U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO DA HIDRODINÂMICA E DINÂMICA SEDIMENTAR NA ZONA COSTEIRA DE ESPOSENDE RECORRENDO AO MODELO X-BEACH

ÁLVARO EDUARDO DA SILVA DE ABREU

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

JULHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

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

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

Ao meu Pai, Mãe, Irmã e Irmão.

" Se não consegue voar, corra, se não consegue correr, ande se não consegue andar, se arraste, mas nunca pare de avançar."

Martin Luther King Jr.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto e o meu coorientador Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos pela dedicação, conselhos e apoio que demostraram ao longo de todas as semanas na elaboração desta dissertação, ao Mestre Francisco Vilela de Carvalho Taveira Pinto pelo conhecimento, apoio e disponibilidade fornecido no uso do software XBeach, Deflt3D e Matlab.

A todos os professores ao longo da minha vida que embora sejam muitos para ser mencionados, são eles que me forneceram as ferramentas para poder chegar onde estou.

Ao meu pai, mãe, irmão e irmã, pela amizade, amor incondicional, paciência, atenção e apoio nos altos e baixos ao longo deste percurso, não poderia deixar de mencionar os meus amigos, os de longa data e os mais recentes, a sua amizade e ajuda a levar com mais facilidade os dias.

A todas estas pessoas o meu mais profundo e sincero, obrigado.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo realizar uma análise da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar na zona costeira da foz do rio Cávado, em Esposende, Portugal, com especial destaque para o estuário e a restinga do rio Cávado, que desempenha um papel importante na proteção da cidade de Esposende da agitação marítima.

De referir que o estuário do rio Cávado tem vindo a apresentar problemas de assoreamento ao longo dos anos, que condicionam a navegação para dentro e para fora do mesmo. Por outro lado, a restinga do rio Cávado é atualmente muito dinâmica, apresentando uma elevada variação da sua morfologia, bem como zonas em erosão, principalmente no seu extremo norte. Em resultado dessa grande dinâmica sedimentar, os riscos costeiros são reais e relevantes. Estes problemas tenderão a intensificar-se no futuro devido à pressão que as alterações climáticas provocam no litoral.

Nesta dissertação é realizado um estudo de modelação numérica de uma área costeira com sensivelmente 12 km por 1.8 km de dimensão, definida entre a praia de Esposende (a norte), o esporão da restinga (a sul), o oceano atlântico (a oeste) e, aproximadamente, a marina de Esposende (a este). Para o efeito foi utilizado o *software* XBeach e consideradas condições de agitação marítima, de maré e caudais fluviais relativos a uma tempestade marítima que ocorreu entre as 00:00 de 03/03/2014 e as 00:00 de 05/03/2014.

Para além do estudo numérico das condições atuais dessa zona costeira, foi também proposta e estudada uma nova solução para mitigação dos problemas existentes, que consiste na implementação de vegetação (*Laminaria ochroleuca)* na zona norte da restinga, de forma a reduzir a energia das ondas e diminuir os problemas de erosão. Trata-se, assim, de uma solução baseada na natureza.

A análise dos resultados foi realizada através de oito *outputs*: dissipação da energia devida à vegetação, variação da batimetria dos fundos, taxa de modificação dos fundos, taxa de erosão do fundo por célula, nível de água, velocidade do escoamento no centro da célula, mudança total da batimetria dos fundos devido ao deslizamento do solo, e erosão e sedimentação. Estes resultados permitiram realizar a análise das consequências da implementação da solução baseada na natureza tendo como termo de comparação a situação atual.

Os resultados obtidos com a aplicação do modelo XBeach permitiram concluir que a implementação da solução baseada na natureza tem efeitos benéficos na restinga de Ofir, estuário do rio Cávado e na frente marítima da cidade de Esposende. Com efeito, o número de episódios de galgamento, o volume do banco de areia e a erosão a norte da restinga diminuíram. Por outro lado, aumentou o canal de navegação e as erosões junto ao molhe existente na entrada para o canal de navegação a norte da restinga.

PALAVRAS-CHAVE: Riscos Costeiros, Alterações Climáticas, Soluções baseadas na Natureza, Modelação Numérica.

ABSTRACT

This dissertation aims to analyse the hydrodynamics and sedimentary dynamics in the coastal zone of the mouth of river Cávado, in Esposende, Portugal, with special emphasis on the estuary and restinga of the river Cávado, which plays an important role in protecting the city of Esposende from ocean waves.

It should be noted that the Cávado River estuary has been experiencing siltation problems over the years, which affect the navigation in the channel. On the other hand, the restinga of River Cávado is currently very dynamic, with a high variation in its morphology and erosion, especially in its extreme north. As a result of these great sedimentary dynamics, coastal risks are real and relevant. These problems will tend to intensify in the future due to the pressure that climate change causes on the coast.

In this dissertation, a numerical modelling study of a coastal area with roughly 12 km by 1.8 km in size is carried out, defined between Esposende beach (to the north), the restinga sandspit (to the south), the Atlantic Ocean (to the west) and, approximately, the Esposende marina (to the east). For this purpose, the XBeach software was used, and wave conditions, tide and river flows were considered for a maritime storm between 00:00 on 03/03/2014 and 00:00 on 05/03/2014.

In addition to the numerical study of the current conditions of this coastal zone, a new solution to mitigate the existing problems was also proposed and studied, which consists in the implementation of a vegetation field (*Laminaria ochroleuca*) in the northern part of the restinga, to reduce wave energy and reduce erosion problems. It is, therefore, a nature-based solution.

The analysis of the results was carried out through eight outputs: energy dissipation due to vegetation, variation in the bathymetry, rate of change in the bottoms, bottom erosion rate per cell, water level, flow velocity in the centre of the cell, total change in bottom bathymetry due to landslide, and erosion and sedimentation. These results allowed to carry out the analysis of the consequences of implementing the nature-based solution, having as a comparison term the current situation.

The results obtained with the application of XBeach model allowed to conclude that the implementation of the nature-based solution has beneficial effects on the restinga of Ofir, the estuary of the Cávado river, and the seafront of the city of Esposende. Indeed, the number of overtopping events, the volume of the sandbank and erosion on the north of the restinga decreased. In addition, there was an increase in the navigation channel and erosions along the existing breakwater at the entrance to the navigation channel north of the restinga.

KEYWORDS: Coastal Hazards, Climate Change, Nature-based Solutions, Numerical Modelling.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETIVOS 2
1.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2

2. SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA 3
2.1. ESTUÁRIOS E RESTINGAS 3
2.2. ORIGEM DOS SEDIMENTOS E A SUA RELAÇÃO COM AS BARRAGENS 4
2.3. DERIVA LITORAL 5
2.4. AGITAÇÃO MARÍTIMA 6
2.5. REBENTAÇÃO EM ÁGUAS POUCO PROFUNDAS 9
2.6. MARÉ 9
2.7. SISTEMA DUNA-PRAIA 10
2.8. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS 12
2.8. SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA 15
2.8.1 KING FISHER BEACH 15
2.8.2 SABINE NATIONAL WILDLIFE REFUGE 15
2.8.3 SWAN ISLAND 15

3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 17
3.1. LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA 17
3.2. PARÂMETROS FÍSICOS DA ZONA DE ESTUDO E OS SEUS INTERVENIENTES 18
3.2.1. RIO CÁVADO 19
3.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA 21
3.2.3. MARÉ 23
3.2.4. SEDIMENTOS 24
3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR DA ZONA DE ESTUDO 25
3.4. ESTRUTURAS E INTERVENÇÕES DE PROTEÇÃO COSTEIRA 28
3.4.1. ESTRUTURAS COSTEIRAS EXISTENTES 28

3.4.2. Dragagens e Alimentações Artificias 29
3.4.3. Cilindros de Geossintéticos 30
3.4. Evolução do Litoral 31
3.5. Outros Estudos Sobre o Caso de Estudo 34
3.6.1 Modelação da Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar do Rio Cávado 34
3.6.2 Estudo de Novas Soluções para a Estabilização da Restinga de Esposende 36
3.6.3 Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Barra do Cávado 38
3.7. Solução Proposta 39

4. MODELO NUMÉRICO 41
4.1. Descrição do Modelo Numérico XBeach e dos Seus módulos 41
4.1.1. Módulo das Ondas 43
4.1.2. Módulo de Escoamento 47
4.1.3. Módulo Sedimentar 49
4.1.4. Módulo Morfológico 52
4.2. Implementação do Modelo Numérico 52
4.3. Condições a Simular 68
4.4. Análise de Resultados e Discussão 69
4.4.1. Dissipação da Energia Devido à Vegetação 69
4.4.2. Cota Do Fundo 70
4.4.3. Taxa de Modificação Dos Fundos 71
4.4.4. Taxa de Erosão do Fundo por Célula 72
4.4.5. Nível de Água 73
4.4.6. Velocidade no Centro da Célula 74
4.4.7. Mudança Total Dos Fundos Devido Ao Deslizamento do Solo 76
4.4.8. Erosões e Sedimentações 77
4.5. Análise Dos Resultados Obtidos e Proposta de Soluções de Melhoria 78

5. CONCLUSÕES E DESMVOLVIMENTOS FUTUROS 81
5.1 Conclusões 81
5.2 Desenvolvimentos Futuros 82
Referências Bibliográficas 83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 – IMAGEM SATÉLITE DO ESTUÁRIO DO RIO GEBA EM GUINÉ-BISSAU (NASA, 2018). 3
FIG. 2 – VISTA AÉREA DA EMBOCADURA DO RIO CÁVADO. À ESQUERDA O RIO E À DIREITA O OCEANO ATLÂNTICO (FERREIRA, 2020). 4
FIG. 3 – PERFIL TRANSVERSAL DE UMA BARRAGEM COM A INDICAÇÃO DA DINÂMICA DOS SEDIMENTOS (LENCASTRE E FRANCO, 1992). 5
FIG. 4 – REPRESENTAÇÃO DA DERIVA LITORAL E OS SEUS INTERVENIENTES (CORREIA, 2012). 5
FIG. 5 – ALTERAÇÃO PROVOCADA NA LINHA DE COSTA PELA PRESENÇA DE ESPORÕES, ADAPTADO DE (PASKOFF, 1981). 6
FIG. 6 – PERFIL SINUSOIDAL COM A REPRESENTAÇÃO DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS (KAMPHUIS, 2000). 6
FIG. 7 – CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS TENDO EM CONSIDERAÇÃO O SEU PERÍODO, ADAPTADO DE (KINSMAN, 1984). 7
FIG. 8 – TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA DO VENTO PARA A MASSA DE ÁGUA (ADAPTADO DE (KAMPHUIS, 2000). 7
FIG. 9 – VAGA (*SEA)* E ONDULAÇÃO (*SWELL)* EM SEPARADO E A SUA CONJUGAÇÃO (KAMPHUIS, 2000). 8
FIG. 10 – TRAJETÓRIAS DAS PARTÍCULAS DE ÁGUA EM ÁGUAS PROFUNDAS E POUCO PROFUNDAS (PECHER E KOFOED, 2017) COM BASE EM IPPEN (IPPEN, 1966). 9
FIG. 11 – REPRESENTAÇÃO DA ITERAÇÃO DE MARÉ, ADAPTADO DE HAYES (HAYES, 1975). 10
FIG. 12 – PROCESSOS MAIS RELEVANTES NO PERFIL TRANSVERSAL DE UMA PRAIA ARENOSA, ADAPTADO DE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2008). 11
FIG. 13 – VARIAÇÃO DOS ÚLTIMOS 160 000 ANOS DA TEMPERATURA POLAR E CONCENTRAÇÃO ATMOSFÉRICA DE CO_2 OBTIDA PELA ESTAÇÃO VOSTOK, ANTÁRTIDA (RAYNAUD ET AL., 1993) EM QUE AGORA REPRESENTA 2005. E PROJEÇÕES DE POSSÍVEIS CONCENTRAÇÕES (HOUGHTON, 2005). 12
FIG. 14 – SEMELHANÇA DE EFEITOS ENTRE A SOL-ATMOSFERA E SOL-ESTUFA (HOUGHTON, 2005). 12
FIG. 15 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA PARA DIFERENTES CENÁRIOS (HOUGHTON ET AL., 2001). 13
FIG. 16 – AUMENTO DO NÍVEL MÉDIO DA ÁGUA DO MAR PARA DIFERENTES (HOUGHTON ET AL., 2001). 14
FIG. 17 – ADAPTADA DE MAPA DE PORTUGAL CONTINENTAL (PACLOPES, 2007) COM A LOCALIZAÇÃO DE ESPOSENDE E DA RESTINGA DO RIO CÁVADO (ESPA, 2011). 17
FIG. 18 – PARQUE NATURAL LITORAL NORTE (VISITESPOSENDE, 2021). 18
FIG. 19 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CÁVADO E OS CONCELHOS ABRANGIDOS (EDP, 2008). 19
FIG. 20 – SÉRIE TEMPORAL RELATIVA AO CAUDAL MÉDIO DIÁRIO NA ESTAÇÃO DE BARCELOS. 20
FIG. 21 – CURVA DE DURAÇÃO DO CAUDAL MÉDIO DIÁRIO (APENAS OUTUBRO A MARÇO) 20
FIG. 22 – DIREÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA ENTRE 2011 ATÉ 2019. 21
FIG. 23 – FOZ DO RIO CÁVADO (A) 27 DE MAIO DE 2021 ÀS 17:55 HORAS E (B) 30 DE JUNHO DE 2021 ÀS 14:39 HORAS. 23
FIG. 24 – ALTURA DA MARÉ A FORNECER AO MODELO NUMÉRICO PARA O PERÍODO COMPREENDIDO ENTRE AS 00:00 HORAS DO DIA 03/03/2014 E AS 00:00 HORAS DO DIA 05/03/2014. 23
FIG. 25 – TROÇO ENTRE A FOZ DO RIO CÁVADO E A RIBEIRA DE REGUENGA (EDP, 2008). 24
FIG. 26 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE RECOLHA DE AMOSTRAS DE SEDIMENTOS (CÂNDIDO, 2020). 25
FIG. 27 – PANORÂMICAS DA ZONA DE ESTUDO OBTIDAS A 30 DE JUNHO DE 2021. 26
FIG. 28 – LOCALIZAÇÃO DAS BARRAGEM NA REGIÃO NORTE DE PORTUGAL (AAVN, 2021) 27
FIG. 29 – ESTRUTURAS COSTEIRAS EXISTENTES NA ÁREA EM ESTUDO: IMAGEM SATÉLITE (A) E NO LOCAL (B E C): (A) MOLHE, (B) DIQUE E (C) ESPORÃO. 28
FIG. 30 – LOCALIZAÇÃO DA ZONA DE DRAGAGEM E DE ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL (POLIS LITORAL NORTE, 2016). 30
FIG. 31 – LOCALIZAÇÃO DO GEOCILINDRO (A) NO DIA 30/06/2021, 20 MINUTOS APÓS BAIXA-MAR E (B) EM 2017 (ADAPTADO DE (PORTELA, 2017). 31
FIG. 32 – LOCALIZAÇÃO DA RESTINGA DO RIO CÁVADO (CÂNDIDO, 2020). 32
FIG. 33 – IMAGENS DE SATÉLITE DISPONÍVEIS NO GOOGLE EARTH DESDE 2002 ATÉ 2021 (GOOGLE EARTH, 2021). 33
FIG. 34 – LOCALIZAÇÃO DO MODELO LOCAL E DO MODELO REGIONAL (PINHO, 2005). 34
FIG. 35 – MODELO HIDRODINÂMICO LOCAL COM A REPRESENTAÇÃO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS PARA OS DOIS TIPOS DE MARÉ ESTUDADOS (PINHO, 2005). 35

FIG. 36 – BATIMETRIA INICIAL DO MODELO LOCAL (PINHO, 2005). 36
FIG. 37 – SIMULAÇÃO DE TRANSPORTE SEDIMENTAR PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE MARÉ (PINHO, 2005). 36
FIG. 38 – PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO A E B: 1 – QUEBRA-MAR DESTACADO 1; 2- QUEBRA-MAR DESTACADO 2; 3- ESTRUTURA LONGITUDINAL; 4 - PROLONGAMENTO DE QUEBRA-MAR NORTE; 5 - ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL (CÂNDIDO, 2020). 37
FIG. 39 – LOCALIZAÇÃO DAS DIFERENTES ALTERNATIVAS E AS SUAS CARACTERÍSTICAS (NEMUS, 2003). 38
FIG. 40 – LOCALIZAÇÃO DA ESPÉCIE *LAMINARIA OCHROLEUCA* (A) E A SUA MORFOLOGIA NA FASE JOVEM E ADULTA (B) ADAPTADO DE (ASSIS ET AL., 2011). 39
FIG. 41 – REPRESENTAÇÃO DOS MÓDULOS E INTERAÇÃO ENTRE ELES, ADAPTADO DE (DELTARES, 2020). 42
FIG. 42 – REPRESENTAÇÃO DO ESPECTRO DA ONDA CORRESPONDENTE E ENVOLVENTE, ADAPTADO DE (DELTARES, 2020). 42
FIG. 43 – FICHEIRO .XYZ RELATIVO À ÁREA EM ESTUDO, ABERTO NO DELFT3D. 53
FIG. 44 – REPRESENTAÇÃO DA GRELHA DE CÁLCULO EM TODA A SUA EXTENSÃO (A) E ZOOM PARA A RESTINGA (B) 54
FIG. 45 – BATIMETRIA INTERPOLADA A PARTIR DO FICHEIRO .XYZ TENDO COMO BASE A GRELHA. 54
FIG. 46 – BATIMETRIA INTERPOLADA A PARTIR DO FICHEIRO .XYZ SEM A REPRESENTAÇÃO DA GRELHA. 55
FIG. 47 – BATIMETRIA APÓS INTERPOLAÇÃO NO MATLAB. 55
FIG. 48 – BATIMETRIA INTERPOLADA (A) E COM A IMPLEMENTAÇÃO DOS LIMITES DA CIDADE DE ESPOSENDE (B). 56
FIG. 49 – BATIMETRIA INTERPOLADA (A) E COM A IMPLANTAÇÃO DO MOLHE (B) 56
FIG. 50 – BATIMETRIA INTERPOLADA (A) E COM A REPRESENTAÇÃO DA CURVATURA DO MOLHE (B). 57
FIG. 51 – BATIMETRIA INTERPOLADA DO ESTACIONAMENTO (A) E COM A CORREÇÃO (B). 57
FIG. 52 – BATIMETRIA INTERPOLADA DO ESPORÃO (A) E COM A CORREÇÃO (B). 57
FIG. 53 – BATIMETRIA INTERPOLADA (A) E COM IMPLEMENTAÇÃO DA DUNA (B). 58
FIG. 54 – PERFIL DA PRAIA EMERSA DE ESPOSENDE (APA, 2021). 58
FIG. 55 – IMAGEM AÉREA DA ZONA COM A LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DA PRAIA DE ESPOSENDE. 59
FIG. 56 – *SMOOTHING* FEITO À PRAIA DE ESPOSENDE. 59
FIG. 57 – PORMENOR DO FICHEIRO .XYZ NA REGIÃO NORTE DO MODELO. 60
FIG. 58 – *SMOOTHING* APLICADO À ZONA SUBMERSA DA PRAIA A DE ESPOSENDE. 60
FIG. 59 – ANTES (A) E DEPOIS (B) DO *SMOOTHING* APLICADO NA DUNA A NORTE. 61
FIG. 60 – BATIMETRIA INTERPOLADA DA RESTINGA (A) E COM A CORREÇÃO (B). 61
FIG. 61 – PORMENOR DA RESTINGA INTERPOLADA (A) E APÓS APLICAÇÃO DO SMOOTHING (B). 62
FIG. 62 – BATIMETRIA INTERPOLADA DO ESPORÃO A SUL (A) E COM A CORREÇÃO (B). 62
FIG. 63 – CONSEQUÊNCIAS DA EXISTÊNCIA DE UM PONTO COM UMA COTA ANÓMALA NA BATIMETRIA. 63
FIG. 64 – BATIMETRIA INTERPOLADA DA PROFUNDIDADE NA PROXIMIDADE DA RESTINGA (A) E COM A CORREÇÃO (B). 63
FIG. 65 – BATIMETRIA DA ZONA EM ESTUDO ADAPTADA COM GRELHA. 64
FIG. 66 – BATIMETRIA DA ZONA EM ESTUDO ADAPTADA SEM GRELHA. 64
FIG. 67 – BATIMETRIA FINAL REPRESENTADA EM 3D UTILIZANDO O MATLAB. 65
FIG. 68 – BATIMETRIA INTERPOLADA (A) E A BATIMETRIA FINAL (B). 66
FIG. 69 – BATIMETRIA MODIFICADA PARA O XBEACH. 67
FIG. 70 – ZONAS NÃO ERODÍVEIS CONSIDERADAS NO MODELO NUMÉRICO. 67
FIG. 71 – FORMAÇÃO ROCHOSA CHAMADA DE CAVALOS DE FÃO (FRADE, 2014). 68
FIG. 72 – LOCALIZAÇÃO DO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DA VEGETAÇÃO NO MODELO DEFLT3D. 68
FIG. 73 – EFEITO DA VEGETAÇÃO NA DISSIPAÇÃO DA ENERGIA DA ONDA. 69
FIG. 74 – DE CIMA PARA BAIXO: COTA DOS FUNDOS NO INÍCIO DA SIMULAÇÃO, PREIA-MAR E NA FINAL DA SIMULAÇÃO: SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA), COM A INTERVENÇÃO (DIREITA). 70
FIG. 75 – TAXA DE MUDANÇA DOS FUNDOS PARA OS DOIS GALGAMENTOS QUE ORIGINEM EROSÕES NO TARDOZ DO DIQUE. 71
FIG. 76 – TAXA DE EROSÃO DO FUNDO PARA OS DOIS EPISÓDIOS DE GALGAMENTO COM OCORRÊNCIAS DE EROSÕES NO TARDOZ DO DIQUE. 72
FIG. 77 – GALGAMENTOS NA SIMULAÇÃO SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO (DIREITA). 73
FIG. 78 – MORFOLOGIA DA RESTINGA EM BAIXA-MAR: SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM INTERVENÇÃO (DIREITA). 74

FIG. 79 – MAGNITUDE DA VELOCIDADE NO CENTRO DA CÉLULA DE CALCULO: SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM INTERVENÇÃO (DIREITA). 75
FIG. 80 – ZONA DO MODELO ONDE OCORRE DESLIZAMENTO DO SOLO, SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM A INTERVENÇÃO (DIREITA). 76
FIG. 81 – DESLIZAMENTO DO SOLO NO EXTREMO NORTE DA RESTINGA: SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM INTERVENÇÃO (DIREITA). 76
FIG. 82 – VALORES ACUMULADOS DE EROSÕES E DEPOSIÇÕES NA EXTENSÃO TOTAL DO MODELO; SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM INTERVENÇÃO (DIREITA). 77
FIG. 83 – VALORES ACUMULADOS DE EROSÕES E DEPOSIÇÕES NO EXTREMO NORTE DA RESTINGA: SEM INTERVENÇÃO (ESQUERDA) E COM INTERVENÇÃO (DIREITA). 78

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – CARATERÍSTICAS DA AGITAÇÃO MARÍTIMA FORNECIDOS AO MODELO NUMÉRICO. 22
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS RECOLHIDOS EM VÁRIOS LOCAIS DENTRO DA ÁREA EM ESTUDO E NA SUA PROXIMIDADE, ADAPTADO DE CÂNDIDO (CÂNDIDO, 2020). 25
TABELA 3 – BARRAGENS CONSTRUÍDAS NO RIO CÁVADO E AFLUENTES. ADAPTADO DE (COSTA, 2004) E (LAMEIRO, 2009) 27
TABELA 4 – MODELOS PRESENTES NO XBEACH E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS (DELTARES, 2020). 41
TABELA 5 – ELEMENTOS A DESTACAR DO FICHEIRO PARAMS.TXT. 69

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

A Ação da onda

A_r Volume do roller

A_{sb} Coeficiente de carga no leito

A_{ss} Coeficiente de carga suspensa

A_v Área da secção transversal do escoamento relativa a vegetação

b_v Diâmetro do caule da vegetação

$b_{v,i}$ Diâmetro do caule da vegetação na camada i

C Coeficiente de Chezy (Módulo de escoamento)

C Concentração de sedimentos relativa à profundidade média (Módulo Sedimentar)

C Velocidade que a onda se propaga

C_d Coeficiente de arrasto do vento

C_D Coeficiente de arrasto da vegetação

$\tilde{C}_{D,i}$ Coeficiente de arrastamento global

C_{eq} Concentração de equilíbrio

$C_{eq,b}$ Concentração de equilíbrio na batimetria

$C_{eq,s}$ Concentração de equilíbrio em suspensão

c_f Coeficiente adimensional do atrito

c_g Velocidade do grupo de ondas

C_{max} Concentração máxima de sedimentos permitida pelo modelo

c_x Velocidade de propagação da onda na direção x

c_y Velocidade de propagação da onda na direção y

c_θ Velocidade de propagação da onda na direção θ

d Distância a batimetria a partir do nível de água estático

D_* Valor adimensional dos sedimentos

D_{50} Diâmetro médio dos sedimentos

D_f Dissipação pelo atrito com o leito

D_h Coeficiente de difusão de sedimentos

D_r Dissipação da energia associada ao roller

D_v Dissipação pela vegetação

$D_{v,i}$ Dissipação de energia criada pela vegetação na camada i

D_w	Dissipação por Rebentação
$\overline{D}_w$	Dissipação total da onda
E_r	Energia cinética do roller
E_w	Energia total da onda
f	Coeficiente de Coriolis
f_{mor}	Acelerador morfológico
f_{Ts}	Fator corretivo e calibrador devido a que o ws é calculado com a profundidade media
$F_{v,x}$	Tensão produzida pela existência de vegetação na direção x
$F_{v,y}$	Tensão produzida pela existência de vegetação na direção y
f_w	Coeficiente de atrito relativo a ondas de curto período short-wave friction coefficient
F_x	Tensão produzida pela onda na direção x
F_y	Tensão produzida pela onda na direção y
g	Aceleração gravítica
h	Profundidade de água
H	Altura de onda
H_{max}	Altura de onda máxima
H_{rms}	Raiz média quadrática da altura de onda
k	Número da onda
k_b	Energia da turbulência
$\overline{k_s}$	Energia média da turbulência de onda.
L	Comprimento da onda
L_{mix}	Comprimento da mistura
m_{cr}	Inclinação crítica
N	Densidade da vegetação
n_v	Número da camada de vegetação
$N_{v.i}$	Densidade da vegetação na camada i
p	Porosidade
Q_b	Fração de ondas rebentadas
q_x	Taxa de transporte de sedimentos na direção x
q_y	Taxa de transporte de sedimentos na direção y
S	Perda de movimento ondulatório organizado das ondas após a rebentação
S_w	Densidade da energia da onda em cada componente direcional
S_{xx}	Tensões de radiação na direção x em relação ao eixo x

S_{xy}	Tensões de radiação na direção x em relação ao eixo y
S_{yy}	Tensões de radiação na direção y em relação ao eixo
t	Tempo
T	Período da onda
T_{m01}	Período médio intrínseco das ondas
T_{rep}	Período da onda representativo
T_s	Tempo de adaptação
$T_{s,min}$	Escala de tempo mínimo de adaptação na equação de advecção-difusão de sedimentos
u	Velocidade associada à onda ou à corrente
u^E	Velocidade Eureliana na direção x
u^L	Velocidade Lagrangian na direção x
u^S	Velocidade de Stokes na direção x
U_{cr}	Velocidade crítica
U_{crc}	Velocidade críticas da Corrente
U_{crw}	Velocidade crítica das Ondas
u_{rms}	Velocidade orbital
$u_{rms,2}$	Velocidade orbital com inclusão da turbulência devido às ondas de curto período
v^E	Velocidade Eureliana na direção y
v^L	Velocidade Lagrangian na direção y
v^S	Velocidade de Stokes na direção y
v_{mg}	Magnitude da velocidade
W	Velocidade do Vento
w_s	Velocidade de queda dos sedimentos
W_x	Velocidade do Vento na direção x
W_y	Velocidade do Vento na direção y
x	Coordenada horizontal perpendicular a costa
y	Coordenada horizontal paralela a costa
z_b	Cota batimétrica
α	Coeficiente de dissipação da onda
α_i	Altura relativa da vegetação na camada i
β_u	Coeficiente que caracteriza a inclinação da frente de rebentação no modelo
β_s	Coeficiente que caracteriza a inclinação da frente de rebentação no modelo
γ	Índice de rebentação

δH_{rms}	Fração da altura de onda
η	Elevação do nível de água
θ	Ângulo de incidência em relação ao eixo x
ν	Viscosidade
ν_h	Viscosidade na direção horizontal
ρ	Massa volúmica da água
ρ_a	Massa volúmica do ar
σ	Frequência intrínseca da onda
τ_{bx}^{E}	Tensão Tangencial junto ao fundo na direção x (Eureliana)
τ_{by}^{E}	Tensão Tangencial junto ao fundo na direção y (Eureliana)
τ_{sx}	Tensão Tangencial induzidas pela ação do vento segundo a direção x
τ_{sy}	Tensão Tangencial induzidas pela ação do vento segundo a direção y

SIGLAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CEM	Coastal Engineering Manual
CFC	Clorofluorcarboneto
GLM	Generalized Lagrangian Mean
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAOT	Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território
SRES	Special Reports on Emission Scenarios
ZH	Zero Hidrográfico

ABREVIATURAS

mm	milímetros
cm	centímetros
m	metros
km	quilometro
s	segundos
min	minutos
h	hora
Fig.	Figura

cont.	continuação
ºC	grau Celsius

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Entre 1958 e 2010, Portugal apresentou uma perda do território na ordem dos 12 km^2, com taxas médias de recuo a variar entre 0.5 m/ano e 9.0 m/ano. Este recou da linha de costa levou à implementação de estruturas rígidas, tais como esporões, diques e quebramares, bem como à realização de operações de alimentação artificial com areia para tentar mitigar estas alterações.

O caso de estudo desta Dissertação, designadamente a restinga do rio Cávado em Esposende, está situada num concelho que regista um recou médio de 1.7 m/ano. Por esse motivo, foram já efetuados diversos estudos com o intuito de compreender a dinâmica sedimentar, hidrodinâmica e morfológica locais, para assim se poder formular uma solução que ajude a combater o avanço do mar.

A morfologia da restinga do rio Cávado depende, em grande medida, da agitação marítima proveniente do oceano Atlântico e da descarga de caudais do rio Cávado. Importa também referir que as estruturas existentes no local, como os esporões, diques e molhes, têm um impacto no comportamento, tanto do rio como do mar.

A restinga do rio Cávado apresenta interesses de carácter socioeconómico, associados às atividades que se realizam na restinga, a infraestruturas como habitações, ao turismo e à fauna e à flora presentes no litoral de Esposende, que rondam uma centena de espécies. Por último, mas não menos importante, a restinga funciona também como uma defesa natural da cidade de Esposende da agitação marítima. Todos estes fatores fazem da restinga um elemento importante e que deve ser salvaguardado.

Aos problemas atuais é ainda necessário acrescentar os efeitos das alterações climáticas resultantes do aquecimento global, que promove o aquecimento dos oceanos e o degelo dos polos. Este processo pode levar ao aumento do nível médio do mar de alguns centímetros. Os resultados de simulações numéricas estimam que a amplitude desse aumento varie entre 90 cm a 100 cm em 2100. Este aumento seria crítico e fatal para muitas espécies, aumentaria os processos erosivos e provocaria uma pressão nas populações que se encontram no litoral. Por outro lado, poderia também criar problemas acrescidos nas estruturas de proteção costeiras devido à maior frequência de galgamentos ou até promover a sua própria rotura.

No passado já foram realizadas algumas intervenções na restinga de Esposende, como por exemplo a implementação de cilindros de geossintéticos em 2015, com o objetivo de proteger a restinga de erosões. Esta solução não mostrou ser muito eficaz para fixar a linha de costa. Também já foram realizadas diversas alimentações artificias para ajudar a mitigar a falta de sedimentos.

Com base no que foi exposto anteriormente é necessário estudar soluções que permitam responder aos problemas existentes. Uma das possíveis soluções passaria pela implementação de soluções baseadas na natureza que serão discutidas nesta dissertação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação é analisar através do modelo numérico *XBeach* a hidrodinâmica e dinâmica sedimentar na zona costeira de Esposende, bem como implementar uma solução baseada na natureza e avaliar a sua eficácia na melhoria das condições atuais de resiliência da restinga do rio Cávado, de forma a garantir um maior grau de proteção da cidade de Esposende da agitação marítima, salvaguardando o interesse turístico e ambiental.

1.3. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação consta de 5 capítulos, sendo o primeiro relativo à introdução. Após este primeiro capítulo de enquadramento, é apresentado o capítulo "Soluções baseadas na natureza", que descreve os conceitos teóricos necessários à compreensão do modelo numérico, bem como alguns tipos de soluções baseadas na natureza a título de exemplo.

O terceiro capítulo, intitulado "Caracterização do Caso de Estudo", descreve a evolução da restinga de Esposende, os estudos realizados por outros autores para o local e a solução proposta neste trabalho, bem como alguns dos valores a usar no modelo numérico. Posteriormente, no quarto capítulo, intitulado "Estudo Numérico", são detalhados os 4 módulos do modelo numérico *Xbeach*. É também aprofundada a implementação desse modelo, que complementa o que foi discutido no capítulo anterior, sendo ainda apresentados e discutidos os resultados numéricos obtidos.

Para finalizar, o capítulo cinco "Conclusões e desenvolvimentos futuros" expõe as diversas conclusões obtidas no estudo numérico, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2
SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

2.1. ESTUÁRIOS E RESTINGAS

Um estuário é um corpo de água semifechado, com ligação ao mar numa extremidade, em que na outra existe um abastecimento de água doce, dentro da qual as águas salgadas e doces se misturam, Pritchard (1967). Apresentam um ciclo de vida: nascimento, envelhecimento e morte. O nascimento ocorre de forma gradual, estimando-se que foi há cerca de 6500 anos atrás, após o último período glacial, em que um aumento da temperatura do planeta, que levou ao degelo dos glaciares, libertando grandes quantidades de água e aumentando assim o nível médio da água do mar em aproximadamente 150 m. À medida que este aumento do nível médio da água do mar acontecia eram submersas as paisagens e drásticos processos ocorreram na costa. Este processo tem evoluído de forma a se tornar mais estável, o aumento nos últimos anos foi o suficiente para se consolidar em certas morfologias nos estuários na fase de envelhecimento. Por último, a morte do estuário por assoreamento. Esta última fase está comprometida por diversos fatores como a atividade humana e o aquecimento global (Hume e Swale, 2003). A Fig. 1 representa o estuário do rio Geba.



Fig. 1 – Imagem satélite do estuário do rio Geba em Guiné-Bissau (NASA, 2018).

Esta figura (Fig. 1) permite visualizar a mistura de água doce de origem fluvial do rio Geba, água salgada do Oceano Atlântico, juntamente com os sedimentos transportados em suspensão e nutrientes orgânicos.

Esta interação torna os estuários, em condições naturais, lugares de alta concentração de nutrientes, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento económico, social e urbano, acrescentando a sua componente fértil, ideal para a agricultura. São também locais adequados para a construção de portos e de vias de acesso ao rio sempre e quando existam características que o permitam. As atividades produzidas pelo homem nos estuários aumentaram significativamente a partir de meados do século XIX, com a construção de complexos industriais que libertam diferentes matérias e substâncias, da agricultura com a utilização de fertilizantes, das barragens, da industria pesqueira e com a pressão provocada pelas alterações climáticas, com o anunciado aumento do nível médio da água do mar. Estas pressões tornam os estuários zonas de alta complexidade e vulnerabilidade (Kjerfve et al., 2002).

As restingas são ecossistemas formados pela deposição de sedimentos, tanto de proveniência fluvial como marítima ao longo do litoral, com diversas formas como barras, esporões e planícies, que apresentam vegetação e que estão enquadradas nas condições do solo e condições marítimas. (Thomazi et al., 2012). A restinga de Esposende é um exemplo que tem interações do rio Cávado com o Oceano Atlântico, estando representada na Fig. 2.



Fig. 2 – Vista aérea da embocadura do Rio Cávado. À esquerda o Rio e à direita o Oceano Atlântico (Ferreira, 2020).

2.2. Origem dos Sedimentos e a Sua Relação com as Barragens

Quando falamos dos sedimentos das praias é preciso regressar atrás no tempo, ao momento da formação da Terra. Os materiais que componham as rochas que hoje constituem a Terra encontravam-se frios, a uma temperatura igual à do espaço, e secos como poeira, pelo que qualquer componente era bloqueado dentro das rochas em forma de compostos químicos. O impacto dos meteoritos, juntamente com a pressão interna causada pela gravidade, levou a um aquecimento do que hoje chamamos de planeta Terra. Este aquecimento permitiu a libertação de gases e água, que começou a encher as bacias dos oceanos. Depois da atmosfera ter suficiente densidade para a formação de ventos, foi possível o transporte do vapor de água que, por sua vez, iniciou o ciclo de evaporação e condensação, provocando erosão pelo escoamento da água na superfície da Terra, levando partículas das rochas de maior tamanho a serem depositadas perto da costa e às de menor dimensão a serem levadas para zonas profundas do mar, causando um aumento do nível medio da água do mar. Uma vez estabelecida a atmosfera, a geração de ondas provocadas pela atividade do vento, começam a erodir as linhas de costas, provocando à degradação das rochas que posteriormente a atividade do mar reduziu de dimensão, formando areias. Estas areias, juntamente com a areia produzida pelo escoamento anteriormente descrito, foram misturadas e distribuídas pela costa formando assim as primeiras praias. (Bascom, 1964).

Nos últimos anos, os rios foram interrompidos com a construção de barragens que se apresentam como uma barreira física ao escoamento. Para alguns autores são um dos empreendimentos com mais impacto criados pelo homem, já que modifica a temperatura e qualidade da água, pode provocar erosões a jusante

da barragem, declínio de peixes anádromos e posteriormente a estrutura na cadeia alimentar, libertação de dióxido de carbono e metano para a atmosfera, deterioração da qualidade da água, eutrofização, desertificação das regiões a montante. O efeito mais relevante para o caso de estudo: prende-se com a interrupção do escoamento natural do rio o que provoca a retenção de material sedimentar a montante e, em consequência, a erosão das zonas a jusante, principalmente as praias (Da Fonseca, 2002). A Fig. 3 representa um corte transversal de uma barragem com capacidade de retenção de sedimentos em que é possível observar a dinâmica dos sedimentos que ficam retidos.

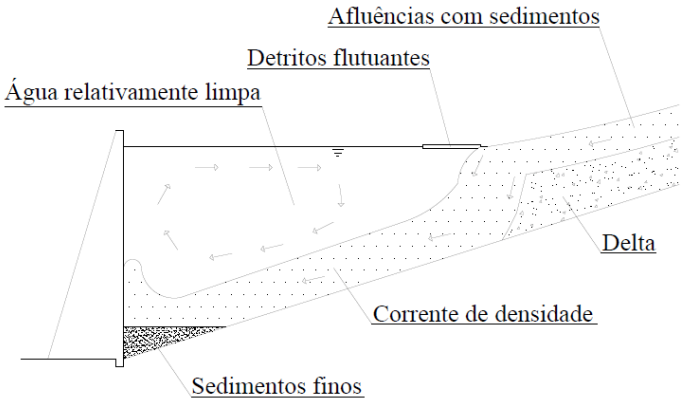


Fig. 3 – Perfil transversal de uma barragem com a indicação da dinâmica dos sedimentos (Lencastre e Franco, 1992).

2.3. DERIVA LITORAL

A deriva litoral é a corrente que transporta os sedimentos devido a direção de incidência da ondulação ser oblíqua em relação à linha de costa, provocando que os sedimentos sejam transportados ao longo do litoral como indica a Fig. 4. A direção da deriva litoral depende da orientação da ondulação. Em Portugal, a direção da agitação é dominante de Norte e Noroeste, devido à predominância de ventos nessa direção, pelo que a deriva litoral tem predominância no sentido de norte para sul. No entanto, se a agitação for inversa, vindo do Sul para o Norte, o sentido da deriva litoral inverte-se.

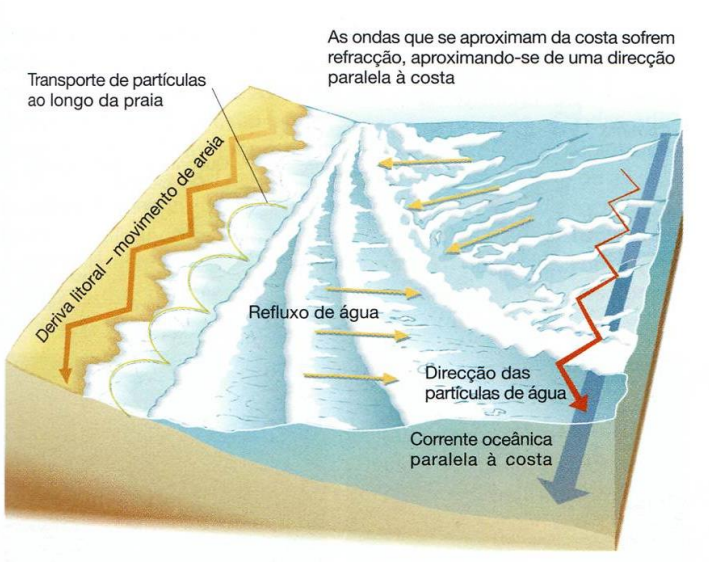


Fig. 4 – Representação da deriva litoral e os seus intervenientes (Correia, 2012).

Se existisse equilíbrio de sedimentos entre os que entram e os que saem numa dada área existira um equilíbrio dinâmico, mas se saem mais sedimentos do que entram existirá um défice de sedimentos, provocando a remoção gradual do material de menor tamanho, ficando aqueles de maior dimensão. Se a situação continuar poderá eventualmente haver arrastamento do material de maior dimensão e chegar-se ao estrato rochoso (Araújo et al., 2003).

Tendo em consideração a direção do transporte sedimentar associado à deriva litoral, existe interesse em promover a acumulação de sedimentos em certas zonas. Os esporões interferem com a deriva litoral provocando a montante (barlamar) uma acumulação de sedimentos enquanto a jusante da deriva litoral (sotamar) existirá erosão (Araújo et al., 2003) como representa a Fig. 5.

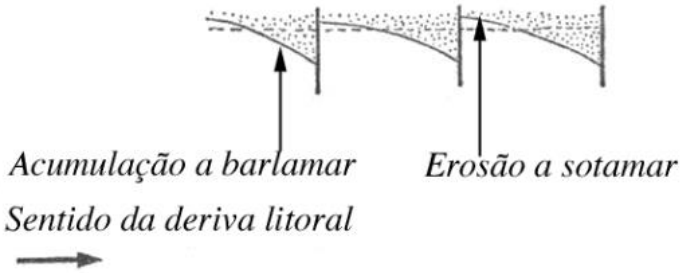


Fig. 5 – Alteração provocada na linha de costa pela presença de esporões, adaptado de (Paskoff, 1981).

2.4. AGITAÇÃO MARÍTIMA

As ondas oceânicas são flutuações do nível médio da água do mar que apresentam perfis transversais normalmente complexos. De uma forma simples, essas flutuações podem ser representadas através de uma onda sinusoidal, como indica a Fig. 6, introduzido as principais variáveis que caraterizam a onda: em que H representa altura de onda, T o período de onda, C a velocidade com que a onda se propaga, L o comprimento da onda, d a distância ao fundo a partir do nível de água estático (Kamphuis, 2000).

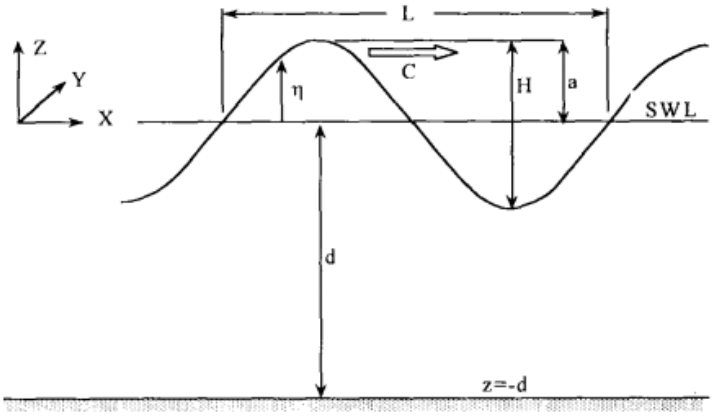


Fig. 6 – Perfil sinusoidal com a representação das principais variáveis (Kamphuis, 2000).

A Fig. 7 apresenta a classificação das ondas com base na sua frequência e período. É de salientar que o período das ondas de maré é superior ao das ondas provocadas pelo vento.

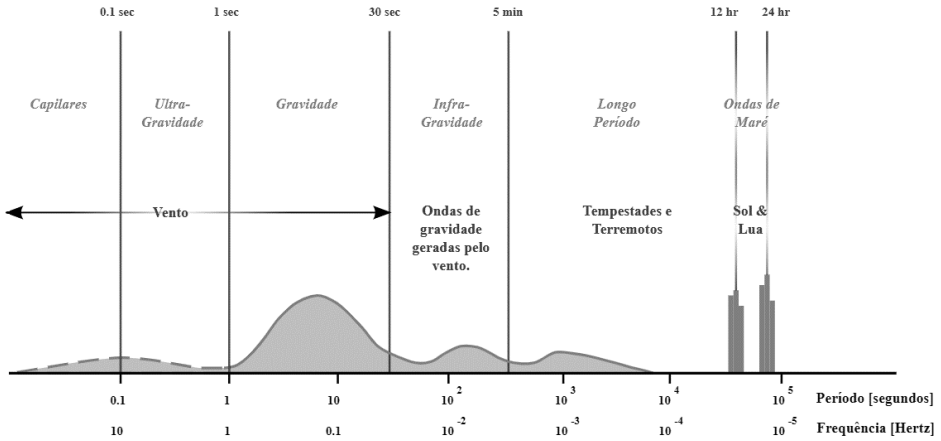


Fig. 7 – Classificação das ondas tendo em consideração o seu período, adaptado de (Kinsman, 1984).

A ação do vento sobre a superfície livre de uma massa de água cria pequenas perturbações e turbulência. A transferência de energia do vento para a onda pode ocorrer de duas formas. Como sobre a crista da onda a ação do vento é maior, ocorrerá na zona da cava uma diminuição da velocidade do vento, ou até uma inversão da direção à crista, pelo que a resultante das tensões tangencias tenderá a deslocar a água em direção a crista em ambas as fases. A forma da onda também tem como efeito que a velocidade do vento seja maior na crista e menor na cava. Tendo em consideração o princípio de Bernoulli, é possível concluir que a pressão é menor sobre a crista e maior sobre a cava. Este efeito tenderá novamente a elevar a crista da onda e empurrar a cava para baixo (Kamphuis, 2000). A Fig. 8 demostra este efeito.

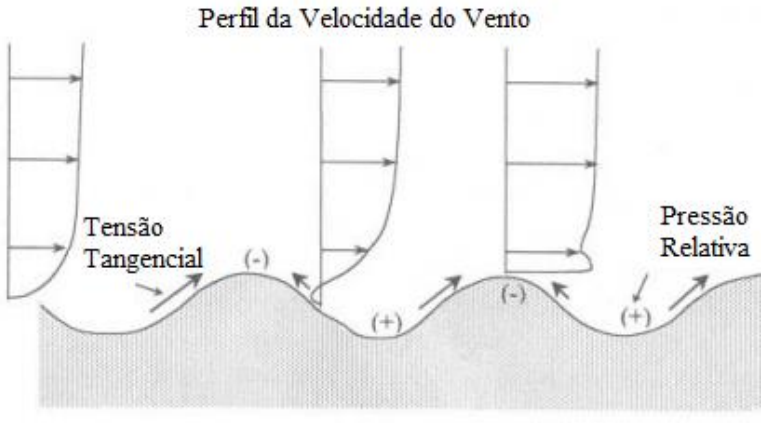


Fig. 8 – Transferência de energia do vento para a massa de água, adaptado de Kamphuis (2000).

Em grandes superfícies da água, a energia de uma tempestade é transferida para a água e produzirá ondas de diferentes períodos e direções. À medida que as ondas se propagam existirá uma dissipação de energia devido ao atrito interno e a energia das altas frequências será transmitida para as menores frequências, permitindo uma melhor reordenação das ondas à medida que estas se afastam da fonte geradora. A estas onda dá-se a designação de ondulação. No litoral existe tanto o efeito da ondulação e das vagas. A Fig. 9 ilustra o espectro que resulta da combinação das ondas produzidas pelo vento localmente chamadas de vaga e da ondulação (Kamphuis, 2000).

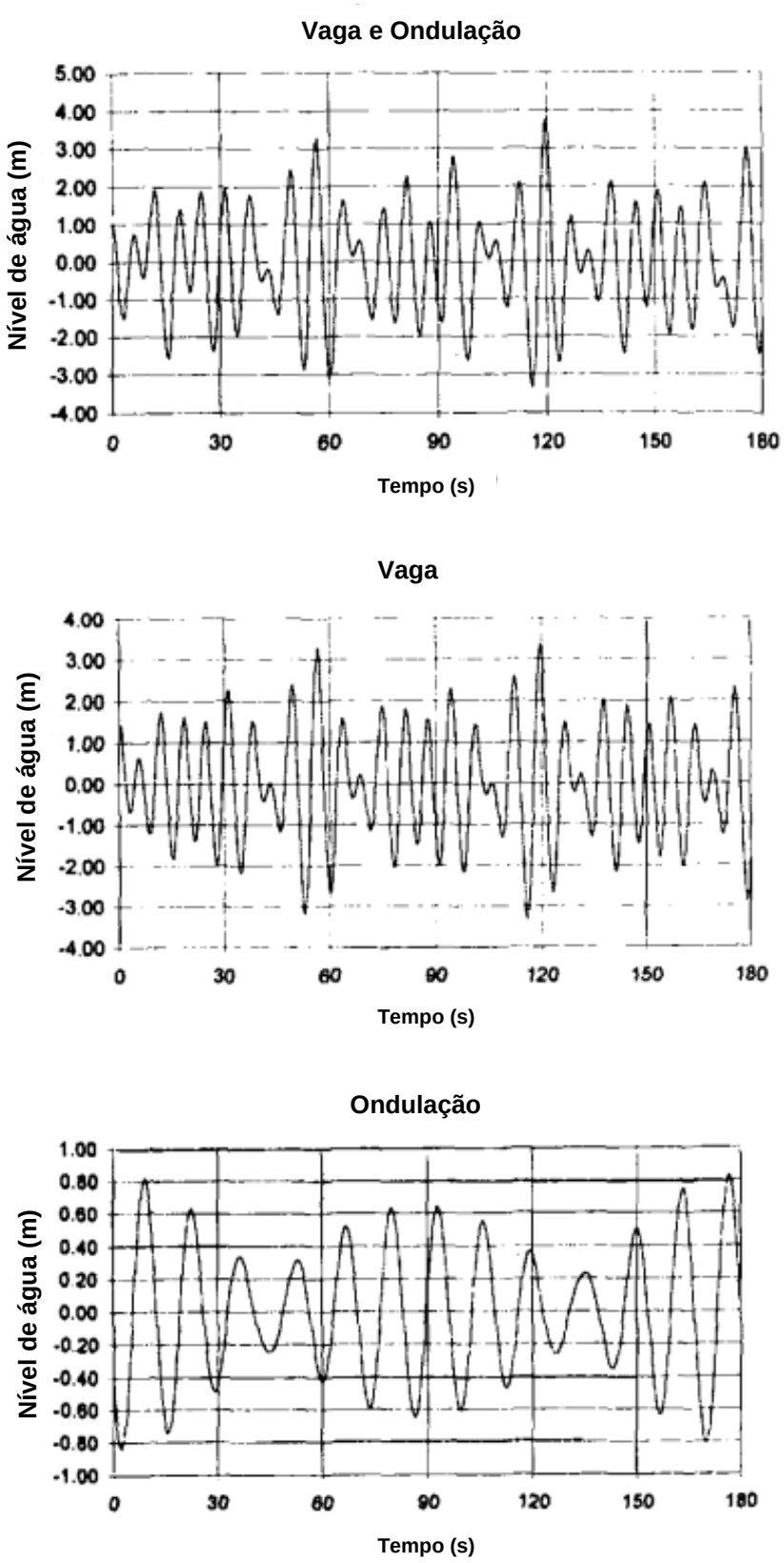


Fig. 9 – Vaga (*Sea)* e ondulação (*swell)* em separado e a sua conjugação (Kamphuis, 2000).

2.5. REBENTAÇÃO EM ÁGUAS POUCO PROFUNDAS

Em águas profundas não existe interação das ondas com o fundo. De facto abaixo da base da onda não se sentirá qualquer ação que esteja a acontecer à superfície. A Fig. 10 mostra que à medida que a onda se aproxima da costa, a profundidade de água começa a ter influência nas características da onda e as orbitas circulares que descrevem as partículas de água em águas profundas transforma-se em orbitas elípticas à medida que se aproximam da costa, devido à interação com o fundo. De salientar que estes fenómenos têm um papel importante no que toca ao transporte, erosão e deposição dos sedimentos (Garrison, 2012; Pecher e Kofoed, 2017; US Army Corps of Engineers, 2008).

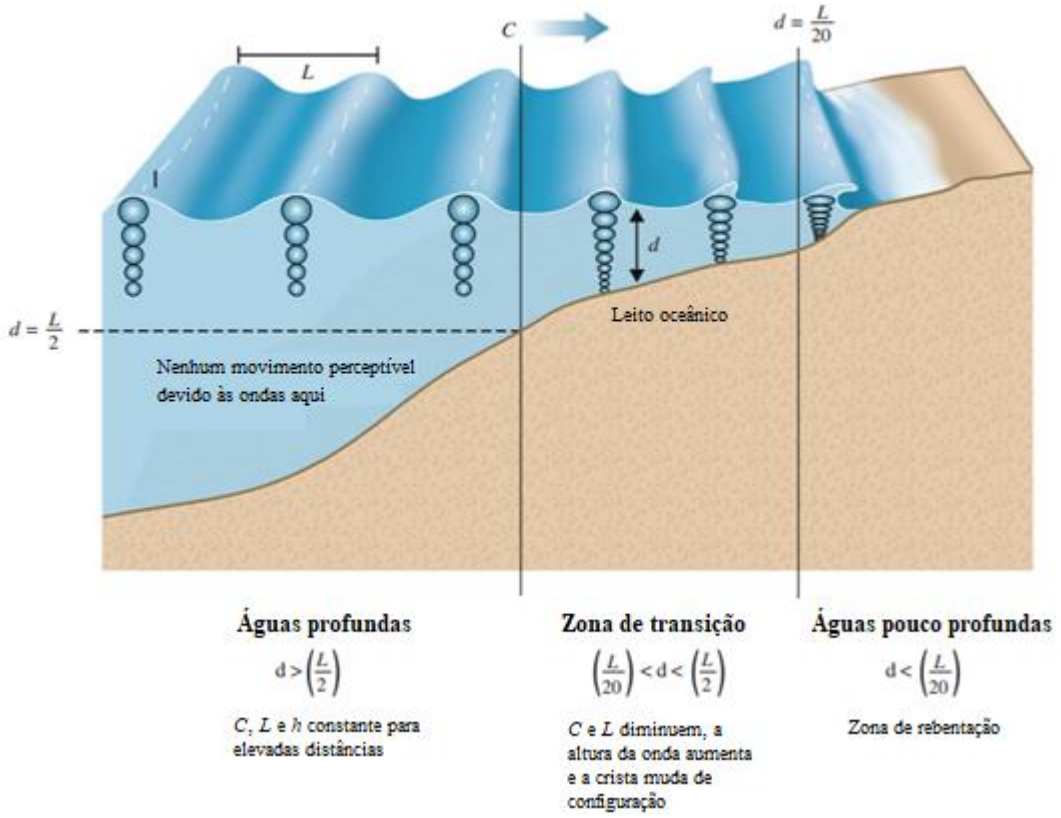


Fig. 10 – Trajetórias das partículas de água em águas profundas e pouco profundas (Pecher e Kofoed, 2017) com base em Ippen (1966).

2.6. MARÉ

A maré, em conjunto com as ondas, são os elementos mais importantes quando se fala da morfologia das praias. Em comparação com as ondas, a maré desempenha uma ação mais subtil, pelo que a sua compreensão é vital no momento de realizar um estudo morfológico. Para tal é preciso expor o conceito de maré enchente e maré vazante. Neste enquadramento é importante destacar que existem 3 diferentes classificações da maré (Davies, 1964): para amplitudes menores que 2 m temos as micro-marés (*micro-tidal),* as meso-marés (*meso-tidal)* para amplitudes de 2 a 4 m e as macro-marés (*macro-tidal)* para amplitudes superiores de 4 m. A Fig. 11 mostra a influência de meso-marés num estuário, em que as correntes de enchente entram no estuário a uma velocidade maior devido ao estreitamento da embocadura. Uma vez ultrapassado este limite, a corrente de maré sofre uma diminuição de velocidade, permitindo a deposição de sedimentos. No caso contrário, na maré de vazante, os sedimentos que se encontram no estuário são transportados para o oceano, uma vez que a embocadura apresenta uma

largura menor que o oceano, pelo que vai existir um aumento da velocidade e deposição dos sedimentos num delta. A circulação na embocadura depende da amplitude da maré, da geometria da embocadura, da geometria do litoral, da existência e caraterísticas de estruturas artificias, da batimetria, do vento e do regime de caudais afluentes dos rios. (Davies, 1964; Hayes, 1975; Masselink e Short, 1993; Militello e Hughes, 2000).

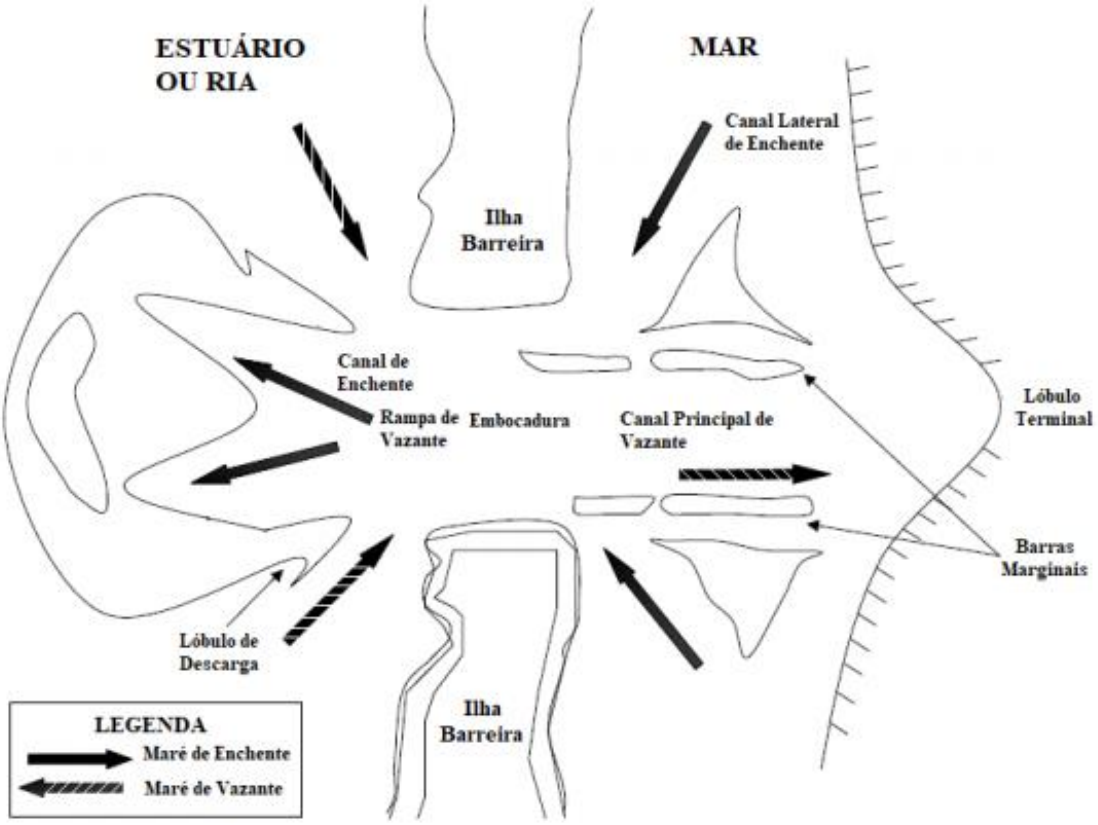


Fig. 11 – Representação da iteração de maré, adaptado de Hayes (Hayes, 1975).

2.7. SISTEMA DUNA-PRAIA

É uma mais valia introduzir o conceito de perfil de equilíbrio da praia no momento de discutir o sistema duna-praia. Este perfil apresenta várias características como: tendência para ter uma geometria côncava, declive relacionado com o diâmetro das partículas (diâmetros pequenos estão relacionadas com declives mais suaves) e, por último, a ocorrência de ondas de maior declividade resulta em declives mais suaves e formação de barras (Dean, 1991).

Trata-se de um conceito teórico, para uma agitação de carácter constante. De qualquer forma, facilita a definição de que se uma praia se encontra em equilíbrio irá dissipar a energia da agitação marítima sem modificação significativa no seu perfil, isto é, um perfil sem erosões ou deposições. No entanto, na prática, este perfil não é obtido por completo, devido a que a agitação não é constante ao longo do tempo, menos restantes variáveis. Uma vez que o perfil da praia não se encontra em equilíbrio com as ondas, a areia tenderá a distribuir-se de forma a encontrar um equilíbrio, dependendo das condições de agitação, forma do perfil existente e das propriedades da areia. Resultando em que a taxa de transporte da areia será efetuada de forma transversal em direção à duna, levando à acumulação de areia na costa e nas

bermas ou direção ao mar, com erosão na parte superior do perfil e a formação de uma barra. Estes perfis são vulgarmente conhecidos por perfil Verão/Inverno ou perfil de resposta de tempestade (Larson et al., 1989).

A Fig. 12 representa as variações do perfil da praia para os eventos mais comuns. De salientar que a figura 12 (e) representa o perfil verão/inverno anteriormente discutido.

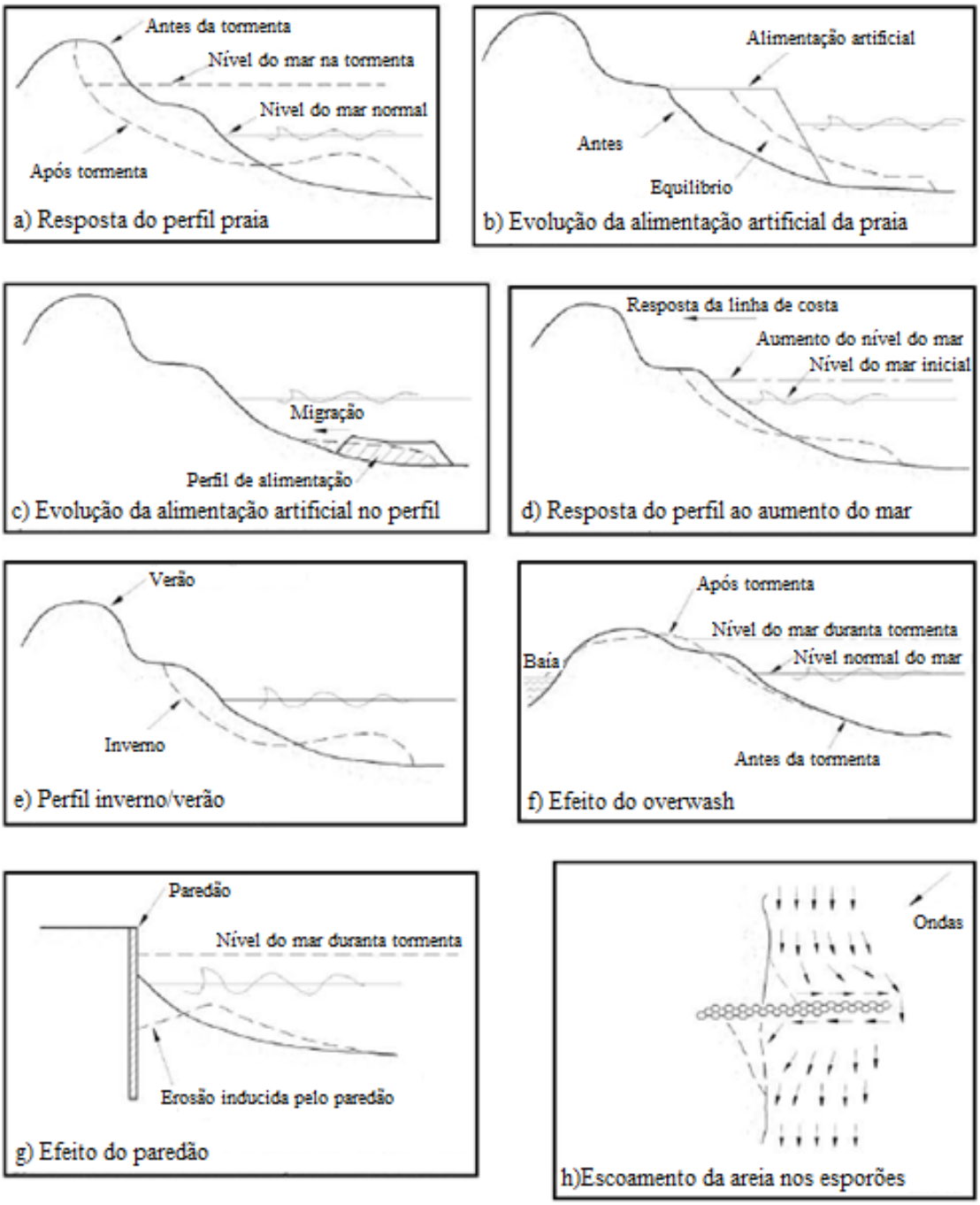


Fig. 12 – Processos mais relevantes no perfil transversal de uma praia arenosa, adaptado de US Army Corps of Engineers (2008).

2.8. ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

As alterações climáticas são o tema ambiental mais discutido nos últimos anos, e estão relacionadas com o aumento da produção de CO_2 devido à queima de combustíveis fosseis, assim como com a libertação de outros gases como o metano, óxido nitroso e clorofluorcarboneto (CFC). Estes gases são conhecidos como gases de efeito de estufa. A Fig. 13 ilustra a variação da concentração de CO_2 em amostras de gelo obtidas na estação Vostok, permitindo concluir que a concentração atual está a aumentar (Houghton, 2005).

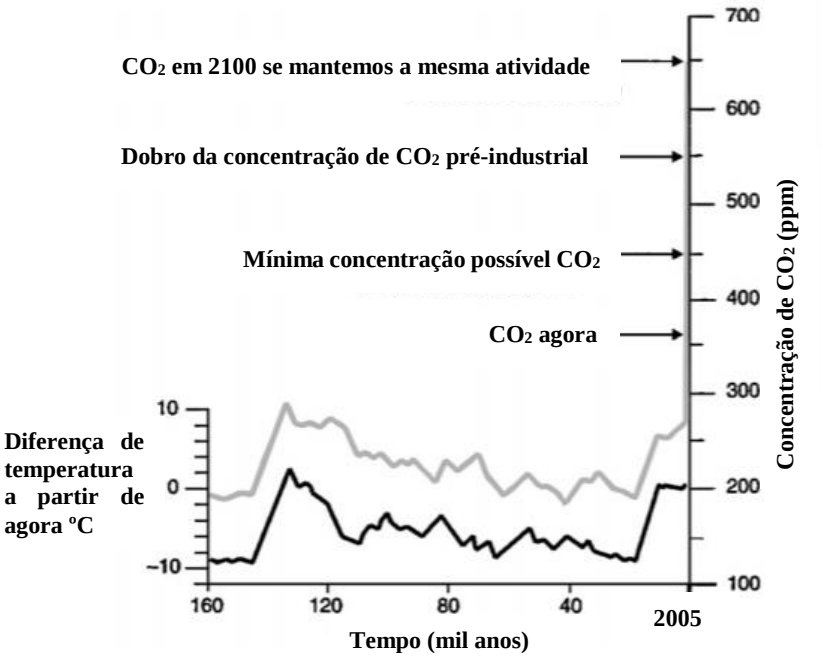


Fig. 13 – Variação dos últimos 160 000 anos da temperatura polar e concentração atmosférica de CO_2 obtida pela estação Vostok, Antártida (Raynaud et al., 1993) e projeções de possíveis concentrações (Houghton, 2005).

A energia de radiação transmitida pelo sol que aquece a superfície do planeta e a radiação térmica que é irradiada da superfície da Terra para o espaço, em média, equilibram-se. O efeito estufa surge devido à presença na atmosfera de gases de efeito de estufa que absorvem a radiação térmica emitida pela superfície terreste, algo similar ao que acontece nas estufas, em que o vidro da estufa tem propriedades parecidas aos gases de efeito estufa, na medida que absorvem radiação infravermelha ao mesmo tempo que é transparente à radiação na parte visível do espectro (Houghton, 2005).

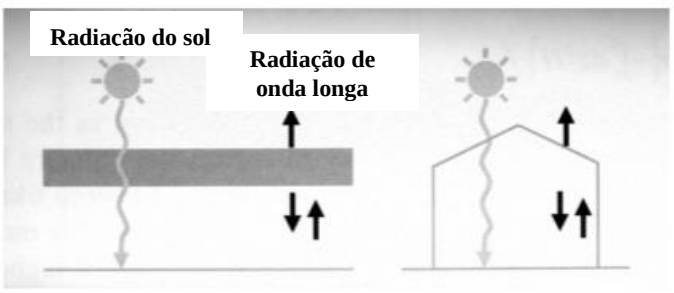


Fig. 14 – Semelhança de efeitos entre a sol-atmosfera e sol-estufa (Houghton, 2005).

Em 1827 o cientista francês Jean-Baptiste Fourier reconheceu este efeito e em 1860 o cientista britânico John Tyndall conseguiu medir a absorção da radiação infravermelha pelo dióxido de carbono e vapor de água, sugerindo que os períodos glaciares estejam relacionados com uma diminuição dos gases de efeito de estufa. Só em 1896 o químico sueco Svante Arrhenius calculou o efeito do aumento das concentrações desses gases e estimou que a eventual duplicação da concentração de dióxido de carbono teria como consequência um aumento da temperatura média global de cerca de 5 a 6 ˚C (Houghton, 2005; Mudge, 2002).

O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), que desenvolve cenários através da análise dos Special Reports on Emission Scenarios (SRES), estuda projeções de diversas variáveis, entre elas a temperatura para diversos cenários (Fig. 15). O cenário A1 representa o caso de uma economia em rápido crescimento económico, em que a população atinge o máximo a meio do século e decresce posteriormente. Dentro do grupo A1 existem diversas variantes com respeito ao consumo de energia: A1FI consumo intensivo de combustíveis fósseis, A1T sem uso de combustíveis fósseis, A1B em que existe um equilíbrio entre todas as fontes. O cenário A2 descreve um mundo mais heterogéneo, com preservação da identidade local e padrões de fertilidade entre regiões que convergem a uma velocidade menor e com um aumento contínuo da população. No cenário B1 a população atinge um máximo em meados do século e diminui de modo idêntico ao representado para o caso A1, mas com uma mudança económica orientada para os serviços e informação, com introdução de tecnologia limpas e eficientes em termos de recursos, onde se faz enfase na sustentabilidade económica, social e ambiental. Por último, o cenário B2 dá enfase a uma solução local para a sustentabilidade da economia local, social e ambiental, com uma população em contínuo crescimento e a um ritmo inferior a A2, níveis intermédios de desenvolvimento económico, com a tecnologia a desenvolver-se mais lentamente e mais diversificadas que no caso de B1 e A1. O cenário B2 está mais focado na proteção ambiental e na equidade social, concentrando-se em soluções a nível regional (Houghton et al., 2001).

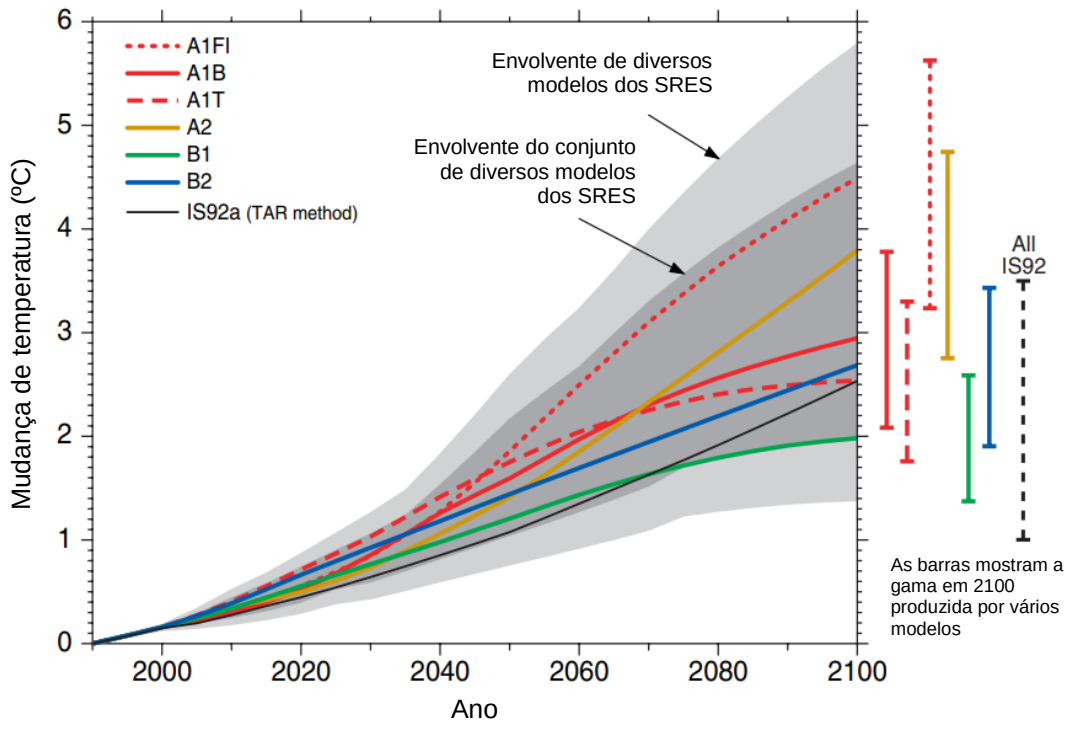


Fig. 15 – Variação da temperatura para diferentes cenários (Houghton et al., 2001).

A "Envolvente de diversos modelos dos SRES" é a temperatura para o modelo simples quando sintonizado com uma série de modelos complexos com uma gama de sensibilidade climática. Para qualquer cenário, o modelo indica que ao fim deste século a temperatura irá aumentar.

Em todas as simulações realizadas existe um aumento da temperatura em 2100 relativamente ao 2000, com um valor máximo de 5.8 ºC e mínimo de 1.4 ºC. Embora estes números possam não ser muito relevantes, de forma a estabelecer uma escala, uma alteração de 5 ou 6 ºC é a alteração média global que ocorreu entre a metade de um era glacial e o período quente entre as idades do gelo (Houghton et al., 2001).

Os cenários anteriormente apresentados (Fig. 15) são agora relacionados com o possível aumento do nível médio da água do mar. A "Envolvente de todos os modelos do SRES, com inclusão da incerteza do gelo" representa a incerteza devido à mudança do solo-gelo, do *permafrost* e deposição de sedimentos. A Fig. 16 apresenta o aumento do nível médio da água do mar para os cenários anteriormente apresentados.

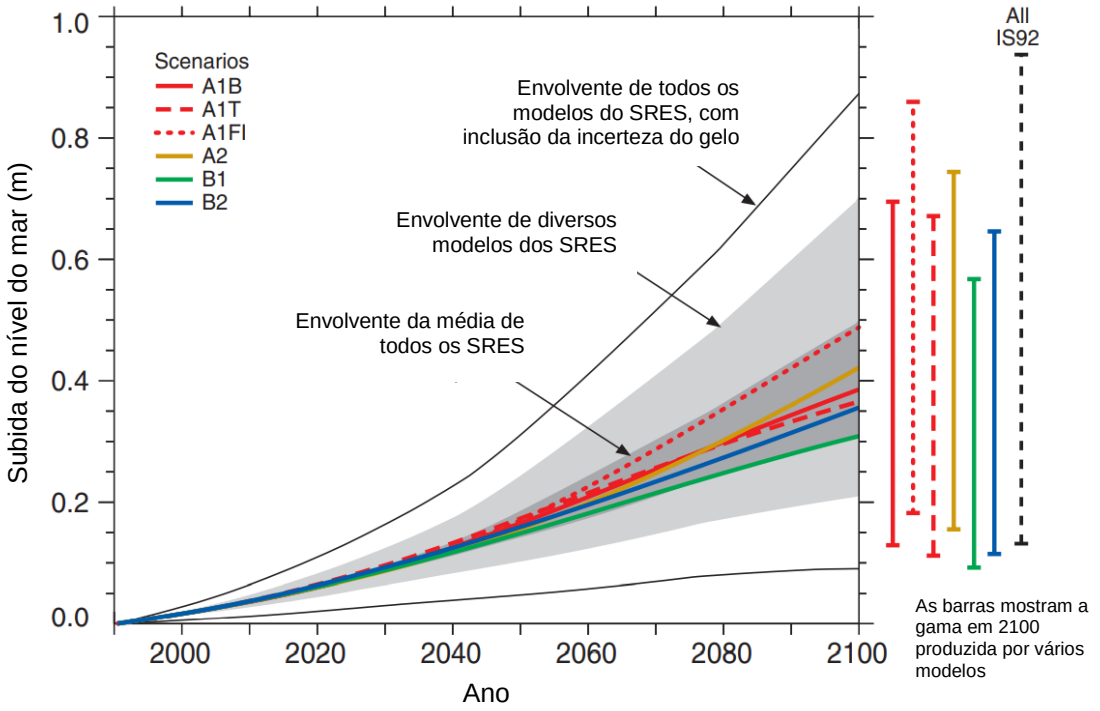


Fig. 16 – Aumento do nível médio da água do mar para diferentes (Houghton et al., 2001).

A determinação da altura que o mar poderia subir é um processo bastante complexo, uma vez que esta variável depende muito da temperatura que o oceano possa atingir e de outros fatores. A incerteza do modelo utilizado mostra um máximo de 90 cm e um mínimo de 10 cm. Um valor espectável para esse aumento estaria compreendido entre 20 e 40 cm para o intervalo de tempo de 100 anos.

Dado que metade da população mundial vive em zonas costeiras, um aumento do nível médio da água do mar teria graves consequências. De forma a exemplificar, um aumento de 0,5 m provaria uma redução de 10% de terrenos habitáveis no Bangladesh. Como consequência 6 milhões de habitantes seriam afetados (Houghton et al., 2001).

2.8. SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA

As alterações climáticas estão a contribuir para o aumento da pressão nas regiões costeiras, sobretudo devido à subida do nível médio da água do mar, erosão, inundações e galgamentos. As soluções baseadas na natureza têm como objetivo mitigar os efeitos das alterações climáticas através de um conjunto de ações e políticas que utilizam o "poder" da natureza para solucionar os desafios que se apresentam. O potencial destas soluções é muito relevante dado que a aplicação destas soluções juntamente com soluções no sector terreste em geral, poderia contribuir para uma diminuição das alterações climáticas em 30% no ano 2050, o que permitia cumprir com o estabelecido no Acordo de Paris para limitar as alterações climáticas (WWF, 2021).

As soluções baseadas na natureza podem ser incorporadas em diversos ambientes, tais como rios, sistemas praia-duna, ilhas, florestas, pântanos e recifes, e podem ocorrer naturalmente ou serem construídas aplicando conhecimentos de engenharia (Bridges et al., 2021). Na secção seguinte serão apresentados e discutidos alguns casos a título de exemplo.

2.8.1 KING FISHER BEACH

Considerada pelos locais como o segredo mais bem guardado do Texas, a King Fisher Beach está localizada no Port O'Connor, Texas, Estados Unidos, próximo de habitats críticos de espécies ameaçadas como a Batuíra-melodiosa (*Charadrius melodus*) e o grou-americano (*Grus americana*). A praia encontra-se suscetível a tempestades, à subida do nível médio da água do mar e à erosão costeira. A realização de dragagens cíclicas de manutenção de um canal de navegação próximo da praia permitiu depositar na costa cerca de 58.000 m^3 de sedimentos, para combater a erosão. Esta solução veio beneficiar ambas as partes, já que diminuiu o preço de dragagem e aumentou o volume sedimentos na praia, o que permitiu proteger a comunidade (Bridges et al., 2021).

2.8.2 SABINE NATIONAL WILDLIFE REFUGE

O Sabine National Wildlife Refuge, localizado em Cameron, Louisiana, nos Estados Unidos, durante as tempestades tropicais, sofre a invasão de água salgada e converte os sapais intermédios vegetativos em grandes áreas de águas salobras, poucos profundas. Por outro lado, a ação das ondas provoca erosão ainda maior nos pântanos circundantes. A implementação de material proveniente da dragagem do canal de navegação do rio Calcasieu, que ocorrem a cada dois anos, permite a alimentação dos pântanos adjacentes, reduz a distância que as ondas percorrem e diminui a erosão. Determinou-se que a construção de um sistema de transposição de areia permanente no rio, localizado no canto nordeste da reserva, eliminaria os impactos e custos associados por cada dragagem individual, permitindo poupar cerca de 2 milhões de dólares por cada dragagem (Bridges et al., 2021).

2.8.3 SWAN ISLAND

A Ilha Swan, pertencente ao grupo das Smiths Islands, localizado em Chesapeake Bay, Maryland, Estados Unidos, funciona como defesa contra a agitação marítima. A aldeia de Ewell apresentou nos últimos 75 anos uma taxa de erosão de cerca de 2 m por ano, devido ao aumento do nível médio da água do mar, défice de sedimentos e subsidência.

Para contrariar estas perdas, foi realizada uma intervenção de alimentação artificial com sedimentos, em conjunto com a plantação de vegetação nativa. Estas medidas ajudaram à estabilização dos sedimentos

colocados, minimizaram a erosão e facilitaram a captação de novos sedimentos, aumentando assim a resiliência e resistência às tempestades e ao aumento do nível médio da água do mar (Bridges et al., 2021).

3
CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA

O presente caso de estudo, a restinga do rio Cávado, está localizada no município de Esposende, no distrito de Braga, na região norte de Portugal. Este distrito tem fronteira a norte com o distrito de Viana do Castelo, a leste com o distrito de Vila Real, a Sul com o distrito do Porto e o Oeste com o Oceano Atlântico, como indica a Fig. 17, que também apresenta a localização da embocadura do rio Cávado.

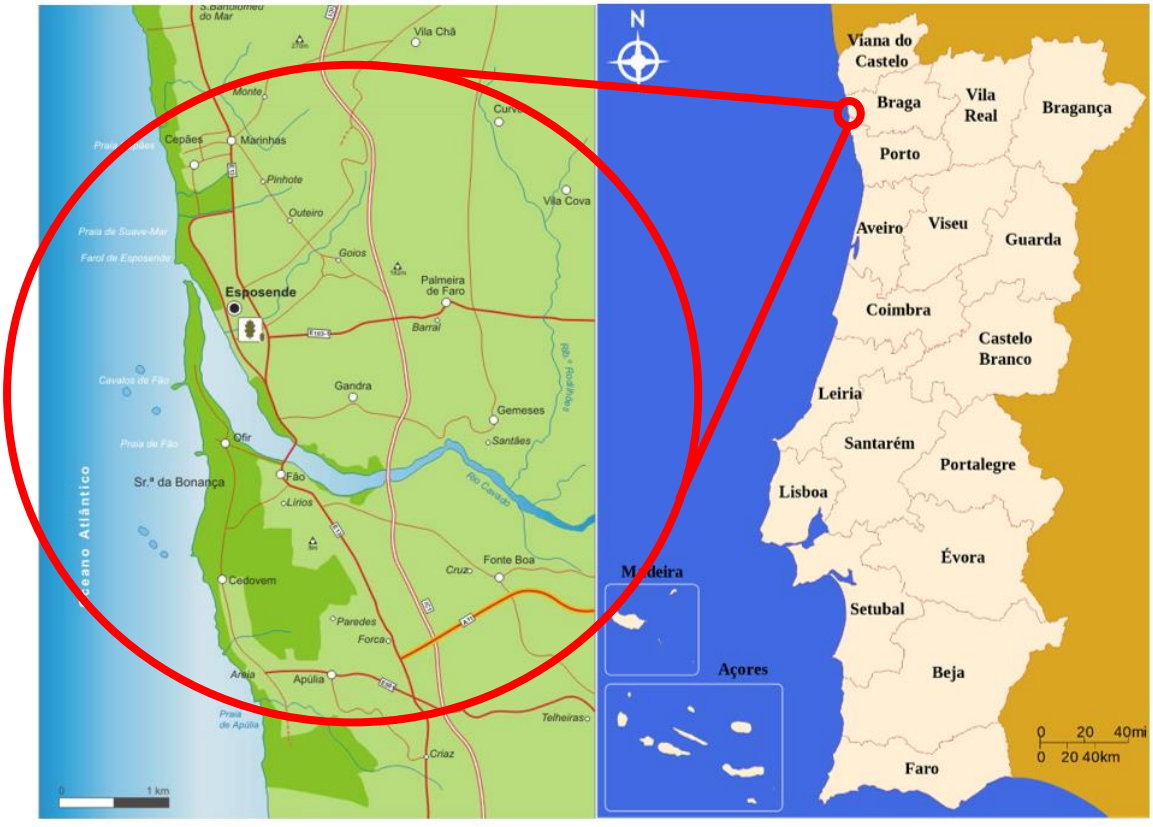


Fig. 17 – Adaptada de Mapa de Portugal Continental (Paclopes, 2007) com a localização de Esposende e da restinga do rio Cávado (ESPA, 2011).

A restinga do rio Cávado compreende parte do Parque Natural do Litoral Norte que se estende por 16 km no litoral (Fig. 18). A história deste parque data de 1987 quando foi classificado como área protegida. Posteriormente, em junho de 2005, foi distinguido como Parque Natural devido ao crescimento urbanístico desordenado e do interesse na preservação natural dessa área importa referir que não se estabeleceu que a zona ficasse interdita, mas a distinção dita regras e mecanismos para a sua correta utilização (VisitEsposende, 2021). A extremidade norte da restinga sofre frequentemente alterações morfológicas importantes devido a agitação marítima e dá maré, que provoca o recou da mesma (Portela, 2017). De acordo com o livro "Sistemas Dunares do Litoral de Esposende", esta zona do litoral apresenta 101 espécies de fauna e flora, em que alguns espécimes estão em estado vulnerável, como por exemplo o *Pelobates cultripes* (Gomes et al., 2002).



Fig. 18 – Parque Natural Litoral Norte (VisitEsposende, 2021).

Para além da sua mais-valia ambiental e turística, a restinga desempenha o papel de proteção da cidade de Esposende nomeadamente da ação da agitação marítima, devido à sua localização (Portela, 2017; VisitEsposende, 2021).

3.2. Parâmetros Físicos da Zona de estudo e os Seus Intervenientes

As interações que ocorrem na restinga do rio Cávado são complexas, existindo diversos intervenientes. De referir que o modelo numérico a implementar para o estudo da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar

na zona de Esposende, tem algumas limitações, como é habitual. Os parâmetros a utilizar no estudo, e que por isso interessa concretizar com atenção são: os caudais do rio Cávado, que são constituídos por um componente líquido, e por uma componente sólida (esta última não pode ser representada no modelo numérico), a interação das ondas com a embocadura e a restinga, a subida e descida da maré e a dimensão dos sedimentos.

Nas secções seguintes serão apresentados estes parâmetros em pormenor. É importante referir que neste capítulo serão também representados os valores a usar no modelo numérico para a tempestade que ocorreu entre às 00:00 horas do dia 03/03/2014 e às 00:00 horas do dia 05/03/2014.

3.2.1. RIO CÁVADO

Com uma extensão de aproximadamente 135 km, o Rio Cávado nasce na Serra do Larouco, em Montalegre, no distrito de Vila Real, e desagua no Oceano Atlântico após passar pela cidade de Esposende. No seu percurso até ao mar atravessa os seguintes concelhos: Terras de Bouro, Amares, Vila Verde, Viera do Minho, Póvoa de Lanhoso, Braga, Barcelos e Esposende, representados na Fig. 19 (Almeida, 1985).

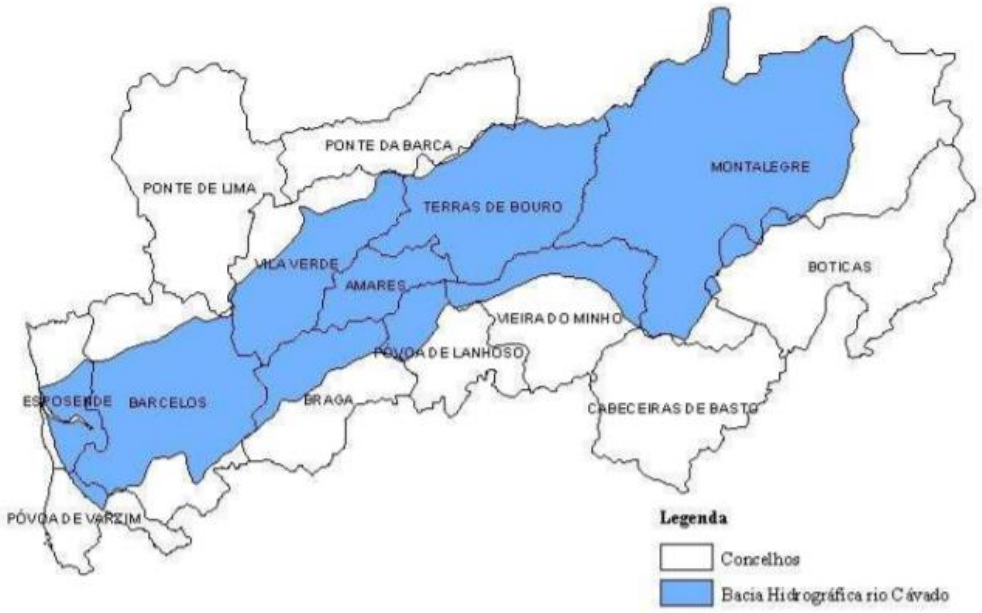


Fig. 19 – Bacia Hidrográfica do rio Cávado e os concelhos abrangidos (EDP, 2008).

A bacia hidrográfica tem uma extensão de 1699 km^2 e apresenta dois afluentes importantes. À direita (no sentido de escoamento) o rio Homem, com uma bacia hidrográfica de 256 km^2, que nasce na Serra do Gerês; e à esquerda o rio Rabagão, com uma bacia hidrografia de 248 km^2, que nasce entre as Serras do Barroso e Larouco (APA, 2014).

Na margem norte do estuário do rio Cávado apresenta infraestrutura pesqueiras, portuárias, recreação e de construção naval. Na margem sul do estuário encontra-se uma longa restinga que separa estuário do mar. Na embocadura existe um banco de areia visível em baixa-mar que dificulta a navegabilidade, de referir que o interior do estuário também apresenta bancos de areia e pequenas ilhas que separam canais de baixa profundidade (Pinho, 2005).

Relativamente aos dados do caudal, o ideal seria ter acesso a essa informação numa estação hidrométrica perto da desembocadura do rio Cávado de forma a considerar toda a área da bacia com interesse. No entanto, de acordo com os dados consultados, das estações a montante da embocadura só a estação de Barcelos (04F/02H) apresenta informação para a variável caudal, mais especificamente para o caudal médio diário, com dados de 01/10/1978 até 03/06/2002. De referir a existência de algumas falhas dessa série temporal (SNIRH, 2021).

De forma a balizar os valores do caudal médio diário, os registos da estação de Barcelos apresentam um máximo de 735.89 m^3/s no dia 04/02/1988 e um valor mínimo (não nulo) de 1.60 m^3/s a 02/10/1981. Numa análise global, os dados apresentam um total de 7419 registos de caudal (Fig. 20) apresentando um intervalo de variação elevado. Assim, no modelo numérico, serão consideradas condições e caraterísticas regulares e extremas.

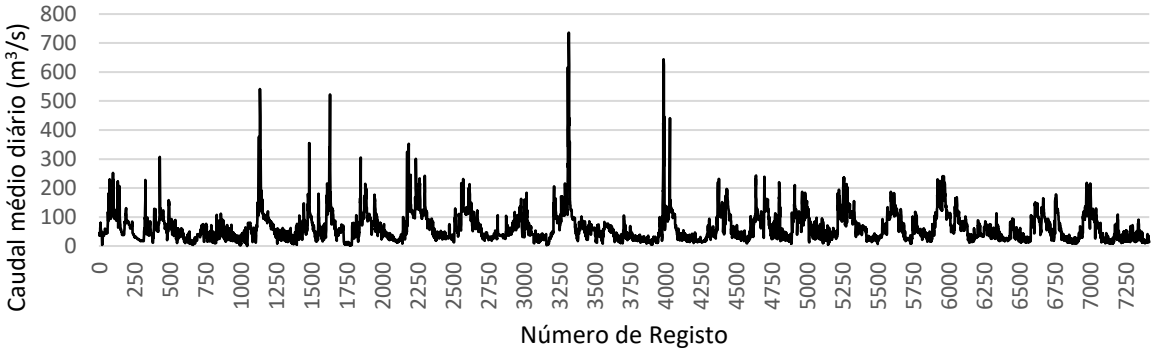


Fig. 20 – Série temporal relativa ao caudal médio diário na estação de Barcelos.

Não existem registos para a data de estudo (03/03/2014 até 05/03/2014), pelo que foi feita uma análise para os meses de fevereiro e de março, que resultou num caudal médio diário de aproximadamente 64 m^3/s para ambos os meses. Como referido anteriormente, o valor máximo de caudal foi 735.83 m^3/s no dia 04/02/1988. Utilizando a Fig. 21 é possível constatar que um caudal de 100 m/s corresponde a um caudal que é igualado ou excedido 30% do tempo (com base nos meses de outubro a março). Tendo por base estes valores foi definido uma descarga fluvial constante de 100 m^3/s durante toda a simulação.



Fig. 21 – Curva de duração do caudal médio diário (apenas outubro a março).

3.2.2. AGITAÇÃO MARÍTIMA

A representação da agitação marítima num modelo numérico morfodinâmico é usualmente traduzida através de um espectro de energia. Existem diversos espectros para esse fim, sendo o mais usado o espectro de JONSWAP (The Joint North Sea Wave Project), que resultou de um estudo empírico realizado no norte de Alemanha, na ilha de Sylt, no mar do norte, durante várias semanas, com o recurso a sensores, 13 estações e boias em 1969 (Hasselmann et al., 1973).

As variáveis necessárias para caraterizar um espectro de JONSWAP são: altura Hm0 (Hm0), período de pico do espectro (Tp), valor de majoração do pico JONSWAP (gammajsp), coeficiente de dispersão direcional (s), o ângulo de incidência da onda em convenções náuticas (mainang), a duração do espectro e o tempo utilizado para descrever as séries temporais de energia das ondas (dtbc) (Deltares, 2018). A Fig. 22 representa o valor de Hm0 em função da direção das ondas para o intervalo de tempo entre 2011 e 2019. Esses resultados permitem verificar que a agitação marítima vem, principalmente, do quadrante Noroeste.

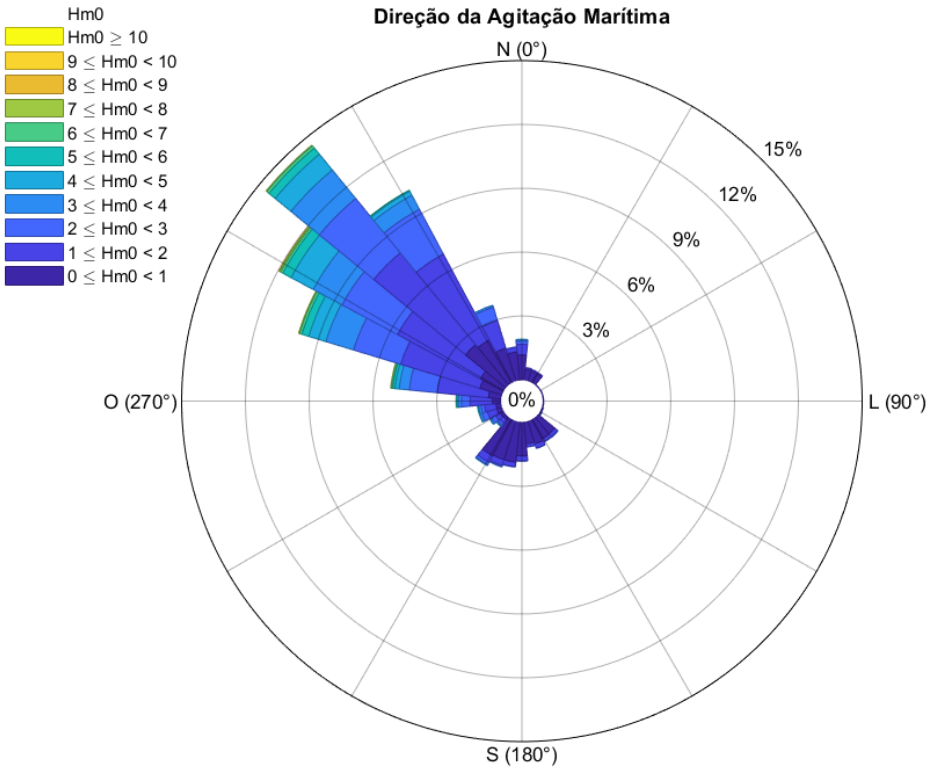


Fig. 22 – Direção da agitação marítima entre 2011 até 2019.

Os valores usados para definir o espectro JONSWAP são ao período compreendido entre o dia 03/03/2014 00:00:00 e o dia 05/03/2014 00:00:00. A Tabela 1 apresenta as caraterísticas da agitação marítima durante esse período, nomeadamente os valores horários da: altura de onda significativa (Hm0), período de pico do espectro (Tp) e o ângulo de incidência da onda em convenções náuticas (mainang). É de salientar que esta tabela apresenta valores repetidos que podiam ser removidos para simplificar a tabela, no entanto, optou-se pela representação das condições na forma que os mesmos devem ser fornecidos no modelo

Tabela 1 – Caraterísticas da agitação marítima fornecidos ao modelo numérico.

Hm0	Tp	Maining	Gammajsp	s	Duração	dtbc
3.75	11.80	301	3.3	4	10800	1
4.06	10.00	300	3.3	4	3600	1
4.81	10.00	300	3.3	4	3600	1
4.21	11.10	307	3.3	4	3600	1
4.82	11.80	310	3.3	4	3600	1
5.24	11.10	311	3.3	4	3600	1
5.68	12.50	316	3.3	4	3600	1
6.94	13.30	310	3.3	4	3600	1
7.33	13.30	308	3.3	4	3600	1
6.95	13.30	307	3.3	4	3600	1
8.87	18.20	303	3.3	4	3600	1
9.23	18.20	304	3.3	4	3600	1
9.28	18.20	305	3.3	4	3600	1
9.28	18.20	304	3.3	4	3600	1
9.45	18.20	302	3.3	4	3600	1
9.03	18.20	302	3.3	4	3600	1
8.10	18.20	303	3.3	4	3600	1
8.40	18.20	299	3.3	4	3600	1
9.10	18.20	300	3.3	4	3600	1
7.94	18.20	304	3.3	4	3600	1
7.97	18.20	307	3.3	4	3600	1
7.49	18.20	300	3.3	4	3600	1
6.94	15.40	308	3.3	4	3600	1
7.23	16.70	308	3.3	4	3600	1
6.69	16.70	313	3.3	4	3600	1
6.88	18.20	302	3.3	4	3600	1
6.54	18.20	306	3.3	4	3600	1
6.71	16.70	310	3.3	4	3600	1
6.02	16.70	303	3.3	4	3600	1
5.44	14.30	307	3.3	4	3600	1
6.31	16.70	303	3.3	4	3600	1
5.42	16.70	303	3.3	4	3600	1
4.80	15.40	304	3.3	4	3600	1
4.73	14.30	304	3.3	4	3600	1
4.66	13.30	312	3.3	4	3600	1
4.35	15.40	306	3.3	4	3600	1
4.92	15.40	308	3.3	4	3600	1
4.29	15.40	315	3.3	4	3600	1
4.49	14.30	304	3.3	4	3600	1
4.49	14.30	311	3.3	4	3600	1
4.73	14.30	309	3.3	4	10800	1
3.92	14.30	313	3.3	4	10800	1

3.2.3. MARÉ

A Fig. 23 apresenta a foz do rio Cávado para duas situações de maré distintas, aquando das duas visitas efetuadas ao local, a 27 de maio de 2021 às 17:55 horas (a), em que a preia-mar foi regista às 16:32 horas, e a de 30 de junho às 14:59 horas, em que a baixa-mar foi registada às 14:39 horas, valores retirados para Esposende (Tabela de Marés, 2021). Embora a amplitude da maré seja diferente devido a diferença de dias, as duas imagens permitem obter alguns conhecimentos sobre as condições locais, sensibilidade e sentido crítico para a posterior análise com o auxílio do modelo numérico.



Fig. 23 – Foz do rio Cávado (a) 27 de maio de 2021 às 17:55 horas e (b) 30 de junho de 2021 às 14:39 horas.

Foi ainda possível também ter acesso a informação da maré astronómica entre o dia 1/1/1980 e o dia 12/10/2020. Pelo que é possível utilizar os valores obtidos no estudo numérico (Fig. 24).

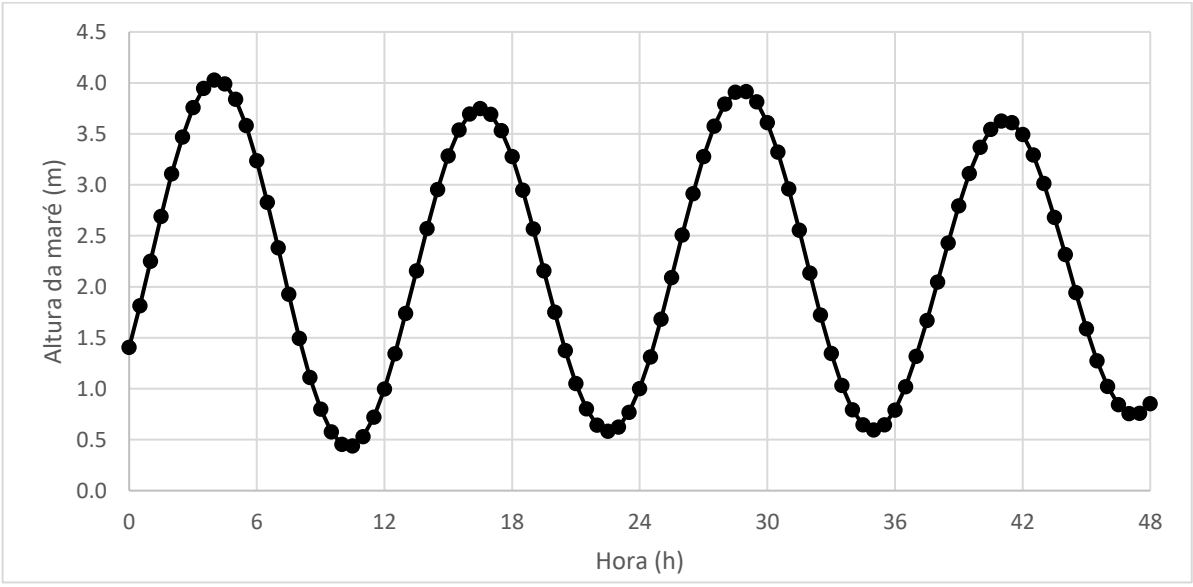


Fig. 24 – Altura da maré a fornecer ao modelo numérico para o período compreendido entre às 00:00 horas do dia 03/03/2014 e às 00:00 horas do dia 05/03/2014.

3.2.4. SEDIMENTOS

Um último parâmetro físico do caso de estudo, mas que não deixa de ter importância, é o material que compõe o litoral. Nos últimos anos foram efetuados vários estudos no estuário do rio Cávado, um deles entre a Ribeira da Reguenga e a foz do rio Cávado (Fig. 25), no qual se observou a ausência de litologias graníticas e um predomínio de litologias metassedimentares, isto é, rochas metamórficas que derivam de rochas sedimentares iniciais.

Neste troço o transporte e deposição de sedimentos sejam de origem fluvial e da deriva litoral. Os depósitos sedimentares recentes correspondem a aluviões atuais, areias e cascalheiras fluviais (EDP, 2008).

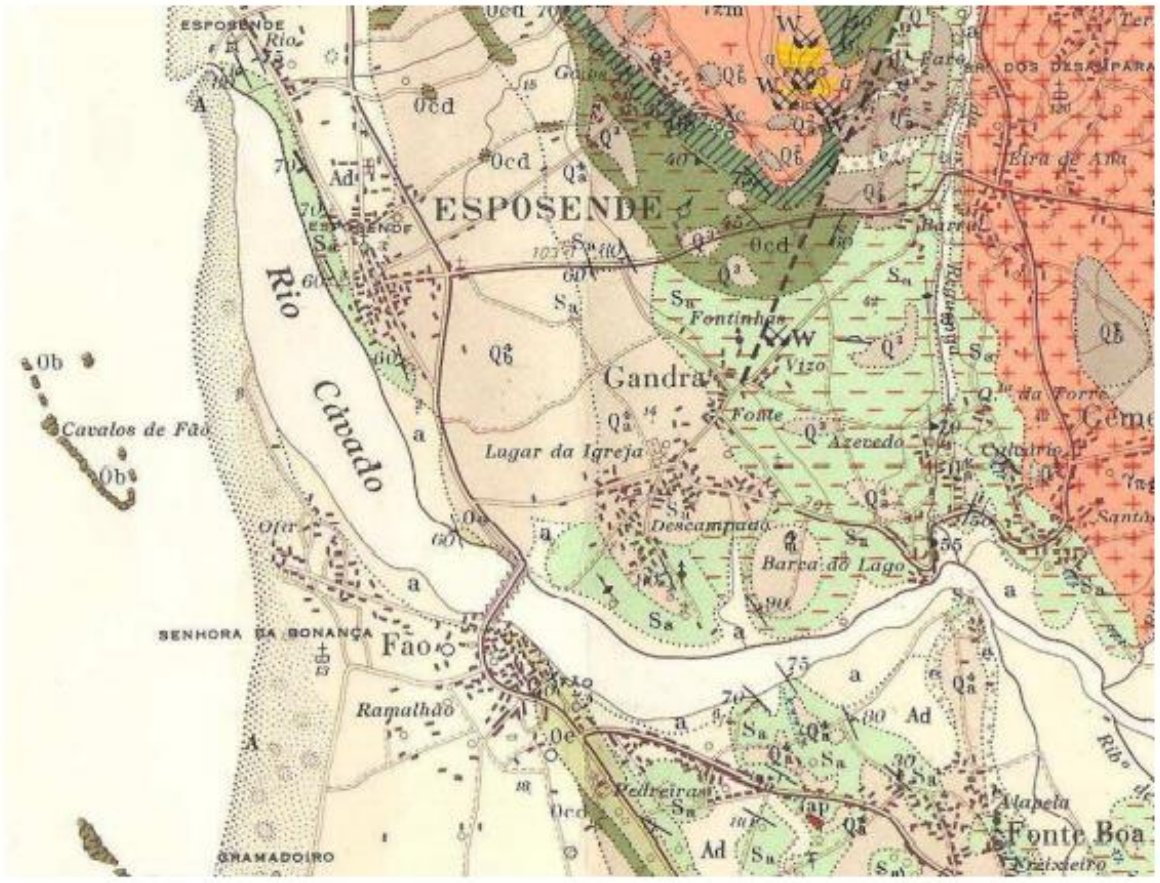


Fig. 25 – Troço entre a foz do rio Cávado e a ribeira de Reguenga (EDP, 2008).

Um parâmetro importante para a caraterização é o $D_{50,}$ que representa o peneiro para o qual a percentagem de acumulados é de 50%. A Tabela 2 contém os resultados de estudos realizados por diversos autores, sendo apresentada a localização (Fig. 26) e o diâmetro dos sedimentos.



Fig. 26 – Localização dos pontos de recolha de amostras de sedimentos (Cândido, 2020).

Tabela 2 – Características dos sedimentos recolhidos em vários locais dentro da área em estudo e na sua proximidade, adaptado de Cândido (Cândido, 2020).

Referência	Localização	D_{50} (mm)
Silva (2006)	Suave Mar	0.60
	Ofir	0.35
ISQ (2016)	EA1	0.28
	EA2	0.35
	EA3	0.40
	EA4	0.55
ISQ (2011 e 2012)	ESPB	0.02 - 2
	ESPC	0.02 - 2
	ESPR	0.02 - 2
	ESPP	0.02 - 2
Carvalho (2013)	E1	>2.00
	E1A	>2.00
	E2	>2.00
	E3	1.65
	E3a	>2.00

Existe uma significativa variação do parâmetro D_{50}, desde 2 a 0.28 mm no estuário, se não forem considerados os valores maiores que 2.00 mm e os valores apresentados pelo ISQ, que não apresenta um valor senão um intervalo de variação do diâmetro. A média dos valores resulta num D_{50} igual a 0.60 mm pelo que para o $D_{50,}$ no modelo numérico, foi considerado o valor de 0.5 mm.

3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR DA ZONA DE ESTUDO

Falar de dinâmica sedimentar em Portugal é um tema desanimador, de acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) que refere que, entre 1958 e 2010, Portugal apresentou uma taxa média de recuo entre 0.5 m/ano e 9.0 m/ano. Estes valores representam uma perda de território na ordem dos 12 km^2. Entre as zonas mais críticas do país no que se refere à erosão costeira está o concelho de Esposende, que conta com um recuo médio de 1.7 m/ano. O nível de erosão é de tal importância que o Presidente da

Câmara Municipal de Esposende, Benjamim Pereira, em entrevista a SIC expressa: *"... já estamos a assumir como perdidas as praias tal qual como as conhecíamos há umas décadas. Isso, nem vale a pena pensar nisso..."* (APA, 2019; SIC, 2021).

A Fig. 27 apresenta 3 panorâmicas da zona de estudo nomeadamente: a embocadura do rio Cávado, a iteração com o oceano Atlântico e a restinga do rio Cávado.



Fig. 27 – Panorâmicas da zona de estudo obtidas a 30 de junho de 2021.

De forma a fazer a continuidade com o que foi previamente discutido no capítulo 2.2, a Tabela 3 apresenta as barragens construídas no percurso do rio Cávado e afluentes, juntamente com o ano de início de construção, ano de fim da construção e de entrada em serviço, bem como uma estimativa do volume de sedimentação.

Tabela 3 – Barragens construídas no rio Cávado e afluentes. Adaptado de (Costa, 2004) e (Lameiro, 2009)

Nome da Barragem	Inicio da construção	Fim da construção	Entrada em serviço	Estimativa de sedimentação (m^3)
Paradela	1953	1958	1958	5,400,000
Salamonde	1950	1953	1953	8,700,000
Caniçada	1952	1955	1955	11,300,000
Alto Cávado	---	1964	1964	1,170,000
Penide	---	1951	1951	---
Alto Rabagão	1960	1964	1964	9,693,000
Venda Nova	1946	1951	1951	1,500,000
Vilarinho das Furnas	---	1971	1972	1,191,400

A Fig. 28 permite visualizar a localização geográfica das barragens na região norte, onde se inclui a zona de estudo, no âmbito do presente trabalho.



Fig. 28 – Localização das Barragem na região norte de Portugal (AAVN, 2021)

3.4. ESTRUTURAS E INTERVENÇÕES DE PROTEÇÃO COSTEIRA

Neste subcapítulo é abordado as estruturas costeiras existentes na zona de estudo, as atividades que foram desenvolvidas, isto é, os geocilindros, as dragagens e alimentações artificiais.

3.4.1. ESTRUTURAS COSTEIRAS EXISTENTES

A Fig. 29 apresenta os limites do caso de estudo representados no modelo numérico. É possível identificar a Norte o molhe Norte (1) e a Sul o esporão da restinga (3), bem como os diques existentes no interior do estuário (2).



Fig. 29 – Estruturas costeiras existentes na área em estudo: imagem satélite (a) e no local (b e c): (A) molhe, (B) dique e (C) esporão.

Essas três estruturas representam as estruturas costeiras existentes na zona de estudo, a reproduzir no modelo numérico. O molhe (1) apresenta dois troços diferentes, uma estrutura vertical de alvenaria de

pedra e betão com uma extensão de aproximadamente 95 m, seguida de uma estrutura em talude de enrocamento com aproximadamente 100 m de comprimento, que tem a capacidade de reter os sedimentos da praia a norte e apresenta uma curvatura acentuada na direção do oceano Atlântico.

O dique (2), paralelo à marginal de Esposende, que faz continuidade com o molhe, neste desempenha a função de proteção da cidade em caso de ocorrência de eventos extremos de agitação marítima.

De referir que atualmente, no seu tardoz, apresenta um valor de assoreamento muito acentuado, devido ao transporte sedimentar de origem fluvial e marítima.

O galgamento dessa estrutura em períodos de tempestade e em preia-mar permite que as ondas cheguem a atingir o muro da marginal. Por último, o esporão (3) localizado a sul e orientado para SW, tem uma forma curvilínea (NEMUS, 2003; Norvia, 2018; Pinho, 2005; Polis Litoral Norte, 2016).

3.4.2. Dragagens e Alimentações Artificias

As dragagens são uma atividade de extração de sedimentos para diversos fins, entre eles o de permitir a manutenção da navegabilidade de rios, estuários e portos que ficam com alguma frequência assoreados com sedimentos. Esses sedimentos podem ser de origem fluvial, marinha ou ambos.

O estuário do rio Cávado não é exceção, tendo sido realizadas dragagens ao longo dos anos. De forma resumida, são apresentadas as relativas a 1994, 2001 e 2006, que foram da responsabilidade do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (MAOT) e em que o volume dragado foi de 105 000 m^3, 15 000 m^3 e 112 000 m^3, a um custo unitário de 0.57 €/m^3, 1.30 €/m^3 e 5.89 €/m^3, respetivamente. As últimas dragagens realizadas nas últimas duas décadas constituem a reposição da restinga com o material dragado.

A título meramente indicativo, prevê no futuro a necessitar de realizar as seguintes intervenções: dragagens de manutenção na barra de 40 000 m^3 a cada 2-3 anos (ou 16 000 m^3 anualmente) e no canal de acesso 80 000 m^3 a cada 5 anos (ou 40 000 m^3 cada 2-3 anos) (Pinheiro, 2008; Pinto et al., 2018; Portela, 2017).

Entre 2015 e 2018 foram realizadas várias operações de alimentação artificial das praias adjacentes à foz do rio Cávado envolvendo volumes de areia muito significativos. Estas intervenções tinham como objetivo proteger a restinga da agitação marítima e a zona costeira da praia de Suave Mar.

A Fig. 30 apresenta a localização das zonas dragadas onde se atingiram cotas de -2.5 m (ZH) e -2.0 m (ZH), sendo o valor estimado na intervenção de 2016 de 35 700 m^3.

No que toca às zonas de deposição de sedimentos, estes foram colocados entre +3.0 m (ZH) e +7.0 m (ZH) na praia Suave Mar em alinhamento com as arribas e ao pé das dunas, na praia da restinga de +1.0 m (ZH) e +3.5 m (ZH) próxima dos geocilindros (Polis Litoral Norte, 2016).



Fig. 30 – Localização da zona de dragagem e de alimentação artificial (Polis Litoral Norte, 2016).

3.4.3. CILINDROS DE GEOSSINTÉTICOS

Uma das intervenções realizadas recentemente consistia no reforço do cordão litoral através da implementação de cilindros geossintéticos preenchidos com areia. Esta intervenção começou em junho de 2015 e terminou em novembro de 2015. A intervenção baseia-se na utilização de cilindros fabricados em material sintético fechado e vazio no seu interior que posteriormente, no local de implementação, são preenchidos com areia. Uma das características dos geossintéticos é a sua porosidade, que permite reter o material de enchimento e a saída de água introduzida na fase de bombagem. Em Esposende foi implementado uma solução com material de enchimento proveniente dos sedimentos dragados do canal de navegação da embocadura do rio Cávado (Palma, 2016).

A intervenção do reforço da restinga constituía em aplicar cilindros geossintéticos ao longo da frente marítima, dimensionados para uma altura de onda significativa de 8.5 m e 9.5 m, período de pico de 12 e 14 s e um nível de maré de 4.34 m.

No total foram instalados 49 geocilindros, cada um com 50 m de comprimento, com configurações diferentes de acordo à face, no talude anterior (virado para o mar) foram colocadas 3 fiadas de geocilindros até à cota +9.1 m ZH e no talude posterior (virado para o rio) implantou-se 2 fiadas até à cota de +6.4 m ZH. Durante a execução da obra foram registados 21 danos que se englobam em 4 problemas: costuras descosidas, abertura, rotação, e abertura em redor da abertura.

As adversidades também apareceram após a finalização da obra com galgamentos, abertura de um geocilindro da base da fiada do lado do rio, que provocou que o geocilindro ficasse vazio, movimentos internos do material de enchimento que modificaram a configuração do geocilindro e falhas no recobrimento da fiada de base. Estes foram alguns dos problemas reportados num espaço de tempo de 2 meses (Palma, 2016).

A Fig. 31 permite observar um dos cilindros já com uma tonalidade verde-escuro, submetido à ação da agitação marítima, numa visita à zona de estudo 20 min após a baixa-mar. A comparação com o ano 2017 demostra que foram removidos do lugar de origem esses cilindros, o que mostra que esta solução não teve um bom resultado.



Fig. 31 – Localização do geocilindro (a) no dia 30/06/2021, 20 minutos após baixa-mar e (b) em 2017, adaptado de Portela (2017).

3.4. EVOLUÇÃO DO LITORAL

Os eventos climáticos conhecidos como o *Pequeno Ótimo Climático,* que representou um aumento da temperatura global nos séculos XI a XIV, provavelmente de 2 ºC no verão, acima do valor atual, e um aumento do nível médio da agua do mar para valores iguais ou ligeiramente diferentes do atual, ou a *Pequena Idade do Gelo,* que representou uma diminuição da temperatura global com a diminuição do nível médio da água do mar nos séculos XVI e XVII, juntamente com a ocupação do território, determinaram de forma indireta a evolução do litoral.

Estima-se que o rio Cávado desaguaria a norte do facho da Bonança e a sul dos Cavalos de Fão em linha reta, e com canais secundários para norte e para sul. O assoreamento da foz do rio terminou possivelmente no início da *Pequena Idade de Gelo,* quando os sedimentos transportados pelo rio ficaram retidos no canal principal. Nessa altura, o canal mais a norte em direção a Esposende, que apresenta uma maior profundidade de água adquiriu uma maior importância. Um documento histórico de 3 de julho de 1703, refere os limites de Fão: "*Corre esta demarcação ao longo do Oceano ao Norte que fica do lado esquerdo e o deserto do limite deste préstimo até chegar ao portal da barra e foz do Rio Cávado...*". Esse documento, juntamente com outros documentos medievais, dão a entender que a restinga era o limite norte de Fão, tal e qual como nos dias de hoje (Loureiro, 2007).

A vila de Fão era um dos maiores centros salineiros no período medieval em Portugal. O progressivo assoreamento do porto de Fão levou os donos das embarcações ancorarem em Esposende, permitindo o desenvolvimento da mesma. Este problema de assoreamento manteve-se na segunda metade do século XVII e o início do século XIX. Os académicos, nomeadamente Lacerda Lobo, consideravam que a estagnação do comércio era por causa do assoreamento dos rios. O 2º Visconde de Balsemão, Luís Máximo de Sousa Coutinho, refere que a navegação dos rios estava muito dificultada por obstáculos tanto naturais como artificias, bem como pela acumulação de areias e pedras, que causavam muitos prejuízos. Mais recentemente, no dia 14 de abril de 1918, o periódico *O Espozendense* expressa: "*Toda a gente sabe que, há poucos dias, a embocadura do Cávado foi totalmente fechada pelas areias a ponto de os nossos pescadores, para saírem para o mar, terem de abrir à enxada e à pá, uma galgueira por onde fizessem sair os barcos na maré cheia*" (Lopes, 2019).

Foram concebidos diversos projetos de intervenção, entre eles, no século XVIII, a da autoria do Tenente do Corpo Real de Engenharia, José Vilas Boas, consistia num encanamento do rio Cávado de forma que em baixa-mar o rio tivesse energia suficiente para descarregar os sedimentos no mar, o que impedia o assoreamento e melhorava as condições de navegabilidade. Este projeto também planeava a implementação de 8 eclusas para amortecer a corrente fluvial. O projeto foi aprovado em 1795, mas não foi realizado. Outra proposta apresentada por volta de 1860 pelo Capitão Engenheiro João Luís Lopes, contemplava a implementação de represas moveis no rio e na barra. (Neiva, 2012).

O assoreamento do rio Cávado é um problema que ultrapassa gerações como foi demostrado. Embora as barragens retenham sedimentos, como foi exposto anteriormente, o fenómeno ainda acontece hoje em dia.

Já que a presente dissertação tem como objetivo o estudo da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar, é importante realizar uma análise da variabilidade que a restinga de Esposende apresenta ao longo do tempo.

A Fig. 32 apresenta a linha de costa juntamente com a variação da restinga em preia-mar (esquerda), em baixa-mar (centro) e o conjunto das duas (direita).

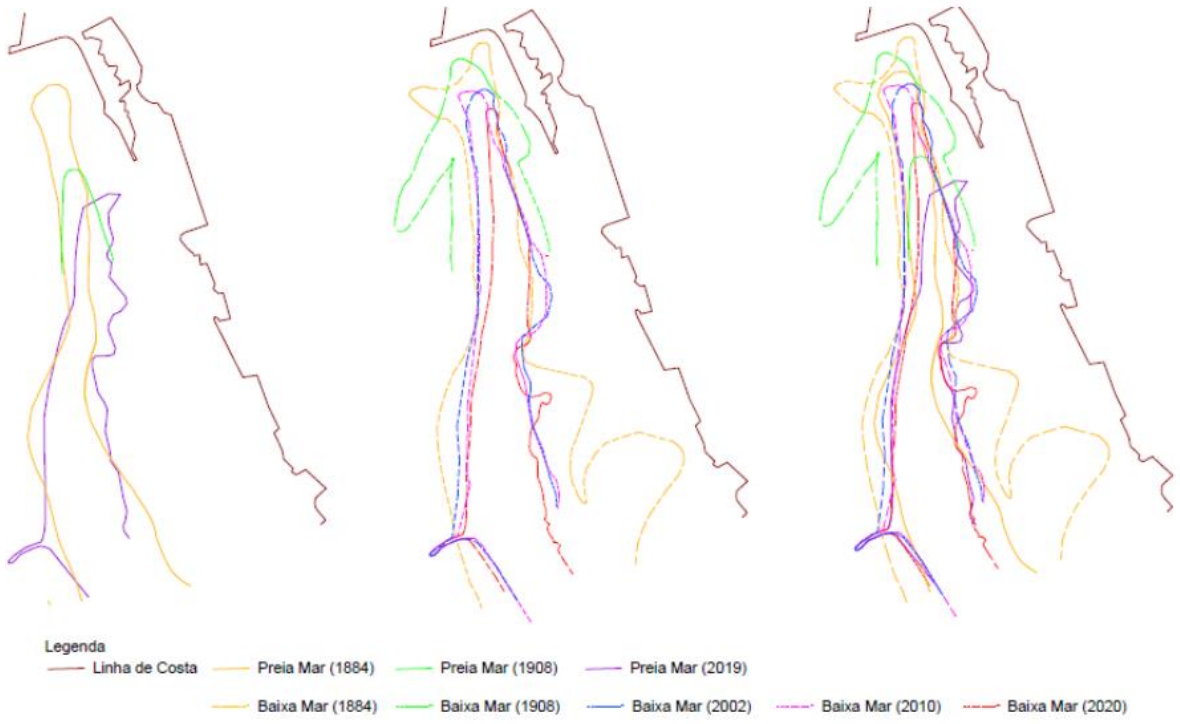


Fig. 32 – Localização da restinga do rio Cávado (Cândido, 2020).

De forma complementar à figura anterior, a Fig. 33 apresenta as imagens satélites da zona em estudo obtidas através do Google Earth.

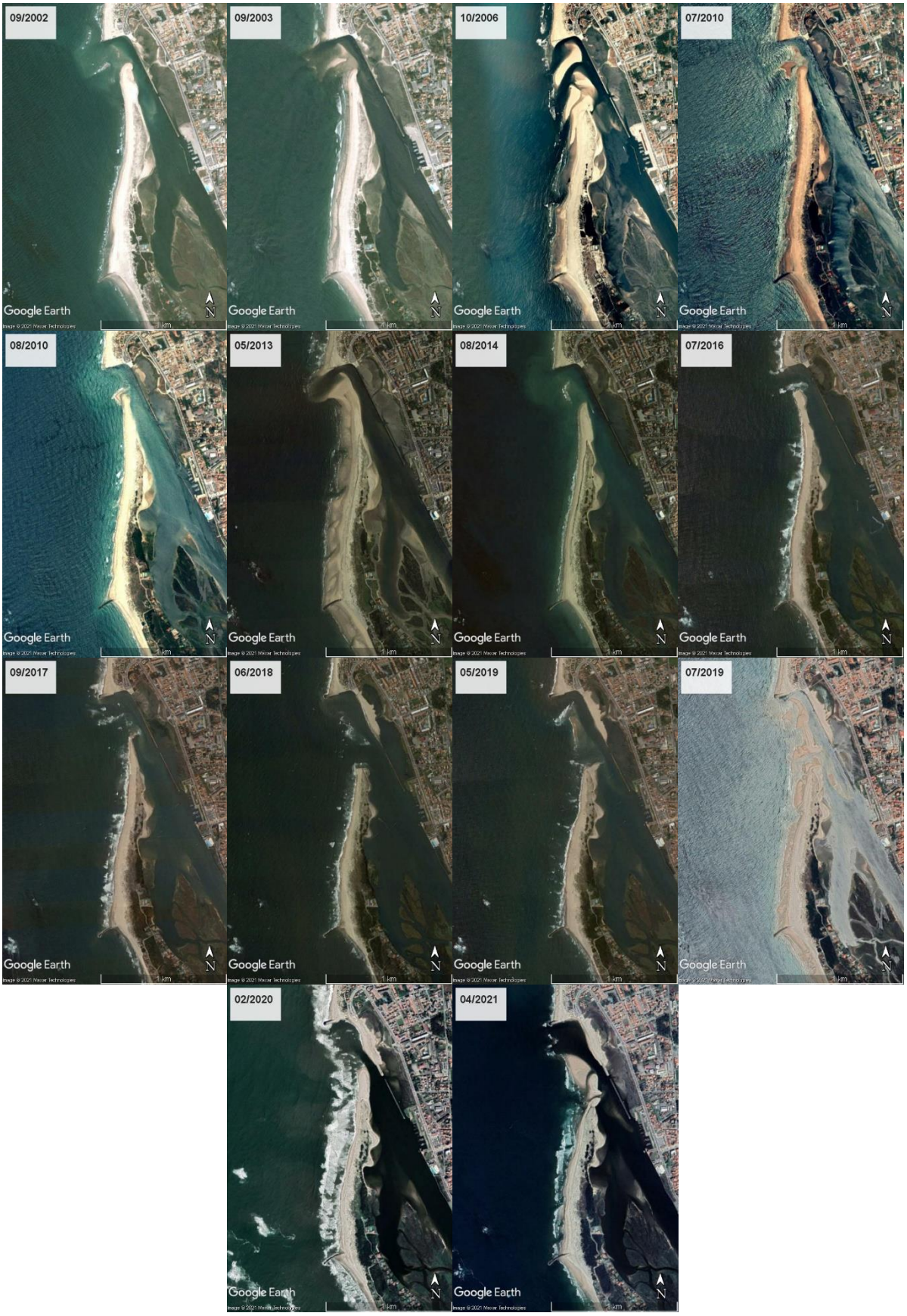


Fig. 33 – Imagens de satélite disponíveis no Google Earth desde 2002 até 2021 (Google Earth, 2021).

Analisando a informação apresentada a Fig. 32 para o nível de preia-mar, é possível constatar um recuo da restinga ao longo do tempo enquanto que para o nível de baixa-mar é possível observar uma elevada variação da sua forma. A Fig. 33 permite complementar a Fig. 32, embora não se tenha informação do dia em que a imagem foi tirada e da situação da maré, é possível confirmar o que foi referido anteriormente. Por outro lado, a figura mostra que existe um estreitamento do canal de navegação e a formação de bancos de areia na entrada da embocadura. É possível também observar que um recuo como foi o de 06/2018 deixa a cidade de Esposende só com o dique como última linha de defesa contra a agitação marítima.

3.5. Outros Estudos Sobre o Caso de Estudo

Como foi demonstrado anteriormente, a morfologia da restinga apresenta uma elevada dinâmica ao longo do tempo, o que despertou o interesse da comunidade académica no estudo desta zona. Por outro lado, o interesse económico, turístico, ambiental e de segurança da cidade de Esposende, são também aspetos importantes a ter em conta. Assim diversos autores realizaram ao longo dos vários estudos. O estudo mais antigo descreve a composição litológica e a génese de várias unidades incluindo Esposende (Granja e Carvalho, 1989; Loureiro, 2007). Na presente dissertação apenas serão discutidas aquelas que tem interesse direto para esta dissertação.

3.6.1 Modelação da Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar do Rio Cávado

Em 2005 foi desenvolvida um modelo hidrodinâmico bidimensional com o software RMA2 e um modelo de dinâmica sedimentar com o software SED2D para o estudo da dinâmica do estuário do rio Cávado (Pinho, 2005). Para tal foram definidos dois domínios: o local, que detalha a embocadura do rio Cávado, com uma malha refinada, e o regional, que abrange a área compreendida desde o açude de angelino até ao estuário, englobando o modelo local (Fig. 34).

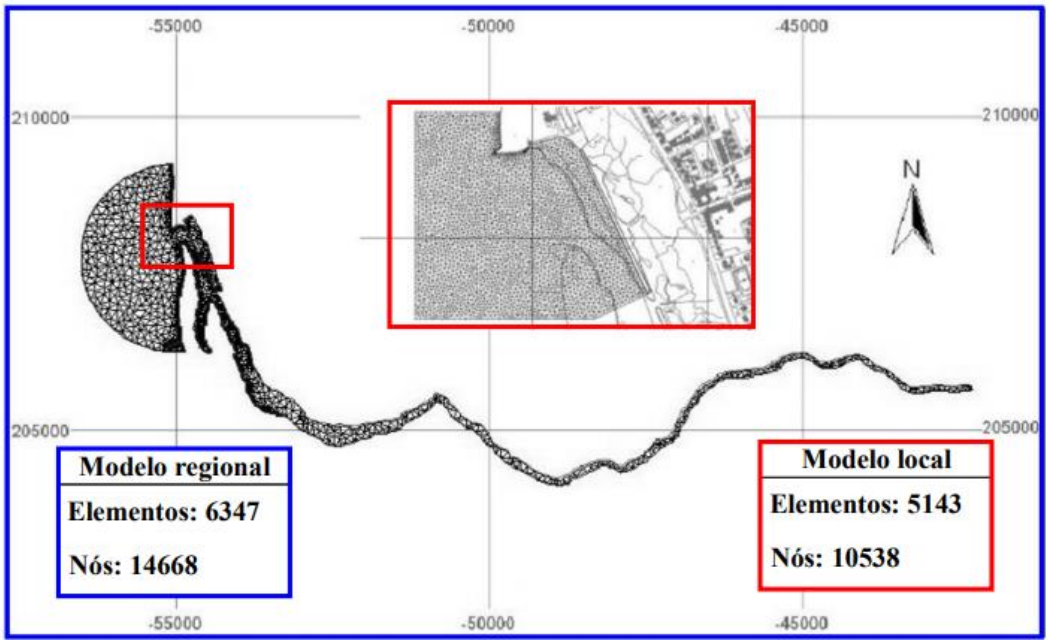


Fig. 34 – Localização do modelo local e do modelo regional (Pinho, 2005).

A divisão da área de estudo em domínios tem como interesse o estudo de diferentes variáveis para cada caso. O domínio regional permite a caracterização das correntes provocadas pela maré e o caudal fluvial, enquanto no domínio local é realizado o estudo hidrodinâmico e de transporte sedimentar com o uso da informação retirada do modelo regional. De ressaltar que no estudo realizado por Pinho (2005) não foi considerada a agitação marítima nem o escoamento do vento.

Os resultados obtidos (Fig. 35) referem-se a dois cenários hidrodinâmicos, ambos com um caudal fluvial de valor próximo do valor médio anual, diâmetro das partículas de 2 mm, uma maré viva com uma altura de 3.05 m e uma maré morta de 1.00 m. com o software RMA2 foi possível obter as velocidades do rio quando se aproxima da zona no modelo local, isto é, que se aproxima da embocadura do rio. Os resultados foram os seguintes: a enchente atinge uma velocidade de 1.40 m/s durante a maré viva e 0.40 m/s em maré morta. Na maré vazante atinge um valor de 3.00 m/s em maré viva e 1.00 m/s durante a maré morta.

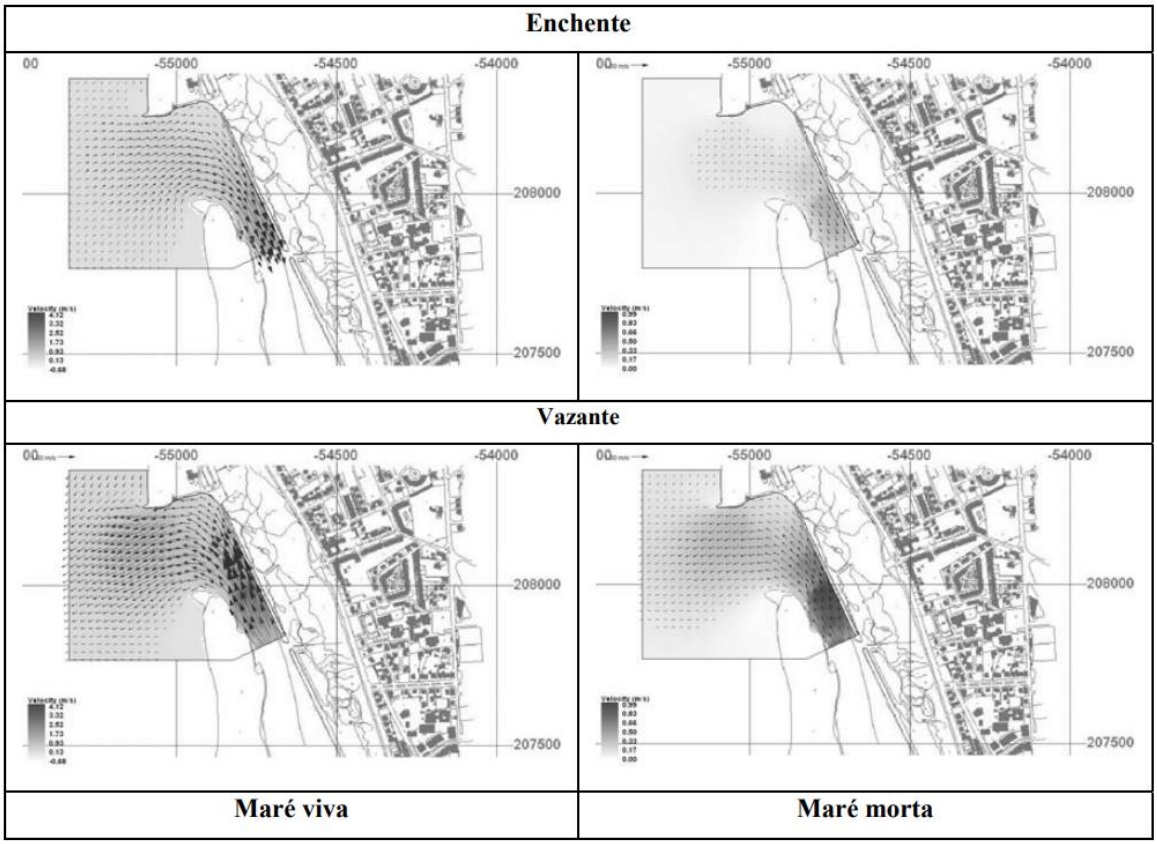


Fig. 35 – Modelo hidrodinâmico local com a representação das velocidades máximas para os dois tipos de maré estudados (Pinho, 2005).

Relativamente ao estudo morfodinâmico, partiu-se de uma batimetria inicial (Fig. 36) com simulações de 12.5h e 25h para diferentes condições de maré. Os resultados obtidos ilustram a deposição de sedimentos na embocadura e a ocorrência de erosão à direita da restinga, na maré morta. Por sua vez, numa maré viva, existe formação de um delta de vazante com erosão a norte da restinga (Fig. 37).



Fig. 36 – Batimetria inicial do modelo local (Pinho, 2005).

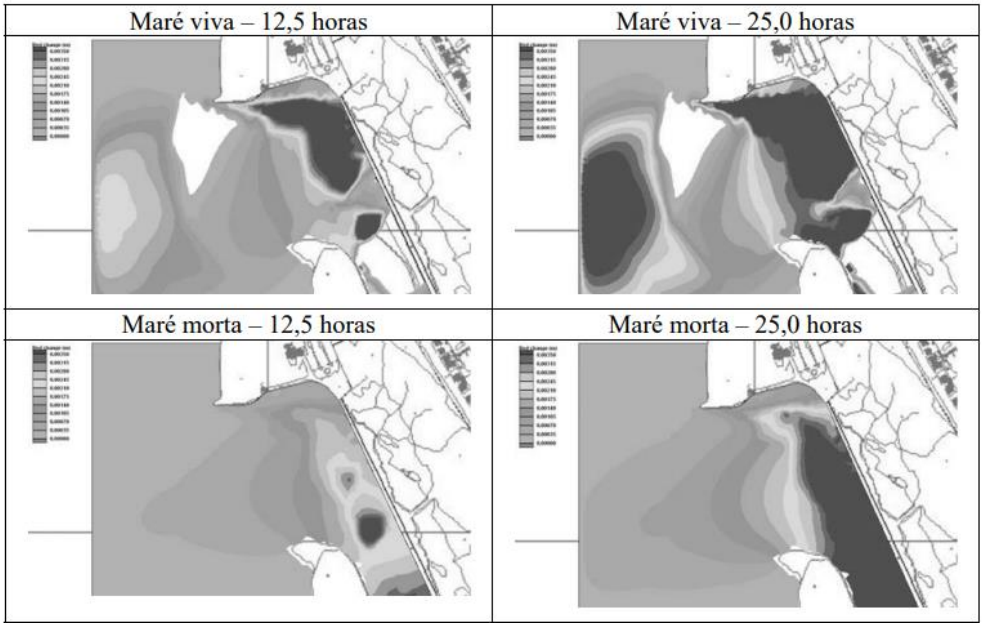


Fig. 37 – Simulação de transporte sedimentar para diferentes condições de maré (Pinho, 2005).

Em conclusão, os resultados obtidos evidenciaram uma deposição de areias no canal durante a maré morta e a formação de um delta de vazante durante as marés vivas (Pinho, 2005).

3.6.2 Estudo de Novas Soluções para a Estabilização da Restinga de Esposende

O trabalho elaborado por Cândido (2020), visou a análise hidrodinâmica e morfodinâmica da restinga de Esposende e propôs a inclusão de duas possíveis soluções de proteção costeira, de forma a solucionar o problema da erosão na extremidade Norte da restinga e a condução de sedimentos para o canal de navegação, o estudo foi realizado com a utilização do modelo numérico Delft3D.

A primeira proposta considera a inclusão de uma estrutura longitudinal paralela à marginal de Esposende que é ligada ao quebra-mar 1. Um segundo quebra-mar, separado cerca de 30 m do primeiro, embora apresentam continuidade a uma cota inferior, faz seguimento da orientação do quebra-mar 1. A segunda proposta é semelhante à primeira, só que a ligação da estrutura longitudinal ao quebra-mar 1 é diferente. Neste caso adotou-se uma solução semelhante ao quebra-mar destacado existente na foz do rio Douro.

Ambas as soluções consideram a realização de alimentação artificial a sul da curvatura do quebra-mar, isto é, na restinga e a construção de um prolongamento no quebra-mar norte, como indica a Fig. 38.

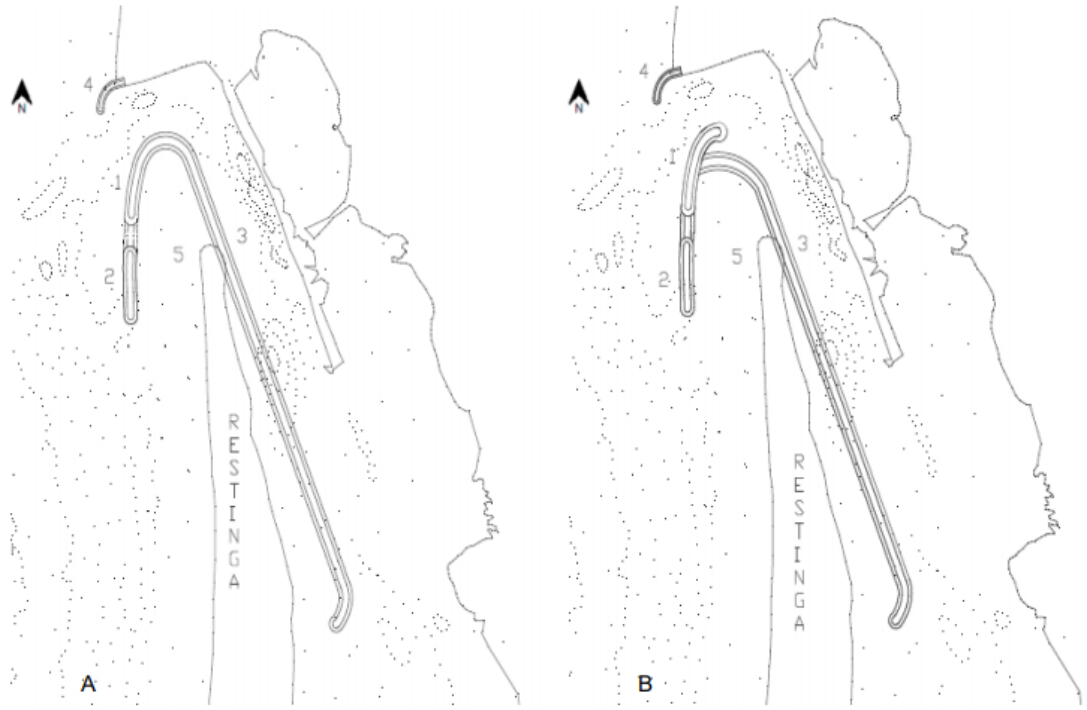


Fig. 38 – Propostas de intervenção A e B: 1 – Quebra-mar destacado 1; 2- Quebra-mar destacado 2; 3- Estrutura longitudinal; 4 - Prolongamento de quebra-mar Norte; 5 - Alimentação artificial (Cândido, 2020).

Os quebra-mares destacados apresentam o coroamento a uma cota de + 6.00 m e a estrutura longitudinal a uma cota + 4 m. Nas simulações numéricas foi simulado o comportamento dos quebra-mares 1 e 2 em duas fases: na primeira fase foi considerada a construção da estrutura longitudinal, posteriormente do quebra-mar destacado 1 e só depois a construção do quebra-mar 2.

Foram simulados 12 cenários, cada um deles com duas fases, de forma a compreender o impacto que as estruturas têm no que se refere ao comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico. A primeira fase constitui na análise sem intervenção, isto é, sem as estruturas. A segunda fase inclui dois cenários, o primeiro (2.1) em que os quebra-mares 1 e 2 estão implementados, e segunda fase (2.2) em que se inclui a estrutura longitudinal. Estas estruturas estão representadas na Fig. 38.

O estudo conclui que a construção dos quebra-mares destacados permite reduzir a energia das ondas entre 30% a 85%. Relativamente ao dique, a sua estrutura não provocou grandes alterações, como era de esperar, já que este teve como objetivo a fixação do canal de navegação e de ser um obstáculo ao transporte sedimentar da restinga para o canal de navegação. No que se refere aos sedimentos, verificou-se que existe erosão no extremo Norte da restinga, na proximidade do quebra-mar norte e o canal de navegação também apresenta erosões aquando da ocorrência de caudal extremo. De referir que o transporte fluvial, a deriva litoral e a agitação marítima favorecem a formação de pré-dunas paralelas à restinga. Os sedimentos depois de entrarem no oceano perdem velocidade e depositam-se, criando um banco de areia na entrada da embocada. A zona abrigada dos quebra-mares permite a deposição de sedimentos e a estrutura longitudinal consegue reter os sedimentos da restinga principalmente na direção do rio (Cândido, 2020).

3.6.3 Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Melhoria da Barra do Cávado

Neste contexto é também importante referir a avaliação de Impacte Ambiental (AIA) de 3 alternativas realizada pela NEMUS – Gestão e Qualificação Ambiental para o Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos (IPTM) em 2003, com o objetivo de analisar possíveis problemas ambientais e comparação das diferentes alternativas de intervenção.

A primeira alternativa analisada não contempla construção de esporão. A configuração do rio mantém-se com recurso a dragagens de forma a permitir a navegabilidade do canal de acesso com dragagens a uma cota de -1.6 m ao ZH, com uma extensão de aproximadamente 2400 m, desde a barra até a doca de pesca.

As alternativas dois e três preveem a construção de 2 molhes, um na margem Sul na restinga e a outro na margem Norte, ambos com enrocamento e protegidos na sua extremidade com blocos de betão Antifer. O que difere entre as soluções é o comprimento que o molhe tem, sendo que a segunda alternativa considera um comprimento superior (160 m no caso do molhe norte e 310 m para o molhe sul) relativamente a terceira solução (120 m para o molhe norte e 300 m para o molhe sul). Esta solução implica também a realização de dragagens iguais às da primeira solução, só que difere na profundidade que passa a ser de -1.0 m em relação ao ZH. A Fig. 39 apresenta as três soluções referidas.

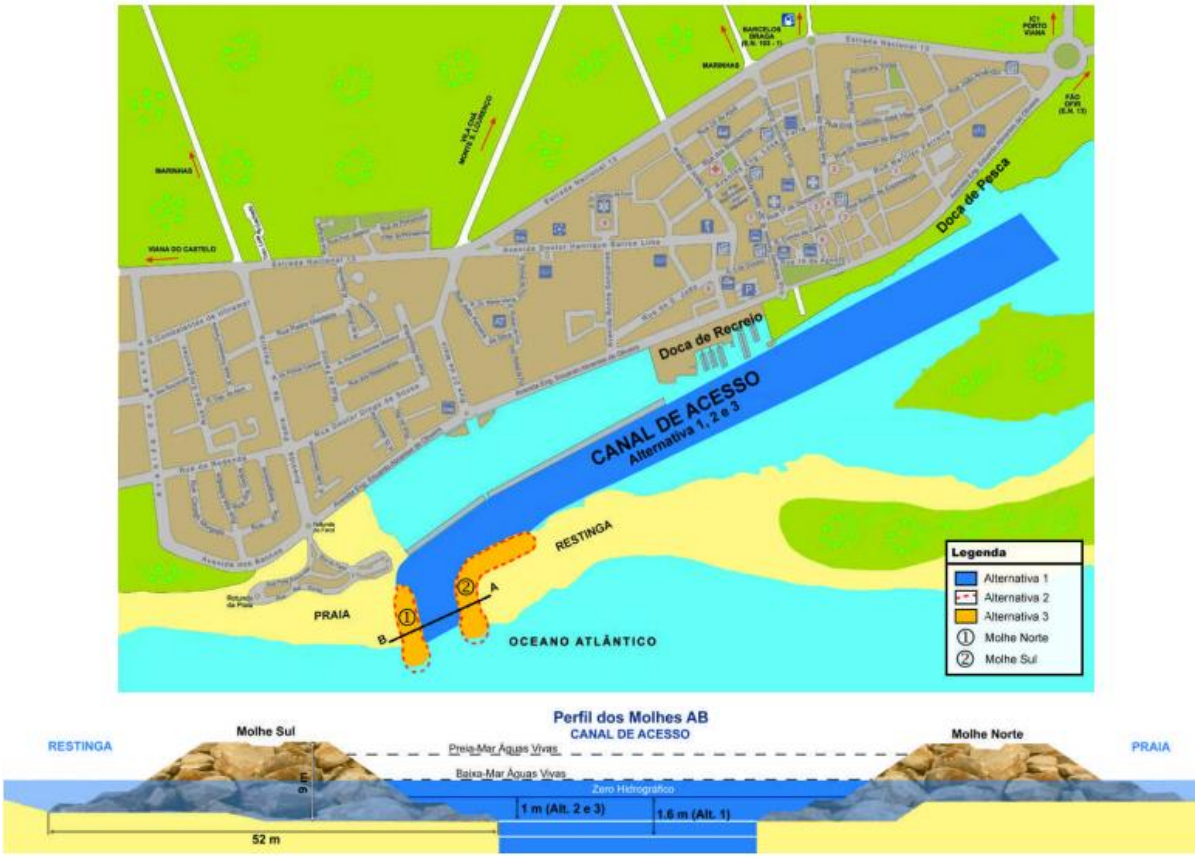


Fig. 39 – Localização das diferentes alternativas e as suas características (NEMUS, 2003).

As alternativas dois e três apresentam um impacto negativo devido a construção de uma nova estrutura. Através de um modelo matemático elaborado para o efeito, foi possível analisar que os impactes nas

comunidades biológicas aquáticas eram pouco significativos devido a imersão de dragados no mar, tanto nas profundidades de 30 m como nas de 100 m.

Considerou-se a terceira alternativa preferível em relação às outras devido ao facto de o volume de sedimentos a dragar e a transportar serem menores o que provocaria uma menor alteração da qualidade da água e perturbações dos sistemas ecológicos (NEMUS, 2003).

3.7. SOLUÇÃO PROPOSTA

A sensibilidade da restinga do rio Cávado à agitação marítima e à maré elevada. A morfologia da restinga tem sofrido variações significativas: o seu extremo norte sofre de problemas de erosão e o os sedimentos tendem, depositarem-se no canal de navegação. A solução proposta nesta dissertação consiste na implementação de vegetação, com o objetivo de reduzir a energia das ondas que atingem a extremidade norte da restinga e, em consequência, a sua erosão, uma vez que a vegetação atua como dissipador de energia da onda.

Numa primeira fase foi ponderado qual seria o espécimen a utilizar. Foram consideradas 3 opções diferentes: erva marinha, mangues e kelp. A erva marinha, foi excluída porque não existe histórico de presença desta vegetação no rio Cávado (Cunha et al., 2014). Os mangues são espécies que se desenvolvem nos trópicos e subtópicos, pelo que também foi excluída (Hamilton e Casey, 2016). Por último, temos o kelp, que existe na costa portuguesa, especificamente a *Laminaria ochroleuca*, uma espécie de kelp perene que habita em fundos rochosos, entre os 3 a 18 m de profundidade. A profundidade ótima de crescimento desta espécie é a 5 m. É possível encontrar esta espécie desde a foz do rio Minho (Caminha) a Leça da Palmeira (Porto), entre o Cabo Raso (Cascais) e o Cabo Espichel (Sesimbra), assim como na Costa Vicentina (Arrifana, Odemira). O comprimento das laminas pode alcançar os 2 a 3 m em alguns casos. Esta espécie apresenta um estipe cilíndrico de tom amarelado, resiste à ação de ondulação energética e à exposição ao sol no verão. A idade que pode atingir ainda é desconhecida, mas estima-se que seja de 18 anos (Assis et al., 2011). A Fig. 40 apresenta a localização desta espécie na costa portuguesa bem como uma ilustração da sua forma em fase adulta e fase jovem.

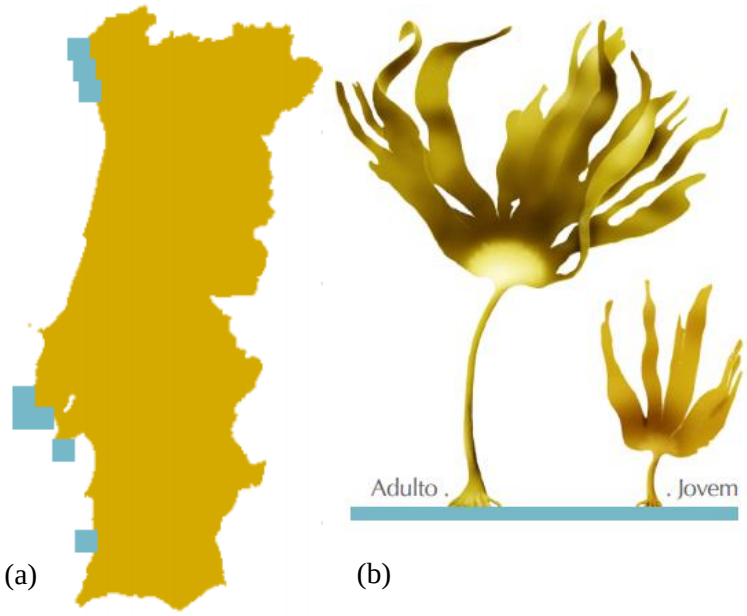


Fig. 40 – Localização da espécie *laminaria ochroleuca* (a) e a sua morfologia na fase jovem e adulta (b) adaptado de Assis et al. (2011).

A implementação de vegetação no modelo numérico consta de dois ficheiros chave, o *veggiemapfile* que indica a localização de vegetação na grelha e o *veggiefile* que no seu interior reencaminha o ficheiro para um ficheiro .txt com as características da vegetação. No modelo numérico XBeach são usados 4 parâmetros: ah, Cd, bv e N, em que se representam a altura da vegetação relativamente à batimetria, o coeficiente de arrastamento, diâmetro do caule, e a densidade da vegetação por secção, respetivamente (Deltares, 2018). Os valores para o kelp foram calibrados de acordo com o estudo *"Modeling of wave attenuation by vegetation with XBeach"* uma vez que surgiram dúvidas de qual seria o melhor coeficiente de arrastamento. Várias simulações foram realizadas com valores entre 0 a 1 tendo-se concluído que o melhor resultado para representar a atenuação causada pela vegetação e a evolução da altura da onda foi obtida com o valor de 0.4. Embora ainda existam algumas incertezas sobre a utilização deste valor, e sendo por isso necessários mais estudos (Van Rooijen et al., 2015), os valores usados para a simulação têm por base o estudo anteriormente exposto e são os seguintes:

- ah igual a 9 cm.
- Cd igual a 0.4.
- bv igual a 2.5 cm.
- N igual a 1200 unidades/m^2.

A sua localização da zona com vegetação será discutida na secção 4.2 de forma a fazer a continuidade com esse capítulo.

4
MODELO NUMÉRICO

4.1. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO XBEACH E DOS SEUS MÓDULOS

O XBeach é um modelo numérico *open-source* atualmente a ser desenvolvido pela Deltares que teve origem no projeto Morphos que envolveu o Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos e o Serviço Geológico dos Estados Unidos esse projeto tinha como objetivo avaliar o impacto de furacões em praias arenosas. Desde então o desenvolvimento do modelo tem vindo a receber apoio de diversas intuições, nomeadamente do Departamento de Obras Públicas da Holanda, Comissão Europeia, do Banco Asiático de Desenvolvimento, entre outras (Deltares, 2021). Esse reforço conjunto permitiu a expansão do modelo para outros tipos de ambientes costeiros e outros desenvolvimentos. (Deltares, 2018).

Atualmente o *software* apresenta 3 diferentes opções em termos de modelação: *stationary*, *surfbeat* e *non-hydrostatic*. Cada um desses modelos apresenta diferentes características e objetivos tal como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos presentes no XBeach e suas principais características (Deltares, 2020).

Tipo	***Stacionary***	***Surfbeat***	***Non-hydrostatic***
Objetivo de calculo	Ondas de curto período	Resolução completa de ondas de longo período	Propagação de ondas individuais
Hidrodinâmica	Não	Sim, mas só para ondas de longo período	Sim, para todas as ondas
Morfodinâmica	Para condições de agitação moderada	Condições extremas	Em desenvolvimento
Tempo Computacional	Baixo	Médio	Alto
Escala do Tempo	Longo-termo	Média a baixa	Baixo

O software XBeach apresenta 4 módulos principais, em que cada um deles desenvolve uma série de cálculos específicos. Numa primeira fase, o módulo de ondas calcula todos os parâmetros referentes às ondas de curto período e à propagação dos rollers. Essa informação é depois transmitida ao módulo de escoamento, que por sua vez calcula a propagação das ondas de longo período, uma vez que ao calcular um novo conjunto de ondas existe uma variação do nível de água. Este módulo comunica com o módulo

de ondas permitindo obter uma nova altura de água. Com esta altura de água atualizada a informação é comunicada ao módulo sedimentar encarregue dos cálculos referentes ao transporte sedimentar, que posteriormente passa essa informação ao módulo morfológico, que se encarrega de atualizar a batimetria. Por fim, para fechar o ciclo, a informação atualizada e os resultados passam para o módulo de ondas tal como representa a Fig. 41.

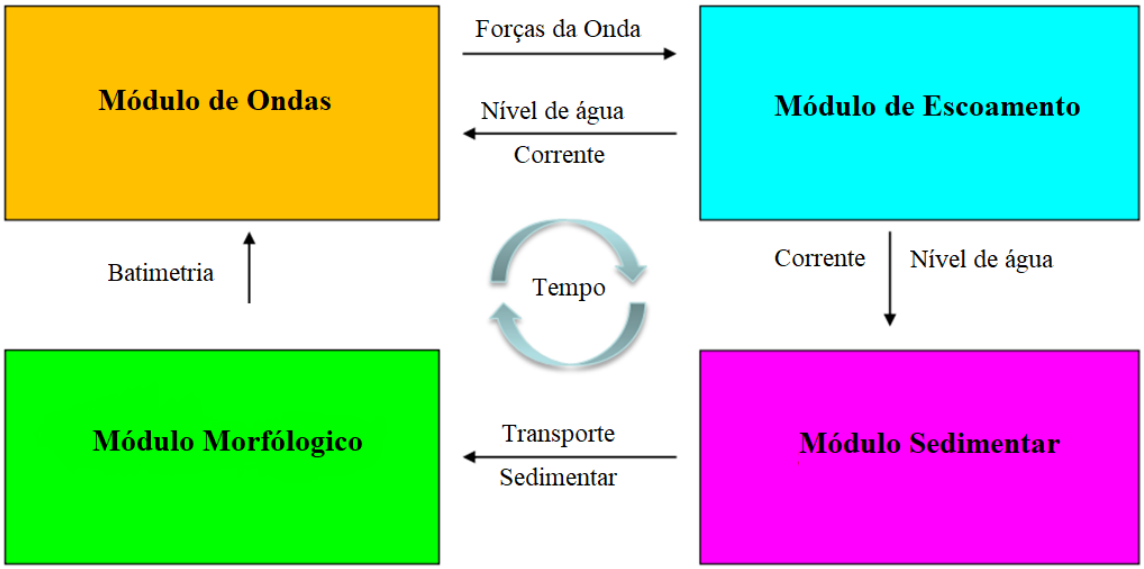


Fig. 41 – Representação dos módulos e interação entre eles, adaptado de (Deltares, 2020).

De salientar que no momento do cálculo, o programa XBeach não determina a série temporal da elevação da superfície livre de forma individual, mas calcula a envolvente da onda tal como esta representado com uma linha vermelha na Fig. 42.

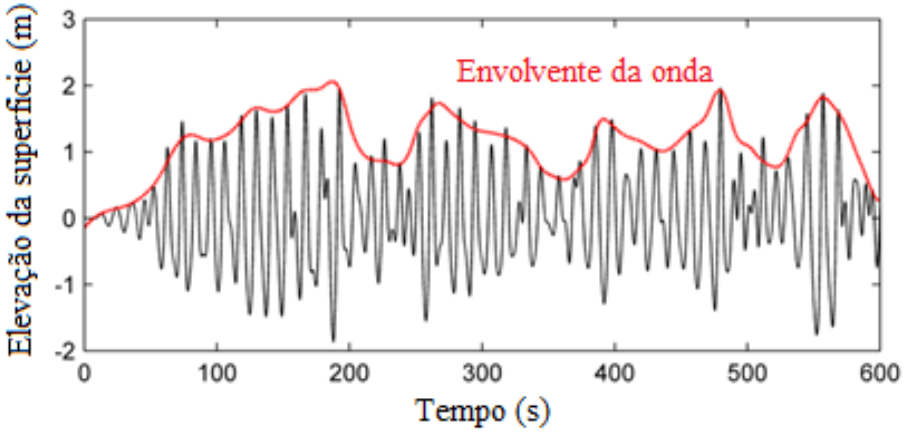


Fig. 42 – Representação do espectro da onda correspondente e envolvente, adaptado de Deltares (2020).

4.1.1. MÓDULO DAS ONDAS

Neste primeiro módulo são calculados variáveis referentes ao movimento, velocidade orbital, rollers, forças produzidas pelas ondas, entre outras. Esta informação é depois fornecida ao módulo de escoamento, o que continua o ciclo de cálculo. No núcleo deste módulo encontra-se a equação de balanço da ação da onda de curto período que é dador por,

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta c_x A}{\delta x} + \frac{\delta c_y A}{\delta y} + \frac{\delta c_\theta}{\delta \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (1)$$

em que A representa a ação da onda, θ o ângulo de incidência em relação ao eixo x, c_x c_y c_θ a velocidade de propagação da onda na direção x, y e θ, respetivamente, D_w a dissipação de energia por rebentação, D_f dissipação pelo atrito com o leito, D_v dissipação pela vegetação e σ a frequência da onda intrínseca. Numa abordagem simples, a primeira parcela representa a variação ao longo do tempo, a segunda e terceira a propagação das ondas na direção x e y, a terceira sobre a refração e em esta parcela é que representa a mudança de direção da onda à medida que se aproxima à costa. No segundo membro da equação estão representados 3 diferentes modos de dissipação da energia da onda que implementados no modelo: por rebentação, atrito com o leito e vegetação. Constata-se que o modelo não inclui o efeito do vento na equação e em consequência disso o XBeach não consegue gerar ondas dentro do domínio, ao contrário de outros modelos, como é o caso do SWAN (Deltares, 2020).

Para o cálculo da ação da onda é usado:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

em que o S_w representa a densidade da energia da onda em cada componente direcional. A obtenção da frequência intrínseca da onda (σ) é feita através de,

$$\sigma = \sqrt{gk\ tanh\ kh} \quad (3)$$

em que k é o número da onda. Retomando a equação de balanço da ação da onda de curto período, o cálculo do valor da velocidade de propagação da ação da onda na direção x, y e θ é feito através da velocidade do grupo c_g,

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g\ cos(\theta) \quad (4)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g\ sin(\theta) \quad (5)$$

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{sinh\ 2kh}\left(\frac{\partial h}{\partial x} sin\theta - \frac{\partial h}{\partial y} cos\theta\right) \quad (6)$$

De forma a concluir a descrição da equação de balanço de ação da onda é preciso falar nos três tipos de dissipação presentes no modelo. A dissipação por rebentação é calculada através de:

$$D_w(x,y,t,\theta) = \frac{S_w(x,y,t,\theta)}{E_w(x,y,t)} \ \overline{D}_w(x,y,t) \tag{7}$$

Neste ponto, o modelo Xbeach permite a utilização de várias fórmulas de dissipação por rebentação, nomeadamente: Roelvink (1993a), Roelvink (1993a) por extenso, Daly et al. (2010), Baldock et al. (1998) e Janssen and Battjes (2007). No presente caso de estudo foi usada a formulação predeterminado pelo software, que é a fórmula Roelvink (1993a), dada por:

$$\overline{D}_w = 2\frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h} \tag{8}$$

em que $\overline{D}_w$ representa a dissipação total da onda, E_w a energia total da onda, Q_b a fração de ondas rebentadas, α o coeficiente de dissipação da onda, T_{rep} o período da onda representativo e H_{rms} a raiz média quadrática da altura de onda.

No que se refere a E_w esta variável é calculado através de um integral da densidade da energia da onda em cada comprimento direcional e é calculado da seguinte forma,

$$E_w(x,y,t) = \int_0^{2\pi} Sw\ (x,y,t,\theta) d\theta \tag{9}$$

relativamente a Qb:

$$Q_b = 1 - exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right) \tag{10}$$

em que H_{rms} é dado por,

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}} \tag{11}$$

e H_{max} pode ser obtida através de,

$$H_{max} = \gamma \cdot (h + \delta H_{rms}) \tag{12}$$

em que H_{max} representa a altura de onda máxima do registo, γ um parâmetro empírico designado por índice de rebentação, que no presente estudo foi usado com um valor igual a 1 (predefinido pelo *software*), e δH_{rms} uma fração da altura de onda. A dissipação devida ao atrito com o leito é dada por,

$$D_f = \frac{2}{3\pi}\rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} sinh\ kh}\right)^3 \quad (13)$$

em que f_w representa o coeficiente de atrito relativo às ondas de curto período, ρ a massa volúmica da água e o T_{m01} o período médio intrínseco das ondas. A dissipação de energia devido à interação entre a vegetação e as ondas é modelado com a seguinte equação,

$$D_v = \sum_{i=1}^{n_v} D_{v,i} \quad (14)$$

A variável n_v representa o número da camada de vegetação e $D_{v,i}$ a dissipação de energia criada pela vegetação na camada i e é calculado através de,

$$D_{v,i} = A_v \cdot \frac{\rho \tilde{C}_{D,i} b_{v,i} N_{v,i}}{2\sqrt{\pi}} \left(\frac{kg}{2\sigma}\right)^3 H_{rms}^3 \quad (15)$$

e

$$A_v = \frac{(\sinh^3 k\ \alpha_i h - \sinh^3 k\alpha_{i-1} h) + 3(\sinh k\ \alpha_i h - \sinh k\alpha_{i-1} h)}{3k\cosh^3 kh} \quad (16)$$

A_v representa a área da secção transversal do escoamento relativa a vegetação, $\tilde{C}_{D,i}$ é o coeficiente de arrastamento global, $b_{v,i}$ o diâmetro do caule da vegetação na camada i, $N_{v.i}$ a densidade da vegetação na camada i e α_i altura relativa da vegetação (*h / hv)* na camada i.

Após o momento de rebentação surgem os rollers que exercem uma tensão tangencial abaixo deles. O XBeach estabelece a fórmula de balanço de energia dos rollers da seguinte forma:

$$\frac{dE_r}{dt} = \frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial E_r c\ cos\theta}{\partial x} + \frac{\partial E_r c\ sin\theta}{\partial y} = S - D_r \quad (17)$$

São incorporadas três novas variáveis: E_r representa a energia cinética do roller, S a perda de movimento ondulatório organizado das ondas após a rebentação e D_r a dissipação de energia associada ao roller, que é calculado através de:

$$D_r = 2\beta_s\beta_u \frac{g}{c_g} E_r \quad (18)$$

Os valores de β_s e β_u são os coeficientes que caracterizam a inclinação da frente de rebentação no modelo que, na maioria dos casos podem ser associados num só, ao qual o modelo associa um valor predefinido igual a 0.1.

A energia do roller é calculada através de,

$$E_r = \frac{1}{2}\frac{\rho R\, c_w^2}{L} \tag{19}$$

Existe um acréscimo do tensor de segunda ordem das tensões de radiação com torsores de segunda ordem na direção xx, xy e yy, que é incorporada no modelo através da contribuição da turbulência superficial donde as tensões de radiação que é dada por,

$$S_{xx,r}(x,y,t) = \int \cos^2\theta\, S_r d\theta \tag{20}$$

E

$$S_{xy,r}(x,y,t) = S_{yx,r}(x,y,t) = \int \sin\theta\, \cos\theta\, S_r d\theta \tag{21}$$

E

$$S_{yy,r}(x,y,t) = \int sin^2\theta\, S_r d\theta \tag{22}$$

Uma vez obtidos o tensor procede-se ao cálculo da força induzidas pela onda na direção x e y (Fx e Fy):

$$Fx = -\frac{\delta S_{xx}}{\delta x} \quad e \quad Fy = -\frac{\delta S_{yy}}{\delta y} \tag{23}$$

Este módulo inclui também o cálculo da turbulência induzida pela rebentação da onda à superfície da água que provoca mistura de sedimentos a certa profundidade. O Xbeach tem 3 opções: energia turbulenta da onda média junto ao fundo, energia turbulenta média da penetração junto ao fundo ou não incorporar a modulação desse fenómeno ao modelo. O modelo, por predefinição, considera a primeira opção, que se baseia em:

$$k_b = \frac{\overline{k_s}}{\exp(h/L_{\text{mix}}) - 1} \tag{24}$$

A variável k_b representa a energia da turbulência, $\overline{k_s}$ a energia média da turbulência de onda, A_r o volume do roller e L_{mix} o comprimento da mistura, que é calculado através de,

$$L_{mix} = \sqrt{A_r} = \sqrt{\frac{2E_r T_{rep}}{\rho_w c_w}} \tag{25}$$

4.1.2. MÓDULO DE ESCOAMENTO

Uma vez calculadas as forças associadas às ondas de curto período no módulo anterior, o módulo de escoamento procede a determinação do forçamento de longo período associado aos grupos de ondas através da utilização da *Generalized Lagrangian Mean* (GLM). Neste caso são utilizadas 3 equações como elementos principais, nomeadamente a equação da continuidade (26), a equação de conservação da quantidade de movimento na direção perpendicular à costa (27) e uma equação de conservação da quantidade de movimento na direção paralela à costa (28),

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \tag{26}$$

e

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \tag{27}$$

e

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \tag{28}$$

Em que *x* representa a coordenada horizontal perpendicular à costa, *y* a coordenada horizontal paralela à costa, *t* o tempo, τ_{sx} e τ_{sy} a tensão tangenciais induzidas pela ação do vento segundo as direções x e y respetivamente, τ_{bx}^Ee τ_{by}^E as tensões tangenciais junto ao fundo na direção x e y respetivamente, F_x e F_y as tensões produzidas pela ação das ondas na direção x e y respetivamente, $F_{v,x}$ e $F_{v,y}$ as tensões produzidas pela existência de vegetação na direção x e y respetivamente, ν_h a viscosidade na direção horizontal, f o coeficiente de Coriolis, u^L e v^L as velocidades Lagrangianas na direção x e y, respetivamente.

Numa abordagem simples, a equação (26) permite ao modelo garantir que a água se comporte como um fluido incompressível enquanto, a equação (27) e a equação (28) têm como base o mesmo principio, só que só aplicadas em direções diferentes. Na primeira parcelada da equação (27) aparece o termo referente à aceleração, a segunda e terceira à advecção, a quarta a representação da força de coriolis, a quinta e sexta traduzem o efeito da viscosidade, a sétima e a oitava o atrito do leito, a nona representa o

gradiente do nível da água e as últimas dois parcelas que são referentes às forças criadas pela ação da onda, que foram obtidos no módulo anterior com a equação (23).

Devido ao uso da GLM, as fórmulas associadas à conservação da quantidade movimento e da continuidade utilizam velocidades Lagrangianas, que são definidas como a distância que uma partícula de água percorre num período da onda a dividir por um período da onda. Esta velocidade Lagrangianas está relacionada com a velocidades Eurelianas, v^E e u^E, que são velocidades observadas desde um ponto fixo. A relação entre ambas as velocidades está representada a seguir:

$$u^L = u^E + u^S \quad \text{e} \quad v^L = v^E + v^S \tag{29}$$

em que u^S e v^S representam a velocidade de Stokes nas direções x e y, respetivamente, e são calculadas com base na velocidade de grupo, a energia de onda e a direção.

$$u^S = \frac{E_w \cos\theta}{\rho h c} \quad e \quad v^S = \frac{E_w \sin\theta}{\rho h c} \tag{30}$$

No que se refere às tensões criadas pela ação do vento, estas são obtidas através da,

$$\tau_{sx} = \rho_a C_d W|W_x| \quad e \quad \tau_{sy} = \rho_a C_d W\left|W_y\right| \tag{31}$$

em que a variável *W* representa a velocidade do vento e as suas componentes em x e y, C_d o coeficiente de arrastamento do vento e ρ_a a massa volúmica do ar.

As tensões produzidas pela vegetação, F_v, são determinadas da seguinte forma:

$$F_v = F_D = \frac{1}{2}\rho C_D b_v N u|u| \tag{32}$$

em que C_D representa o coeficiente de arrasamento da vegetação, b_vo diâmetro do caule da vegetação, N a densidade da vegetação e u a velocidade associada à onda ou à corrente.

Por último, neste módulo, o cálculo da tensão tangencial junto ao fundo é realizado através de,

$$\tau_{bx}^E = c_f \rho u_E \sqrt{(1.16 u_{rms})^2 + (u_E + v_E)^2} \tag{33}$$

e

$$\tau_{by}^E = c_f \rho v_E \sqrt{(1.16 u_{rms})^2 + (u_E + v_E)^2} \tag{34}$$

O modelo XBeach apresenta 5 diferentes formulações para a definição do coeficiente adimensional do atrito c_f: Chezy, Mannning, Colebrook-White, Colebrook-White relativa ao tamanho do grão, e uma abordagem predeterminada pelo programa baseado na formulação Chezy e que é calculada através de:

$$c_f = \sqrt{\frac{g}{C^2}} \tag{35}$$

em que o módulo utiliza um coeficiente predeterminado de Chezy, C, igual a 55 $m^{1/2}/s$.

4.1.3. MÓDULO SEDIMENTAR

Este módulo é referente ao transporte sedimentar, sendo baseado na concentração de sedimentos na coluna de água. Para o cálculo, o modelo utiliza um esquema de advecção-difusão com uma média em profundidade e com a presença de uma fonte e sumidouro, baseado numa equação de equilíbrio de sedimentos, que se encontra a seguir descrita:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y}\right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \tag{36}$$

em que C representa a concentração de sedimentos relativa à profundidade média, que varia com cada conjunto de ondas ao longo do tempo, D_h o coeficiente de difusão de sedimentos, T_s o tempo de adaptação, C_{eq} a concentração de equilíbrio. Uma vez conhecidas as variáveis representadas, e de uma forma simples de formular, a primeira parcela da equação (36) trata sobre a mudança de concentração de sedimentos, a segunda e a terceira sobre o transporte sedimentar por advecção, a terceira e a quarta da difusão. No segundo membro da equação aparece a função de recolha de sedimentos (*Sediment Pick-Up Functions*).

O cálculo de T_s é feito com base na seguinte formula:

$$T_s = max\left(f_{Ts}\frac{h}{w_s}, T_{s,min}\right) \tag{37}$$

em que $T_{s,min}$ representa o tempo mínimo de adaptação das equações de advecção-difusão de sedimentos, que é arbitrado pelo programa como sendo 0.5 s, embora seja permitida a sua alteração neste estudo manteve-se, o w_s é a velocidade de queda dos sedimentos e f_{Ts} um fator corretivo e calibrador com um valor predeterminado pelo programa igual a 0.1, devido a que o w_s é calculado para a profundidade média. Para o cálculo do w_s é utilizada a seguinte equação:

$$w_s = \alpha_1\sqrt{\Delta g D_{50}} + \alpha_2\frac{\Delta g D_{50}^2}{\nu} \tag{38}$$

O valor da viscosidade (ν) é arbitrado pelo módulo e toma o valor de 19^{-6} m^2/s e os valores de α_1 e α_2 são obtidos com as seguintes fórmulas:

$$\alpha_1 = 1.06\tanh(0.016A^{0.50}\exp(-120/A)) \quad (39)$$

e

$$\alpha_2 = 0.055\tanh(12A^{-0.59}\exp(-0.0004A)) \quad (40)$$

No que se refere às fórmulas de transporte no momento da elaboração desta dissertação, a versão existente de XBeach conta com duas formulações: Soulsby-Van Rijn e Van Thiel-Van Rijn, que usam a equação (41) de equilíbrio de concentração de sedimentos. Nesta equação é usado o mínimo valor de concentração de sedimentos, tanto para o leito como para a fração em suspensão, comparado com um valor máximo de concentração de sedimentos, Cmax, esta estabelecido no software que este parâmetro toma um valor de 0.1, embora exista a possibilidade de alterar esse valor para um valor no intervalo entre 0 e 1, mas não é aconselhável, de acordo com o manual. Ainda a salientar que existe uma terceira formulação possível, a de Van Rijn 1993, mas que não utiliza a equação de equilíbrio de sedimentos.

$$C_{eq} = max\left(min\left(C_{eq,b}, \frac{1}{2}C_{max}\right) + min\left(C_{eq,s}, \frac{1}{2}C_{max}\right), 0\right) \quad (41)$$

em que C_{eq} representa a concentração em equilíbrio, $C_{eq,b}$ e $C_{eq,s}$ a concentração de equilíbrio no leito e em suspensão, respetivamente. É necessário escolher entre as duas formulações anteriormente referidas. Na presente dissertação foi usado o método de Van Thiel-Van Rijn, que é predeterminado. Para a equação de equilíbrio de concentração, são utilizadas as seguintes fórmulas:

$$C_{eq,b} = \frac{A_{sb}}{h}\left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr}\right)^{1.5} \quad (42)$$

e

$$C_{eq,s} = \frac{A_{ss}}{h}\left(\sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr}\right)^{2.4} \quad (43)$$

em que U_{cr} é a velocidade crítica, v_{mg} a magnitude da velocidade, u_{rms} a velocidade orbital, $u_{rms,2}$ a velocidade orbital com inclusão da turbulência devida às ondas de curto período, A_{ss} e A_{sb} são os coeficientes de carga suspensa e no leito respetivamente,

$$A_{sb} = 0.015\mathrm{h}\frac{(\mathrm{D}_{50}/\mathrm{h})^{1.2}}{(\Delta \mathrm{g}\mathrm{D}_{50})^{0.75}} \quad (44)$$

e

$$A_{ss} = 0.012 D_{50} \frac{{D_*}^{-0.6}}{(\Delta g D_{50})^{1.2}} \quad (45)$$

em que o valor adimensional dos sedimentos (D_*) é obtido através do D_{50} utilizando a seguinte equação,

$$D_* = \left(\frac{\Delta g}{\nu^2}\right)^{1/3} D_{50} \quad (46)$$

A velocidade v_{mg} é obtida através da velocidade Euleriana,

$$v_{mg=} \sqrt{(u^E)^2 + (v^E)^2} \quad (47)$$

A velocidade orbital com inclusão da turbulência provocada pelas ondas de curto período é calculada através das seguintes equações:

$$u_{rms} = \frac{\pi H_{rms}}{T_{rep}\sqrt{2}\sinh(k(h + \delta H_{rms})} \quad (48)$$

e

$$u_{rms,2}^2 = u_{rms}^2 + 1.45 k_b \quad (49)$$

em que T_{rep} representa o período representativo do período da onda e H_{rms} a altura de onda média quadrática. O valor de k_b foi discutido no módulo anterior sendo obtido através da fórmula (26).

A variável U_{cr} representa a velocidade crítica é calculada com a seguinte fórmula:

$$U_{cr} = \beta U_{crc} + (1 - \beta) U_{crw} \quad (50)$$

em que o valor de β é obtido através das velocidades usadas,

$$\beta = \frac{v_{mg}}{v_{mg} + u_{rms}} \quad (51)$$

No que toca às velocidades críticas da corrente, U_{crc}, estas são obtidas pelo seguinte sistema de equações, e tendo como base o valor do D_{50}:

$$U_{crc} = \begin{cases} 0.19 D_{50}^{0.1} \log 10\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) & \text{para } D_{50} \leq 0.0005 \\ 8.5 D_{50}^{0.6} \log 10\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) & \text{para } D_{50} \leq 0.002 \\ 1.3\sqrt{\Delta g D_{50}}\left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{1/6} & \text{para } D_{50} > 0.0005 \end{cases} \quad (52)$$

Já a velocidade crítica das ondas (U_{crw}) é baseada por outro sistema de equações:

$$U_{crw} = \begin{cases} 0.24(\Delta g)^{2/3}\left(D_{50} T_{rep}\right)^{1/3} & \text{para } D_{50} <= 0.0005 \\ 0.95(\Delta g)^{0.57}(D_{50})^{0.43}\, T_{rep}^{0.14} & \text{para } D_{50} > 0.0005 \end{cases} \quad (53)$$

4.1.4. MÓDULO MORFOLÓGICO

O módulo morfológico é o último módulo do ciclo de cálculo do software XBeach e tem como objetivo a atualização da batimetria dos fundos devido ao transporte sedimentar estimada com a aplicação do anterior módulo. Este módulo tem como base a equação de equilíbrio, que é dado por:

$$(1-p)\frac{\partial z_b}{\partial t} + f_{\text{mor}}\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) = 0 \quad (54)$$

em que z_b representa a cota batimétrica, p a porosidade, q_x e q_y a taxa de transporte de sedimentos segundo as direções x e y respetivamente e f_{mor} um fator de aceleração morfológico. Tal como foi realizada para os outros módulos, e de forma a permitir uma análise mais simples da equação, refere-se que na primeira parcela está representada a variação do nível do leito ao longo do tempo e na segunda parcela o fator de aceleração morfológico a multiplicar o transporte sedimentar.

É importante ter em consideração que o acelerador morfológico, f_{mor}, reduz o tempo de computação, provocando uma aceleração da escala do tempo morfológico relativamente à escala hidrodinâmica.

Um outro parâmetro incluído neste módulo é o "*Avalanching*", que permite representar melhor a realidade, já que simula o deslizamento de sedimentos para outra parcela quando a inclinação dos fundos atingir um valor crítico, como demostra a seguinte equação:

$$\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| > m_{cr} \quad (55)$$

em que m_{cr} representa a inclinação crítica. É importante salientar que existe separação de zonas húmidas (wetslp) e zonas secas (dryslp), que apresentam valores já estabelecidos de 0.3 e 1 mas que podem ser alterados pelo utilizador (Deltares, 2018).

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O *software* XBeach apresenta um total de 298 parâmetros de entrada e um conjunto variado de opções, desde as caraterísticas da maré ao tamanho dos sedimentos, desde a simulação da chuva até à simulação

das ondas geradas por um navio em movimento, inclusive à incorporação de vegetação e zonas não erodíveis. Importar referir que caso algum parâmetro não seja introduzido o XBeach utiliza valores predeterminados.

Existem 4 componentes indispensáveis no momento de se elaborar um modelo em Xbeach:

- Ficheiro executável (XBeach.exe);
- O ficheiro com os parâmetros que será fornecido ao programa (Params.txt);
- A batimetria do modelo (ficheiro .dep);
- A grelha do modelo (ficheiro .grd).

No que toca ao executável, é possível obtê-lo através do site da Deltares. Os restantes componentes são criados pelo utilizador. Na presente dissertação a obtenção da batimetria e grelha foi possível através do *software* Delft3D, com a utilização de um ficheiro .xyz (Fig. 43), que contém as coordenadas em x, y e z de um conjunto de pontos.

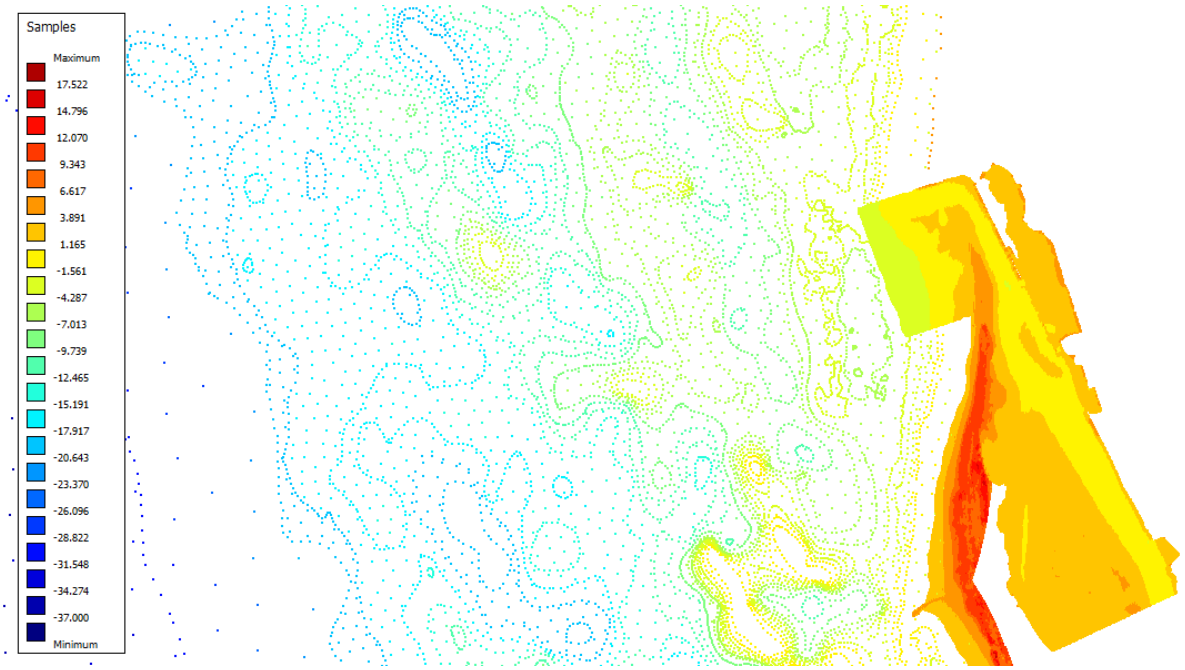


Fig. 43 – Ficheiro .xyz relativo à área em estudo, aberto no Delft3D.

A grelha foi criada com o Delft3D, no módulo RGFGRID, com um espaçamento de 5 por 5 m (Fig. 44b) até uma profundidade de água razoável, de forma a representar os fenómenos de transformação das ondas na sua propagação para a costa e a influencia dos fundos. A Fig. 44a. Apresenta uma rotação de -31º para norte para evitar que as energias das ondas saia para fora da grelha devido ao ângulo de incidência das ondas. No total a grelha tem uma dimensão de 12 km por 1.8 km.

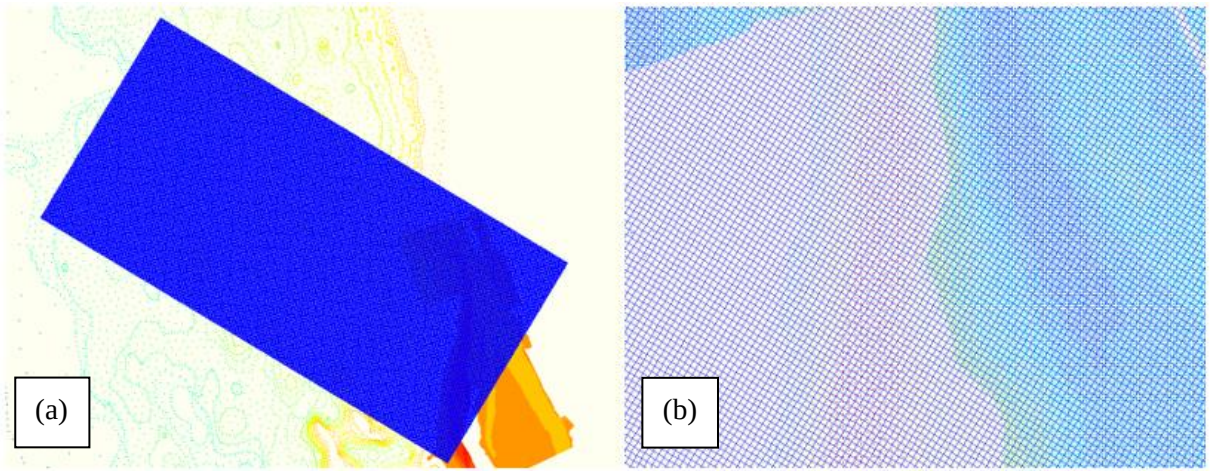


Fig. 44 – Representação da grelha de cálculo em toda a sua extensão (a) e zoom para a restinga (b).

O módulo QUICKIN do Delft3D permite, através dos pontos do ficheiro .xyz, criar uma batimetria através de uma interpolação triangular entre os pontos. Nesta fase é uma mais-valia o uso de uma imagem área como a apresentada na Fig. 29a que permite corrigir os erros devido a falta de alguns pontos no ficheiro de dados, o que provocaria uma má representação em certos locais, como se pode observar na Fig. 45 e, com maior facilidade, na Fig. 46, no qual o problema já se torna mais visível uma vez que foi removida a grelha. Entre as zonas de má representação sobressai o caso dos molhes norte, a costa a norte e a cidade de Esposende.

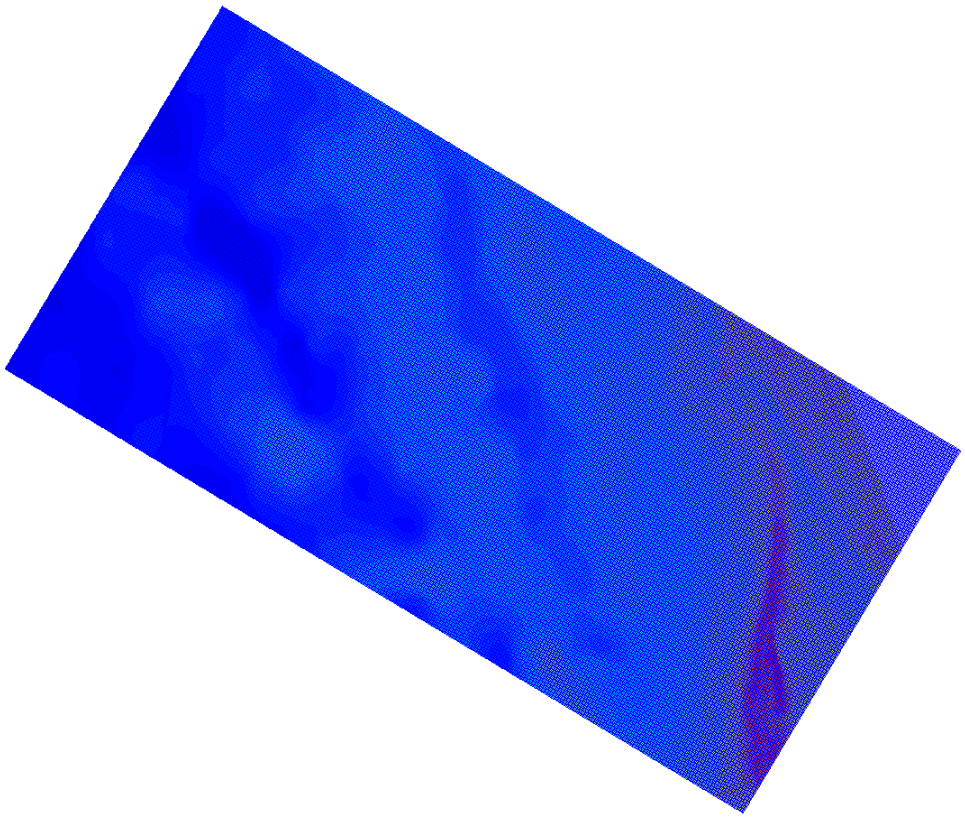


Fig. 45 – Batimetria interpolada a partir do ficheiro .xyz tendo como base a grelha.

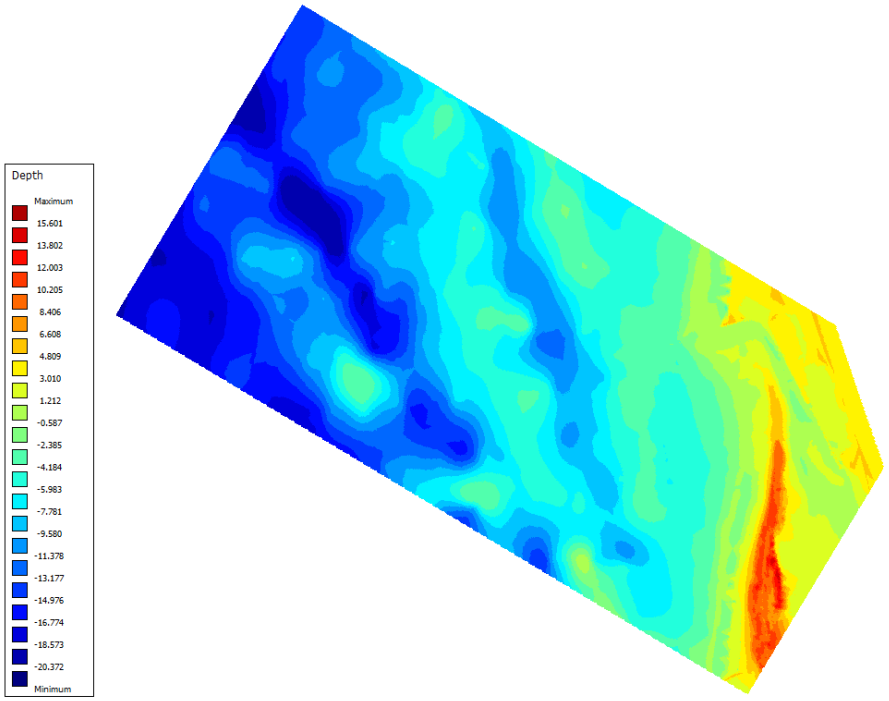


Fig. 46 – Batimetria interpolada a partir do ficheiro .xyz sem a representação da grelha.

Com recurso ao Matlab consegue-se facilmente verifica que a batimetria criada não esta correta, como demostra a Fig. 47, pelo que neste subcapítulo será abordada a sua alteração.

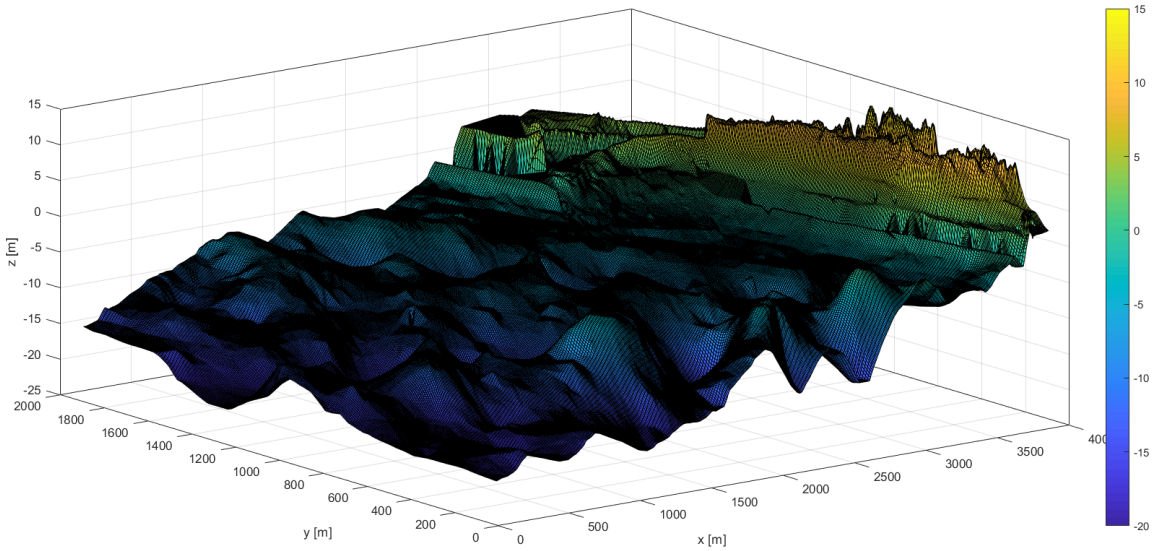


Fig. 47 – Batimetria após interpolação no Matlab.

A forma de definição dos limites da cidade de Esposende por interpolação (Fig. 48a) foi alterada utilizando um polígono que representasse, o melhor possível, as fronteiras da cidade. Foi decido colocar

o terreno da cidade de Esposende a uma altura de 6,0 m (Fig. 48b), ou seja, 1.0 m acima do dique apresentado na Fig. 49.

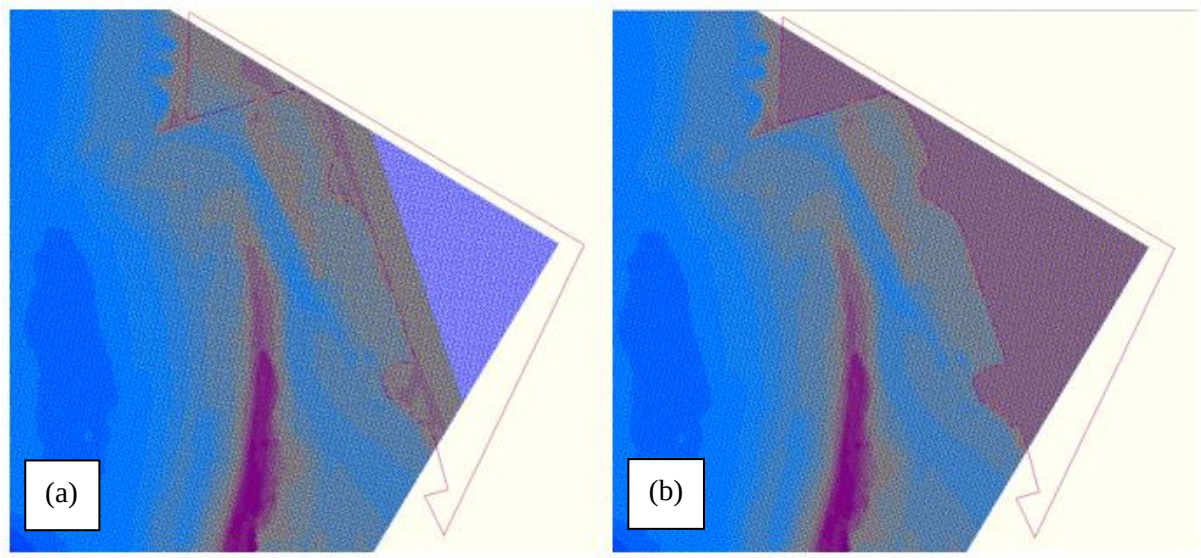


Fig. 48 – Batimetria interpolada (a) e com a implementação dos limites da cidade de Esposende (b).

A Fig. 49 representa os molhes norte e sul antes (Fig. 49a) e depois da atualização (Fig. 49b), com a informação da cota dos diques retirada do projeto de reabilitação do molhe norte da embocadura do rio Cávado, que tem o coroamento a uma altura de 5 m em relação ao ZH (Polis Litoral Norte, 2016).

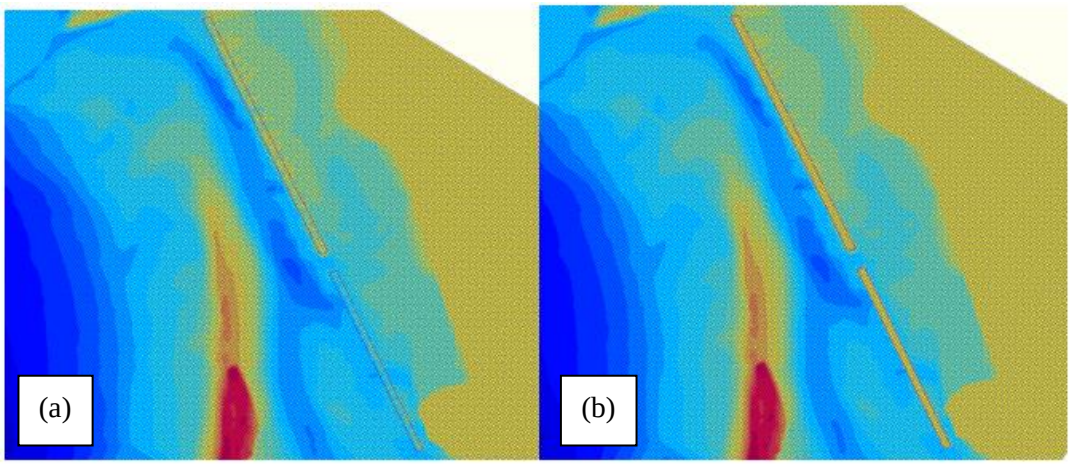


Fig. 49 – Batimetria interpolada (a) e com a implantação do molhe (b).

A curvatura do molhe (Fig. 50a) constitui um problema no momento de o representar no modelo devido à configuração da grelha quadrada. Assim definiu-se uma forma o mais semelhante possível da geometria do molhe e o coroamento foi posicionado à cota 6 m ZH (Fig. 50b).

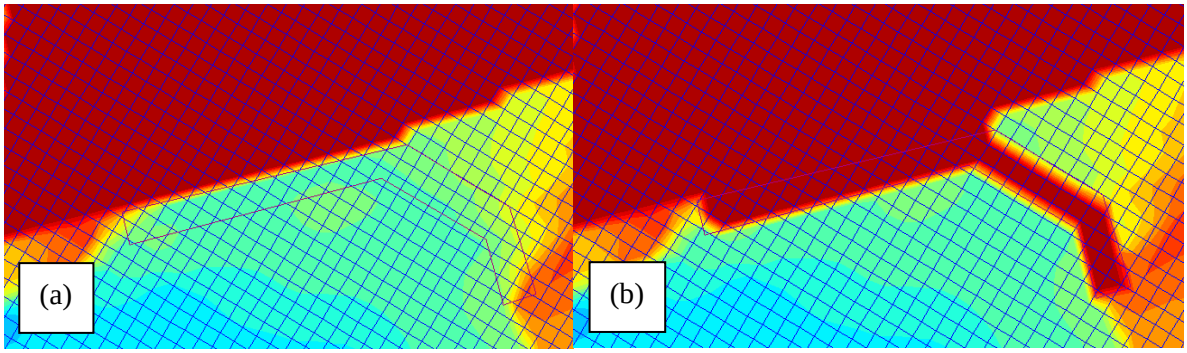


Fig. 50 – Batimetria interpolada (a) e com a representação da curvatura do molhe (b).

Uma vez que a área da cidade de Esposende é extensa, a possibilidade de existir uma zona com alguma incongruência a nível de representação é possível. A zona adjacente do estacionamento (Fig. 51a) é um bom exemplo. Para corrigir o problema, a solução inicial foi alterada de forma a ter a uma batimetria mais adequada à realidade Fig. 51b.

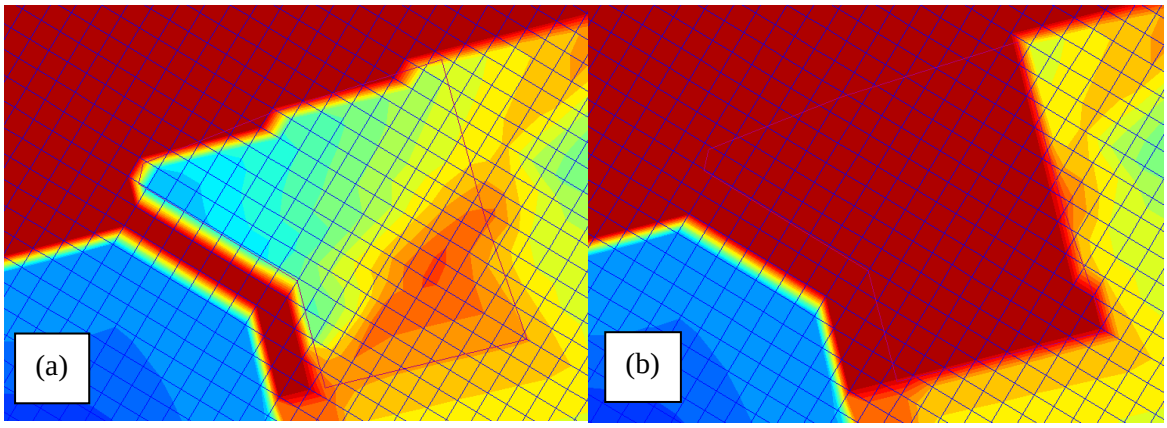


Fig. 51 – Batimetria interpolada do estacionamento (a) e com a correção (b).

Também se encontrou uma incongruência na batimetria para o esporão mais a norte (Fig. 52a). Assim a batimetria foi modificada de forma que o coroamento da estrutura ficasse 6.5 m ZH. Essa cota também foi atribuída à alimentação artificial das praias adjacentes à foz do rio Cávado (Polis Litoral Norte, 2016) e confirmada com uma visita à zona de estudo, de forma a obter uma validação dos desníveis entre as estruturas.

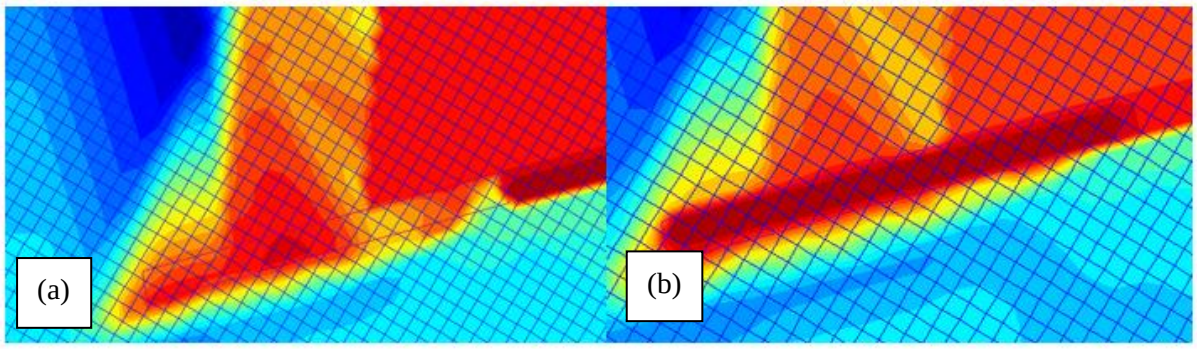


Fig. 52 – Batimetria interpolada do esporão (a) e com a correção (b).

A praia a norte do esporão apresentava muitos problemas, como se consegue observar na Fig. 53a. Numa primeira abordagem, foi tratada a duna. Para se poder representar com o maior pormenor possível foram utilizados dados do programa COSMOS. O perfil da praia emersa de Esposende (APA, 2021), Fig. 54. Esta praia é a mais próxima do esporão (Fig. 55) e, com base numa visita à zona de estudo, esta zona da praia de Esposende está a uma cota superior à cota da duna que se encontra ao lado do estacionamento, pelo que se optou por definir uma cota constante de 8 m para a duna (Fig. 53b).

A ressaltar ainda que a zona de estudo é a restinga do rio Cávado e não a zona da praia de Esposende. No entanto, é preciso representar a duna porque é um sistema de defesa perante os galgamentos que podem ocorrer durante condições ambientais mais extremas.

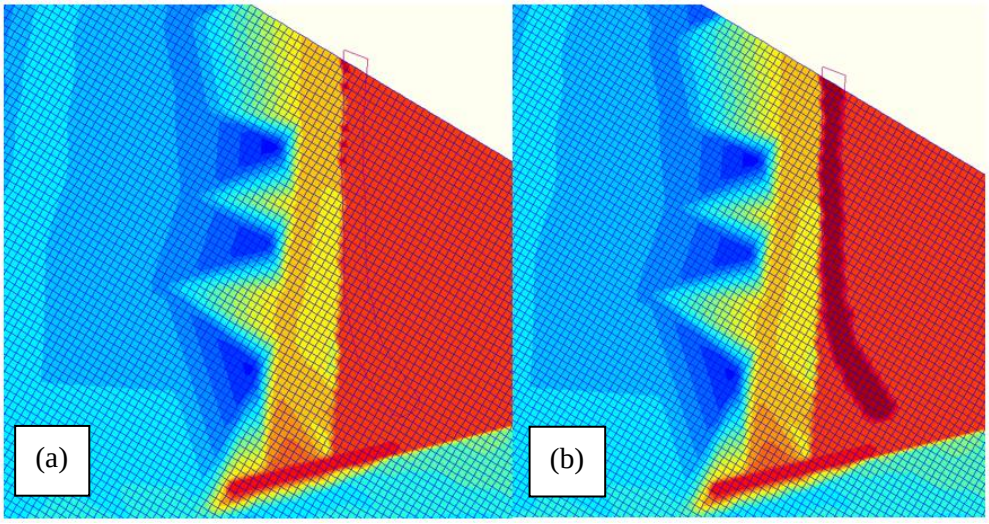


Fig. 53 – Batimetria interpolada (a) e com implementação da duna (b).

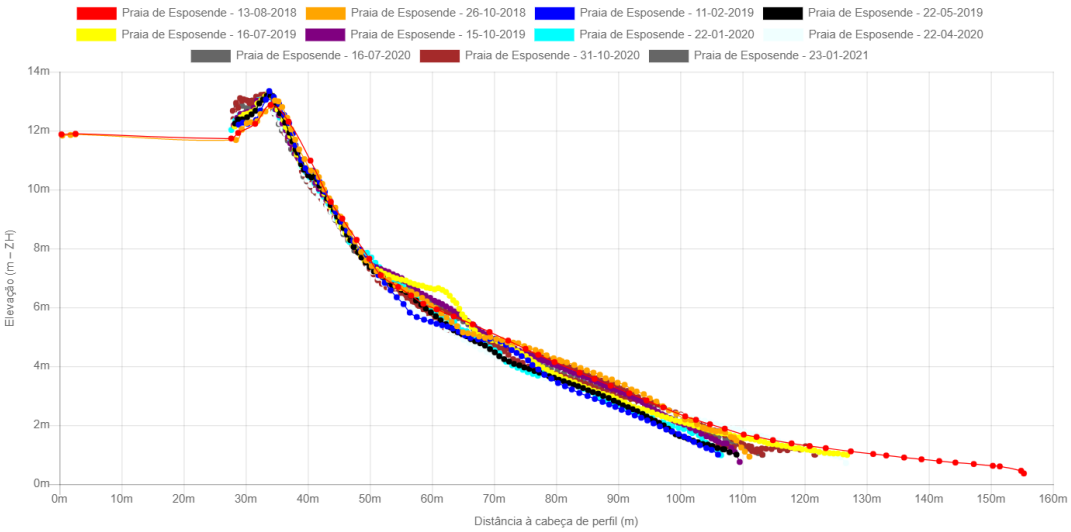


Fig. 54 – Perfil da praia emersa de Esposende (APA, 2021).



Fig. 55 – Imagem aérea da zona com a localização do perfil da praia de Esposende.

Relativamente à praia de Esposende, foi feito um *smoothing* desde a duna até as zonas mais irregulares, como representa a Fig. 56 de forma a reproduzir um perfil de praia mais regular.

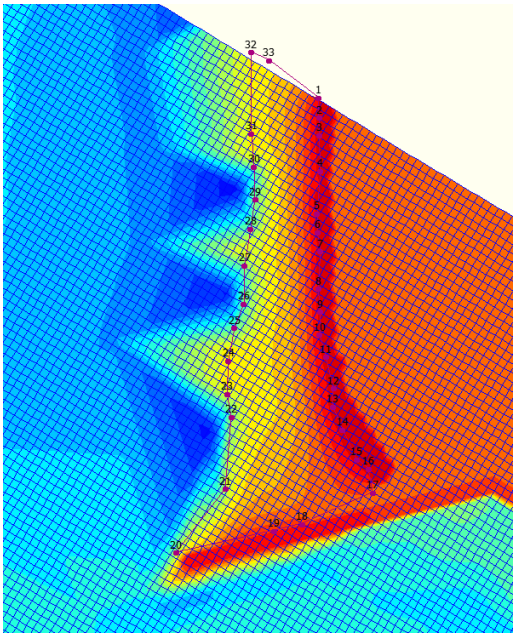


Fig. 56 – *Smoothing* feito à Praia de Esposende.

No que se refere a batimetria desta praia, existem algumas inconsistências, como foi discutido anteriormente e representado por exemplo, na Fig. 56. É possível concluir que essas formas triangulares estão incorretas e aparecem devido à pouca informação que o ficheiro .xyz apresenta nessa zona (Fig. 57).

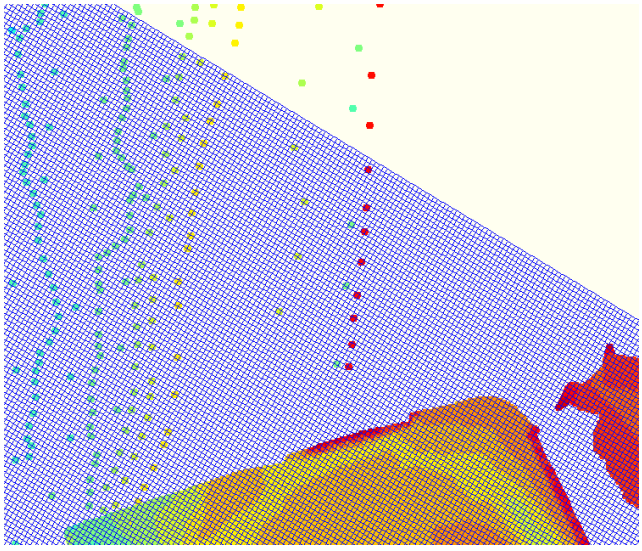


Fig. 57 – Pormenor do ficheiro .xyz na região norte do modelo.

A solução encontrada foi realizar um *smoothing* de forma a que se obtenha uma batimetria razoável, como indica a Fig. 58. Importa salientar, novamente, que o estudo a realizar nesta dissertação não visa a análise dessa zona, mas o trabalho tem de ser feito de forma a que o modelo numérico apresente valores razoáveis.

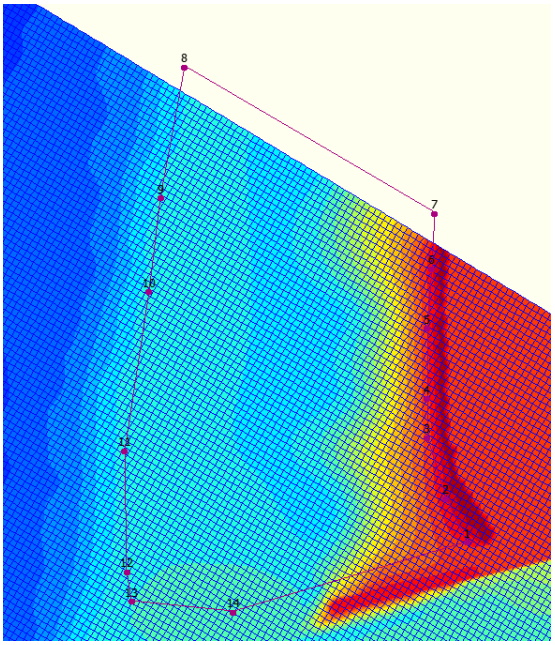


Fig. 58 – *Smoothing* aplicado à zona submersa da praia a de Esposende.

Visto que foi decidido fazer o *smoothing* até meia secção da duna (Fig. 56), para ter uma diferença entre pontos o mais elevado possível. O restante da duna foi aplicado um *smoothing* para uniformizar a batimetria (Fig. 59).

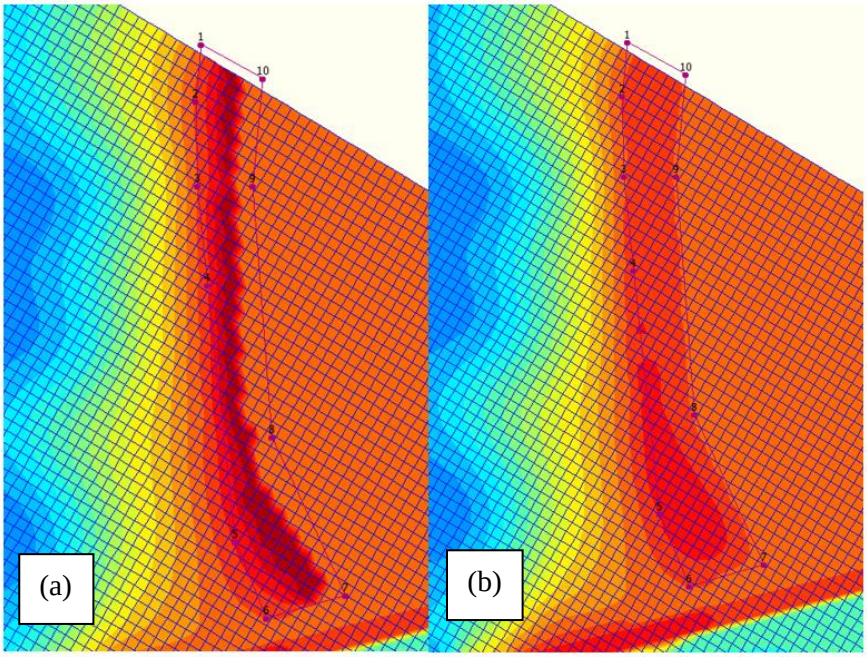


Fig. 59 – Antes (a) e depois (b) do *smoothing* aplicado na duna a norte.

Uma vez finalizada o tratamento da zona norte, procedeu-se ao tratamento da restinga. A Fig. 47 representa uma imagem 3D da batimetria recém interpolada onde se consegue observar a existência de picos na restinga, o que é uma morfologia impossível de ocorrer numa duna arenosa. De forma a resolver este problema foi aplicado um *smoothing* à restinga, como indica a Fig. 60a, que permite dar uma forma mais real da restinga, Fig. 60b.

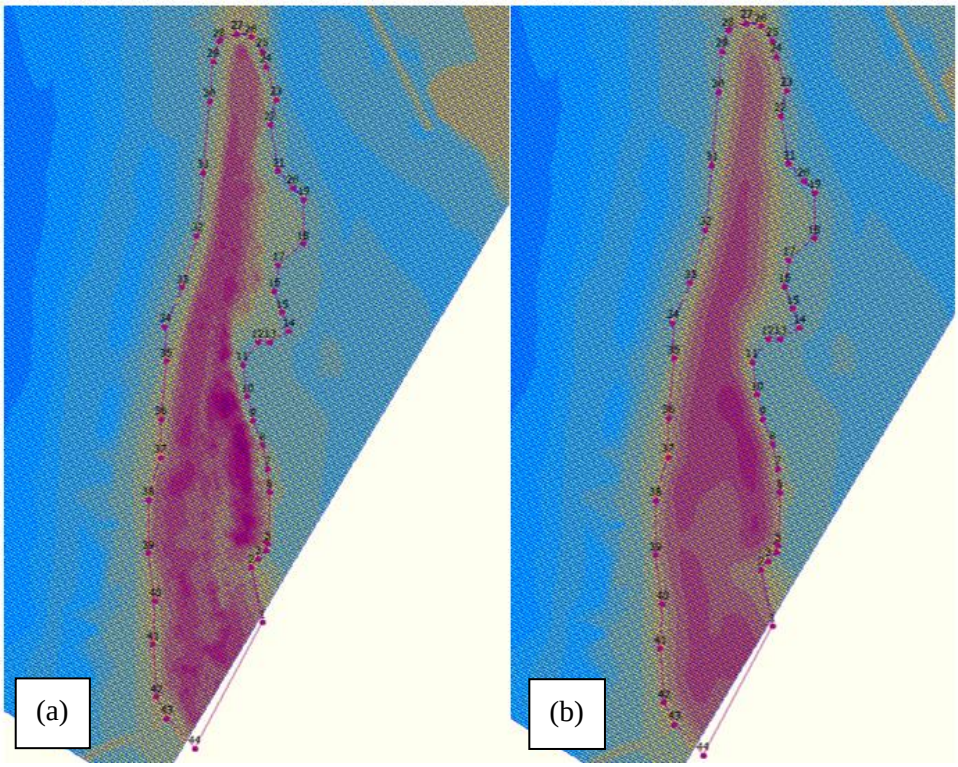


Fig. 60 – Batimetria interpolada da restinga (a) e com a correção (b).

A restinga também apresenta alguns erros de dimensão reduzidas, representado na Fig. 61a. Para a correção desses erros foi aplicado um *smoothing*, de forma a obter uma morfologia mais uniforme (Fig. 61b).

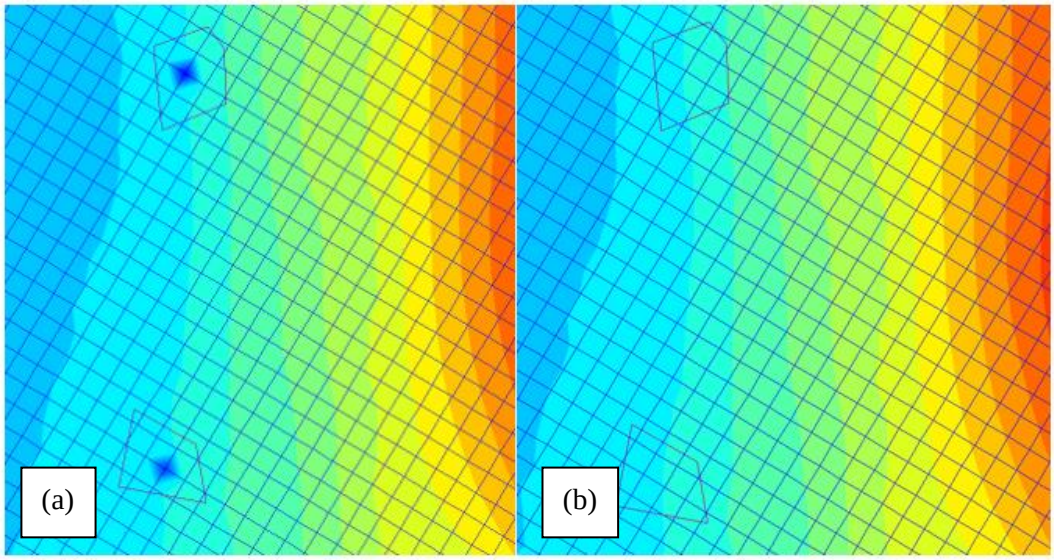


Fig. 61 – Pormenor da restinga interpolada (a) e após aplicação do smoothing (b).

O esporão a sul do modelo também teve alterações de cota. Como se pode observar na Fig. 62a, este não apresenta uma cota constante, pelo que foi modificado de forma a ter uma altura constante igual á do esporão norte, isto é, igual a 6.5 m, como mostra a Fig. 62b.

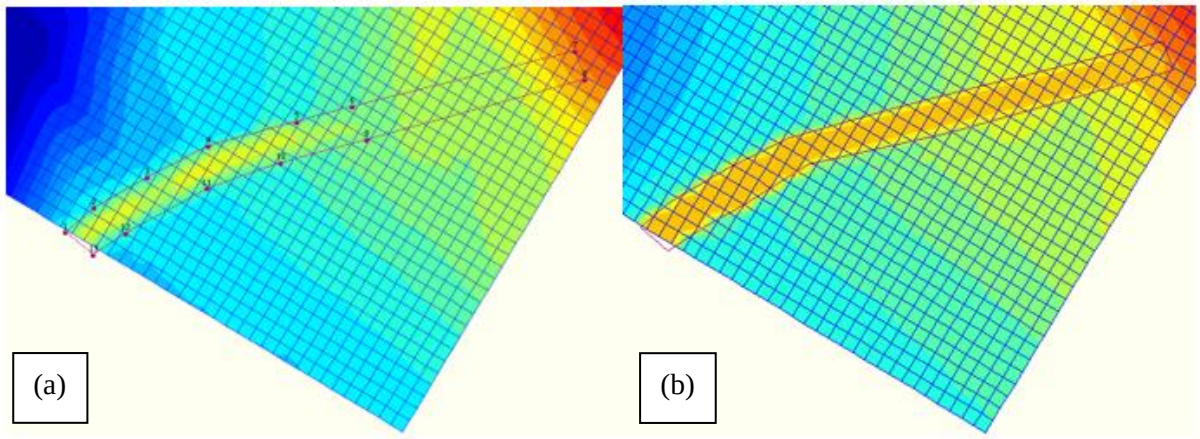


Fig. 62 – Batimetria interpolada do esporão a sul (a) e com a correção (b).

Observa-se também que a batimetria na proximidade da restinga apresenta pontos de variação brusca de cotas, como foi visto no caso da praia de Esposende (Fig. 57). Essas modificações bruscas também podem ser observadas na restinga, como mostra a Fig. 63.

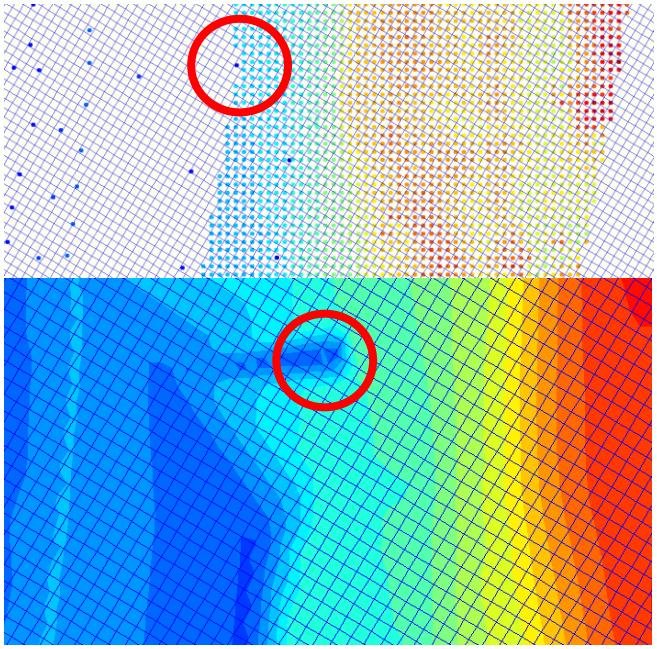


Fig. 63 – Consequências da existência de um ponto com uma cota anómala na batimetria.

A falta de pontos para representar, de forma correta, essa transição levou a realização de um *smoothing* na restinga para criar uma batimetria mais regular (Fig. 64).

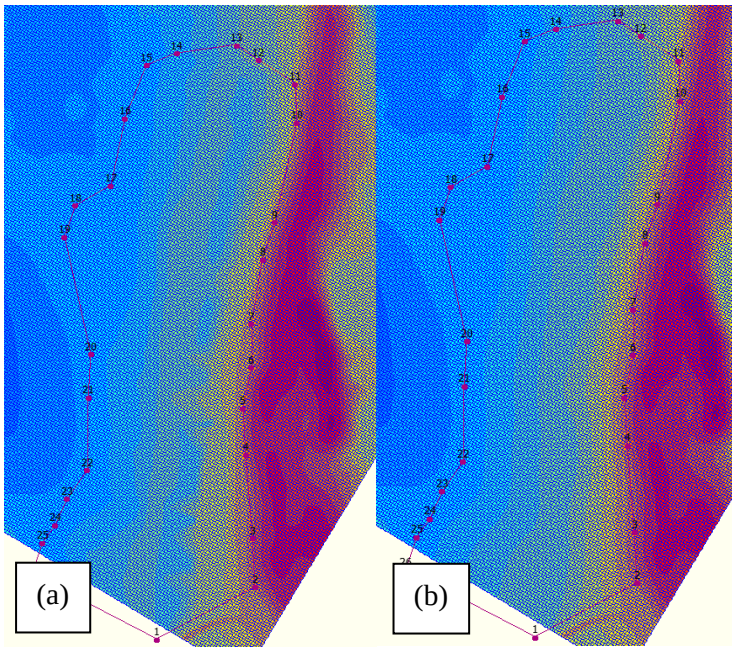


Fig. 64 – Batimetria interpolada da profundidade na proximidade da restinga (a) e com a correção (b).

No que se refere à restante batimetria, esta foi deixada igual ao resultado da interpolação. A Fig. 65 apresenta a batimetria final com grelha e a Fig. 66 apresenta a mesma batimetria sem grelha, de forma a conseguir uma melhor compreensão e facilitar a interpretação.

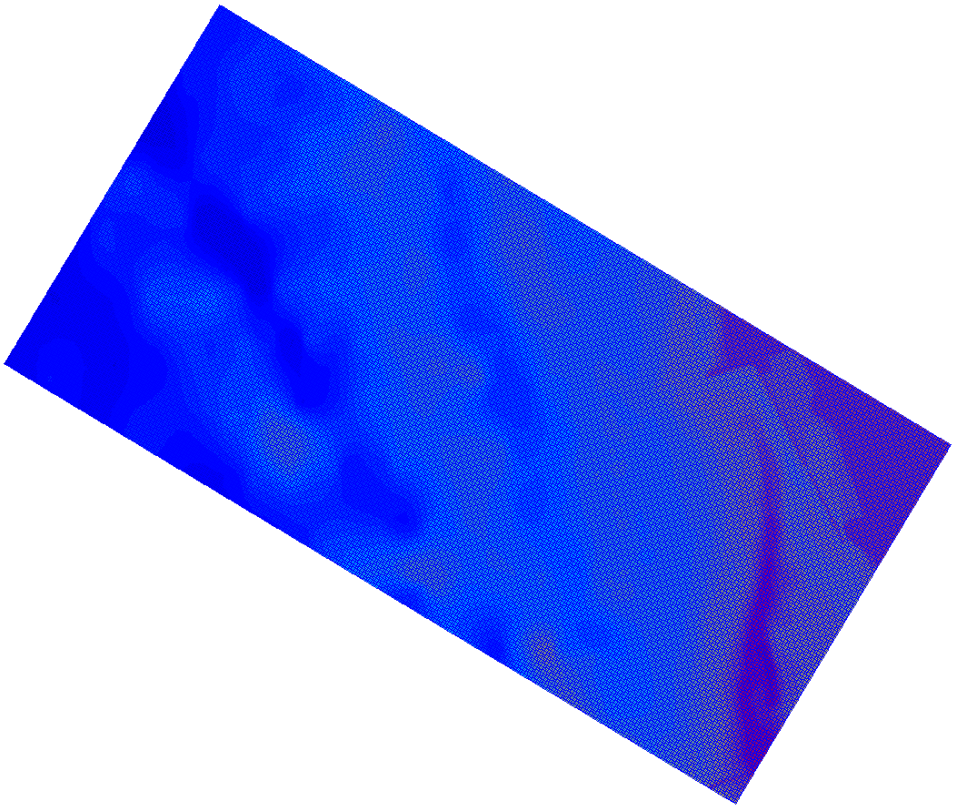


Fig. 65 – Batimetria da zona em estudo adaptada com grelha.

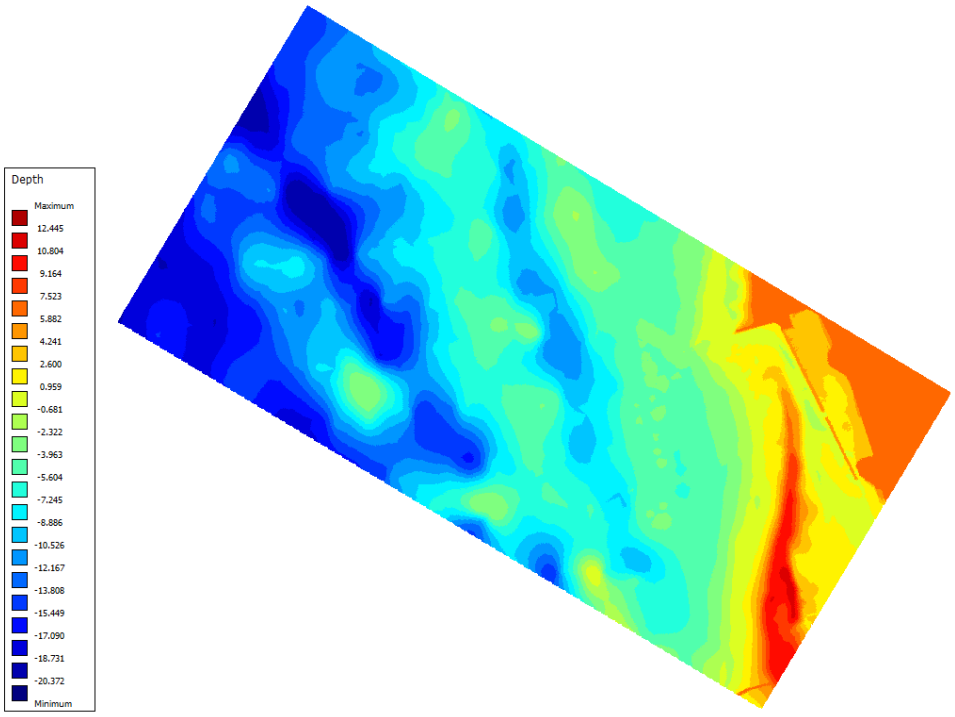


Fig. 66 – Batimetria da zona em estudo adaptada sem grelha.

A Fig. 67 mostra uma representação 3D de toda a zona em estudo após as alterações implementadas. De referir que a escala vertical foi ampliada em relação à escala horizontal.

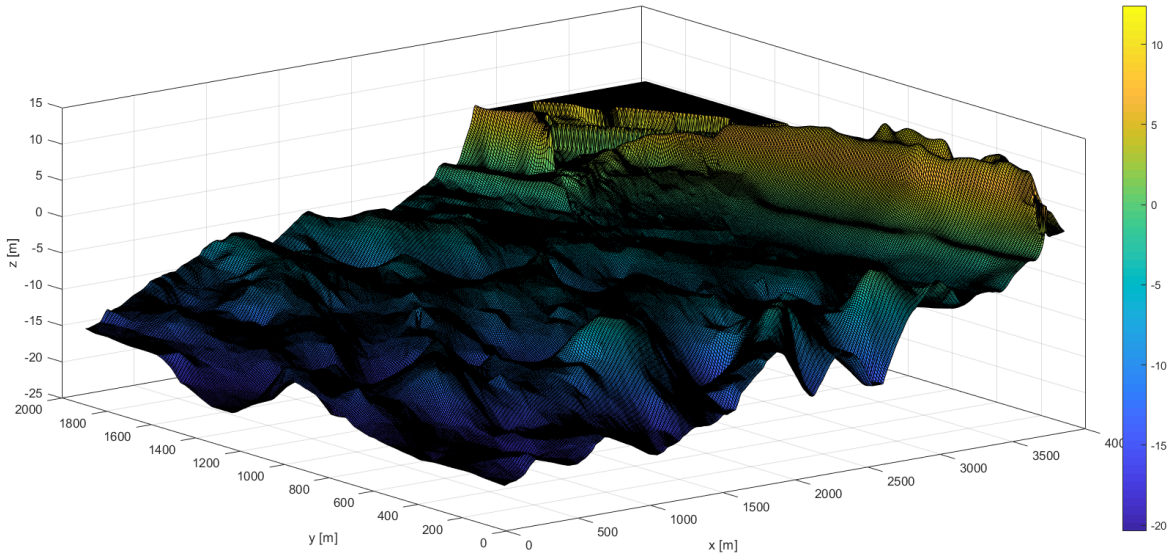


Fig. 67 – Batimetria final representada em 3D utilizando o Matlab.

De forma a concluir a análise da batimetria, é importante salientar que o ideal seria ter uma batimetria em que não fosse necessária a nenhuma alteração por parte do utilizador, para evitar erros de definição. A Fig. 68a representa a batimetria simplesmente interpolada na zona da restinga que pode ser comparada com a Fig. 68b na mesma zona. É logico que o comportamento hidráulico de uma é muito diferente do da outra. Também é importante ter em conta que como é um estudo de um modelo número, estas alterações bruscas de direção da superfície podiam introduzir alguma instabilidade numérica pelo que o melhor é fazer alterações.

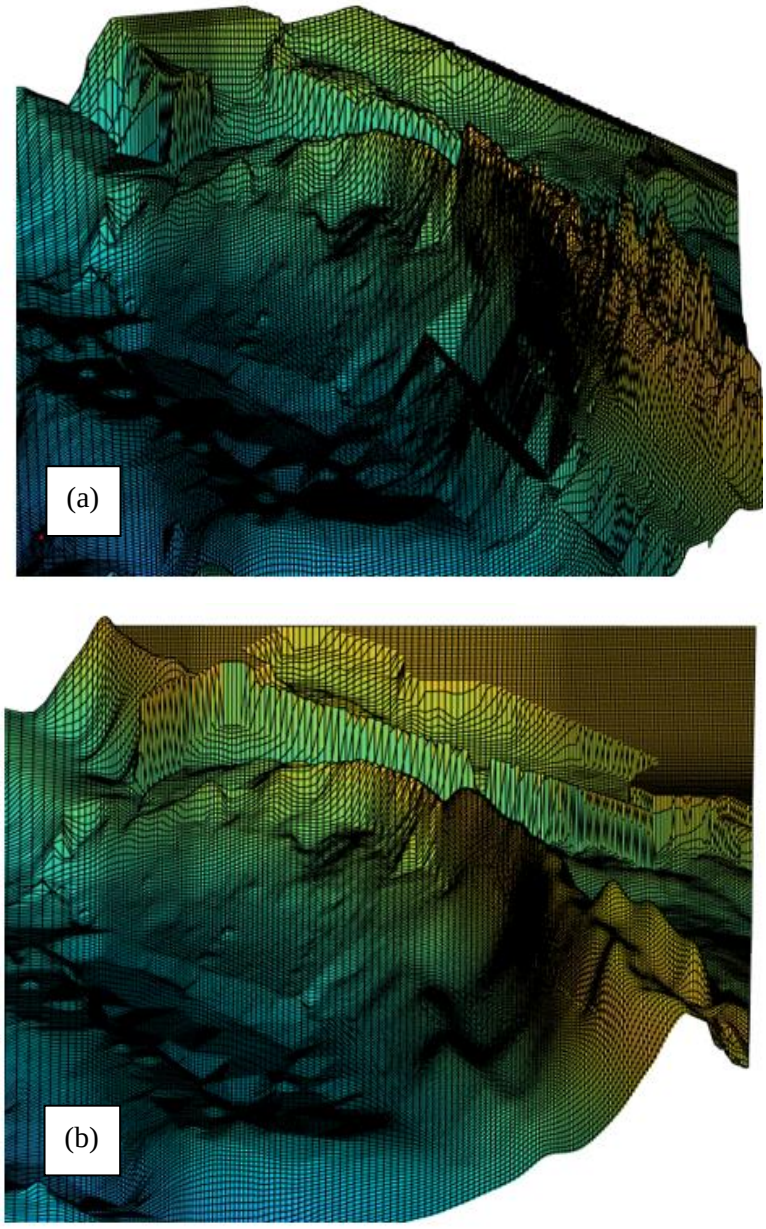


Fig. 68 – Batimetria interpolada (a) e a batimetria final (b).

Devido às condições de agitação que foram fornecidas ao XBeach e às características da batimetria, apareceu um erro: "Warning: shallow water so long wave variance is reduced using par%nmax". Isto porque o XBeach não permite que ondas de elevada altura sejam simuladas em condições fronteiras pouco profundas (o capítulo 2.5.1 expõe a situação de rebentação em águas pouco profundas). Uma forma de evitar que isto aconteça consiste em estender a batimetria até uma elevada profundidade. Para esse efeito foi usado o Matlab para criar uma batimetria fictícia que considera uma inclinação de 1/25 desde a fronteira da batimetria real até á cota de -60 m, como um patamar uniforme aos -60 m, extensão de 50 m, de forma a que as ondas entrem no modelo sem serem perturbadas por una batimetria muito complexa como a que se encontra na Fig. 69.

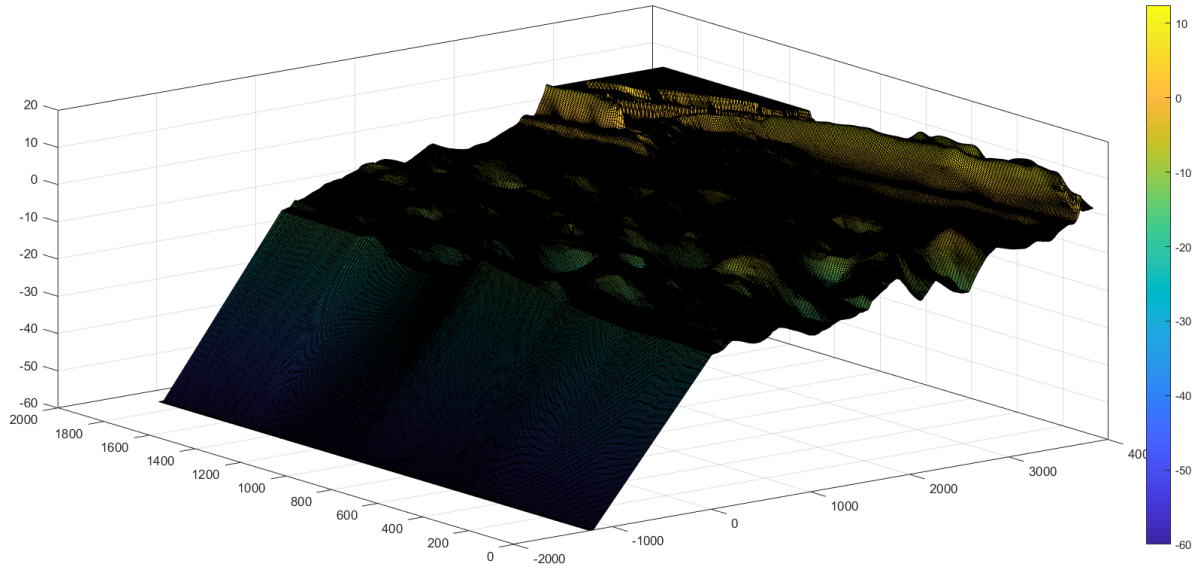


Fig. 69 – Batimetria modificada para o Xbeach.

É possível também criar zonas não erodíveis no modelo numérico. Para tal é preciso fornecer um ficheiro ne.txt que incorpore numa matriz as coordenadas dos pontos que não são erodíveis. Para tal foi usado outro script Matlab, em que foi possível representar as zonas não erodíveis representadas na Fig. 70, nomeadamente: a cidade de Esposende, o molhe norte da embocadura do rio Cávado, o dique, o esporão a sul da restinga e os cavalos de fão.

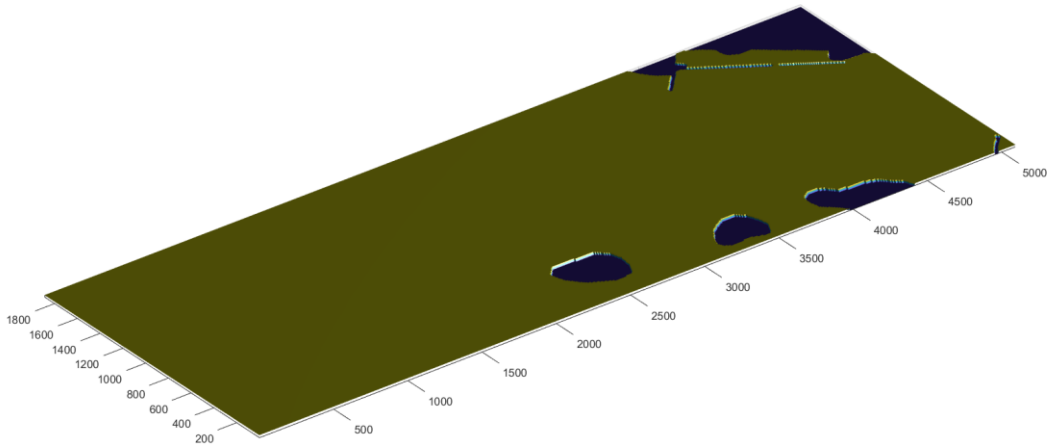


Fig. 70 – Zonas não erodíveis consideradas no modelo numérico.

Os cavalos de fão são uma formação rochosa muito conhecida pela lenda da petrificação de equídeos que permitem a proteção da vila de Fão, para evitar a aproximação de embarcações à costa (Frade, 2014). Esta formação rochosa pode ser vista em certas condições de agitação marítima, como se pode observar na Fig. 71. Estas formações podiam ocasionar problemas às embarcações antigas que não conheciam a zona.



Fig. 71 – Formação rochosa chamada de Cavalos de Fão (Frade, 2014).

Por último a localização da vegetação que já foi detalhada anteriormente na secção 3.7, está representada na Fig. 72. A zona de vegetação foi implementada num local de forma a não obstruir a embocadura do rio Cávado na sua totalidade, paralelamente à batimetria e de forma a proteger o extremo norte.

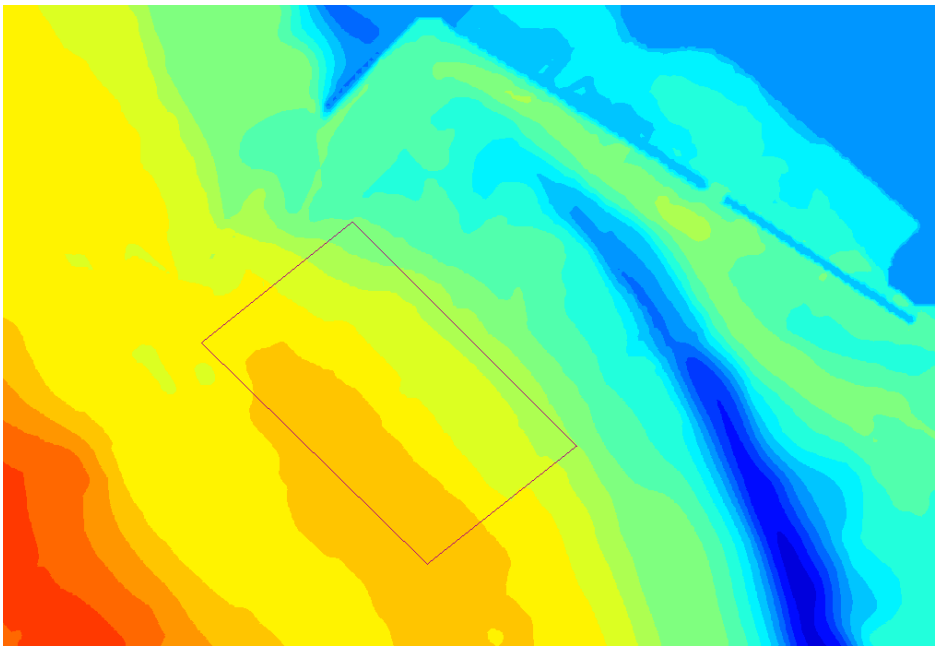


Fig. 72 – Localização do local de implantação da vegetação no modelo Deflt3D.

4.3. CONDIÇÕES A SIMULAR

Foram desenvolvidas cerca de 50 versões do modelo numérico e realizadas mais de 100 simulações, que permitiram obter uma boa perceção do modelo e afinar detalhes importantes. As condições de teste, que são especificadas no ficheiro params.txt e que são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Elementos a destacar do ficheiro params.txt.

Parâmetro	Valor
wavemodel	surfbeat
wbctype	jonstable
thetamin	-90
thetamax	90
dtheta	20
alfa	329
morfac	10
left / right	wall
avalanching / struct	1

As condições de agitação marítima, marés, batimetrias, entre outros, foram já discutidas anteriormente, no capítulo 3, pelo que não serão expostas neste capítulo. Importa salientar que o tempo de simulação foi de 2 dias, o que levou a um tempo de calculo de 5 dias por cada simulação.

4.4. Análise de Resultados e Discussão

Os resultados são extraídos no Delft3D no módulo QUICKPLOT, através de diversos *outputs*, que são especificados antes de realizar a simulação e que serão discutidos a seguir. As imagens que se encontram neste capítulo, no lado esquerdo, representam a simulação sem intervenção, enquanto à direita encontram-se os resultados da implementação da solução baseada na natureza. De referir ainda que o título das imagens tem formato: dia / mês / ano às horas : minutos : segundos.

4.4.1. Dissipação da Energia Devido à Vegetação

O *output* designado por "Dveg" no *software* permite visualizar a dissipação de energia da onda devido à vegetação, o que é uma mais-valia, uma vez que permite observar o efeito da vegetação que foi implementada no modelo numérico e a sua interação com o escoamento. A Fig. 73 permite confirmar que existe dissipação da energia da onda na simulação com a vegetação.

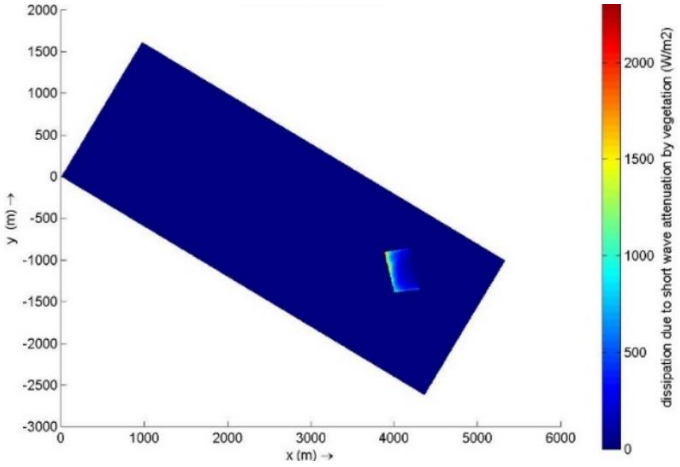


Fig. 73 – Efeito da vegetação na dissipação da energia da onda.

4.4.2. COTA DO FUNDO

Designado "zb", este *output* permite a visualização da cota do fundo na área reproduzida no modelo. A Fig. 74 apresenta o ponto de partida, que é igual nos dois casos (à esquerda sem intervenção e à direita com a intervenção).

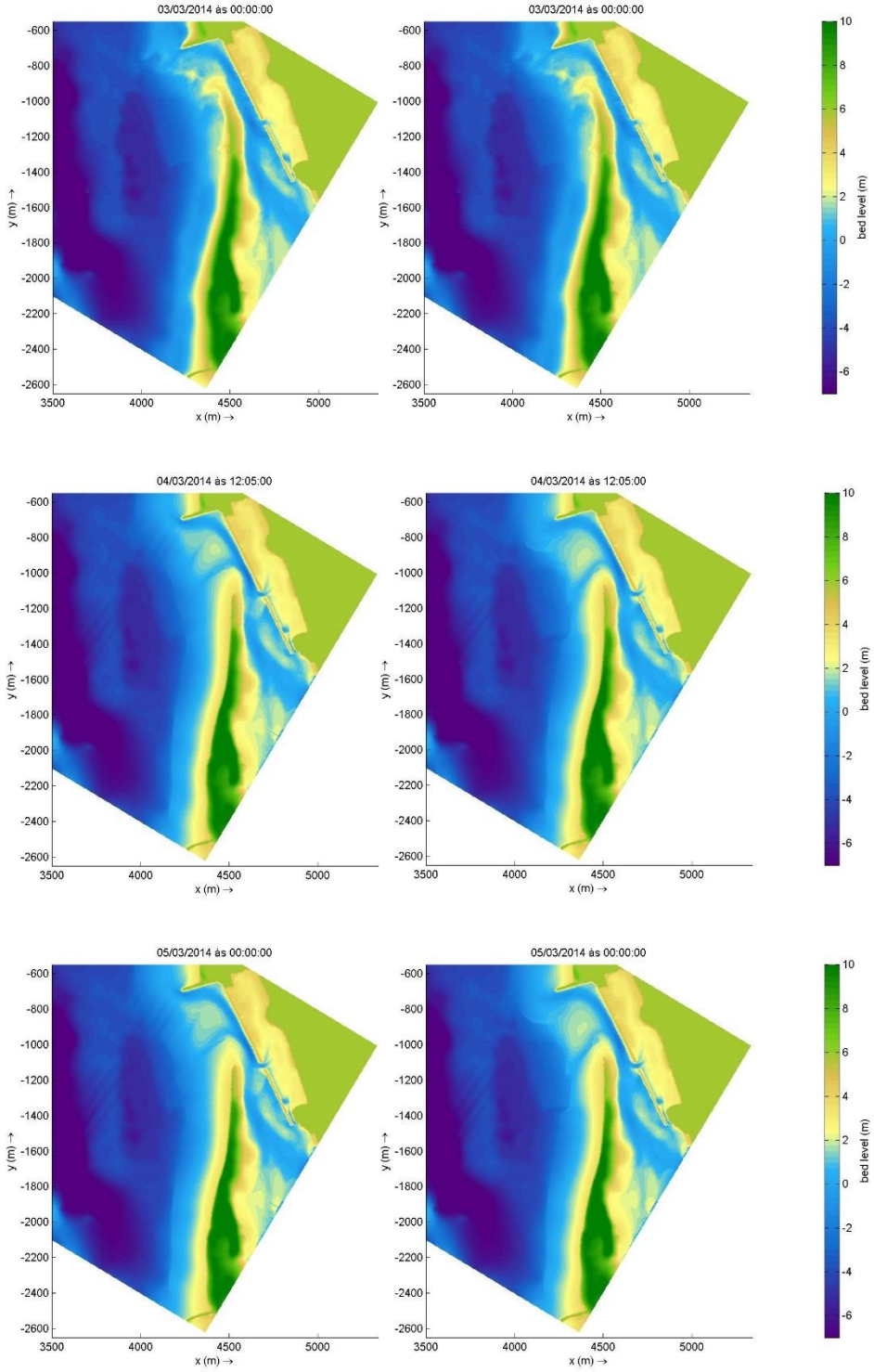


Fig. 74 – De cima para baixo: cota dos fundos no início da simulação, preia-mar e na final da simulação: sem intervenção (esquerda), com a intervenção (direita).

Na maré baixa já é possível observar diferenças significativas da morfologia da restinga designadamente, um aumento da volumetria do banco de areia e um alargamento do canal de navegação. A imagem inferior representa as condições no final da simulação, onde é possível verificar que existe um alargamento da embocadura e do canal de navegação e, no que diz respeito ao banco de areia é possível observar que este apresenta um aumento a norte e uma forma mais uniforme.

4.4.3. TAXA DE MODIFICAÇÃO DOS FUNDOS

O output "dzbdt" permite a representação da taxa de modificação da batimetria, tanto em termos de erosão como de acreção. Com este *output* é possível também visualizar os galgamentos que ocorrem e que causam erosão no tardoz do dique. A simulação realizada demostra que só existem dois galgamentos em que isto ocorre, designadamente às 15:15 e as 15:35 horas do dia 03/03/2014 (Fig. 75).

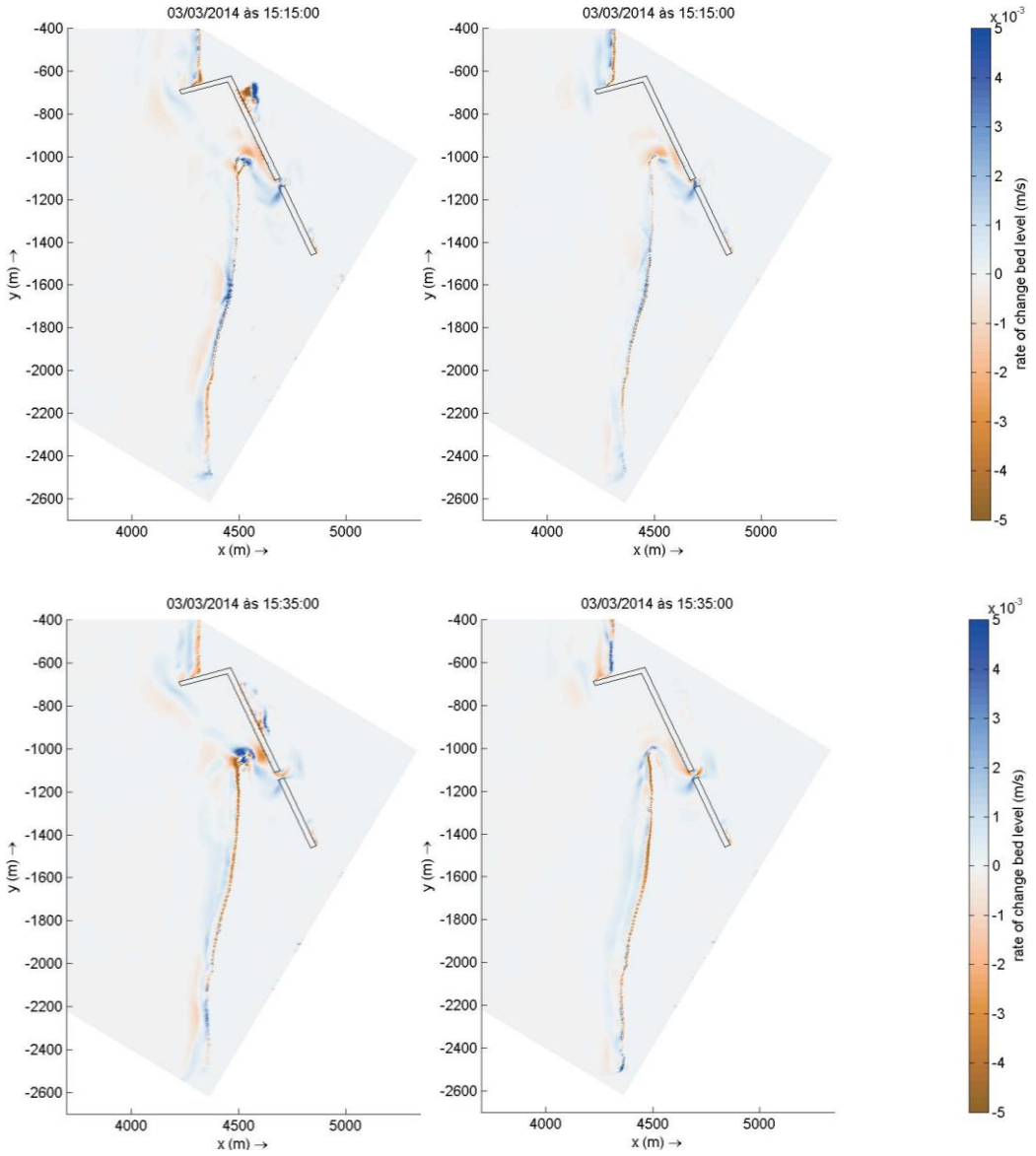


Fig. 75 – Taxa de mudança dos fundos para os dois galgamentos que originem erosões no tardoz do dique.

Em ambos os episódios de galgamento é possível observar que na solução baseada na natureza não existe erosão nem acumulações no tardoz do dique, verificando-se uma diminuição no transporte sedimentar no ponto norte da restinga.

4.4.4. TAXA DE EROSÃO DO FUNDO POR CÉLULA

O *output* "ero" apresenta a diferença do anterior "dzbdt", e permite a análise exclusiva das erosões do fundo, de forma a facilitar a compreensão dos resultados. A Fig. 76 representa o *output* para a data anteriormente analisada.

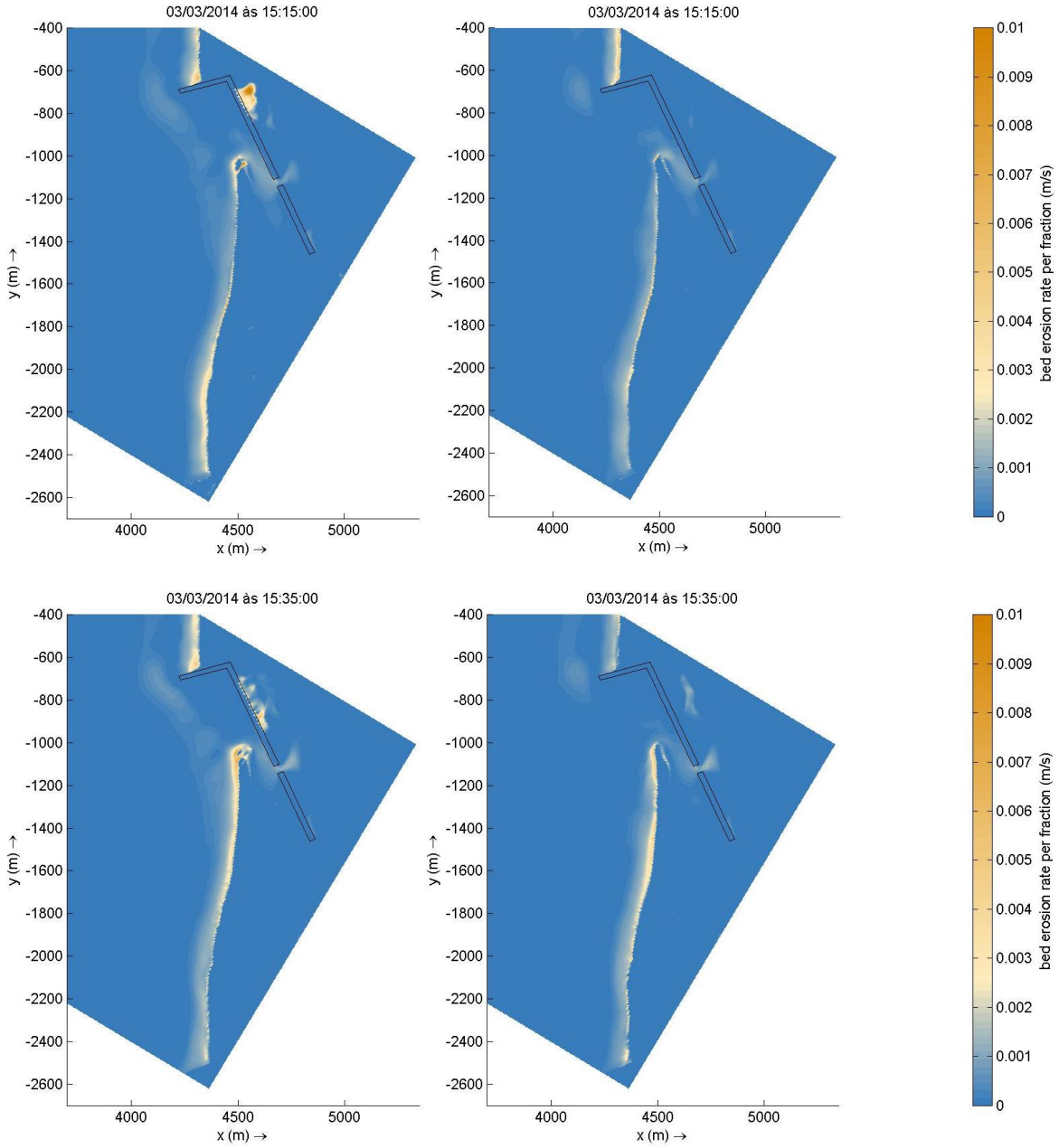


Fig. 76 – Taxa de erosão do fundo para os dois episódios de galgamento com ocorrências de erosões no tardoz do dique.

Com o *output* "ero" é possível confirmar as conclusões anteriores. Isto é que não existe erosão nem acreção de sedimentos no tardoz do dique, após a implementação da solução. Na parte norte da restinga verifica-se uma diminuição do transporte sedimentar.

De salientar que com este *output* é muito mais visível a diminuição dos fenómenos erosivos na praia norte. Numa análise do que resta da restinga (retirando a parte norte), não se consegue concluir se para estes intervalos será benéfica a implantação de uma solução baseada na plantação de vegetação.

4.4.5. NÍVEL DE ÁGUA

O *output* "zs" permite visualizar a altura de água. Os elementos que não estão em contacto com a água apresentam uma cor branca, permitindo assim visualizar a ocorrência de galgamentos. A Fig. 77 permite ainda visualizar e analisar as diferenças que resultam da implementação da solução de proteção proposta neste estudo.

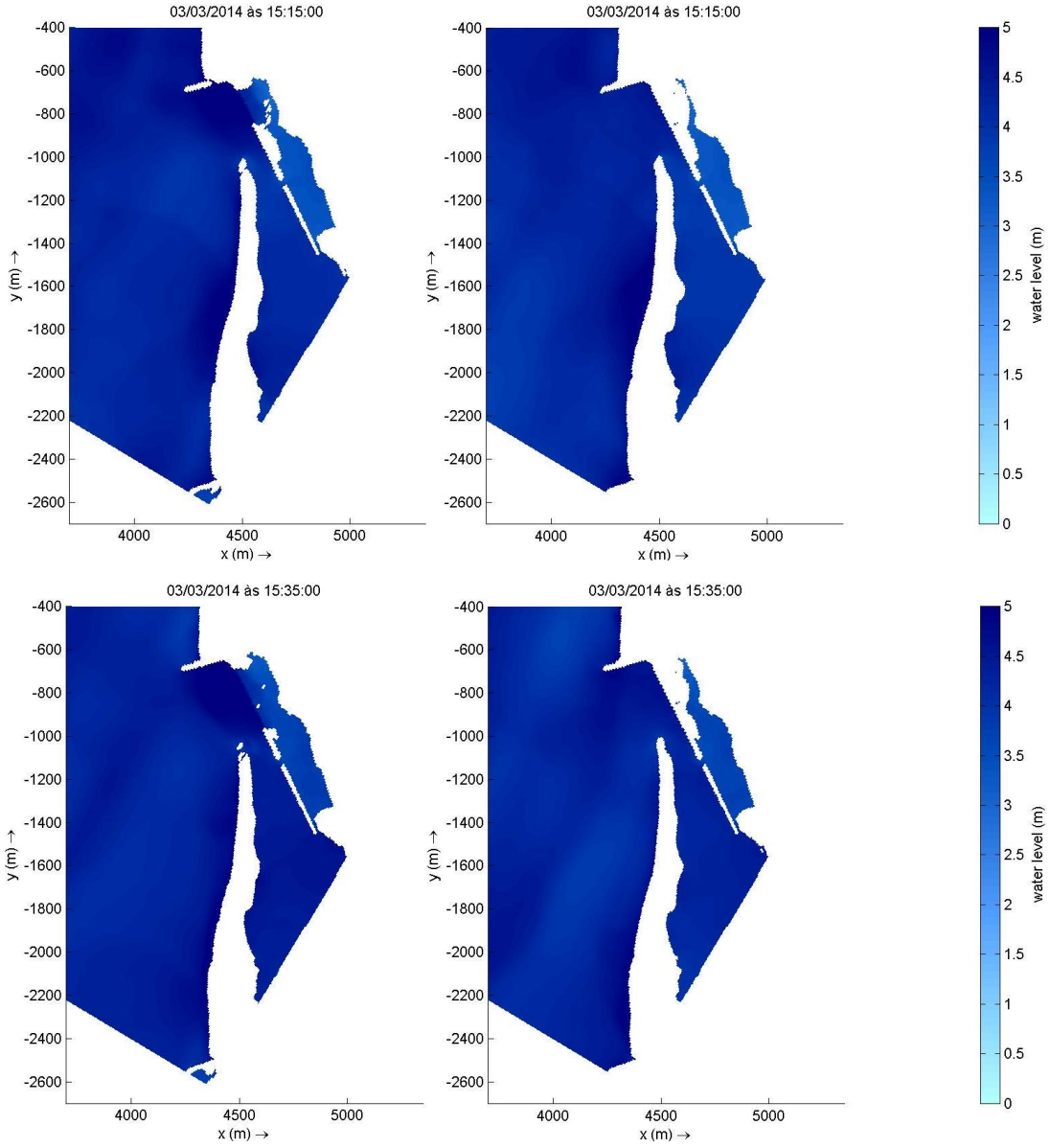


Fig. 77 – Galgamentos na simulação sem intervenção (esquerda) e com implementação da solução (direita).

A simulação base apresenta 13 eventos de galgamento do dique, sendo que apenas dois provocam a erosão no tardoz da estrutura. Com a implementação da vegetação foi possível eliminar 7 desses eventos de galgamentos, entre eles os dois representados na Fig. 77.

Este output também tem outra finalidade, na medida em que permite visualizar a morfologia que a restinga apresenta em baixa-mar (Fig. 78).

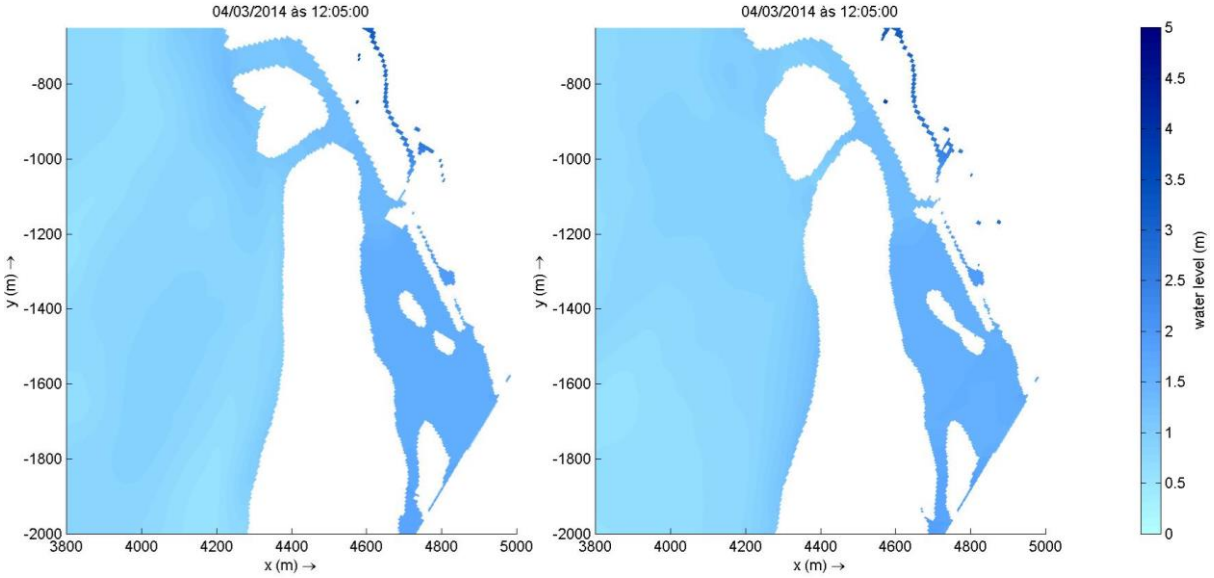


Fig. 78 – Morfologia da restinga em baixa-mar: sem intervenção (esquerda) e com intervenção (direita).

É assim possível concluir que a implementação de vegetação aumentou a área do banco de areia e conduzir a um estreitamento do canal que separa a restinga do banco de areia. De referir que existe manutenção do canal de navegação e a abertura, para sul da embocadura, o que é benéfico para o canal de navegação. A restinga regista um acréscimo de volume entre as coordenadas y de -1200 a -1400, aproximadamente. Estes resultados mostram, de uma forma clara, o efeito favorável que a colocação de vegetação pode ter para a resolução dos problemas identificados.

4.4.6. Velocidade no Centro da Célula

A velocidade no centro de cada célula de cálculo "vmag" está representada na Fig. 79.

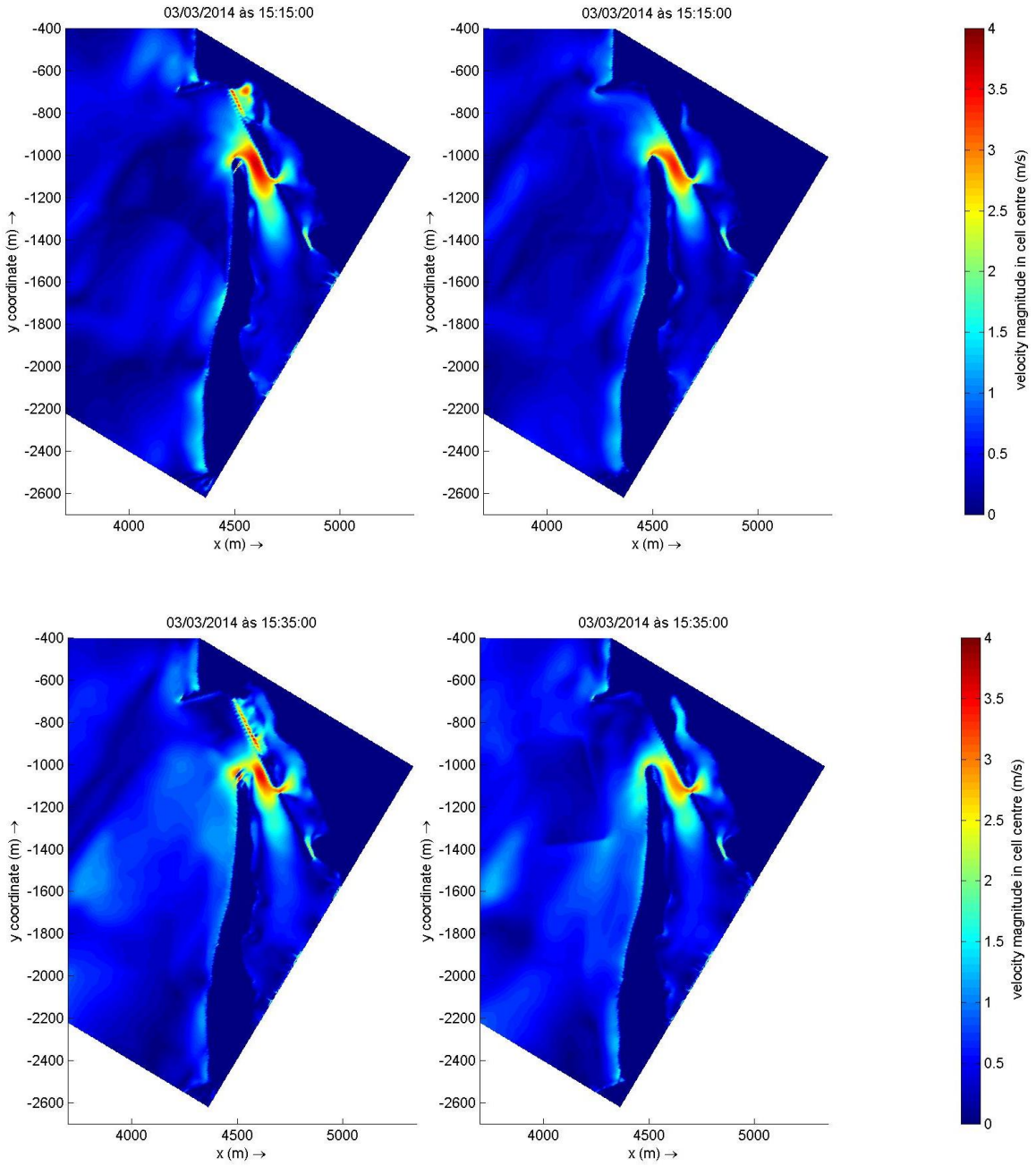


Fig. 79 – Magnitude da velocidade no centro da célula de calculo: sem intervenção (esquerda) e com intervenção (direita).

Com a implementação da vegetação, verifica-se que existe uma diminuição da magnitude da velocidade na extremidade norte da restinga, juntamente com a quase eliminação da velocidade que ocorre na zona adjacente ao dique. Isto quer dizer que o escoamento não tem energia suficiente para transpor o dique após a implementação da solução baseada na natureza.

4.4.7. MUDANÇA TOTAL DOS FUNDOS DEVIDO AO DESLIZAMENTO DO SOLO

Uma forma de avaliar se o deslizamento de terras "*avalanching*" está a desempenhar o seu papel é através da implementação do *output* "dzav". A Fig. 80 apresenta o deslizamento para os dois casos.

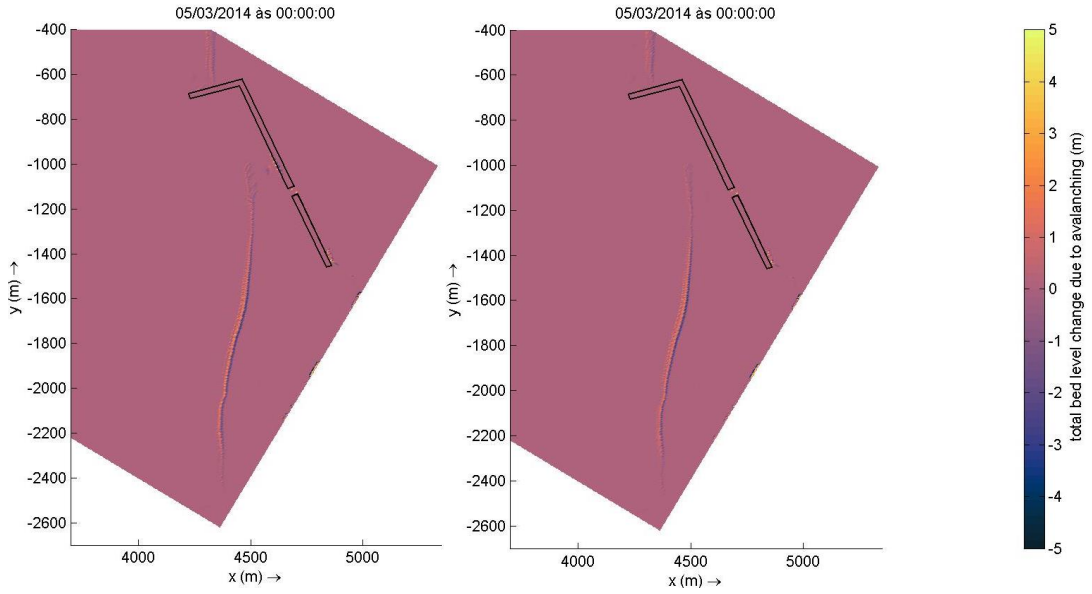


Fig. 80 – Zona do modelo onde ocorre deslizamento do solo, sem intervenção (esquerda) e com a intervenção (direita).

É possível concluir que não existe uma grande diferença entre a simulação sem a intervenção e baseada na implantação de vegetação a simulação com a intervenção, devido à escala usada na Fig. 80. A Fig. 81 tem como foco a zona mais a norte da restinga, o que fez diminuir a escala usada na apresentação dos resultados e, o que facilitou a análise do impacto que teve o "*avalanching*".

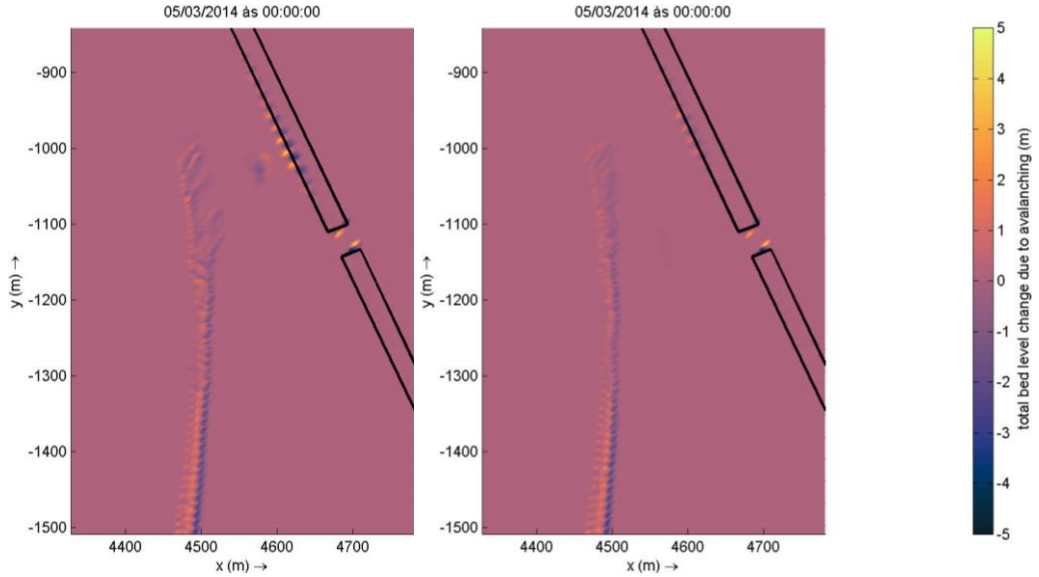


Fig. 81 – Deslizamento do solo no extremo norte da restinga: sem intervenção (esquerda) e com intervenção (direita).

Antes de realizar algum comentário sobre os resultados obtidos com este *output*, é importante salientar que o deslizamento de terra que ocorre no local de implantação das estruturas rígidas é motivado pela grelha, que não se encontra paralela à estrutura, mas sim com uma dada rotação, que provoca o deslizamento de "terra".

Os resultados das simulações sem introdução da intervenção mostram um deslizamento do solo em quase toda a extensão da zona de iteração da restinga com o mar. Um maior deslizamento de terras ocorre no extremo norte, com rotação a este, o que representa um deslizamento do solo na zona norte da restinga para além de um deslizamento na margem do rio Cávado. A implementação da solução baseada na natureza permitiu eliminar o deslizamento para a zona do rio, ademais diminuir a rotação do deslizamento e intensidade na zona norte da restinga.

4.4.8. EROSÕES E SEDIMENTAÇÕES

O *output* erosão e acreção apresenta valores acumulados de erosões e deposições. No XBeach este resultado tem a designação de "*sedero*". Como este *output* apresenta valores acumulados, o que interessa são os resultados para a última fase da simulação. Esses resultados permitem comparar de forma quase imediata as consequências da solução implementada.

A Fig. 82 apresenta o *output* a uma grande escala o que não permite retirar muita informação.

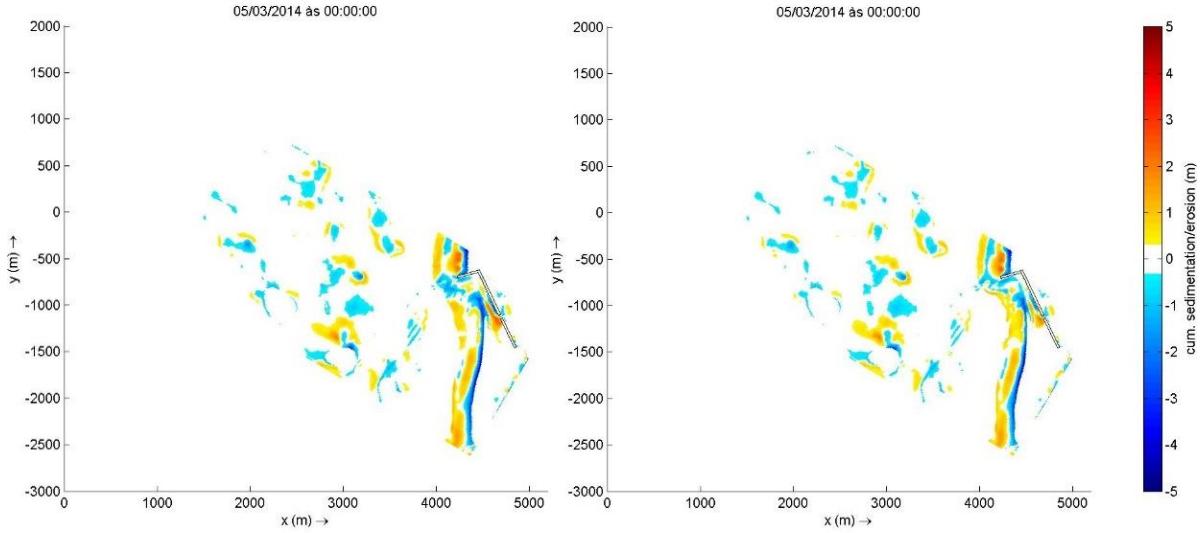


Fig. 82 – Valores acumulados de erosões e deposições na extensão total do modelo; sem intervenção (esquerda) e com intervenção (direita).

A Fig. 83 já se encontra a uma escala que permite analisar os resultados, que serão discutidos a seguir.

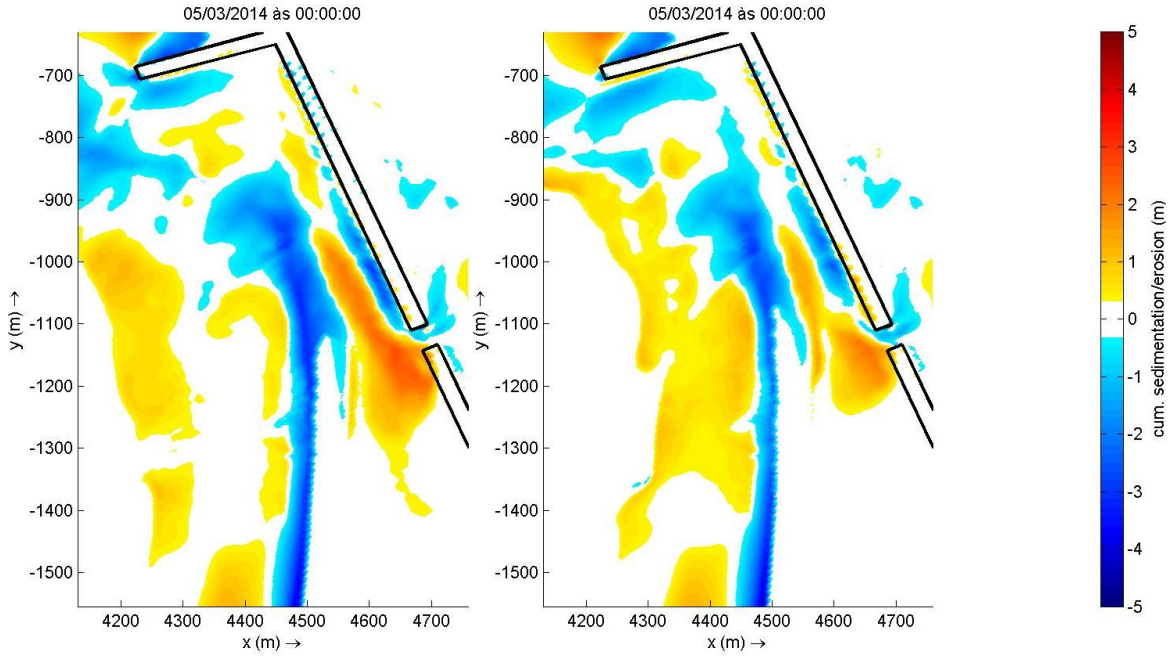


Fig. 83 – Valores acumulados de erosões e deposições no extremo norte da restinga: sem intervenção (esquerda) e com intervenção (direita).

Os resultados das simulações sem a intervenção permitem concluir que existe uma deposição de sedimentos no interior do estuário e no canal de navegação, com uma extensão aproximada de 300 m. Também é possível observar uma mudança de perfil da praia em toda a sua extensão, para um perfil de resposta de tempestade em que os sedimentos são erodidos da duna e colocados numa barra submarina.

Por outro lado, é percetível a ocorrência de erosão junto ao molhe, com uma deposição de sedimentos na zona entre a extremidade norte da restinga e o molhe, que coincide com o que é percetível na visita realizada ao local em maré baixa (existência de um banco de areia). De realçar ainda, pela sua importância, a ocorrência de valores elevados de erosão no extremo norte da restinga, com um valor aproximado de 200 m.

A implementação da solução de proteção veio diminuir a deposição de material sedimentar no interior do canal de navegação, diminuiu a intensidade das deposições a norte da restinga, diminuiu a área de deposição do banco de areia, aumentou as erosões junto ao molhe norte e verificou-se também um pequeno acréscimo não erodido na extremidade norte da restinga.

Na zona mais a sul é possível constatar que não existem grandes diferenças em termos de erosões, o que indica que a solução está a ter impacto unicamente na zona pretendida.

4.5. Análise Dos Resultados Obtidos e Proposta de Soluções de Melhoria

A implementação da solução baseada na natureza teve resultados benéficos em termos de erosões na restinga, evitou 7 episódios de galgamento, aumentou o canal de navegação e evitou ainda o deslizamento do solo da restinga para o rio.

No entanto, existem alguns pormenores que vale a pena referir, de forma a propor melhorias e recomendações para os desenvolvimentos futuros:

- Realizar uma melhor caracterização da granulometria da zona de estudo;
- Realizar simulações numéricas com um caudal do rio Cávado variado;
- Otimizar área de implantação da vegetação;
- Estudo de outras soluções como erva marinha ou mangues;
- Validação do modelo com batimetria antes e após a tormenta;
- Utilizar um ficheiro batimétrico .xyz com uma densidade de pontos maior;
- Ponderar a extensão da batimetria tendo em consideração o tempo de cálculo;
- O Xbeach não simula caudais sólidos nem a deriva litoral, pelo que a inclusão deste aspeto seria muito benéfico no estudo;
- Os limites do modelo numérico apresentam instabilidades, pelo que é recomendado alterar os valores de forma a obter os resultados pretendidos;
- A zona do modelo onde ocorre a descarga do rio Cávado apresenta uma elevada sensibilidade.

5
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Ao longo dos anos, o assoreamento do canal de navegação do rio Cávado tem sido um problema importante que passou de geração em geração. Por outro lado, a erosão da zona norte da restinga do rio Cávado levou, ao longo dos anos, a uma diminuição do seu volume, deixando a cidade de Esposende à mercê da agitação marítima. Em síntese, estão a faltar sedimentos por um lado e a sobrar sedimentos por outro. Para mitigar estes problemas foi proposta e avaliada numericamente a implementação de uma solução baseada na natureza.

Estas soluções têm como objetivo mitigar os efeitos das alterações climáticas, sem, contudo, terem os impactos associados à implementação de outras estruturas feitas pelo homem, mais pesadas, como é o caso dos esporões, por exemplo.

Numa primeira fase foram analisadas 3 espécies a implementar, tendo sido posteriormente escolhida a *Laminaria ochroleuca*, pois era a espécie que apresentava melhores características para a zona de estudo. A sua implementação consta de um bloco paralelo à costa, que permita proteger a zona norte da restinga, mas que também deixa uma abertura de forma a permitir a circulação livre das correntes de vazante.

Foram analisados os resultados obtidos para dois cenários distintos, em que num deles a zona em estudo não apresentava nenhuma intervenção de proteção adicional para além das já existentes atualmente. Na outra simulação foi implementada uma solução baseada na natureza. Ambos os modelos criados foram submetidos à tempestade que ocorreu entre as 00h00 do dia 03/03/2014 e as 00h00 do dia 05/03/2014.

A solução proposta mostrou ser benéfica para a cidade de Esposende, uma vez que diminuiu o número de eventos de galgamentos de 13 para 6. Em relação à restinga, as erosões a norte diminuíram, o canal de navegação aumentou, o banco de areia que se encontra entre o molhe e a restinga diminuiu de tamanho, aumentaram as erosões junto ao molhe e verificou-se ainda um pequeno acréscimo na zona norte da restinga.

Conclui-se também que o modelo XBeach apresenta ainda algumas limitações, como a impossibilidade de representar caudais sólidos, aspeto este considerado fundamental para a avaliação do comportamento morfodinâmico da restinga de Esposende. No entanto, o modelo XBeach tem as ferramentas necessárias para simular a solução proposta nesta Dissertação. Esta solução deve ser analisada desde o ponto de vista da viabilidade prática, económica e ecologia. Estes aspetos não foram tidos em consideração nesta análise.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a realização deste estudo com implementação da espécie *Laminaria ochroleuca*, seria interessante realizar outros estudos com outro tipo de espécie dentro dos kelp, que permitam realizar uma comparação dos benefícios que gerariam cada uma das espécies e compreender qual seria a melhor. Também seria interessante desenvolver a implementação das soluções que foram excluídas deste estudo, nomeadamente a introdução de erva marinha e mangues.

Uma vez que não existem dados de campo sobre a restinga de Esposende com características adequadas à validação dos resultados numéricos obtidos neste estudo, seria importante a realização dos mesmos no futuro.

O modelo numérico utilizado nesta dissertação, XBeach, apresenta características interessantes para analises de hidrodinâmica e dinâmica sedimentar, como *avalanching*, representação de estruturas rígidas, entre outros. No entanto apresentou algumas limitações na reprodução do fenómeno da deriva litoral e do caudal sólido transportado pelo rio Cávado, pelo que a utilização de um outro *software* ou duma versão mais atualizada do *software* usado neste estudo seria vantajosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAVN (2021) - As Barragens [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: http://www.amigosdevilanova.com/?id=56>.

ALMEIDA, NEVES DE (1985) - Rios de Portugal. Disponível em WWW: <https://arquivos.rtp.pt/conteudos/rio-cavado/>.

APA (2014) - Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça (RH2). [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: https://conselhonacionaldaagua.weebly.com/uploads/1/3/8/6/13869103/rh2_qsiga.pdf>.

--- (2019) - Relatório do Estado do Ambiente 2019 Disponível em WWW: <URL: https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/rea/REA2019/REA2019.pdf> .

--- (2021) - Perfil da praia emersa de 11 de fevereiro de 2019, referente à Praia de Esposende (ES) [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: https://cosmo.apambiente.pt/data/652>.

ARAÚJO, MARIA DA ASSUNÇÃO; DEVY-VARETA, NICOLE; GRANJA, HELENA (2003) - Variações climáticas e evolução da linha de costa: algumas reflexões. [Em linha].

ASSIS, JORGE [et al.] (2011) - Florestas marinhas: As espécies de algas castanhas gigantes de Portugal. ISBN 978-989-97260-0-0.

BASCOM, WILLARD (1964) - Waves and beaches: the dynamics of the ocean surface. Anchor Books Garden City.

BRIDGES, TODD S [et al.] (2021) - Engineering With Nature: An Atlas, Volume 2. Environmental Laboratory (US).

CÂNDIDO, INÊS OLIVEIRA (2020) - Estudo de Novas Soluções para a Estabilização da Restinga de Esposende. [Em linha].

CORREIA, NUNO (2012) - [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: http://cienciasdavidaedaterra25.blogspot.com/2012/03/evolucao-do-litoral.html>.

COSTA, ANA LUISA RIBEIRO DA (2004) - O assoreamento das albufeiras das barragens hidroeléctricas e a "erosão" das praias:(uma contribuição para o conhecimento dos seus sedimentos).

CUNHA, ALEXANDRA H; ASSIS, JORGE F; SERRÃO, ESTER A (2014) - Reprint of "Seagrasses in Portugal: A most endangered marine habitat". Aquatic botany [Em linha]. 115: 3-13. ISSN 0304-3770.

DA FONSECA, RITA MARIA FERREIRA (2002) - Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. Estratégia de re-aproveitamento dos sedimentos depositados. DAMS: Impacts and: Impacts and Hazards [Em linha]. 17.

DAVIES, JL (1964) - A morphogenic approach to world shorelines. Zeitschrift für geomorphologie [Em linha]. 127-142.

DEAN, ROBERT G (1991) - Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. Journal of coastal research [Em linha]. 53-84. ISSN 0749-0208.

DELTARES (2018) - Xbeach Documentation. [Em linha]. v1.23.5527:

--- (2020) - DSD 2020: XBeach Basic Course - Morphodynamic modelling during storm conditions.

--- (2021) - Involved organisations of the XBeach open source model [Em linha]. [Consult. 05/06]. Disponível em WWW: <URL: https://oss.deltares.nl/web/xbeach/involved-organisations>.

EDP (2008) - Plano de melhoria do estado de conservaçao dos peixes migradores e dos seus habitats no sector terminal do rio Cávado [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: https://www.edp.com/sites/default/files/Relatorio_Final_Cavado.pdf>.

ESPA (2011) - Parque Natural Litoral Norte [Em linha]. [Consult. 13/06/2021]. Disponível em WWW: <URL: https://arqnat.webnode.pt/parques-naturais-portugueses/parque-natural-do-litoral-norte/>.

FERREIRA, RICARDO (2020) - ESPOSENDE, Portugal | Northern Portuguese Coast | Aerial view by DJI MINI drone. Disponível em WWW: <https://www.youtube.com/watch?v=7hyiyHXlcio>.

FRADE, RICARDO (2014) - Cavalos de Fão [Em linha]. [Consult. 10/06/2021]. Disponível em WWW: <URL: https://www.portugalnummapa.com/cavalos-de-fao/>.

GARRISON, TOM S (2012) - Oceanography: an invitation to marine science. Cengage Learning. ISBN 1285401557.

GOMES, PEDRO T.; BOTELHO, ANA C.; CARVALHO, GASPAR S. (2002) - Sistemas dunares do litoral de Esposende. ISBN 972-9027-16-1.

GOOGLE EARTH (2021) - Google

GRANJA, HELENA MARIA; CARVALHO, G. SOARES (1989) - Quaternary sea level changes in NW Portugal. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar [Em linha]. 111:3. 298-300. Disponível em WWW: <URL: https://doi.org/10.1080/11035898909452717>. ISSN 0016-786X.

HAMILTON, STUART E; CASEY, DANIEL (2016) - Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). Global Ecology and Biogeography [Em linha]. 25:6. 729-738. ISSN 1466-822X.

HASSELMANN, KLAUS F [et al.] (1973) - Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A [Em linha].

HAYES, MILES O (1975) - Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In Geology and Engineering. Elsevier. p. 3-22.

HOUGHTON, JOHN (2005) - Global warming. Reports on Progress in Physics [Em linha]. 68:6. 1343. ISSN 0034-4885.

HOUGHTON, JT [et al.] (2001) - CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS. [Em linha].

HUME, TERRY; SWALE, ANDREW (2003) - How estuaries grow old. NIWA Water and Atmosphere [Em linha].

IPPEN, ARTHUR T (1966) - Estuary and coastline hydrodynamics. McGraw-Hill Book Company, IncCatalog Card Number 65-27677, Printed in the United States of America [Em linha].

KAMPHUIS, J WILLIAM (2000) - Introduction to coastal engineering and management. World Scientific. ISBN 9811208018.

KINSMAN, BLAIR (1984) - Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface. Courier Corporation. ISBN 0486646521.

KJERFVE, BJÖRN; MIRANDA, LUIZ BRUNER DE; CASTRO, BELMIRO MENDES (2002) - Princípios de oceanografia física de estuários. São Paulo: EDUSP [Em linha].

LAMEIRO, LUÍSA FERNANDES (2009) - Sedimentação em albufeiras e estudo da possibilidade de utilização dos sedimentos em alimentação artificial de praias. [Em linha].

LARSON, MAGNUS; KRAUS, NICHOLAS C; ROSATI, JULIE DEAN (1989) - SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Citeseer.

LENCASTRE, ARMANDO COUTINHO DE; FRANCO, F MELO (1992) - Acumulação de sedimentos numa barragem. Disponível em WWW: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-46-Acumulacao-de-sedimentos-numa-barragem-Fonte-Lencastre-e-Franco-1992_fig8_283073472>.

LOPES, ANA ISABEL ALVES (2019) - "Governar a Natureza": o assoreamento da foz do rio Cávado, em Fão-causas, impactos e respostas sociais (1750-1870). [Em linha].

LOUREIRO, EDUARDO (2007) - Indicadores geomorfológicos e sedimentalógicos na avaliação da tendência evolutiva da zona costeira: aplicação ao concelho de Esposende. [Em linha].

MASSELINK, GERHARD; SHORT, ANDREW D (1993) - The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. Journal of coastal research [Em linha]. 785-800. ISSN 0749-0208.

MILITELLO, ADELE; HUGHES, STEVEN A (2000) - Circulation patterns at tidal inlets with jetties. [Em linha].

MUDGE, FB (2002) - The Development of the 'greenhouse' theory of global climate change from Victorian Times. Climate Change: Critical Concepts in the Environment [Em linha]. 1: 245. ISSN 0415276578.

NASA (2018) - The Meandering Estuaries of Guinea–Bissau. Disponível em WWW: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/92266/the-meandering-estuaries-of-guineabissau>.

NEIVA, MANUEL ALBINO PENTEADO (2012) - Esposende: a barra, o porto e a navegabilidade do Cávado - Projectos e Memórias.

NEMUS (2003) - Estudo de Impacte Ambiental Projeto De Melhoria Da Barra Do Cavado Resumo Não Tecnico: MARÍTIMOS, INSTITUTO PORTUÁRIO E DOS TRANSPORTES.

NORVIA (2018) - Embocadura do Rio Cávado - Reabilitação do molhe norte. Disponível em WWW: <https://www.nrv-norvia.com/pt/projetos/embocadura-do-rio-cavado-reabilitacao-do-molhe-norte>.

PACLOPES (2007) - Portuguese Districts Map With Names [Em linha]. [Consult. 13/06/2021]. Disponível em WWW: <URL: https://pt.wikipedia.org/wiki/Distritos_de_Portugal#/media/Ficheiro:Portuguese_Districts_Map_With_Names.svg>.

PALMA, DANIELA MARISA LUDOVICO DA COSTA (2016) - Aplicação de geossistemas em obras de proteção costeira, o caso da restinga de Ofir.

PASKOFF, R. (1981) - L'Erosion des côtes. 1981. Société de géographie.

PECHER, ARTHUR; KOFOED, PETER JENS (2017) - Handbook of ocean wave energy. Springer Nature. ISBN 3319424246.

PINHEIRO, JOÃO PEDRO TORRES (2008) - Avaliação dos processos de transposição artificial de sedimentos em embocaduras. [Em linha].

PINHO, JOSÉ LS (2005) - Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado. [Em linha]. ISSN 0873-1152.

PINTO, C; SILVEIRA, T; TEIXEIRA, S (2018) - Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal Continental: Enquadramento e retrospetiva das intervenções realizadas (1950–2017). Relatório Técnico. Agência Portuguesa do Ambiente (in Portuguese) [Em linha].

POLIS LITORAL NORTE (2016) - Alimentação Artificial Das Praias Adjacentes à Foz do Rio Cávado.

PORTELA, LI (2017) - Plano plurianual de dragagens portuárias 2018-2022

PRITCHARD, DONALD W (1967) - What is an estuary: physical viewpoint. 1967. American Association for the Advancement of Science.

RAYNAUD, DEA [et al.] (1993) - The ice record of greenhouse gases. Science [Em linha]. 926-934. ISSN 0036-8075.

SIC (2021) - Castelos de Areia. Disponível em WWW: <https://sicnoticias.pt/programas/reportagemespecial/2021-06-19-Castelos-de-Areia-b3707fd5>.

SNIRH (2021) - Dados de Base [Em linha]. [Consult. 25/05/2021]. Disponível em WWW: <URL: https://snirh.apambiente.pt/index.php?idRef=MTIyMw==&FILTRA_BACIA=107&FILTRA_COVER=920123705&FILTRA_SITE=1627743350>.

TABELA DE MARÉS (2021) - Tábua De Marés e Solunares Esposende. Disponível em WWW: <https://tabuademares.com/pt/braga/esposende>.

THOMAZI, RAFAEL D [et al.] (2012) - Um panorama da vegetação das restingas do Espírito Santo no contexto do litoral brasileiro. [Em linha]. ISSN ISSN 1806–7409.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2008) - Coastal engineering manual. US Army Corps of Engineers Washington, DC.

VAN ROOIJEN, AA [et al.] (2015) - Modeling of wave attenuation by vegetation with XBeach. 2015. Citeseer.

VISITESPOSENDE (2021) - Parque Natural Do Litoral Norte [Em linha]. [Consult. 18/03/2021].

WWF (2021) - ¿En qué consisten las soluciones basadas en la naturaleza y cómo pueden ayudarnos a enfrentar la crisis climática? Disponível em WWW: <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/en-que-consisten-las-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-y-como-pueden-ayudarnos-a-enfrentar-la-crisis-climatica>.