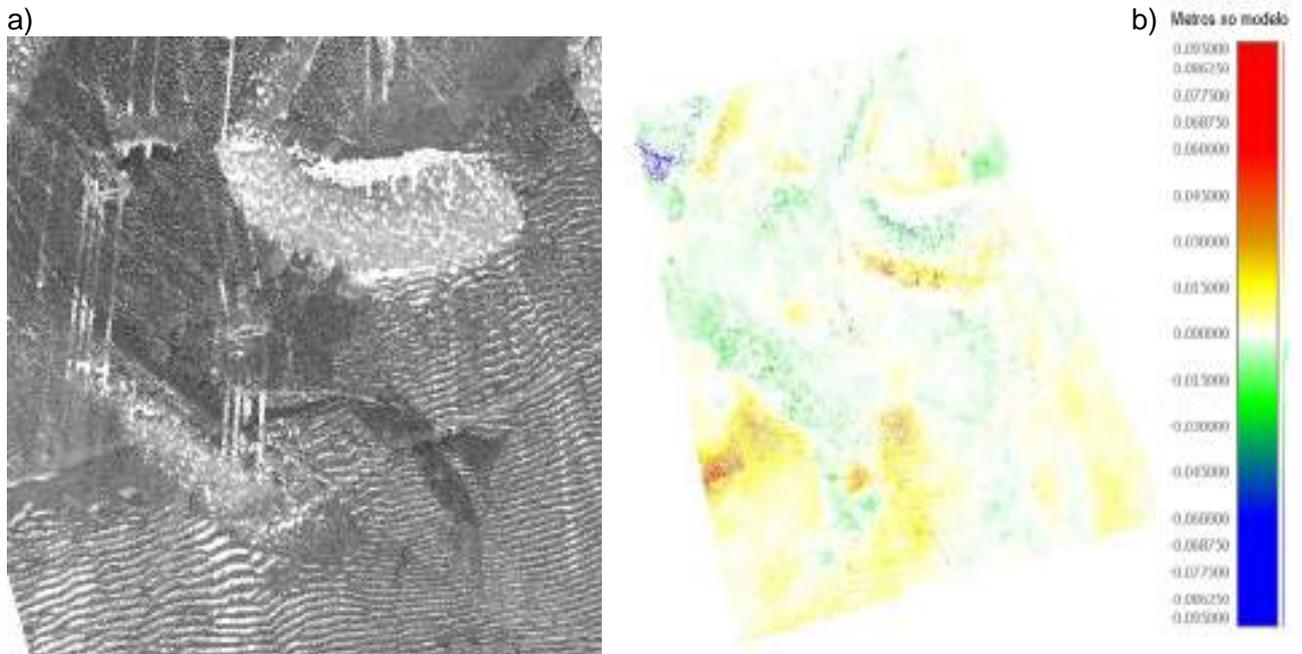


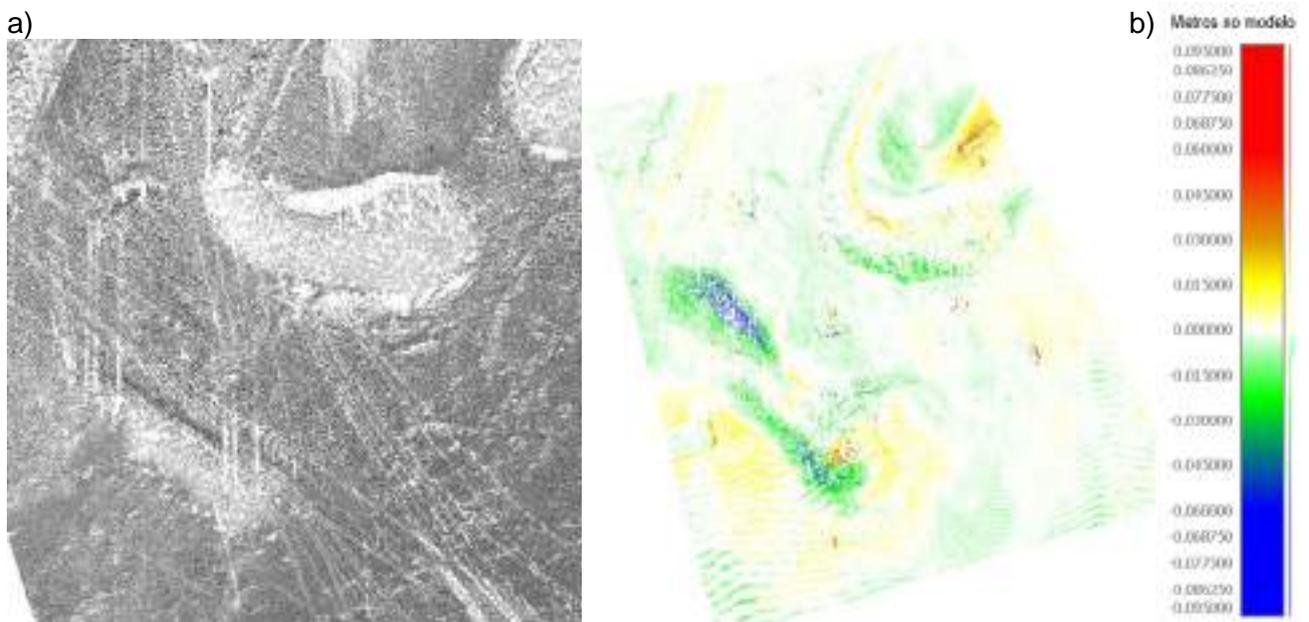
Figura 178 – Alterações totais da restinga durante as quatro séries de testes com as novas estruturas.

A Figura 179 apresenta a embocadura do rio Cávado no seu estado inicial e as transformações que sofre durante a primeira série de testes. Pode observa-se acreção na praia a norte da embocadura e também a barlar da estrutura que contorna a cabeça da restinga de Ofir.



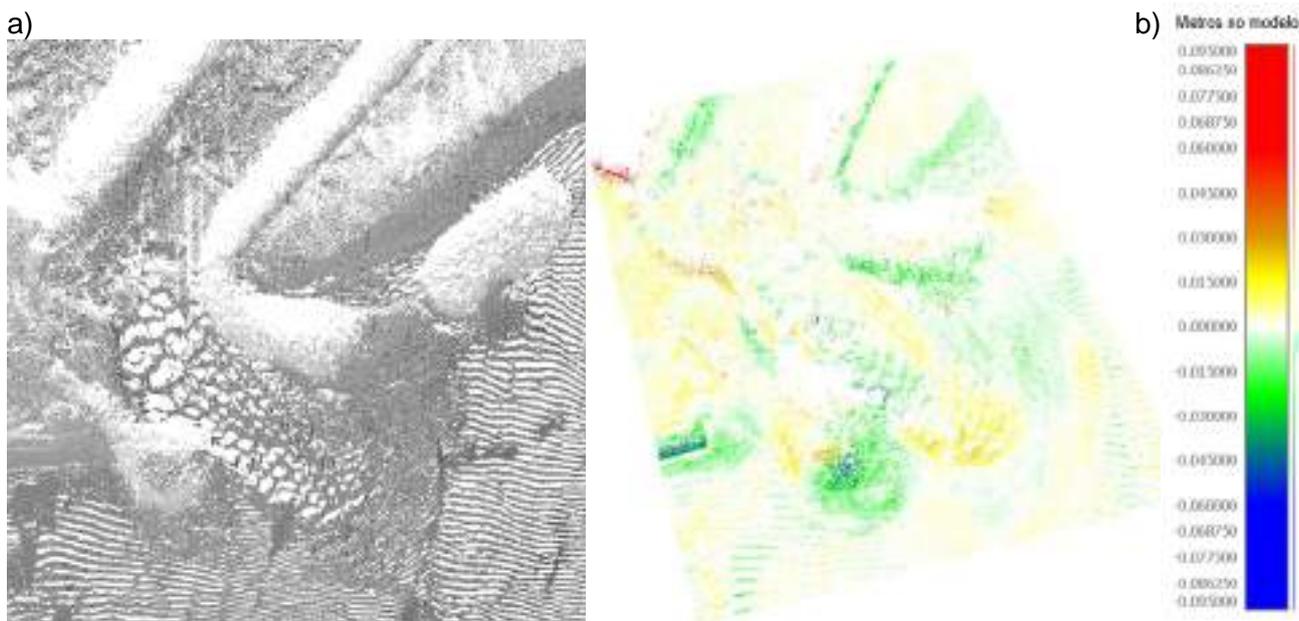
**Figura 179 – Embocadura no estado inicial (a) e alterações ocorridas na embocadura entre o estado inicial e o fim da primeira série de testes (b).**

Na Figura 180 pode observar-se que a embocadura sofre, durante a segunda fase de testes, erosão e a zona do “cotovelo” apresenta maior volume de sedimentos deslocados. Observa-se ainda uma ligeira acreção na praia a norte.



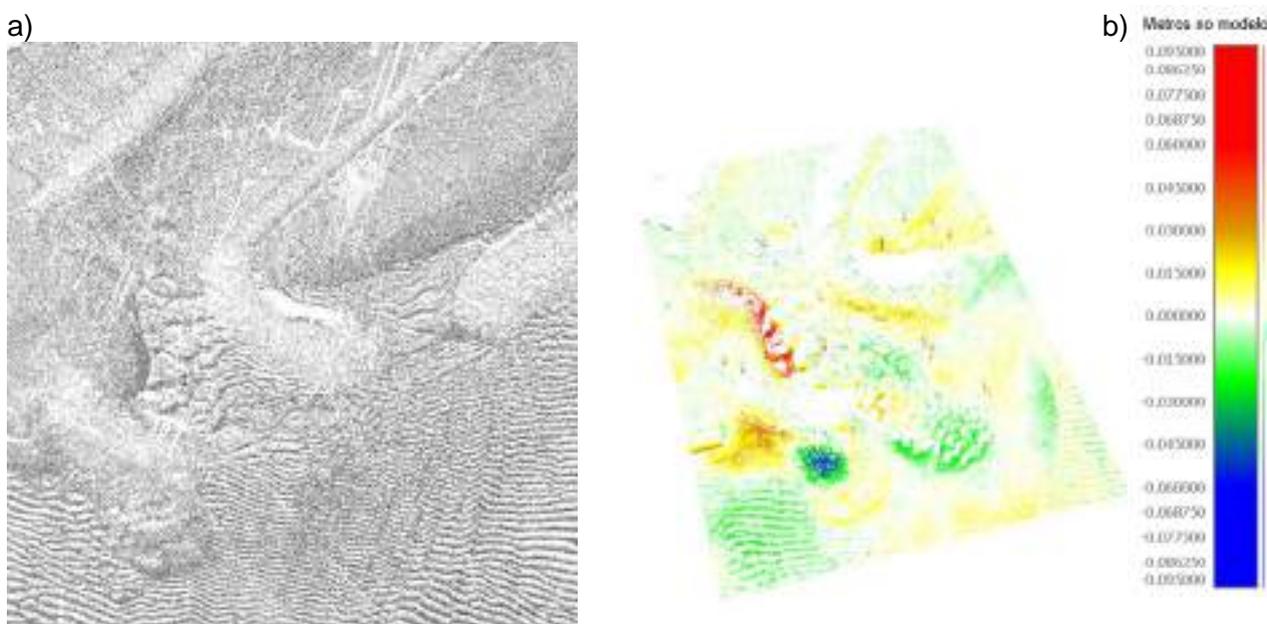
**Figura 180 – Embocadura antes da segunda série (a) e alterações observadas na embocadura durante a segunda série de testes (b).**

A Figura 181 apresenta as alterações no final da terceira série de testes. Verifica-se que ocorreu acreção na zona do “cotovelo” do canal de navegação, bem como o aparecimento, ainda que não muito evidente, de um banco de areia na saída da embocadura do rio Cávado. Na extremidade do esporão norte verifica-se erosão.



**Figura 181 – Embocadura antes da terceira série (a) e alterações na embocadura durante a terceira série de testes (b).**

A Figura 182 reproduz a dinâmica sedimentar durante a quarta série de testes. Na zona do “cotovelo” observa-se a ocorrência de acreção, possivelmente devido aos elevados caudais fluviais bem como ao caudal sólido introduzido (o mesmo se verificou na série anterior). Observa-se também acreção na praia a norte assim como a barlar da estrutura de proteção colocada a contornar a cabeça da restinga de Ofir. Continua a verificar-se erosão na cabeça do esporão norte.



**Figura 182 – Embocadura antes da última série (a) e alterações observadas na embocadura durante a última série de testes (b)**

Na Figura 183 pode-se observar a transformação total da embocadura do rio Cávado durante as quatro séries de testes. É bem visível a acreção junto ao “cotovelo” e alterações que ocorreram no próprio canal de navegação.

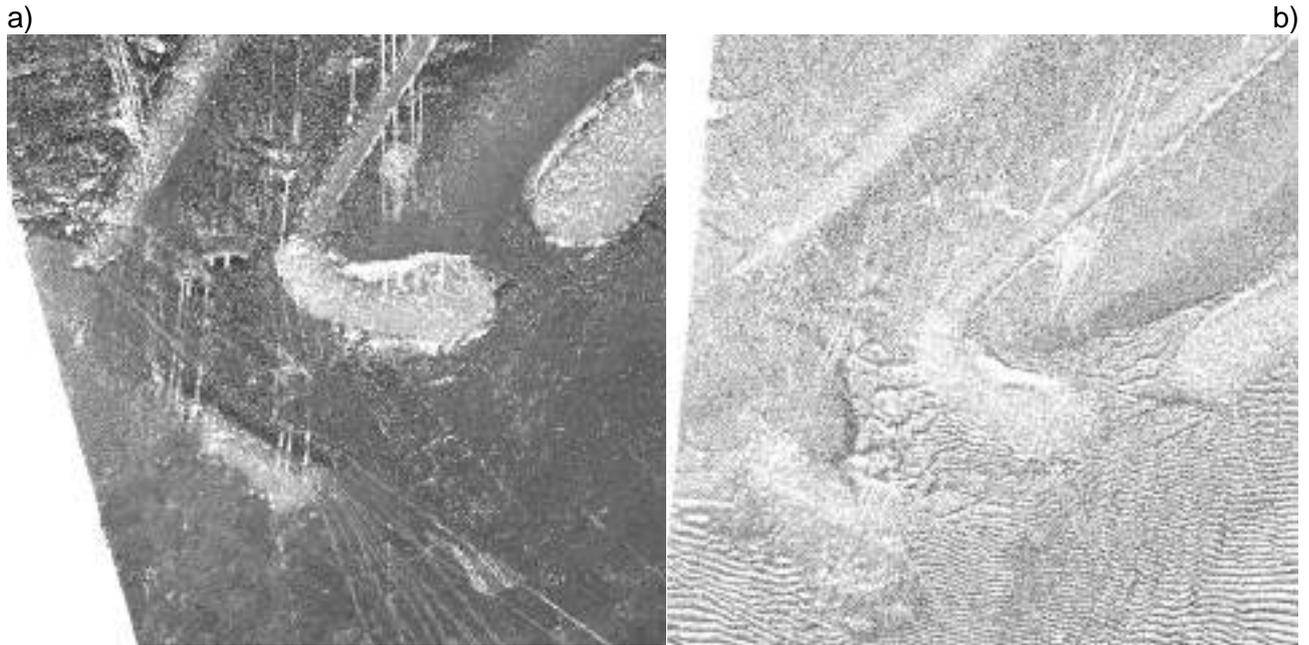


Figura 183 – Situação inicial da embocadura (a) e situação após todos os testes da segunda fase de testes (b).

A Figura 184 apresenta a variação total da batimetria dos fundos na zona da embocadura do rio Cávado durante as quatro séries de testes. Os resultados mostram zonas de grande acreção nomeadamente na zona do “cotovelo”, a barlamar do esporão norte e no talude interior do dique que contorna a extremidade da restinga. O interior do estuário apresenta uma ligeira erosão e a zona exterior da embocadura parece registar uma ligeira acreção.

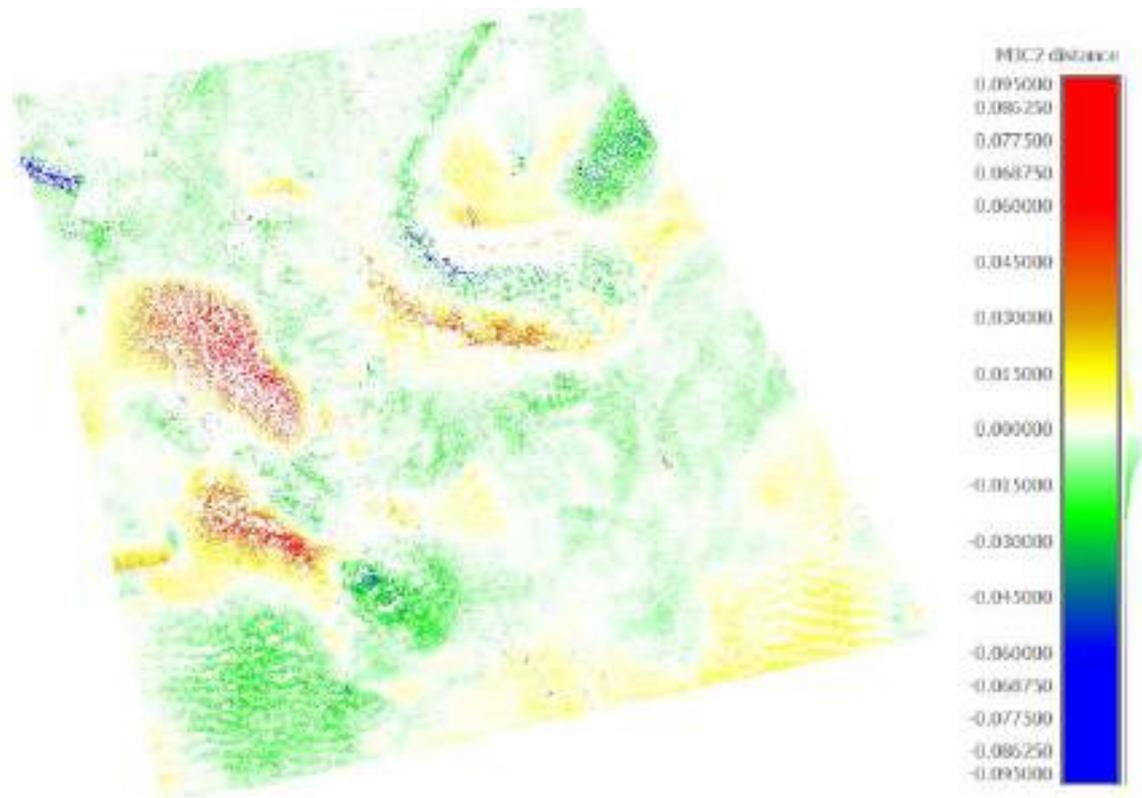


Figura 184 – Alterações na embocadura do rio Cávado entre o início e o fim das 4 séries de testes.

A Figura 185 apresenta a comparação entre o estado da restinga de Ofir no final das 4 séries de testes realizadas, quer para o cenário 1 – sem a intervenção de proteção, quer para o cenário 2 – com as novas estruturas. Em ambos os cenários observou-se a deposição de sedimentos na zona do “cotovelo”. Pode ainda concluir-se que o canal de navegação, também em ambas os cenários, aparenta ser perigoso de atravessar por uma embarcação, nomeadamente na zona da embocadura. Por outro lado, é também de salientar que o corpo da restinga, após a implementação das novas estruturas, se encontra mais robusto que para as condições atuais.

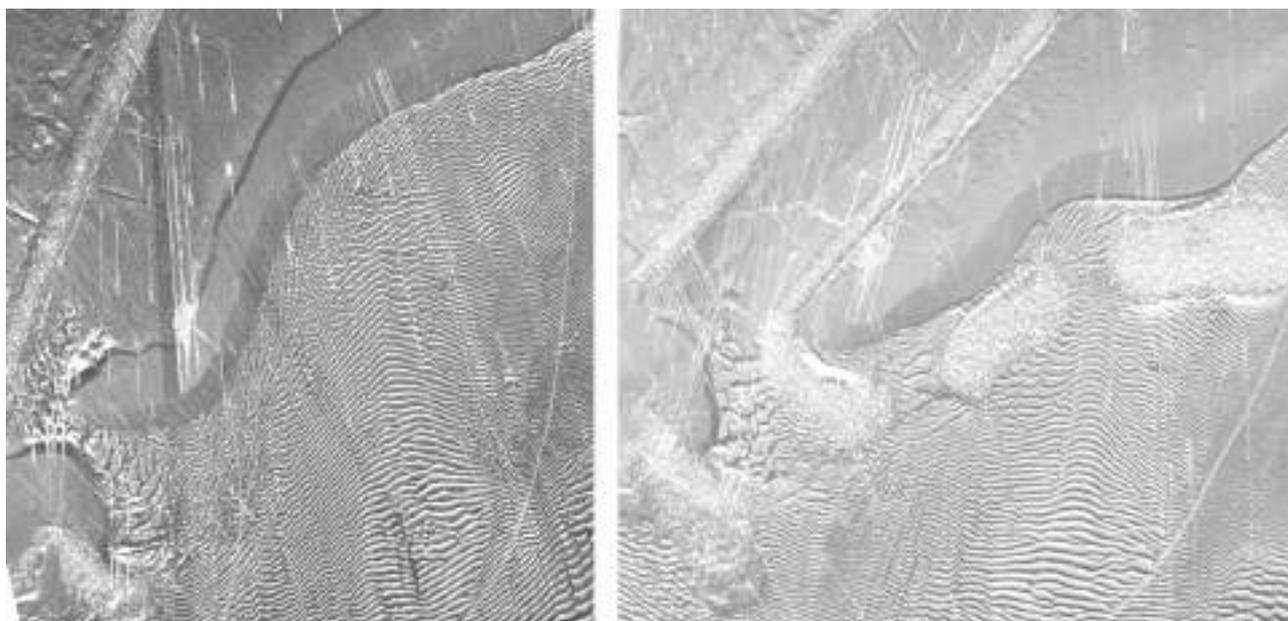


Figura 185 – Forma final da restinga de Ofir no final das quatro séries de testes: sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas de proteção (direita).

Por último apresenta-se a comparação entre a variação da restinga e da embocadura durante a primeira série de testes para os dois cenários analisados neste estudo experimental (Figura 186).

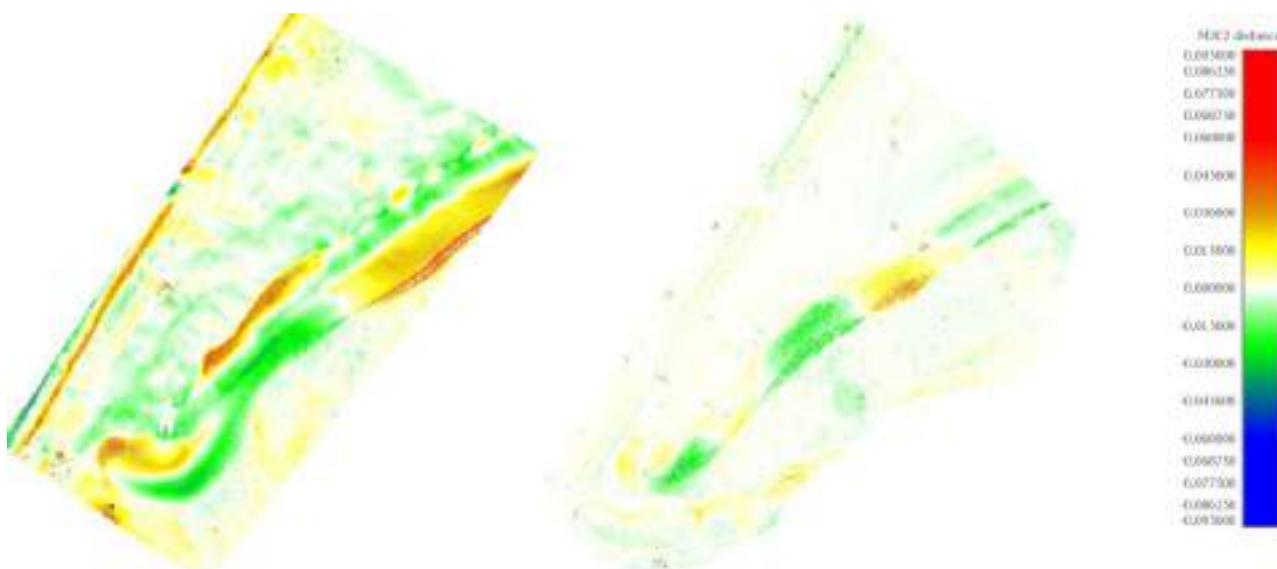


Figura 186 – Variação da restinga durante a primeira série de teste: sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas (direita).

Nos testes sem estruturas é bem visível o recuo da cabeça e da parte central do corpo da restinga, com acreção a sotamar e erosão a barlamar. Na parte mais a sul da restinga observa-se acreção a barlamar.

Nos testes com estruturas, o talude interior da restinga parece não sofrer alterações muito significativas. O talude de barlamar sofre erosão na zona de abertura entre os quebramares destacados e acreção na zona protegida pelos mesmos. Nestes testes observou-se, em geral, um menor volume de sedimentos deslocados nesta zona.

Na Figura 187 apresenta-se a comparação das alterações na embocadura do rio Cávado para os dois cenários estudados. Nos testes sem estruturas a erosão junto ao “cotovelo” é menor e, a barlamar do esporão norte, a acreção é mais intensa.

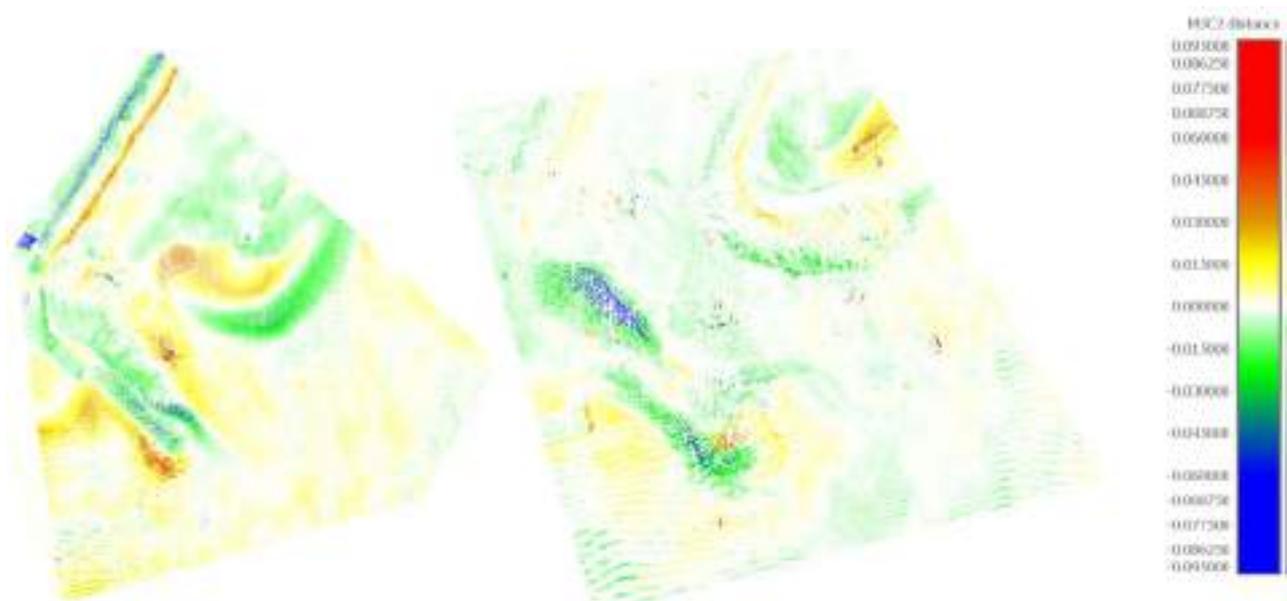


Figura 187 – Variação da embocadura durante a primeira série de testes: sem estruturas (esquerda) e com as novas estruturas (direita).

### 7.7. Conclusões e considerações finais

Neste trabalho foi efetuado o estudo da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado. Para o efeito foi construído no tanque de ondas da FEUP um modelo físico dessa área à escala geométrica 1/100 e submetido a diferentes condições de agitação marítima e de escoamento fluvial. Por último, analisou-se o comportamento morfodinâmico da restinga de Ofir para a situação atual (*i.e.*, sem estruturas adicionais de proteção) e após a implementação de um conjunto de estruturas de proteção costeira proposto no âmbito deste trabalho.

Como era de esperar, a restinga de Ofir evoluiu de formas distintas. Nas séries de testes sem estruturas a cabeça da restinga sofreu uma translação para o interior do estuário e no tronco da restinga observou-se a formação de uma “baía”. Esta evolução dita “natural” da restinga terá sido amplificada pelo facto de a direção da agitação marítima ter sido fixa durante todos os testes (WNW). Esta situação não se verifica na realidade, no entanto, devido à elevada frequência de ocorrência no local de agitação marítima com essa direção, em parte devido ao fenómeno da refração, que tende a rodar uns graus para sul os rumos NW e NNW, é uma evolução morfológica expectável, se se colocar a restinga com a forma inicial prevista neste trabalho (coroamento à cota + 8.00 m ZH).

Nas séries de testes sem estruturas, observaram-se ainda vários episódios de galgamentos da restinga. Contudo, a sua função de proteção em relação à agitação marítima parece não ter ficado comprometida (para as condições testadas). É importante frisar que a eventual continuação dos testes por mais tempo poderia levar ao seu rompimento. Em relação à embocadura, as transformações observadas em modelo físico representam bem o que acontece na realidade, nomeadamente no que concerne às alterações da forma da cabeça da restinga quando submetida a solicitações extremas do ambiente marítimo.

Nos testes realizados para o cenário 2 (com estruturas adicionais de proteção), verificou-se que a forma da restinga de Ofir se mantinha mais estável. No entanto, a embocadura apresentou alguns problemas, nomeadamente acreção excessiva na zona do “cotovelo”, algo que também tinha ocorrido nos testes realizados sem as novas estruturas de proteção.

O coroamento dos dois quebramares destacados propostos neste trabalho foi fixado à cota +4.00 m Z.H. de forma a ficarem praticamente submersos para os níveis de água mais elevados. Numa fase posterior de refinamento desta solução (e.g., em fase de projeto de execução), a cota de coroamento poderá ter de ser reajustada, procurando-se uma solução equilibrada entre o nível de proteção oferecido pelas duas estruturas e o impacto visual. De referir ainda que embora nas fotografias do modelo físico as estruturas em enrocamento propostas sejam claramente visíveis, tal deve-se, sobretudo, à coloração dos blocos de enrocamento e a transparência da água usada no tanque de ondas. Com efeito, após implementação, estas estruturas teriam um impacto visual muito mais reduzido, mesmo para os níveis de água mais reduzidos, próximos da baixa-mar de águas vivas.

O dique longitudinal interior, paralelo ao atualmente existente, parece não introduzir alterações muito significativas na hidrodinâmica do estuário. De facto, o objetivo desta estrutura é assegurar a estabilidade do talude interior da restinga, uma vez que este sofre bastantes transformações, nomeadamente devido aos galgamentos, bem como evitar o assoreamento do canal de navegação. Com a introdução dos dois quebramares destacados, esses galgamentos reduzem-se substancialmente. A presença do novo dique parece também ajudar a manter a navegabilidade no canal central e a orientar as correntes.

O estudo experimental das estruturas propostas para a proteção da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado contemplou a sua componente “pesada”, pois é aquela que mais influí na hidrodinâmica e na morfodinâmica locais. No entanto, mesmo essa componente foi trabalhada de forma a que os impactos fossem mínimos e houvesse uma boa integração das estruturas no local, considerado de grande valor ambiental e paisagístico.

Assim, recorreu-se, como referido, a estruturas de coroamento a cota reduzida e com taludes de baixa inclinação (aproximadamente 1/10 a 1/15), materializados por blocos de enrocamento desarrumados, o que confere às estruturas propostas um aspeto mais natural, para além das vantagens conhecidas do ponto de vista hidráulico (maior dissipação de energia). Esses taludes apresentam características que favorecem a sua colonização por plantas e por outros organismos marinhos, permitindo assim constituir, no curto prazo, o que atualmente se designa por quebramares vivos, ou seja, uma solução mais inspirada na natureza.

[1] GTL, 2014. Gestão da Zona Costeira - O Desafio da Mudança, Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, Dezembro de 2014.

## 8. CONCLUSÕES

A hidrodinâmica e a dinâmica sedimentar num estuário e na zona costeira adjacente são extremamente complexos, devido às características hidrodinâmicas e morfológicas desses sistemas. Deste modo, este estudo compreendeu, inicialmente, uma análise da evolução história e o diagnóstico da situação atual, bem como a análise de casos de estudo nacionais e internacionais com características semelhantes às da restinga de Ofir. Esse trabalho depois serviu de base à definição de propostas de intervenção tendo em vista o reforço da restinga e da barra do rio Cávado.

Dada a complexidade dos processos costeiros e estuarinos, foi necessário recorrer, numa fase posterior, à aplicação conjunta de modelação numérica e de modelação física, não apenas para a caracterização da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar da restinga e do estuário do rio Cávado para as condições atuais, mas também para avaliar a eficácia das intervenções propostas para a melhoria das condições atualmente existentes.

Os modelos físicos são versões a escala reduzida dos sistemas em estudo – o protótipo. Os resultados obtidos com esses modelos, depois de transpostos para o protótipo, permitem tirar conclusões sobre as suas dinâmicas, bem como obter resultados para a validação dos modelos numéricos.

As simulações numéricas realizadas com o *software* Delft3D, para os cenários sem e com as estruturas de proteção propostas para a restinga de Ofir e a embocadura do rio Cávado, permitiram, de uma forma geral, analisar as principais tendências em termos de hidro e morfodinâmica local. Numa fase inicial, os resultados numéricos foram validados com dados do protótipo (trajetórias de *drifters* lançados no local) e com resultados do estudo experimental realizado no tanque de ondas da FEUP.

Os resultados numéricos obtidos para as condições atuais, *i.e.*, ainda sem as intervenções propostas, evidenciaram, para as condições testadas: o estreitamento e assoreamento (diminuição da profundidade de água) do canal de navegação e o movimento de translação da extremidade norte da restinga para o interior do canal de navegação. De referir que após uma análise pormenorizada das principais alterações morfológicas ficou comprovada a necessidade de proteger o intradorso da restinga de Ofir. De facto, nas atuais condições, a realização de dragagens periódicas no canal de navegação é essencial para garantir a profundidade mínima necessária à navegabilidade nesse canal e assegurar o acesso aos portos de recreio e de pesca localizados no interior do estuário.

Após a implementação das novas estruturas de proteção costeira, nomeadamente um dique longitudinal e dois quebramares destacados, foi possível concluir que existe uma tendência para que os sedimentos sejam transportados para a zona de sotamar dos quebramares destacados. Assim, ao longo do tempo, prevê-se que exista um reforço sedimentar da restinga de Ofir. Por outro lado, verificou-se que o dique longitudinal conseguiu evitar que a restinga se deslocasse para o interior do canal de navegação. Para além disso, a profundidade do canal de navegação ao longo das simulações manteve-se relativamente constante. Por fim é importante referir que para as condições testadas a principal entrada de sedimentos na zona a sotamar dos quebramares destacados ocorre a norte, entre o dique longitudinal e o primeiro quebramar destacado.

Relativamente aos resultados finais das alterações morfológicas de cada série de simulações numéricas, é possível concluir que as tendências observadas foram qualitativamente idênticas às observadas no estudo em modelo físico realizado no Laboratório de Hidráulica da FEUP. Em síntese, o estudo permitiu obter uma boa avaliação da resposta morfodinâmica da restinga de Ofir a eventos extremos, sem e com a implementação de novas intervenções de proteção costeira.

O estudo experimental envolveu a construção, no tanque de ondas da FEUP, de um modelo físico da restinga e do estuário do rio Cávado, à escala geométrica 1/100, que foi depois testado para diferentes condições de agitação marítima, níveis de água e caudais fluviais. Por fim, analisou-se o comportamento morfodinâmico da restinga de Ofir para a situação atual (*i.e.*, sem estruturas adicionais de proteção) e após implementação das estruturas de proteção costeira propostas no âmbito deste trabalho. Pretendeu-se assim, em ambiente controlado, estudar o comportamento e as dinâmicas desse complexo sistema costeiro e estuarino, em particular face a eventos extremos, assim como analisar a eficácia das soluções propostas.

Como era de esperar, a restinga de Ofir evoluiu de formas distintas nos cenários com e sem as estruturas propostas. Nas séries de testes sem as novas estruturas, a cabeça da restinga sofreu uma translação para o interior do estuário e o tronco adquiriu uma configuração curvilínea. Esta evolução “natural” terá sido, em parte, potenciada pelo facto de a direção da agitação marítima ter sido fixa (rumo WNW). Nestas séries de testes observaram-se ainda vários episódios de galgamentos da restinga embora, a sua função de proteção, em relação às ondas, não tenha ficado comprometida. No entanto, é importante referir que a eventual continuação dos testes por mais tempo poderia ter levado ao seu rompimento.

Em relação à embocadura, as transformações observadas no modelo físico representam o que acontece na realidade, nomeadamente no que concerne às modificações da forma da cabeça da restinga quando submetida a solicitações extremas do ambiente marítimo. O estudo experimental mostrou também a dinâmica da restinga aquando da ocorrência de eventos extremos, e que a recuperação deste sistema, após os eventos extremos, é consideravelmente mais lenta.

Nos testes realizados para o cenário 2 (com estruturas adicionais de proteção), verificou-se que a forma da restinga de Ofir se mantinha mais estável. No entanto, a zona da embocadura continuou a apresentar alguns problemas, ainda que de menor magnitude que os observados para o cenário 1, nomeadamente uma acumulação significativa de sedimentos na margem direita da curva a 90°, devido às características do escoamento no local. Estas situações são frequentes e bem conhecidas nos escoamentos fluviais, nos quais se verifica uma tendência para a acumulação de sedimentos na margem exterior das curvas.

O coroamento dos dois quebra-mares destacados propostos neste trabalho foi fixado à cota +4.00 m Z.H. de forma a ficarem praticamente submersos para os níveis de água mais elevados. Numa fase posterior de refinamento desta solução (*e.g.*, em fase de projeto de execução), a cota de coroamento poderá ter de ser reajustada, procurando-se uma solução equilibrada entre o nível de proteção oferecido pelas duas estruturas e o impacto visual.

De referir que embora nas fotografias do modelo físico as estruturas em enrocamento propostas sejam claramente visíveis, tal deve-se, sobretudo, à coloração dos blocos de enrocamento e à transparência da água utilizada no tanque de ondas. De facto, após implementação, estas estruturas teriam um impacto visual reduzido, mesmo para os níveis de água mais reduzidos, próximos da baixa-mar de águas vivas.

O dique longitudinal interior, paralelo ao atualmente existente, parece não introduzir alterações muito significativas na hidrodinâmica do estuário. De facto, o objetivo desta estrutura é assegurar a estabilidade do talude interior da restinga, uma vez que este sofre bastantes transformações, nomeadamente devido aos galgamentos, bem como evitar o assoreamento do canal de navegação. Com a introdução dos dois quebra-mares destacados, esses galgamentos reduzem-se significativamente. A presença do novo dique parece também ajudar a manter a navegabilidade no canal central e a orientar as correntes.

O estudo experimental das estruturas propostas para a proteção da restinga de Ofir e do estuário do rio Cávado contemplou a sua componente “pesada”, pois é aquela que mais influí na hidrodinâmica e na morfodinâmica locais. No entanto, mesmo essa componente foi trabalhada de forma a que os impactos fossem mínimos e houvesse uma boa integração das estruturas no local, considerado de grande valor ambiental e paisagístico.

Assim, recorreu-se, como referido, a estruturas de coroamento a cota reduzida e com taludes de baixa inclinação (aproximadamente 1/10 a 1/15), materializados por blocos de enrocamento desarrumados, o que confere às estruturas propostas um aspeto mais natural, para além das vantagens conhecidas do ponto de vista hidráulico (maior dissipação de energia). Esses taludes apresentam características que favorecem a sua colonização por plantas e por outros organismos marinhos, permitindo assim constituir, no curto prazo, o que atualmente se designa por quebra-mares vivos, ou seja, uma solução inspirada na natureza.

As intervenções de proteção propostas e estudadas neste trabalho terão de ser reequacionadas, numa futura fase de projeto, de forma a otimizar a sua forma, posicionamento e volumetria, tendo naturalmente em conta as condições existentes nessa data (e.g., batimetria dos fundos, configuração e robustez da restinga), permitindo alcançar eficazmente os objetivos estabelecidos, eventualmente melhorando ainda mais a integração das mesmas no ambiente natural.

# ANEXO A

## ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA



Nas Figuras A1 a A6 é apresentada a evolução da posição da linha de costa na zona da restinga de Ofir, Esposende, ao longo do tempo.

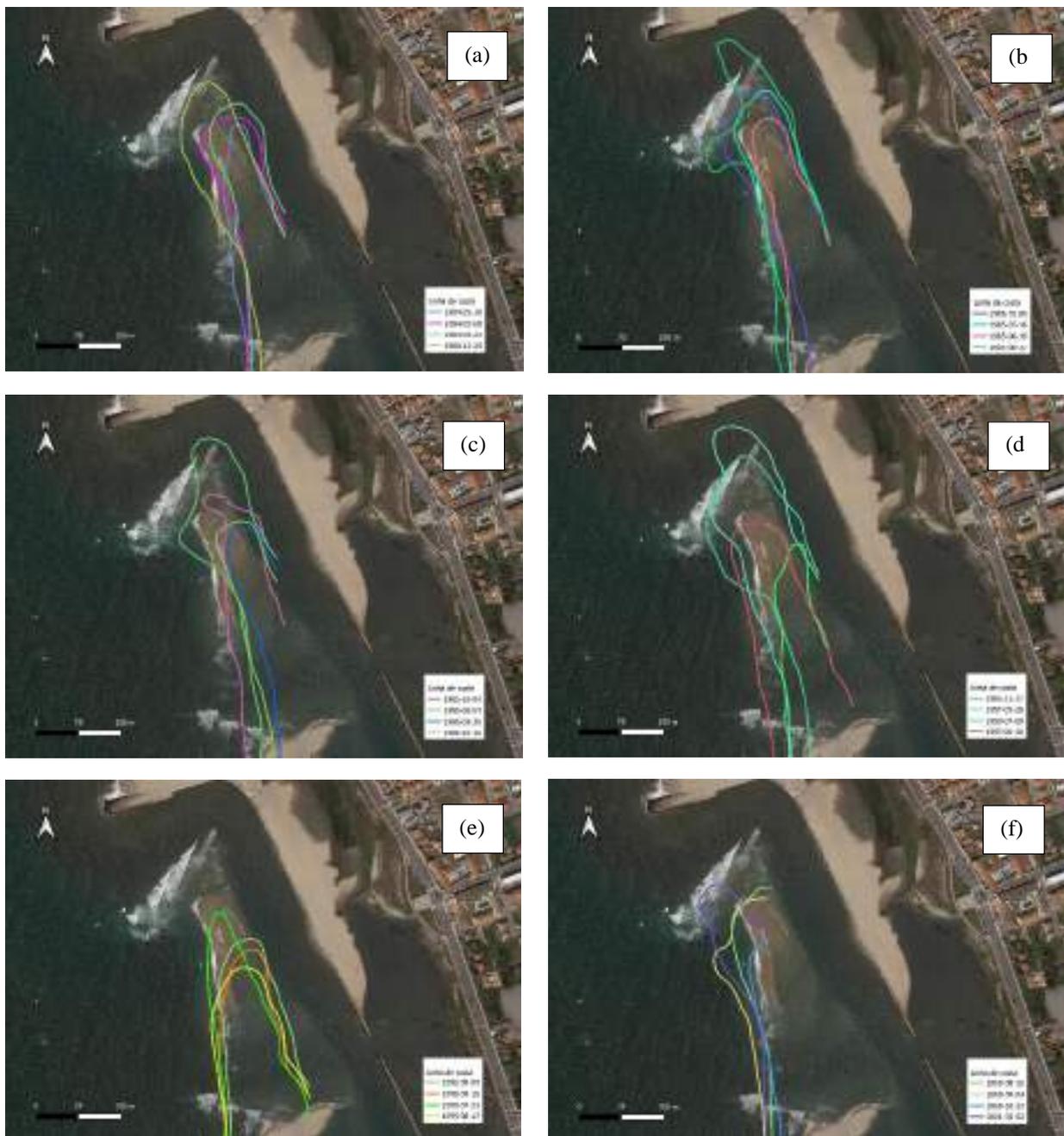
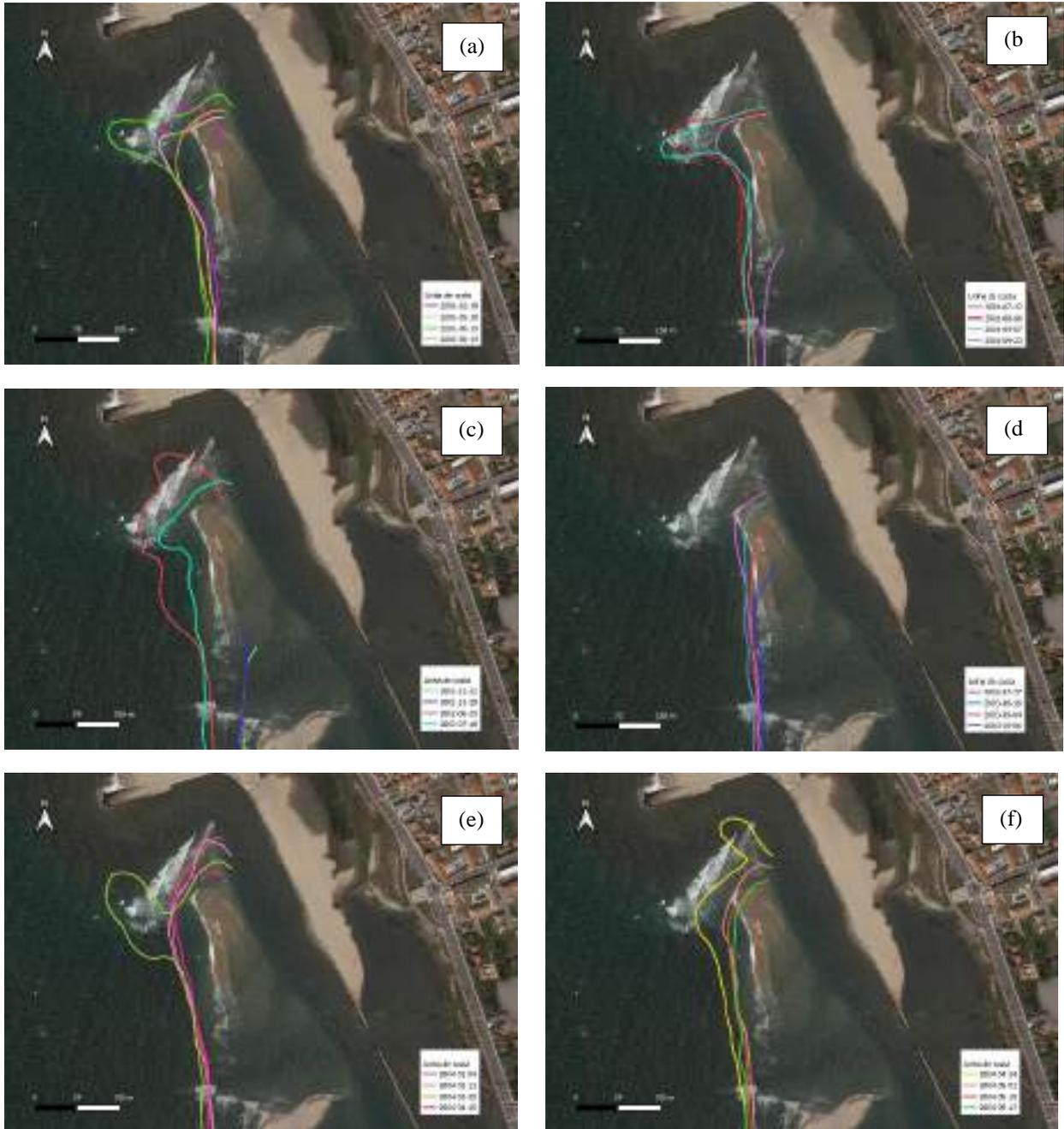


Figura A.1 – Representação da linha de costa entre: (a) 10/05/1984 e 29/12/1984; (b) 05/01/1985 e 17/08/1985; (c) 04/10/1985 e 16/10/1986; (d) 17/11/1985 e 10/06/1996; (e) 09/09/1996 e 17/08/1999 e (f) 26/08/2000 e 02/02/2001.



**Figura A.2 – Representação da linha de costa entre (a) 18/02/2001 e 19/06/2001; (b) 12/07/2001 e 23/09/2001; (c) 12/12/2001 e 18/07/2003; (d) 27/07/2003 e 05/10/2003; (e) 04/02/2004 e 15/04/2004 e (f) 24/04/2004 e 17/05/2004.**

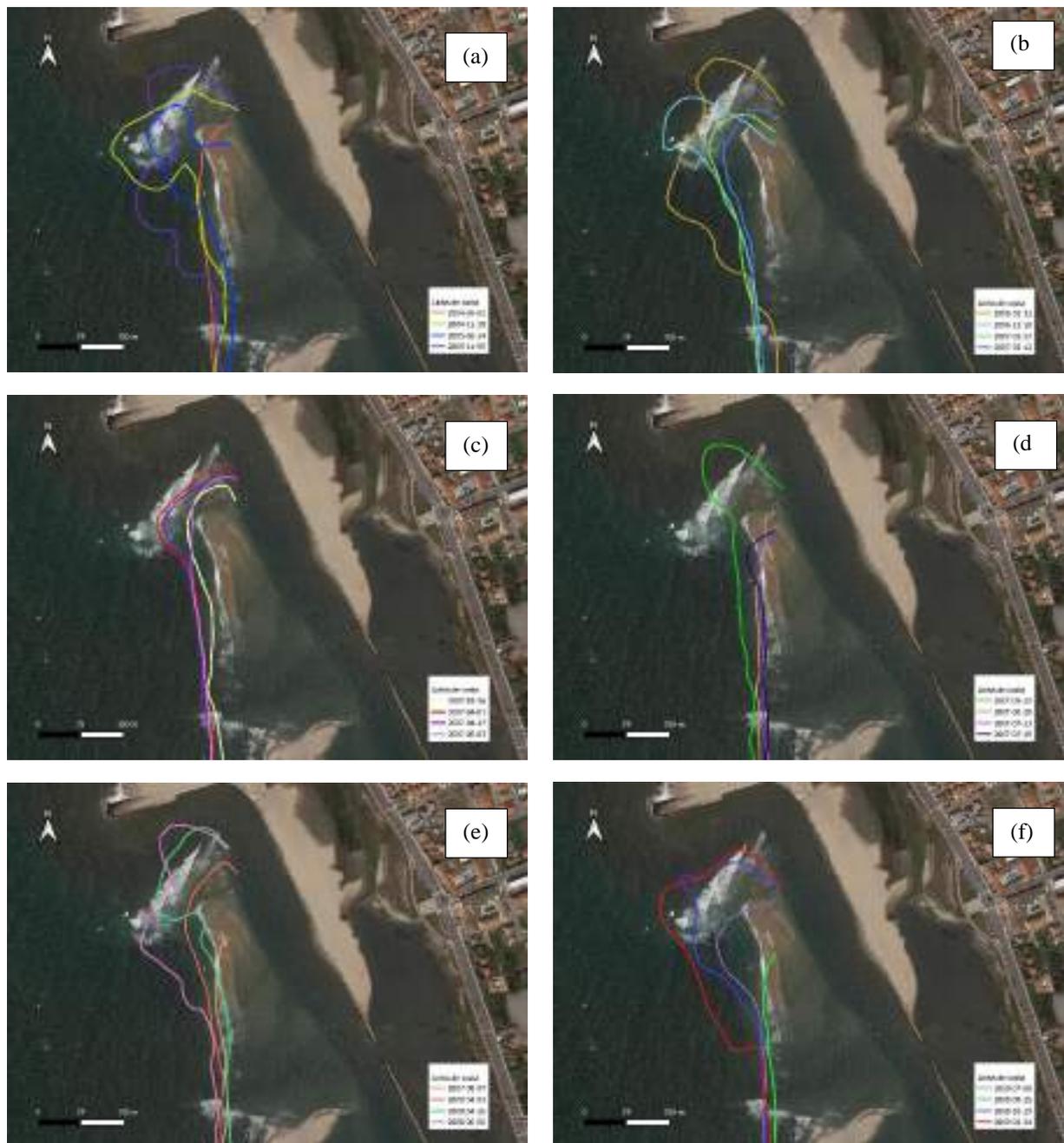
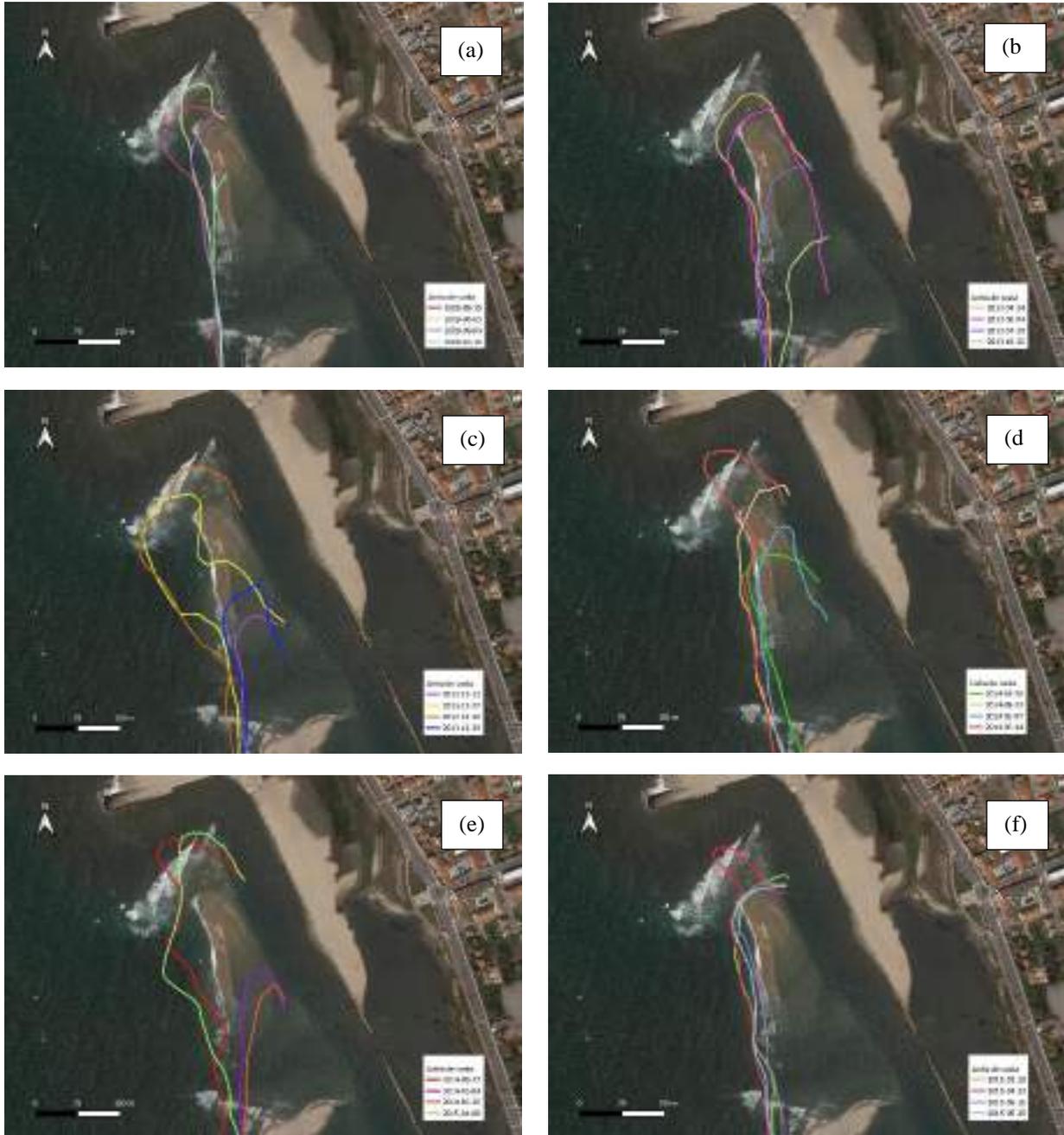


Figura A.3 – Representação da linha de costa entre: (a) 02/06/2004 e 05/11/2005; (b) 31/01/2006 e 12/02/2007; (c) 16/03/2007 e 03/05/2007; (d) 19/05/2007 e 29/07/2007; (e) 07/08/2007 e 06/06/2008 e (f) 08/07/2008 e 24/02/2009.



**Figura A.4 – Representação da linha de costa entre: (a) 15/05/2009 e 15/10/2009; (b) 24/04/2013 e 26/10/2013; (c) 11/11/2013 e 29/12/2013; (d) 10/03/2014 e 14/06/2014; (e) 27/09/2014 e 08/01/2015 e (f) 18/02/2015 e 25/05/2015.**

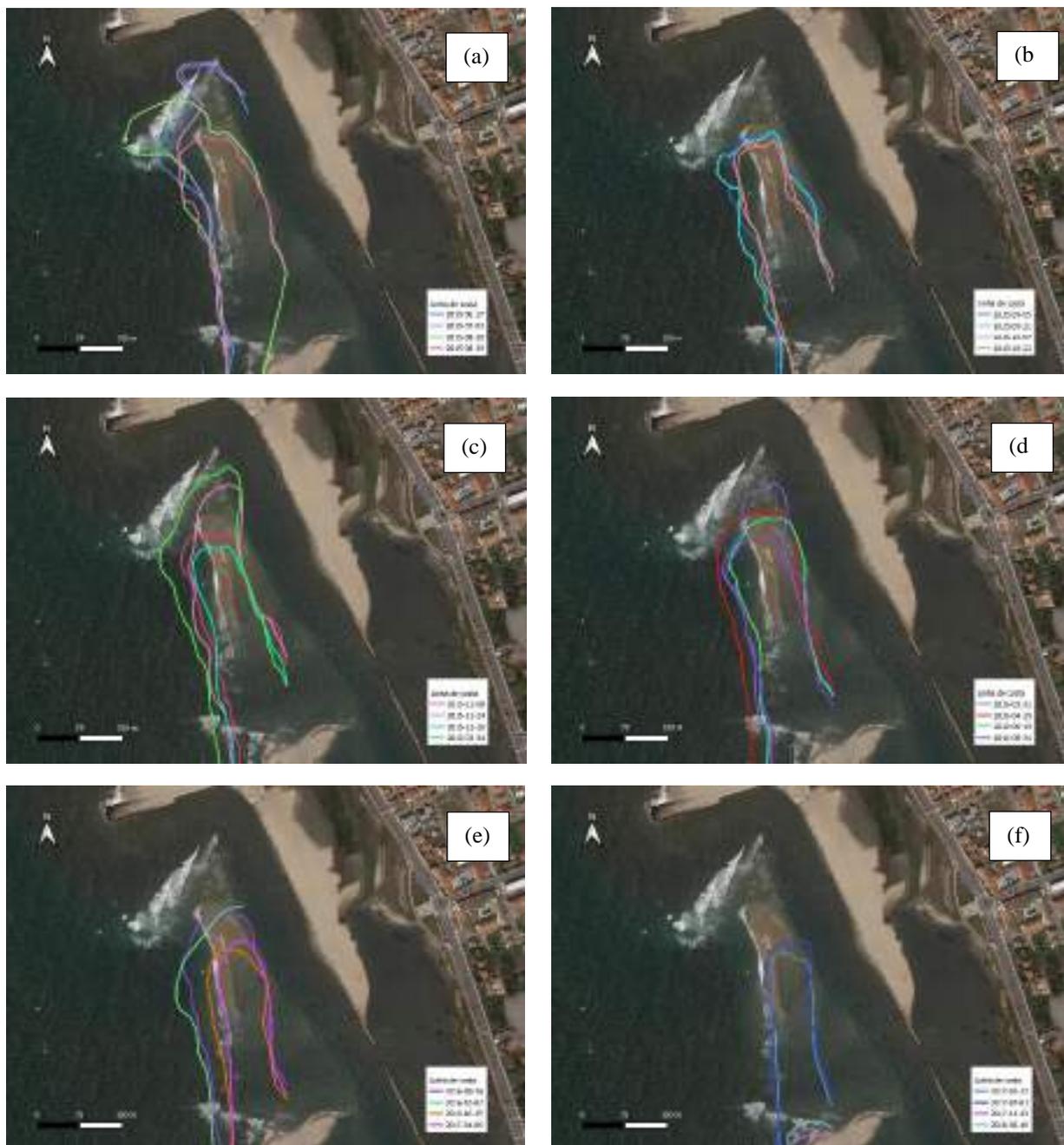


Figura A.5 – Representação da linha de costa entre: (a) 17/06/2015 e 29/08/2015; (b) 05/09/2015 e 23/10/2015; (c) 08/11/2015 e 24/03/2016; (d) 31/03/2016 e 31/08/2016; (e) 16/09/2016 e 06/01/2017 e (f) 22/01/2017 e 10/02/2018.

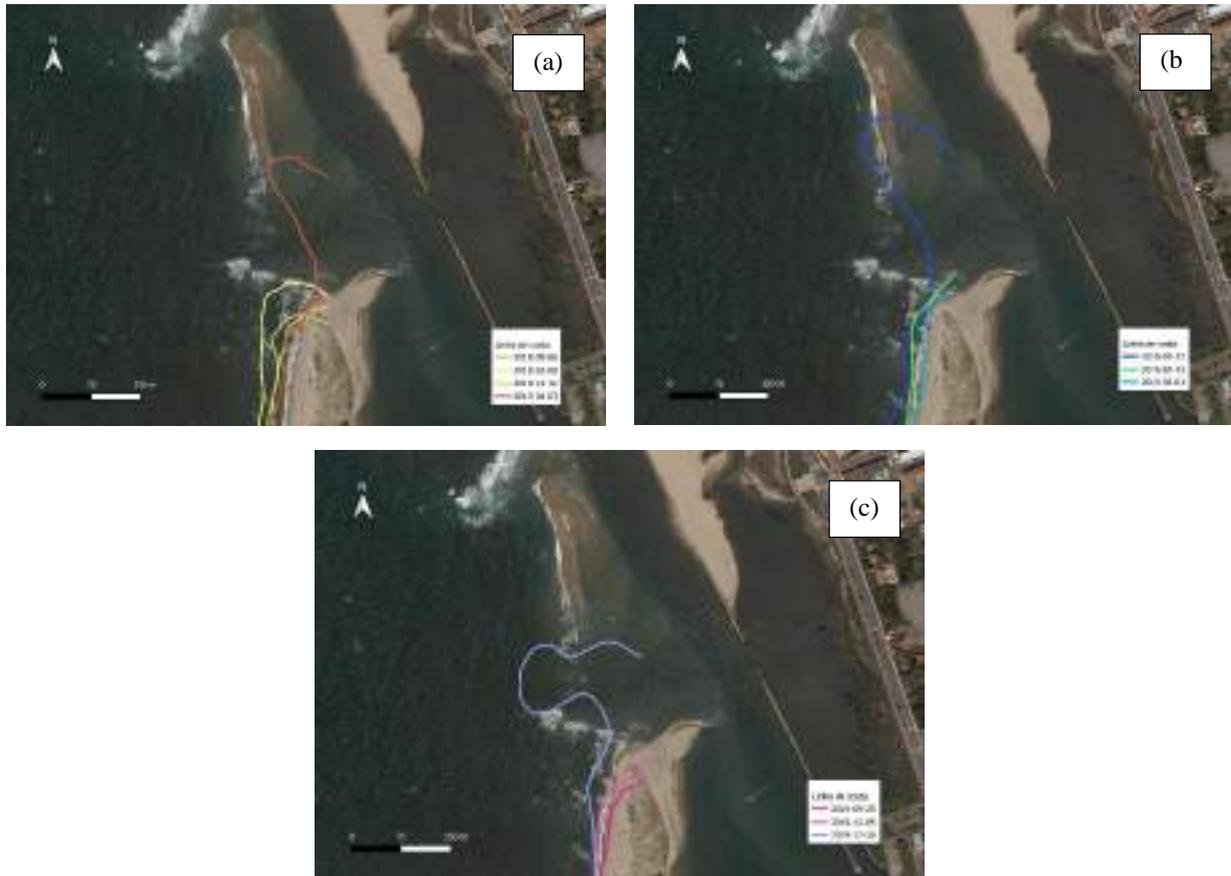


Figura A.6 – Representação da linha de costa entre: (a) 06/09/2018 e 03/01/2019; (b) 12/01/2019 e 01/03/2019 e (c) 25/09/2019 e 30/12/2019.

# ANEXO B

## ANÁLISE DOS CAUDAIS



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

Ano Hidrológico	Caudais Médios Mensais (m <sup>3</sup> /s)											
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET
1978/1979	41.94	44.78	110.40	136.74	154.69	107.97	85.78	61.68	79.39	52.45	26.56	18.30
1979/1980	72.79	50.48	57.44	86.99	94.79	78.22	64.82	56.00	42.70	25.74	24.18	15.02
1980/1981	33.36	51.45	47.03	39.70	27.11	52.00	55.86	47.90	36.41	29.75	20.45	34.21
1981/1982	58.77	44.75	144.20	146.31	96.42	81.58	52.57	39.45	43.45	41.31	32.08	35.57
1982/1983	56.15	67.32	117.67	69.90	56.55	51.88	85.49	179.92	81.76	47.00	48.92	8.88
1983/1984	26.52	67.69	87.87	127.07	110.64	80.56	94.61	54.51	47.70	33.62	23.95	16.95
1984/1985	48.65	106.01	154.37	133.63	142.46	126.04	121.95	78.79	42.29	39.49	38.91	34.00
1985/1986	32.20	63.31	95.70	133.86	143.49	113.96	80.02	53.56	34.82	29.95	33.86	41.39
1986/1987	35.10	47.85	49.84	82.23	103.29	62.87	81.02	40.48	29.56	30.25	25.56	20.92
1987/1988	87.26	95.04	111.75	175.84	247.87	80.62	51.12	71.28	48.72	61.84	48.03	39.92
1988/1989	60.46	60.59	45.26	30.13	29.99	49.16	40.47	27.38	26.08	24.68	20.84	14.73
1989/1990	20.11	40.32	193.20	108.43	142.85	73.18	31.94	36.23	27.46	28.15	18.69	17.71
1990/1991	27.47	55.19	48.75	130.14	97.80	144.95	71.90	42.56	36.70	30.50		
1991/1992												
1992/1993	32.50	72.73	126.89	80.55								
1993/1994					140.32	75.84	66.87		101.03	40.13	32.85	
1994/1995	42.48	113.98	94.34	131.15		104.77	61.23	59.87	52.17	36.93	33.62	41.96
1995/1996		93.76	110.86	174.15	139.27	102.83	74.54	58.89	56.33	25.48	24.81	24.86
1996/1997	45.79	72.59	121.03	125.39	93.14	54.89	23.11	40.85	77.82	47.33	41.91	29.77
1997/1998	67.38	151.38	157.84	162.06	101.61	57.76	119.80	75.65	74.17	28.66	26.92	56.30
1998/1999	42.55	58.10	44.41	53.49	36.00	24.15	29.60	61.36	40.00	34.77	21.69	42.04
1999/2000	90.49	106.61	96.67	90.76	63.59	36.64	83.21	89.11	32.01	26.82	18.07	17.61
2000/2001	37.82	108.52		182.81	129.78	104.60	120.64	84.66	48.91	24.42	19.95	19.97
2001/2002	51.09	21.37	33.73	33.53	33.05	47.67	28.59	20.75	15.35			

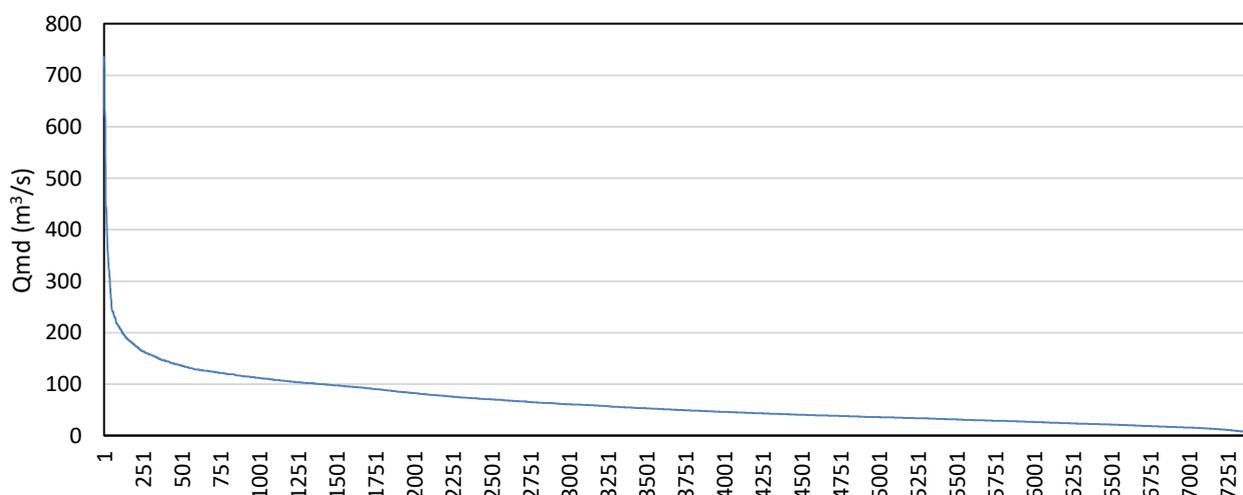


Figura B.1 - Variação dos caudais médios registados na estação de Barcelos, por ordem decrescente (SNIRH).

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

Ano Hidrológico	Caudal Máximo Anual (m <sup>3</sup> /s)
1978/1979	252.34
1979/1980	307.21
1980/1981	110.66
1981/1982	541.61
1982/1983	522.85
1983/1984	304.93
1984/1985	352.73
1985/1986	231.34
1986/1987	183.97
1987/1988	735.83
1988/1989	104.84
1989/1990	644.14
1990/1991	231.34
1991/1992	
1992/1993	242.93
1993/1994	238.74
1994/1995	210.1
1995/1996	235.02
1996/1997	187.11
1997/1998	240.61
1998/1999	112.56
1999/2000	177.64
2000/2001	217.64
2001/2002	108.52

# ANEXO C

## ANÁLISE DOS SEDIMENTOS



Para a caracterização dos sedimentos na área de estudo, foram analisadas várias campanhas de recolha de sedimentos realizados no período de 2008 a 2016, nas seguintes zonas:

- Praia Suave-Mar;
- Praia de Ofir;
- Barra do rio Cávado;
- Canal de Navegação;
- Doca de recreio;
- Doca de Pesca;
- Ponte de Fão.

O ISQ realizou uma primeira campanha a 10 de agosto de 2011, com recolha de 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 Figura C.1 apresenta a localização geográfica do local de recolha de algumas amostras. Os resultados obtidos para cada amostra, relativos à percentagem acumulada de material que passa nos peneiros, são apresentados com detalhe em [1].



**Figura C.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 a outra a uma profundidade de 1.5 m. A Figura C.2 e a Figura C.3 apresentam a curva granulométrica do ponto ESPB-SUP e ESPB-PROF. A vermelho é possível observar o  $D_{50}$ , com um valor aproximado de 1.2 mm e 1.4 mm para ESPB-SUP e ESPB-PROF, respetivamente. De um modo geral, nessas amostras foram obtidos para a dimensão das partículas valores médios entre 0.02 e 2.0 mm, classificando-se assim os sedimentos como areia.

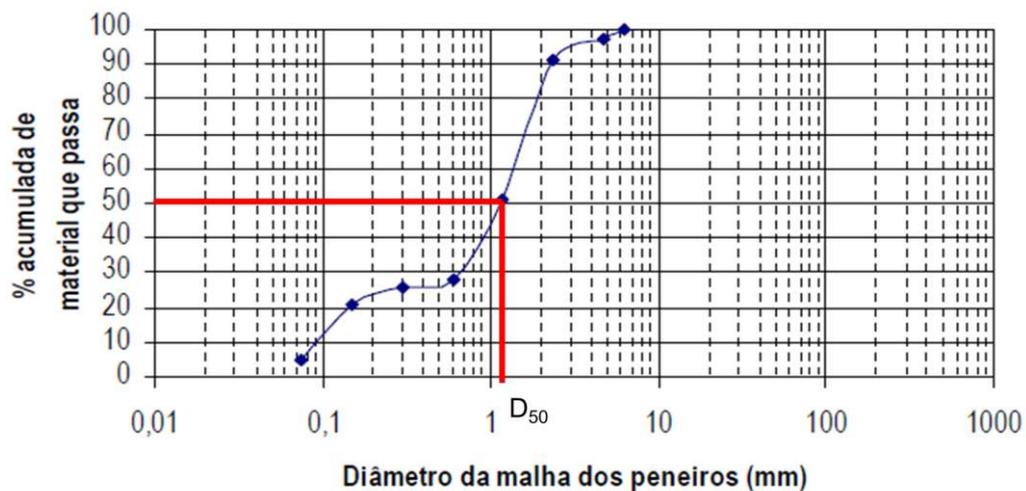


Figura C.2 - Curva granulométrica do ponto AQ 18176/11 - ESPB1 - SUP [1].

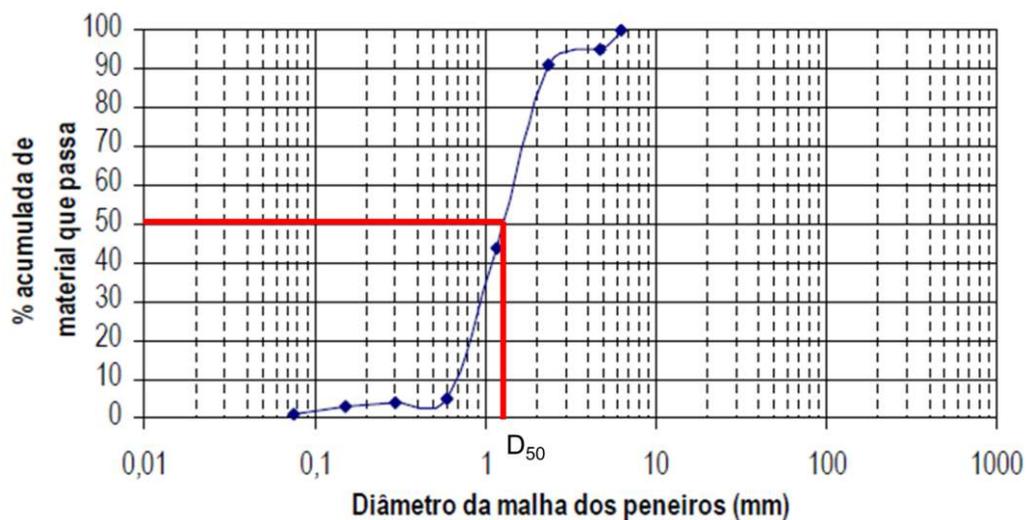


Figura C.3 - Curva granulométrica do ponto AQ 18177/11 - ESPB1 - PROF [1].

Na segunda campanha, também efetuada pelo ISQ, a 22 de fevereiro de 2012, foram apenas realizadas amostras nos pontos que tinham sido classificados como contaminados na primeira campanha. Obteve-se uma granulometria média semelhante à apresentada anteriormente, ou seja, sedimentos entre 0.02 e 2.00 mm.

A campanha realizada pelo ISQ a 12 de agosto de 2016 consistiu na recolha de quatro amostras no canal de navegação, Figura C.4. Uma vez que todas as amostras estão integradas no canal de navegação e visto que as curvas granulométricas são idênticas, apenas são apresentadas as curvas granulométricas referentes aos pontos EA1 e EA4 (Figura C.5 e Figura C.6), obtendo-se um D<sub>50</sub> de aproximadamente 0.28 e 0.55 mm, respetivamente.



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

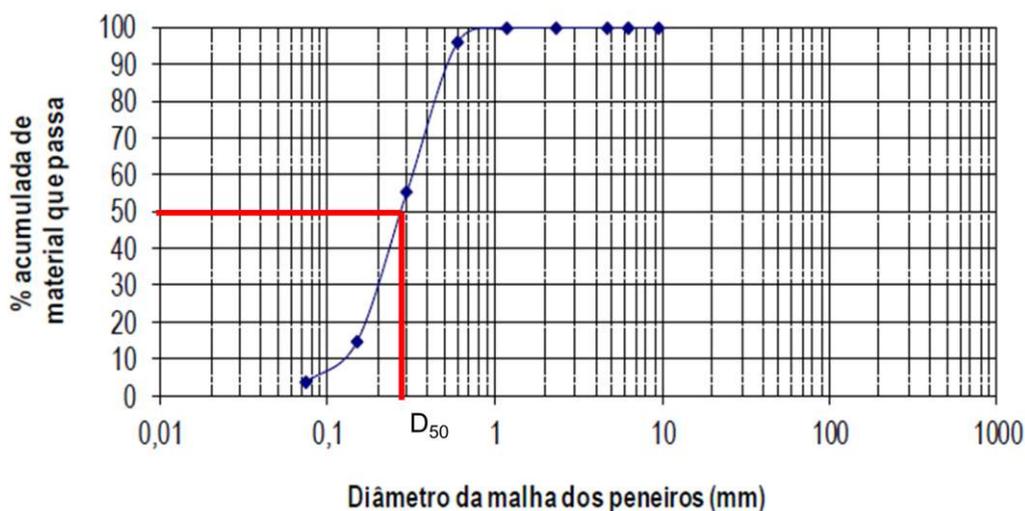


Figura C.5 - Curva granulométrica do ponto EA1 [1].

Tal como já foi mencionado anteriormente, 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 Figura C.7. Com base na tabela referente ao “Peso seco de cada fração de tamanho de grão, expresso em percentagem, por estação de amostragem” [2], foi possível obter as curvas granulométricas referentes aos pontos de amostragem (Figura C.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.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, os pontos 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, sensivelmente igual a 1.65 mm, como também uma maior variabilidade de tamanho dos sedimentos.

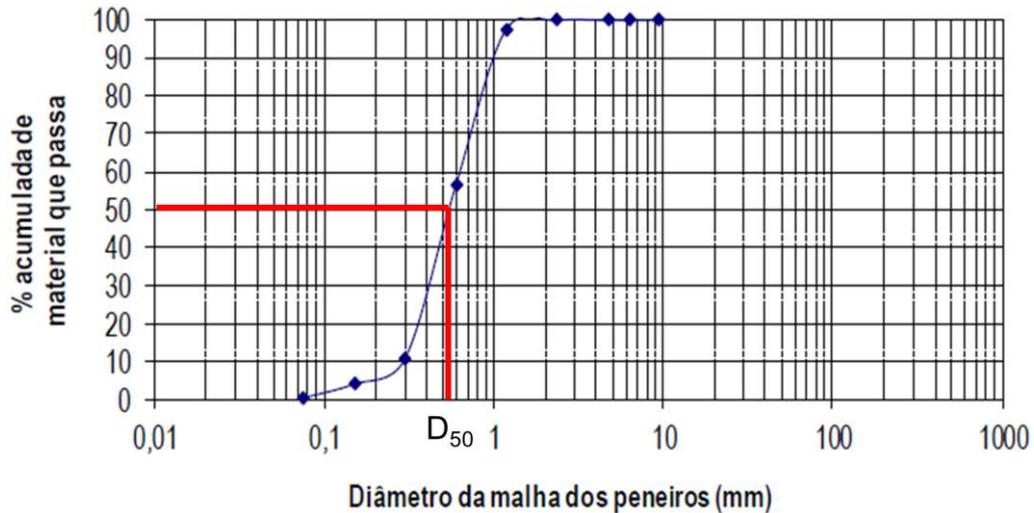


Figura C.6 - Curva granulométrica do ponto EA4 [1].



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

Por último, também foi possível obter resultados nas praias adjacentes à foz do rio Cávado, ou seja, na praia Suave-Mar e de Ofir. Uma vez que o estudo não especifica com precisão a localização geográfica do ponto de recolha das amostras, neste trabalho considerou-se que o parâmetro  $D_{50}$  obtido para essas praias é constante, embora isso não corresponda à realidade. Com base nas curvas granulométricas apresentadas, obteve-se o valor médio do  $D_{50}$  para cada uma das praias: Suave-Mar – 0.60 mm (areia média) e Praia de Ofir – 0.35 mm (areia fina). A Tabela C.1 resume os  $D_{50}$  das recolhas das 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 definição do  $D_{50}$ , parâmetro fundamental para a análise morfodinâmica no modelo numérico. Tendo em vista a possibilidade de admitir no modelo numérico um  $D_{50}$  variável no espaço, procedeu-se à conversão das coordenadas obtidas no Google Earth para as do Delft3D.

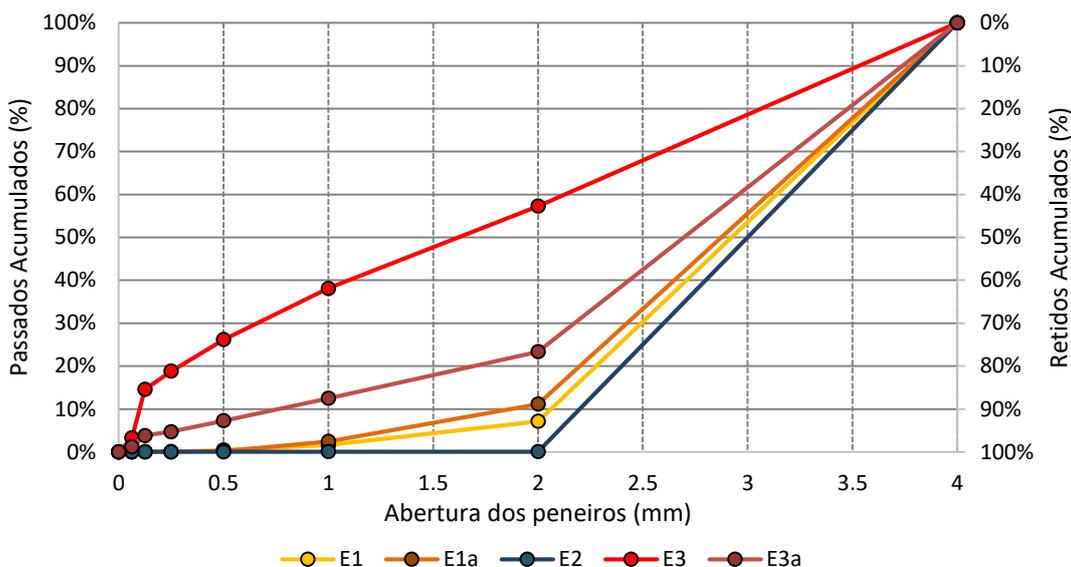


Figura C.8 - Curva granulométrica dos pontos E1, E1a, E2, E3 e E3a, referente ao período 2009-2010.

Tabela C.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

**Tabela C.1 - Recolhas de amostras efetuadas: parâmetro D<sub>50</sub> e conversão de coordenadas (cont.).**

Ponto	D <sub>50</sub> (mm)	Coordenadas			
		WG84 (Google Earth)		Etrs89/PT TM06	
		Latitude (N)	Longitude (W)	X	Y
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
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

[1] ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2016). Caracterização Físico-Química de Sedimentos da Foz do rio Cávado [Relatório de Monitorização Ambiental].

[2] ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade (2012). Caracterização Físico-Química dos Sedimentos a Dragar no Porto de Esposende [Relatório de Monitorização Ambiental].

