

APLICAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO NO ESTUDO DA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DE UM TRECHO COSTEIRO EM EROSÃO

LUÍS MARIA SARAIVA AGUIAR CORREIA DA SILVA

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 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

À minha família

A persistência é o caminho para o êxito

Charlie Chaplin

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Francisco Taveira Pinto e ao Professor Paulo Rosa Santos, pela sua orientação ao longo deste trabalho. O seu acompanhamento atento e o apoio contínuo foram fundamentais para a concretização desta dissertação.

Expresso igualmente a minha gratidão ao Professor Bas Huisman pela sua disponibilidade e pela generosa partilha de conhecimento relativamente ao modelo numérico *ShorelineS*. A sua explicação clara e aprofundada foi decisiva para compreender o funcionamento e a metodologia aplicada.

Por fim, expresso o mais profundo agradecimento à minha família, pelo seu apoio constante, compreensão e incentivo, que ao longo de todo o meu percurso académico, sempre estiveram presentes.

RESUMO

A erosão costeira representa atualmente uma das maiores ameaças às zonas litorais, com implicações severas a nível ambiental, social e económico. Em Portugal, a erosão é um fenómeno que tem assumido especial relevância, com destaque para a Praia do Furadouro, no concelho de Ovar, na qual a linha de costa tem registado um recuo expressivo nas últimas décadas. A presente dissertação pretende estudar a evolução morfológica da linha de costa nesta região através da aplicação do modelo numérico *ShorelineS*, uma ferramenta concebida para simular a dinâmica costeira a médio e longo prazo.

O trabalho foi iniciado por uma análise teórica e contextual do fenómeno da erosão costeira em Portugal, abordando as suas principais causas, implicações e medidas de mitigação implementadas. Posteriormente foi descrita em detalhe o modo de funcionamento do modelo numérico, incluindo a sua formulação matemática e parametrizações. Após a seleção do caso de estudo, procedeu-se à recolha e tratamento de dados relevantes, nomeadamente levantamentos topo-hidrográficos e uma série temporal das condições de agitação marítima.

A fase de modelação inclui a calibração do *ShorelineS*, com o objetivo de reproduzir com rigor os padrões de erosão e acumulação observados no terreno. Apesar de algumas imprecisões locais, os resultados obtidos revelaram uma boa concordância com os dados reais observados, validando a capacidade do modelo para estudar a evolução costeira do Furadouro.

Foram ainda simuladas três propostas distintas de proteção costeira. A primeira consistiu na implementação de duas alimentações artificiais espaçadas no tempo, a segunda e a terceira consistem em reconfigurações estruturais dos esporões existentes, em “T” e em “Y”, respetivamente. Os resultados obtidos através da aplicação do modelo numérico evidenciaram vantagens distintas em cada solução, sendo que a terceira proposta foi a que promoveu maior estabilidade da linha de costa. Por fim, destaca-se a importância de ferramentas de modelação numérica como o *ShorelineS* na avaliação de cenários futuros, e recomenda-se a sua utilização em estudos complementares, com a integração de diferentes modelos e abordagens.

PALAVRAS-CHAVE: proteção costeira, modelação numérica, *ShorelineS*, Praia do Furadouro, mitigação da erosão costeira.

ABSTRACT

Coastal erosion currently represents one of the greatest threats to coastal zones, with severe environmental, social, and economic implications. In Portugal, erosion is a phenomenon of particular relevance, especially at Praia do Furadouro, in the municipality of Ovar, where the coastline has experienced significant retreat in recent decades. This dissertation aims to study the morphological evolution of the coastline in this region through the application of the numerical model *ShorelineS*, a tool designed to simulate coastal dynamics over medium and long timescales.

The work began with a theoretical and contextual analysis of the coastal erosion phenomenon in Portugal, addressing its main causes, implications, and mitigation measures. The methodology and functioning of the numerical model were then described in detail, including its mathematical formulation and parameterizations. After selecting the case study, relevant data was collected and processed, namely topographic and hydrographic surveys and a time series of wave conditions.

The modelling phase includes the calibration of *ShorelineS*, aiming to accurately reproduce the observed erosion and accretion patterns in the field. Despite some local inaccuracies, the results showed good agreement with the real data, validating the model's capability to study the coastal evolution of Furadouro.

Three distinct coastal protection proposals were also simulated. The first consisted of two artificial sand nourishments spread over time, while the second and third involved structural reconfigurations of the existing groynes, in "T" and "Y" shapes, respectively. The results obtained from the numerical model demonstrated different advantages in each solution, with the third proposal promoting the greatest shoreline stability. Finally, the importance of numerical modelling tools such as *ShorelineS* in evaluating future scenarios is highlighted, and its use in complementary studies is recommended, integrating different models and approaches.

KEYWORDS: coastal protection, numerical modelling, *ShorelineS*, Praia do Furadouro, coastal erosion mitigation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2. ENQUADRAMENTO	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. A EROÇÃO COSTEIRA EM PORTUGAL: CAUSAS E IMPLICAÇÕES.....	6
2.3. MITIGAÇÃO DO PROBLEMA	7
2.4. PROGRAMA COSMO	11
2.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	12
2.6. ESCALAS ESPACIAIS E TEMPORAIS.....	14
2.7. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA LINHA DE COSTA.....	16
2.7.1. LTC (LONG TERM CONFIGURATION)	17
2.7.2. XBEACH	17
2.7.3. DELFT3D.....	18
3. SHORELINES	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. SHORELINES	22
3.3. FORMULAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO MODELO	23
3.3.1. TRANSPORTE.....	24
3.3.3. TRATAMENTO DE ESTRUTURAS E PROCESSOS COSTEIROS	27
3.4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES.....	27
3.5. ESTUDOS ANTERIORES	28
3.5.1. MODELAÇÃO DA FORMAÇÃO DA RESTINGA DO LOBITO, ANGOLA.....	28
3.5.2. VALIDAÇÃO DO MODELO COM O PROJETO SAND MOTOR EM TER HEIJDE, PAÍSES BAIXOS	29
3.5.3. MODELAÇÃO DA DINÂMICA E GESTÃO DA LINHA DE COSTA EM ADELAIDE, AUSTRÁLIA ..	30
4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO.....	31
4.1. PRAIA DO FURADOURO	31

4.1.1.	CONDIÇÕES MARÍTIMAS	32
4.1.2.	CARACTERÍSTICAS E TRANSPORTE SEDIMENTAR	34
4.2.	O PROBLEMA DA EROÇÃO COSTEIRA.....	35
4.3.	MITIGAÇÃO DO PROBLEMA	36
5.	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	39
5.1.	INTRODUÇÃO	39
5.2.	DADOS UTILIZADOS	39
5.2.1.	LEVANTAMENTOS TOPO-HIDROGRÁFICOS E PROCESSAMENTO DA LINHA DE COSTA	39
5.2.1.	SÉRIE TEMPORAL DAS CONDIÇÕES MARÍTIMAS	42
5.2.3.	PROFUNDIDADE DE FECHO	44
5.3.	CALIBRAÇÃO DO MODELO SHORELINES.....	44
5.4.	VALIDAÇÃO DO MODELO	47
5.5.	VANTAGENS E LIMITAÇÕES OBSERVADAS	49
6.	ANÁLISE DE PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO	51
6.1.	ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE AREIA.....	51
6.1.1.	DESCRIÇÃO DA PROPOSTA	51
6.1.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	51
6.2.	PROLONGAMENTO DOS ESPORÕES EXISTENTES EM “T”	54
6.2.1.	DESCRIÇÃO DA PROPOSTA	54
6.2.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	55
6.3.	PROLONGAMENTO EM “Y” DO ESPORÃO NORTE	56
6.3.1.	DESCRIÇÃO DA PROPOSTA	56
6.3.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	57
6.4.	COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES	59
6.5.	CONCLUSÕES	59
7.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	61
7.1.	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	61
7.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	62
7.3.	OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Troços costeiros em situação de erosão, 1958-2021 (APA, 2024).....	6
Figura 2 - Campo de esporões no Concelho de Espinho (Google Earth, 2025).....	8
Figura 3 - Localização dos Quebra-mares Destacados na Praia do Carneiro (Taveira Pinto, 2020).	9
Figura 4 - Estruturas de Proteção na Praia de S. João da Caparica (Álvares, 2021).	9
Figura 5 - Esquema de uma alimentação artificial de praia (Mammoth Memory).	10
Figura 6 - Efeito do défice sedimentar na evolução da linha de costa, desde a situação de equilíbrio dinâmico até ao equilíbrio estático (Pereira e Coelho, 2013).....	12
Figura 7 - Representação esquemática de uma célula sedimentar (Santos et al., 2014).	13
Figura 8 - Células sedimentares do litoral português (Santos et al., 2014).	14
Figura 9 - Limites do perfil de praia (Ferreira, 2023).	16
Figura 10 - Módulos de funcionamento e interação, adaptado de DELTARES (2020).....	18
Figura 11 - Comparação entre o XBeach e o ShorelineS para diferentes escalas (adaptado de Huisman e Roelvink, 2022).....	21
Figura 12 - Sistema de coordenadas ao longo da linha de costa e definição dos ângulos em relação à costa e às ondas (Huisman e Roelvink, 2022).	22
Figura 13 - Esquema representativo do funcionamento do modelo ShorelineS (adaptado de Roelvink e Huisman, 2015).....	26
Figura 14 - Representação de esporões e linha de costa – (Roelvink e Huisman, 2015).	27
Figura 15 - Restinga de Lobito, Angola (Google Earth).	28
Figura 16 - Vista aérea sobre o projeto Zandmotor (den Haag, 2015).	29
Figura 17 - Região de Adelaide, Austrália (Google Earth).	30
Figura 18 - Trecho Central da Praia do Furadouro (Lopes, 2022).	31
Figura 19 - Recuo da linha de costa na secção Norte da Praia do Furadouro (APA, 2022).....	32
Figura 20 - Rosa de direção das ondas na Praia do Furadouro (dados de 1991 a 2020).	33
Figura 21 - Balanço sedimentar da subcélula 1b (Santos et al., 2014).....	34
Figura 22 - Recuo médio acumulado e taxa média de evolução da linha de costa (APA, 2024).35	
Figura 23 - Evolução morfológica da Praia do Furadouro (Ferreira, 2023).....	36
Figura 24 - Estruturas de defesa na praia do Furadouro (CM Ovar, 2012).....	37

Figura 25 – Área do levantamento topo-hidrográfico e modelo digital de elevação de 2020.....	40
Figura 26 - Imagem real e representação da linha de costa à Cota 2 m (ZH).	41
Figura 27 - Representação dos pontos extraídos.	42
Figura 28 - Localização do ponto de extração das condições marítimas.	43
Figura 29 - Série temporal das ondas no período 1990-2020.....	43
Figura 30 - Comparação nas zonas adjacentes aos esporões. a) esporão sul, b) esporão norte...	47
Figura 31 - Comparação entre a linha de costa simulada e linha real observada.	48
Figura 32 - Localização da alimentação artificial.	52
Figura 33 - Resultados da simulação, proposta 1.....	53
Figura 34 - Proposta de intervenção na Praia do Furadouro (Ferreira, 2023).	54
Figura 35 - Resultados da simulação, proposta 2.....	55
Figura 36 - Dimensões em planta da proposta de reconfiguração do esporão norte da Praia do Furadouro (Marques, 2021).....	56
Figura 37 - Esquema representativo da área protegida pelo esporão (Marques, 2021).....	57
Figura 38 - Resultados da simulação, proposta 3.....	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Fórmulas de Transporte Sedimentar (Roelvink et al., 2020).	24
Tabela 2 - Parâmetros-chave iterados no modelo <i>ShorelineS</i>	45
Tabela 3 - Parâmetros de configuração do modelo <i>ShorelineS</i>	46
Tabela 4 - Contributos da dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.	63

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

- b – Coeficiente de calibração da fórmula CERC1
- D_{50} - Diâmetro médio dos sedimentos (m)
- D_c – Altura do perfil costeiro ativo (m)
- H_{s0} – Altura de onda significativa offshore (m)
- H_{sb} – Altura de onda significativa no ponto de rebentação (m)
- K_2 – Coeficiente de calibração da fórmula CERC2
- K_{swell} – Coeficiente associado às condições de agitação marítima
- m_b - Declive médio do perfil da praia na zona de rebentação
- p – Porosidade da areia
- q_i – Parâmetro associado aos fluxos sedimentares transversais ($m^3/m/ano$)
- Q_s – Transporte longitudinal de sedimentos (m^3/ano)
- s – Coordenada ao longo do tempo
- t – Tempo
- $\tan\beta$ – Inclinação média do perfil da praia
- T_p - Período de pico das ondas (s)
- V_{total} – Fator de corrente longitudinal na fórmula de Van Rijn
- ρ_s – Massa volúmica dos sedimentos (kg/m^3)
- ρ_w – Massa volúmica da água (kg/m^3)
- φ_c – orientação da normal à linha de costa em relação ao Norte (N)
- φ_{loc} - ângulo local entre as ondas e o alinhamento costeiro, definido por $\varphi_c - \varphi_w$
- φ_{locb} - Ângulo relativo das ondas na zona de rebentação
- φ_w - ângulo de incidência das ondas em relação ao Norte

SIGLAS

- APA – Agência Portuguesa do Ambiente
- CERC – Coastal Engineering Research Center
- COSMO – Coast and Sediment Monitoring Programme
- DEM – Modelos Digitais de Elevação
- ENGIZC - Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira
- GNSS – Global Navigation Satellite System

INCCA - Adaptação Integrada às Alterações Climáticas para Comunidades Resilientes

KAMP – Kamphuis

LTC – Long Term Configuration

MDT - Modelos Digitais de Terreno

POOC – Plano de Ordenamento da Orla Costeira

RSLR – Relative Sea Level Rise (m/ano)

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

VR – Van Rijn

ZH – Zero Hidrográfico

ABREVIATURAS

NNE – Nor-nordeste

NW – Noroeste

SSW – Su-sudoeste

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A erosão costeira constitui um dos principais desafios impostos às zonas litorais por todo o mundo. Este fenómeno corresponde à remoção e transporte de sedimentos das praias e dunas e resulta da combinação de vários fatores e ações do ambiente marítimo, tais como ondas, correntes e marés. A erosão conduz ao recuo da linha de costa e consequente perda de território, e manifesta-se em diferentes escalas temporais, podendo ocorrer de forma rápida e intensa no caso de intempéries, ou desenvolver-se progressivamente ao longo de anos ou décadas. Existem diversas causas que explicam o progressivo agravamento deste fenómeno, quer de origem natural, quer de origem antropogénica, tais como a diminuição do volume sedimentar fluvial fornecido, a subida do nível médio da água do mar e a existência de obras de engenharia costeira.

A interação entre os processos hidrodinâmicos e sedimentares, aliada às alterações climáticas, tem levado a um recuo progressivo do alinhamento costeiro em vários trechos do litoral português, comprometendo assim ecossistemas, infraestruturas e comunidades. Entre 1958 e 2023 estimou-se uma perda de território costeiro de Portugal continental de aproximadamente 13,5 km² (APA, 2024).

Em Portugal, a erosão costeira é um problema particularmente relevante devido à extensão da sua linha de costa e ao facto da grande maioria da população viver no litoral. Apesar de algumas zonas da costa se encontrarem naturalmente protegidas dos avanços marítimos, cerca de 45% do litoral baixo e arenoso de Portugal apresenta uma tendência erosiva de longo prazo (APA, 2024), o que evidencia a vulnerabilidade do país face à ocorrência de eventos extremos. A subida do nível médio da água do mar e o aumento da frequência e intensidade de tempestades marítimas agravam esta situação, revelando a importância do estudo detalhado da evolução morfológica das zonas costeiras de forma a planear e prevenir eventos futuros. Em Portugal, a Praia do Furadouro, situada no concelho de Ovar, é um dos casos mais alarmantes nesta temática, revelando nos últimos anos um recuo significativo da linha de costa, o que se reflete em graves implicações ao nível da segurança, património e sustentabilidade local.

Para melhorar a compreensão da evolução morfológica do litoral e apoiar a definição correta de estratégias de gestão costeira, o desenvolvimento e aplicação de modelos numéricos tem-se revelado fundamental. Entre as ferramentas mais recentes destaca-se o *software ShorelineS*

(Roelvink *et al.*, 2020), um modelo numérico desenvolvido pela *Deltares*, com o objetivo de simular a evolução da linha de costa a médio e longo prazo, permitindo a análise de efeitos provocados por diversos fatores e cenários.

Assim, o presente trabalho pretende estudar a evolução morfológica da linha de costa na Praia do Furadouro com recurso a levantamentos topo-hidrográficos de alta resolução e a uma série temporal de condições de agitação marítima. Adicionalmente, este trabalho tem como objetivo testar, calibrar e validar o modelo numérico *ShorelineS* ao aplicá-lo ao caso de estudo da Praia do Furadouro. O modelo terá como base dados reais e será calibrado através de um processo iterativo minucioso para reproduzir, com o maior rigor possível, os padrões de erosão e acumulação observados ao longo da faixa costeira em análise.

A principal motivação desta dissertação reside na crescente necessidade de desenvolver e aplicar ferramentas computacionais que sirvam de apoio à tomada de decisão na gestão costeira, com particular foco em zonas críticas como é o caso da Praia do Furadouro. A opção pela utilização do modelo *ShorelineS* é justificada, sobretudo, pela abordagem do modelo, baseada em equações unidimensionais de transporte sedimentar e pela possibilidade de este ser adaptado e calibrado a diferentes contextos e cenários. Ao aplicar este modelo numérico e validá-lo com base num caso real – trecho vulnerável da costa portuguesa, espera-se contribuir para o avanço da compreensão dos problemas em causa, bem como para o avanço da modelação costeira e o desenvolvimento de soluções eficazes de gestão costeira.

Por fim, atendendo à crescente vulnerabilidade da Praia do Furadouro e à urgente necessidade de intervenções eficazes nesse trecho, a presente dissertação contempla ainda a apresentação de três propostas de estratégias de mitigação da erosão costeira. A análise destas propostas é realizada através da aplicação do modelo *ShorelineS*, i.e., pela simulação da evolução da linha de costa em resposta às soluções propostas, que visam aumentar a segurança e resiliência da frente marítima desta região. A primeira proposta diz respeito à introdução de sedimentos na praia através de uma alimentação artificial de areia, por sua vez, as duas últimas propostas consistem na reconfiguração da geometria das estruturas existentes, particularmente do esporão norte no caso da terceira proposta. Estas últimas medidas foram definidas tendo por base as soluções previamente analisadas para o local em estudo em dissertações anteriores.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho reside na simulação e análise da evolução morfológica da linha de costa na Praia do Furadouro, por meio da aplicação do modelo numérico *ShorelineS*. Numa primeira fase será avaliado o seu desempenho tendo por base os dados reais recolhidos entre 2018 e 2020 no âmbito do Programa COSMO. Posteriormente, esse modelo será usado para avaliar a eficácia de duas propostas de estratégias de mitigação da erosão costeira, que visam aumentar a segurança e resiliência da frente marítima desta região.

De modo a atingir o objetivo geral pretendido, estabeleceram-se os seguintes objetivos parciais:

- Processar os levantamentos topo-hidrográficos existentes de forma a determinar a posição da linha de costa nos anos 2018, 2019 e 2020;
- Recolher e processar a série temporal das condições marítimas correspondentes ao período em análise;
- Configurar o modelo numérico utilizando dados reais adequados como dados de entrada, incluindo parâmetros geomorfológicos e hidrodinâmicos;
- Proceder à calibração do modelo numérico através de um processo iterativo e recorrendo à comparação direta para avaliar a qualidade dos resultados;
- Usar o modelo numérico para simular a evolução da linha de costa em resposta a soluções propostas, que visam aumentar a segurança e resiliência da frente marítima desta região;
- Identificar e compreender as possíveis vantagens e as limitações modelo *ShorelineS*.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos principais, interligados sequencialmente. No primeiro capítulo é apresentada a contextualização do problema em estudo, são delineados os objetivos de investigação, e ainda é exposta a motivação que conduziu ao desenvolvimento da dissertação.

Seguidamente, no segundo capítulo, são aprofundados os principais conceitos teóricos associados ao fenómeno da erosão costeira em Portugal, abordadas as causas do problema, as consequências e as medidas de mitigação, bem como os processos do transporte sedimentar, e as escalas espaciais e temporais dos eventos costeiros. Adicionalmente, são analisadas as principais abordagens da modelação numérica da linha de costa, e descrevem-se alguns modelos mais comuns nesta área.

No terceiro capítulo, é apresentado com algum detalhe o modelo *ShorelineS*, é justificada a sua escolha para a aplicação neste estudo e explica-se o seu funcionamento, com especial foco na temática das equações de transporte sedimentar e outros processos relevantes incluídos no modelo. Encerra-se o capítulo com a descrição de alguns estudos anteriores relevantes, nos quais foi utilizado o modelo *ShorelineS* em cenários reais.

O quarto capítulo incide sobre o caso de estudo, a Praia do Furadouro. Neste capítulo descrevem-se as características físicas, as condições marítimas e o regime sedimentar observado. Aborda-se também o histórico de eventos litorais e as estratégias de mitigação aplicadas no local.

Segue-se o capítulo 5, onde são descritos o procedimento e a metodologia utilizados na presente investigação. Neste capítulo são expostos os dados utilizados, tais como os levantamentos topo-hidrográficos, a série temporal das condições de agitação marítima e a obtenção da estimativa da profundidade de fecho. O subcapítulo dedicado à configuração do modelo numérico detalha os valores adotados na parametrização, os testes conduzidos e os critérios de análise com cenários

reais observados. Discute-se ainda a qualidade e validade dos resultados da simulação, bem como as vantagens e limitações detetadas durante a utilização do modelo *ShorelineS*.

No sexto capítulo são apresentadas e analisadas três propostas de mitigação da erosão costeira na zona do Furadouro. São estudadas a reconfiguração das estruturas existentes através de um prolongamento em “Y” do esporão norte, o prolongamento em “T” dos dois esporões existentes, e ainda a introdução de uma alimentação artificial de areia. Esses cenários são simulados com o auxílio do modelo *ShorelineS*, o que permite posteriormente a comparação de resultados tendo em vista a avaliação dos impactos de cada proposta estudada.

Por fim, no sétimo capítulo, é feito o epílogo dos resultados alcançados nesta dissertação, sendo discutida a eficácia do modelo *ShorelineS* e da metodologia utilizada. Por fim, são também propostas recomendações para desenvolvimentos futuros e cenários de aplicação para o modelo numérico.

2

ENQUADRAMENTO

2.1. INTRODUÇÃO

Com uma extensão de aproximadamente 943 km em território continental, a zona costeira portuguesa é constituída por áreas de elevado valor natural, económico e cultural que enfrentam uma crescente crise ambiental de origem natural e antropogénica, agravada pelas alterações climáticas (Pinto, 2022). Devido à sua exposição (costa ocidental) ao Oceano Atlântico, Portugal possui uma das costas mais energéticas do mundo, o que contribui diretamente para a elevada dinâmica dos processos costeiros. O fenómeno da erosão costeira é atualmente um problema grave e generalizado no litoral português. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) estima que mais de 67% da linha de costa portuguesa apresente sinais de erosão ativa, sendo a área mais afetada a região norte, Figura 1.

A conjugação de fatores naturais, tais como a ação energética das ondas, correntes e variações de maré, com a crescente pressão populacional, tem resultado num recuo significativo da linha de costa em várias zonas do país, com a consequente perda de territórios costeiros, e em prejuízos em habitats naturais e infraestruturas, com particular incidência em regiões de baixa altitude e ocupação intensa (Mesuras, 2018).

O problema da erosão costeira em Portugal é resultado de uma complexa interação entre fatores críticos, sejam estes naturais ou provocados pela ação humana. Estes fatores, muitas vezes com efeitos cumulativos, agravam significativamente os resultados adversos observados no litoral. Na costa portuguesa, caracterizada como arenosa e relativamente baixa, o fenómeno é especialmente grave devido aos equilíbrios morfodinâmicos vulneráveis e facilmente perturbáveis. Destaca-se a região noroeste portuguesa, como o litoral de Aveiro e o Furadouro pela severidade dos problemas associados à erosão costeira (Silva, 2010). Em Portugal, a gestão e mitigação da erosão costeira são particularmente difíceis devido à complexidade da previsão do seu comportamento que apresenta grandes variações e incertezas (Veloso-Gomes, 2010).

A correta compreensão e mitigação do problema exige uma abordagem multidisciplinar devido à complexidade do fenómeno. Neste contexto, destaca-se assim a modelação numérica da evolução

morfológica da linha costeira que surge como uma ferramenta fundamental para a previsão de cenários futuros e apoio ao planeamento e gestão costeira.



Figura 1 - Troços costeiros em situação de erosão, 1958-2021 (APA, 2024).

2.2. A EROSÃO COSTEIRA EM PORTUGAL: CAUSAS E IMPLICAÇÕES

O fenómeno da erosão costeira é considerado um problema generalizado globalmente, do qual resultam impactos significativos e custos avultados que colocam várias frentes urbanas em risco (Fonseca, 2015). A erosão costeira é, atualmente, um problema grave que o país enfrenta, uma vez que 75% da população reside em zonas costeiras devido à sua atratividade económica e social, e 9 dos 16 grandes núcleos urbanos encontram-se em situação de perigo (Ferreira, 2023). A disposição da linha de costa portuguesa acrescenta ainda alguma complexidade, pela sua

diversidade morfológica, que varia desde trechos extensos baixos e arenosos, no caso entre Espinho e a Marinha Grande, e trechos rochosos de arriba, como é o caso nas regiões mais a Sul do país. Esta diversidade morfológica confere à costa portuguesa um elevado valor ecológico devido aos diferentes tipos de habitat naturais existentes (Mesuras, 2018). A erosão costeira é consequência de uma interação sinérgica entre fatores naturais e atividades humanas que colocam o litoral sob uma enorme pressão. Esta combinação de fatores resulta na aceleração dos processos erosivos nas diferentes zonas costeiras nacionais.

Entre os principais fatores naturais que provocam a erosão litoral destaca-se a ação energética do mar, através de ondas, marés e correntes que têm impactos diretos sobre a morfologia das praias, principalmente aquando da ocorrência de eventos de temporal extremos, os quais têm mostrado uma tendência crescente da sua frequência desde a década de 1970 (Velo-Gomes, 2010). As alterações climáticas verificadas nas últimas décadas desempenham também um papel preponderante sobre a erosão costeira, com a subida do nível médio da água do mar e as alterações nas características da agitação marítima (i.e., períodos, alturas de onda e regimes de temporal), resultam no aumento significativo do risco e frequência de erosão e inundação da costa (Santos *et al.*, 2014).

Os fatores antropogénicos, resultantes da ação humana, são aqueles cujos impactos são mais notórios e facilmente identificáveis. O aumento da ocupação humana nas regiões costeiras e o desenvolvimento de atividades socioeconómicas a ela associados tem obrigado à implementação de medidas cada vez mais invasivas para tentar travar o problema (Bastos e Pereira, 2018). Neste contexto, destaca-se a destruição de cordões dunares para fins turísticos e habitacionais, o que resulta na perda de defesas naturais, à construção de estruturas de defesa pesadas (esporões, quebra-mares e obras longitudinais aderentes).

O défice sedimentar é considerado o principal responsável pelo recuo da linha costeira em praias arenosas (Lima *et al.*, 2021). Este fator deve-se, sobretudo, a ações humanas tais como a interrupção do transporte fluvial de sedimentos devido à construção de barragens, a extração de areias nos leitos fluviais e praias para uso na construção civil, a falta de reposição de sedimentos provenientes de dragagens de canais de navegação e portos, entre outros (Perdiz, 2020).

As consequências da erosão costeira são vastas e afetam diferentes setores pelo comprometimento de valores ambientais e sociais ao longo da linha de costa. Este fenómeno reflete-se no recuo da linha de costa e estreitamento das praias, na degradação e até mesmo destruição de praias e dunas, bem como danos frequentes nas estruturas de defesa, habitações costeiras e espaços públicos litorais. Os galgamentos e inundações costeiras são também uma consequência que se observa com uma crescente frequência.

2.3. MITIGAÇÃO DO PROBLEMA

Devido à magnitude dos impactos da erosão costeira em Portugal, várias estratégias de mitigação e adaptação têm sido implementadas com o objetivo de garantir a segurança da população,

assegurar a estabilidade dos territórios litorais e, idealmente, restaurar o equilíbrio sedimentar nas zonas afetadas. As medidas postas em prática podem ser agrupadas em diferentes categorias, nomeadamente: soluções de engenharia pesadas, soluções suaves e estratégias de gestão e planeamento costeiro (Fernandes, 2018).

As medidas de proteção com estruturas costeiras, ou obras pesadas, incluem a construção de estruturas rígidas como esporões, quebra-mares ou molhes. O principal objetivo destas soluções é proteger o litoral, assim como os bens e infraestruturas nele localizados, dos prejuízos provocados pelos avanços do mar. No entanto, é habitual a implementação dessas soluções resultar na transferência ou propagação do défice sedimentar para outras zonas a sotamar (Pereira e Coelho, 2013).

Os esporões são o tipo de obra pesada de proteção mais comum em Portugal. Estas estruturas são construídas perpendicularmente à linha de costa com o intuito de acumular sedimentos e aumentar as praias (Ferreira, 2023). Por sua vez, estas estruturas provocam perturbações no transporte longitudinal de sedimentos, alteram as condições de agitação marítima e podem criar correntes de transporte sedimentar para profundidades de água superiores às que são “atingidas” pela ondulação, o que retira a capacidade de reposição natural de sedimentos pelo sistema. Por último, o impacto mais comumente observável é a acumulação de sedimentos a barlar e a ocorrência de erosão a sotamar, como se pode observar na Figura 2. Apesar dos impactos adversos, em Espinho, a utilização de esporões curvos de grandes dimensões é considerado um caso de sucesso de defesa costeira, pela criação de uma baía larga capaz de reter sedimentos e assim assegurar a proteção contra galgamentos (Freitas e Dias, 2015).



Figura 2 - Campo de esporões no Concelho de Espinho (Google Earth, 2025).

À semelhança do que pode ser observado em Espinho, também na Praia da Costa da Caparica e na Praia da Cova Gala (situada na margem sul do Cabo Mondego) se recorreu à implementação de um campo de esporões para controlar o fenómeno da erosão costeira.

Outros tipos de soluções estruturais rígidas têm sido estudados em Portugal, nomeadamente os quebra-mares destacados, que são colocados paralelamente à linha de costa e não têm ligação à praia. Este tipo de estruturas permite a acumulação de areias na zona abrigada e protege a praia da incidência da agitação marítima (Taveira-Pinto, 2020). De referir que para a proteção da Praia do Carneiro no Porto, bem como do Passeio Alegre, foi proposto pela Consulmar a criação de um campo de cinco quebra-mares destacados, Figura 3.



Figura 3 - Localização dos Quebra-mares Destacados na Praia do Carneiro (Taveira Pinto, 2020).

Outro tipo de estrutura de defesa frequentemente utilizada em Portugal são as obras longitudinais aderentes. A sua utilização é justificada, muitas vezes, pelo défice sedimentar a sotamar dos esporões (Cruz, 2015). São estruturas implementadas paralelamente à linha de costa, junto à face do cordão dunar ou do talude da praia, e a sua principal finalidade é fixar a posição do alinhamento costeiro e dissipar a energia das ondas para evitar galgamentos. No entanto, este tipo de solução pode acelerar a remoção de sedimentos no perfil da praia à sua frente. Frequentemente implementadas em situações de emergência em locais com uma grande vulnerabilidade, estas estruturas são normalmente utilizadas em conjunto com esporões, como é o caso da praia de S. João da Caparica, visível na Figura 4.



Figura 4 - Estruturas de Proteção na Praia de S. João da Caparica (Álvares, 2021).

Existem também abordagens de engenharia com obras mais ligeiras. Estas incluem a alimentação artificial com areias, Figura 5, o reaproveitamento de sedimentos provenientes de dragagens, a renaturalização de bacias hidrográficas e por fim a proteção e requalificação dunar. Este tipo de soluções procura atuar diretamente no balanço sedimentar pela redução do défice, pela adição de sedimentos ou recorrendo a intervenções diretas nos fluxos de distribuição sedimentar (Coelho *et al.*, 2023). A alimentação artificial das praias tem ganho relevância e é uma medida cada vez mais utilizada na gestão costeira, como complemento às estruturas de defesa clássicas (Perdiz, 2020). Este tipo de solução já foi implementado em várias regiões em Portugal e é considerada uma prioridade para vários trechos, como por exemplo entre Esmoriz e o Furadouro (Bastos e Pereira, 2018).

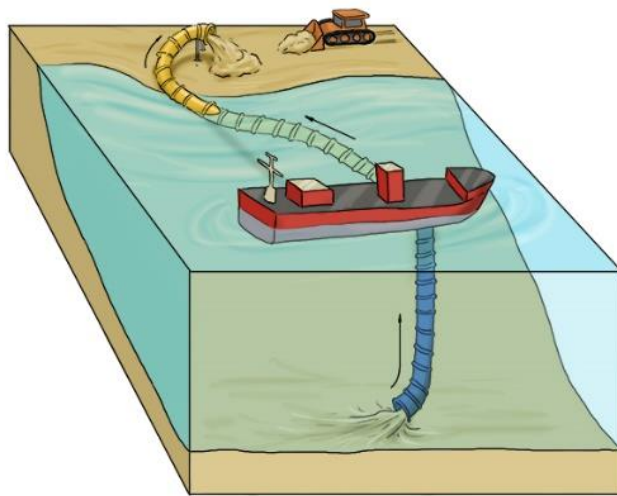


Figura 5 - Esquema de uma alimentação artificial de praia (Mammoth Memory).

Desde 2006, a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 49/2006), regulariza a reposição dos sedimentos dragados provenientes de zonas portuárias para utilização em alimentações artificiais de praias em situação de erosão. Esta estratégia é uma alternativa à imersão dos sedimentos no mar, que era uma prática que retirava quantidades elevadas de sedimentos à deriva litoral (Santos *et al.*, 2014).

Por último, destacam-se as medidas de adaptação e de planeamento, que incluem a retirada e a realocação estratégica de edifícios em zonas de risco elevado, a implementação de sistemas de alerta para a população, a educação e a sensibilização da população para os riscos associados à erosão e ainda as medidas que visam a compensação financeira dos cidadãos pelas perdas e danos consequentes dos avanços do mar. Instrumentos como o Plano de Ordenamento da Orla Costeira (POOC), a Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira (ENGIZC) são fundamentais pelas bases que estabelecem para uma gestão sustentável. O sucesso destas iniciativas está dependente de vários agentes, desde órgãos políticos, agências governamentais e instituições académico-científicas (Perdiz, 2020).

Em Portugal, a adaptação à erosão costeira tem transitado da clássica abordagem meramente reativa e localizada, focada apenas na construção de estruturas pesadas, e evoluído para uma

abordagem mais completa e integrada com soluções mais leves/suaves e horizontes temporais de longo prazo. O desenvolvimento de sistemas de alerta e a criação de campanhas educativas com o envolvimento das comunidades afetadas são também essenciais para o bom desempenho da estratégia nacional para a mitigação do fenómeno da erosão costeira.

2.4. PROGRAMA COSMO

Desenvolvido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental, ou Programa COSMO (*Coast and Sediment Monitoring Programme*), é considerado uma ferramenta de grande relevância para a gestão e planeamento da orla costeira (Martins, 2023). Esta iniciativa tem como objetivo principal produzir uma base de dados, originais e processados, que sirvam de suporte à tomada de decisão. O programa consiste na recolha, tratamento e análise de dados sobre a evolução morfológica de praias, dunas, arribas e fundos marinhos na costa portuguesa (Ferreira, 2023). Estes dados são obtidos com recurso a tecnologias avançadas como imagens de satélite, drones e estações de monitorização em tempo real, o que permite o estudo de parâmetros como o volume de sedimentos, o perfil das praias, o impacto das tempestades e a evolução da linha de costa.

Os dados recolhidos no âmbito do programa são disponibilizados gratuitamente na plataforma COSMOnline. Estes dados incluem levantamentos de perfis totais de praias que alcançam os -20 m (ZH), perfis emersos, levantamentos topo-hidrográficos e também Modelos Digitais de Terreno (MDTs). Este conjunto de informações dá um contributo valioso ao estudo e conhecimento da dinâmica e dos processos costeiros.

O COSMO foi já utilizado para diversas análises costeiras por todo o território nacional, das quais se destacam:

- O estudo da inclinação média do perfil da praia entre Caminha e Espinho (Martins, 2023);
- O diagnóstico do estado da faixa costeira portuguesa (estudo que concluiu que vários trechos litorais se encontram em estado de erosão intensa) (Martins, 2023);
- A avaliação da profundidade de fecho ao largo da costa de Portugal continental (Ferreira, 2023).

Assim, apesar de algumas limitações observadas, tais como a falta de dados em algumas zonas do país, o Programa COSMO destaca-se pela sua abordagem integrada e multidisciplinar, bem como pela sua importância na promoção de uma gestão costeira eficaz e sustentável. Este programa assume um papel fundamental no estudo e validação de medidas de mitigação ao fornecer dados suportados por evidências científicas que avaliam a eficácia das soluções. Por fim destaca-se o contributo do Programa COSMO no desenvolvimento e calibração de modelos numéricos.

2.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O estudo da dinâmica sedimentar assume um papel fundamental na compreensão da morfologia costeira pela sua importância para o equilíbrio e a estabilidade das zonas costeiras. O transporte sedimentar, impulsionado pela ação das ondas e correntes, divide-se essencialmente em transporte longitudinal (*longshore*) e transporte transversal (*cross-shore*). O primeiro, também conhecido como deriva litoral, é um fator preponderante no balanço sedimentar e ocorre, na costa ocidental portuguesa, principalmente de Norte para Sul. Este tipo de transporte é motivado, sobretudo, pela incidência oblíqua da agitação marítima na costa. O transporte transversal consiste nas trocas sedimentares perpendiculares à linha de costa e assume um papel de menor relevância no que diz respeito à dinâmica sedimentar das praias. No estudo da evolução de grandes extensões de praia a médio e longo prazos, habitualmente atribui-se a principal influência ao gradiente de transporte longitudinal e despreza-se o gradiente de transporte transversal (Silva, 2010).

Para existir transporte de sedimentos é necessário que as forças hidrodinâmicas atuantes sejam suficientes para iniciar o movimento das partículas. Esse movimento está condicionado pela superação de limiares críticos, em particular do critério da velocidade média crítica e do critério da tensão crítica de arrastamento (Fonseca, 2015). Desta forma, as forças hidrodinâmicas dominantes no sistema são a força de arrastamento e a força de sustentação.

O desequilíbrio no balanço sedimentar acontece quando ocorre uma conjugação entre a redução do aporte fluvial de sedimentos e a capacidade de transporte marítimo. O desequilíbrio provoca alterações na morfologia da linha costeira obrigando-a a adaptações de modo a atingir uma nova configuração de equilíbrio, Figura 6. O insuficiente fornecimento de sedimentos a sotamar resulta na propagação do fenómeno erosivo no sentido da deriva litoral, de Norte para Sul no cenário português.

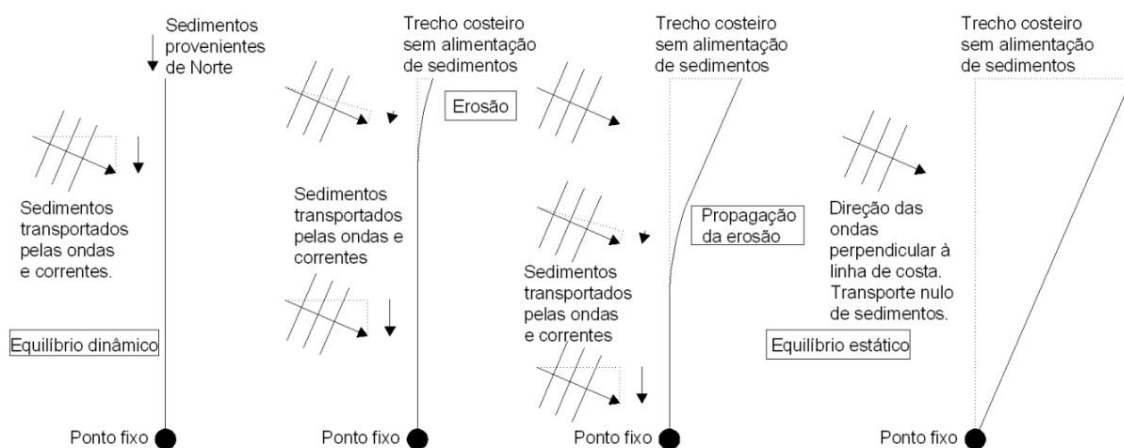


Figura 6 - Efeito do déficit sedimentar na evolução da linha de costa, desde a situação de equilíbrio dinâmico até ao equilíbrio estático (Pereira e Coelho, 2013).

Pela complexidade e diversidade de processos geológicos, tectónicos e climáticos foi proposto pelo Grupo de Trabalho do Litoral (Santos *et al.*, 2014) a divisão e organização do litoral em células sedimentares, cuja definição geral é apresentada na Figura 7.

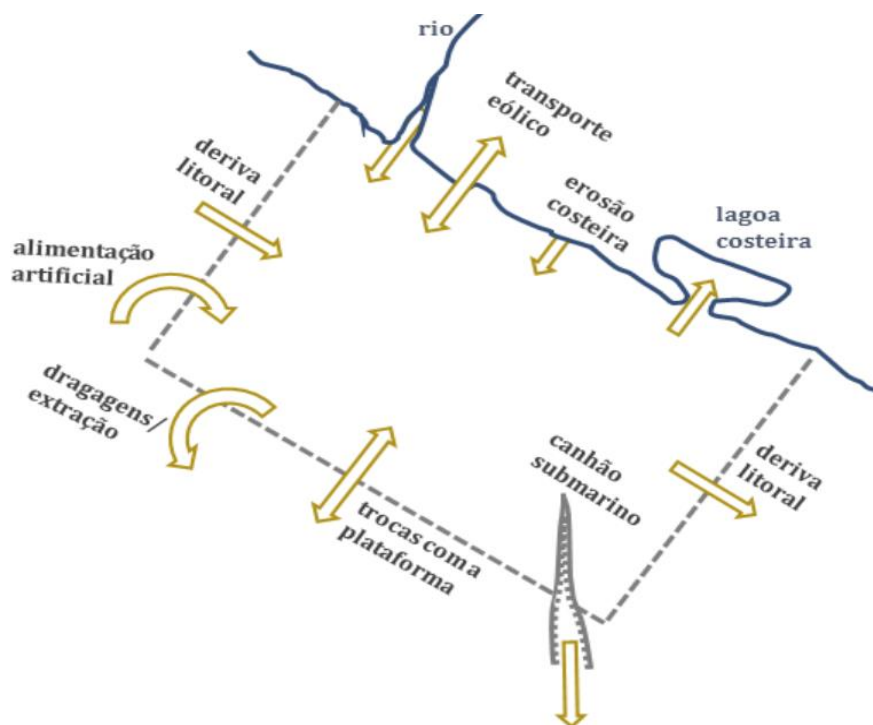


Figura 7 - Representação esquemática de uma célula sedimentar (Santos *et al.*, 2014).

A proposta contempla a divisão do litoral de Portugal continental em oito células sedimentares, Figura 8, separadas de acordo com as características geomorfológicas e dinâmica sedimentar. As células representam unidades individuais e autónomas do ponto de vista sedimentar e funcionam como a unidade de gestão do território (APA, 2015). O balanço sedimentar é traduzido pela diferença entre as entradas (fontes) e saídas (sumidouros) de sedimentos em cada célula: valores negativos indicam tendências erosivas e valores positivos acreções.

A célula 1, entre a foz do rio Minho e a Nazaré, foi dividida em 3 subcélulas sedimentares:

- Subcélula 1a (Minho - Douro): caracteriza-se por uma costa rochosa baixa e apresenta um balanço sedimentar negativo na ordem dos $-1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$. Este balanço negativo resulta da insuficiência de sedimentos fluviais nesta subcélula que tem sido fortemente afetada pela construção de barragens e dragagens como as do porto de Viana do Castelo (Santos *et al.*, 2014);
- Subcélula 1b (Douro - Cabo Mondego): neste trecho verificam-se valores também elevados de défice sedimentar, de aproximadamente $-6.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$. Este défice é o reflexo da redução significativa do aporte de sedimentos pelo rio Douro, o que resulta em erosões significativas em trechos como o de Espinho à Torreira (Mesuras, 2018);
- Subcélula 1c (Cabo Mondego – Nazaré): este trecho apresenta valores significativos de défice sedimentar devido à captura integral do volume transportado longitudinalmente pelo canhão da Nazaré que funciona como sumidouro.

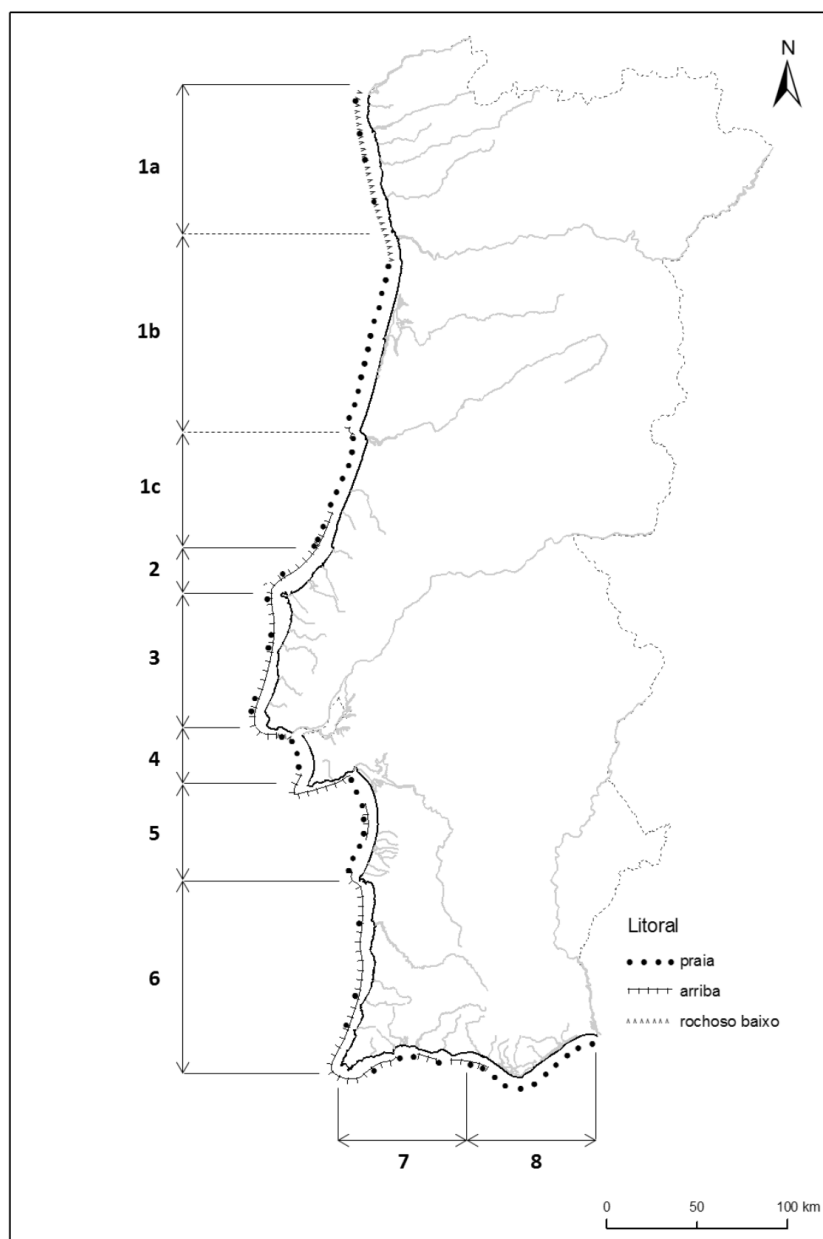


Figura 8 - Células sedimentares do litoral português (Santos *et al.*, 2014).

2.6. ESCALAS ESPACIAIS E TEMPORAIS

As diversas escalas temporais e espaciais nas quais ocorre a evolução da morfologia costeira refletem a complexidade e variabilidade dos processos morfodinâmicos que ditam a evolução das praias (Velo-Gomes, 2010). A identificação e separação dos processos que originam determinadas alterações morfológicas constituem um grande desafio para a gestão costeira. Uma possível abordagem para este problema é agrupar os processos em escalas de resposta das praias (Silva, 2010). O estudo destas escalas de resposta é fundamental para a descrição adequada dos mecanismos de transporte sedimentar, dos fenómenos de erosão e deposição e ainda para a correta calibração dos modelos numéricos.

As categorias de escalas espaciais e temporais da morfologia costeira incluem (Silva, 2010):

- Curto Prazo:
 - Escalas espaciais limitadas (na ordem das centenas de metros) e escalas temporais reduzidas a alguns dias;
 - Em eventos extremos de curta duração, a agitação marítima provoca deformações no alinhamento costeiro ou no perfil transversal da praia;
 - A descrição detalhada da evolução topo-hidrográfica da praia foca-se nos processos transversais à linha de costa, de curto prazo, e assumem uniformidade longitudinal;
 - O uso de modelos numéricos que incluem processos computacionalmente exigentes, está por norma limitado a aplicações de curto prazo;
- Médio Prazo:
 - Escalas espaciais que variam entre 1 e 5 km e escalas temporais de anos a décadas;
 - Previsões habitualmente consistentes com os volumes de sedimentos transportados;
 - Disponibilidade sedimentar impacta a dinâmica das barras submersas e de crescentes de praia, e ainda a recuperação da praia após um temporal a médio prazo;
 - A gestão costeira baseia-se principalmente em perspetivas temporais compreendidas nesta categoria;
- Longo Prazo:
 - Escalas espaciais superiores, de 10 a 100 km, e escalas temporais compreendidas entre décadas e séculos;
 - As respostas litorais nesta escala são o resultado das descontinuidades espaciais no transporte longitudinal;
 - A variação do nível médio da água do mar foi o processo que mais influenciou a evolução morfológica da linha de costa numa perspetiva de milhares de anos, i.e., desde o último máximo glacial, há cerca de 18 000 anos (Santos *et al.*, 2014).

No contexto deste estudo, destaca-se a importância das escalas de médio e longo prazo, uma vez que estão intrinsecamente associadas ao tempo de vida útil das obras de engenharia e ainda à dimensão das células sedimentares. No entanto, o estudo do comportamento litoral nestas escalas requer um elevado conhecimento dos processos hidrodinâmicos que ocorrem na zona costeira, particularmente na zona de rebentação onde o nível de conhecimento é limitado (Silva, 2010).

Embora a perceção social tenda a focar-se no curto prazo, para uma gestão costeira eficaz é recomendado que as zonas sejam classificadas como áreas de risco elevado, a médio e a longo prazo, baseando-se em escalas temporais alargadas, entre 20 e 100 anos (Santos *et al.*, 2014). Devido à tendência reativa nas respostas administrativas aos estragos, o estudo e análise de respostas mais robustas é severamente comprometido.

2.7. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA LINHA DE COSTA

A modelação numérica tem um papel fundamental na avaliação de riscos costeiros. A capacidade de previsão do comportamento da linha de costa ao longo do tempo é considerada fulcral para garantir a eficácia do planeamento e da gestão costeira (Cruz, 2015). Os modelos numéricos permitem o estudo da evolução morfológica das zonas costeiras, bem como a simulação do efeito das variações nas condições de agitação marítima e das dinâmicas sedimentares. São, também, particularmente interessantes no contexto das alterações climáticas e da subida do nível médio da água do mar, bem como para a análise dos impactos associados à crescente pressão antropogénica no litoral. Apesar da sua relevância para o estudo de diversos fatores, os resultados dos modelos numéricos devem ser analisados com precaução devido à complexidade e variabilidade dos processos físicos envolvidos, que muitas vezes não são representados numericamente de forma exata (Silva, 2010). A escolha do modelo numérico a utilizar deve ser ponderada levando em conta vários fatores, entre os quais a escala temporal e espacial do estudo, o objetivo da simulação (diagnóstico, prognóstico ou apoio à decisão), a disponibilidade e validade dos dados de entrada e ainda os recursos computacionais disponíveis.

Os modelos utilizados para estudar a evolução da posição da linha de costa são frequentemente baseados na teoria clássica de “uma linha”, isto é, assumem o equilíbrio do perfil transversal da praia e que a variação do alinhamento costeiro se deve ao deslocamento paralelo do perfil de praia em torno de uma profundidade de fecho, que resulta do balanço de volume transportado longitudinalmente (Coelho *et al.*, 2023). A profundidade de fecho é um conceito muito relevante na modelação costeira, e consiste na profundidade a partir da qual se admite que não existe variação significativa do perfil transversal da praia, ou seja, que o transporte sedimentar seja desprezável, Figura 9.

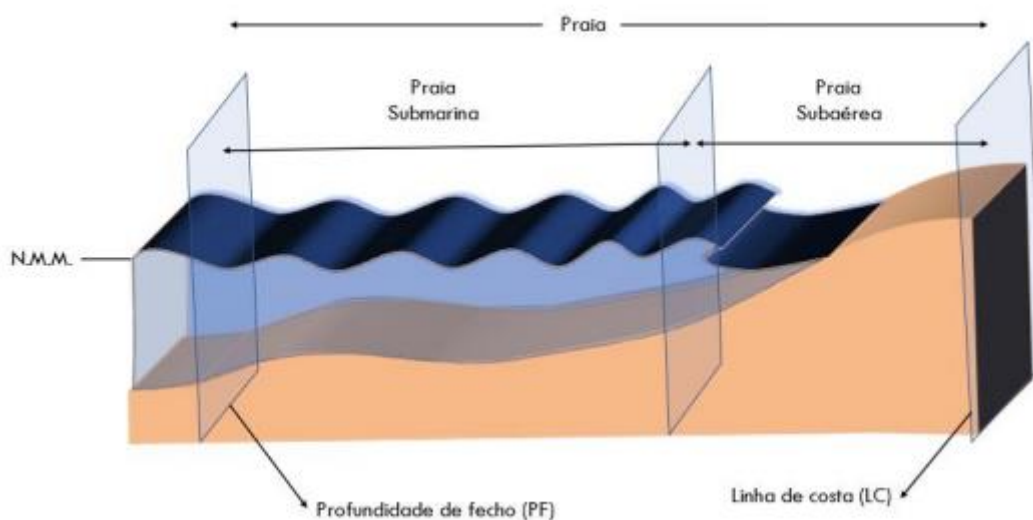


Figura 9 - Limites do perfil de praia (Ferreira, 2023).

Esta formulação de “uma linha” assume que a taxa de transporte transversal de sedimentos é nula a médio e a longo prazo e, portanto, que a variação da morfologia da praia é apenas afetada pelos gradientes de transporte longitudinal (Silva, 2010). Estes modelos de “uma linha” permitem simulações utilizando grandes escalas espaciais e temporais, devido às exigências computacionais relativamente baixas, comparativamente às de outros modelos mais complexos.

Existe um vasto leque de modelos numéricos, mais simples ou mais complexos, cada um com as suas vantagens e limitações, o que obriga a uma escolha criteriosa do modelo a utilizar para cada estudo. Como referência, nesta secção são apresentados alguns modelos.

2.7.1. LTC (LONG TERM CONFIGURATION)

O modelo LTC, ou *Long Term Configuration*, foi inicialmente desenvolvido por Coelho (2005) e mais tarde aperfeiçoado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este modelo numérico foi criado para a simulação da evolução da fisiografia das faixas costeiras a médio e a longo prazo (Silva, 2010). Com abordagens centradas no transporte sedimentar longitudinal e inserido na teoria de “uma linha”, o LTC tem como objetivo apoiar a gestão e o planeamento do litoral ao simular cenários naturais e antropogénicos em escalas temporais de décadas e escalas espaciais na ordem das dezenas de quilómetros. O modelo pode também ser utilizado como ferramenta complementar no estudo de situações de risco e vulnerabilidade à agitação marítima, bem como na escolha de soluções estruturais de defesa. Apesar da sua abordagem simplificada, o modelo considera variações do nível médio da água do mar e a influência de estruturas costeiras pesadas e alimentações artificiais de praias. O declive do perfil da praia junto à linha de água controla a taxa de transporte longitudinal e influencia a estimativa do limite de espraçamento (Silva, 2010).

As vantagens deste modelo incluem a sua simplicidade e baixa exigência computacional, o que o torna indicado para simulações a longo prazo, bem como a possibilidade de simular os impactos das alterações climáticas no litoral. A sua principal vantagem, quando comparado com os outros modelos de “uma linha”, é a atualização das cotas do perfil transversal ativo. No entanto, o LTC tem também algumas limitações, entre as quais a necessidade de um *software* específico para aceder aos resultados, a simplificação exagerada da transformação das ondas na aproximação à costa (algo que pode ser melhorado utilizando-o em conjunto com programas mais sofisticados), a limitação na descrição dos processos físicos na zona de rebentação, que conduz a incertezas na evolução morfológica, e, por fim, a limitação ao uso de apenas cinco perfis transversais que pode dificultar a análise em estudos com grandes extensões espaciais (Fonseca, 2015).

Este modelo foi utilizado no desenvolvimento do Projeto INCCA (Coelho *et al.*, 2023), que visava simular a evolução morfológica da faixa costeira no concelho de Ovar para um horizonte de 80 anos (2020-2100), considerando diferentes cenários de intervenção. Foi também utilizado por Fonseca (2015) para o estudo da evolução da linha de costa no trecho Maceda-Furadouro-Torreira, no qual foram analisadas várias opções de intervenção, nomeadamente o cenário “*Do Nothing*”, isto é, a ausência de qualquer intervenção. O principal objetivo deste trabalho passava por compreender o regime litoral do transporte sedimentar na costa Noroeste Portuguesa.

2.7.2. XBEACH

O XBeach é um modelo numérico de domínio aberto que combina processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos para estudar a resposta de praias arenosas a eventos extremos, funcionando, portanto, com escalas temporais reduzidas, na ordem das horas a dias (Abreu, 2021). O programa inclui três modos distintos de modelação: *stationary* (ondas de curto período), *surfbeat* (ondas de longo período) e *non-hydrostatic* (não hidrostático). Cada um destes modos de simulação tem escalas temporais diferentes bem como tempos de computação inversamente proporcionais às escalas. O XBeach é composto por quatro módulos fundamentais interligados. Em cada um desses

módulos são calculados parâmetros específicos e, posteriormente, transferidos entre módulos. No final de cada ciclo, a batimetria é atualizada e essa informação regressa ao módulo inicial, Figura 10. Este modelo permite ainda incluir elementos como a vegetação e estruturas rígidas pela definição de zonas não erodíveis (Ferreira, 2020).

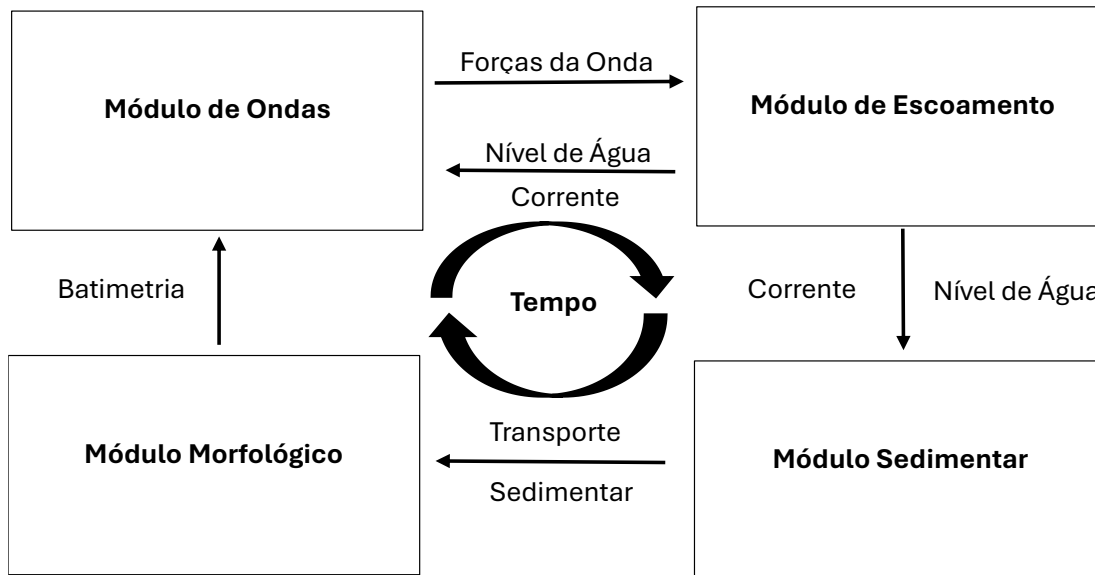


Figura 10 - Módulos de funcionamento e interação, adaptado de DELTARES (2020).

O XBeach tem várias características que o tornam um ótimo modelo de simulação, como o facto de ser um modelo de código aberto, a sua capacidade de representar corretamente os processos físicos da morfodinâmica costeira e o seu excelente desempenho na modelação da erosão dunar devido a tempestades (Oliveira, 2012). Por sua vez, e para atingir resultados corretos, para além do elevado tempo computacional, o modelo exige um elevado número de dados de entrada, o que pode tornar exaustivo o processo de calibração. O modelo não tem a capacidade de incluir caudais sólidos nem o transporte longitudinal de sedimentos, o que é visto como uma limitação a simulações com escalas temporais superiores.

O modelo foi utilizado por Abreu (2021) para analisar a hidrodinâmica e dinâmica sedimentar da restinga do Rio Cávado, em Esposende. Neste estudo foi simulada uma solução baseada na natureza, a adição de uma espécie de alga (*Laminaria Ochroleuca*) para salvarguardar a zona Norte da restinga. Este estudo mostrou resultados benéficos, como o alargamento do canal de navegação, o impedimento/redução de episódios de galgamento e ainda a redução da energia das ondas no local (que atenua a perda de material sedimentar na restinga).

2.7.3. DELFT3D

Tal como o *software* anterior, o Delft3D foi também desenvolvido pela Deltares e caracteriza-se pela sua capacidade para conduzir estudos abrangentes em faixas costeiras, rios e estuários. Este programa permite simular escoamentos, a propagação da agitação marítima e a sua interação com fronteiras rígidas, o transporte sedimentar, a qualidade da água e a morfodinâmica (Taveira Pinto, 2020).

O modelo é constituído por três módulos principais: o Delft3D-WAVE, que é responsável pela propagação de ondas, o Delft3D-FLOW, que simula e avalia o comportamento hidrodinâmico em 2D ou 3D, e por fim, o Delft3D-MORPHOLOGY, que caracteriza o transporte sedimentar e as alterações morfológicas.

O Delft3D tem várias vantagens associadas, que fazem do programa um dos mais utilizados para diversos tipos de análises, costeiras ou estuarinas, pelo que a sua versatilidade e aplicabilidade são pontos fortes do modelo. Porém, devido à sua complexidade, este *software* tem elevadas exigências computacionais e de qualidade e pormenorização dos dados de entrada.

Este modelo foi utilizado para o estudo das erosões localizadas em estruturas de proteção costeira, nomeadamente da intervenção que propunha a construção de cinco quebra-mares destacados na Praia do Carneiro (Taveira-Pinto, 2020). Para este estudo foram conjugadas análises em modelo físico e numérico, o que garantiu uma melhor avaliação da morfodinâmica local, bem como da eficácia das estruturas na proteção da praia.

3

SHORELINES

3.1. INTRODUÇÃO

A opção pelo modelo *ShorelineS* para o desenvolvimento da presente dissertação de Mestrado deve-se à sua capacidade para executar simulações de evolução costeira de elevada complexidade. O modelo destaca-se pelas suas aplicações em zonas costeiras geometricamente complexas e com regimes de praia instáveis, mas sobretudo por permitir simulações de larga escala espacial e temporal. Com baixa exigência computacional, o modelo representa de uma forma eficiente os principais processos da dinâmica costeira, considerando estruturas rígidas de proteção, climas de agitação marítima reais e os fenómenos associados. Quando comparado com modelos semelhantes, como o XBeach, são perceptíveis as diferenças nas suas valias de cada um, particularmente no que diz respeito às escalas espaciais e temporais, como é demonstrado pela Figura 11.

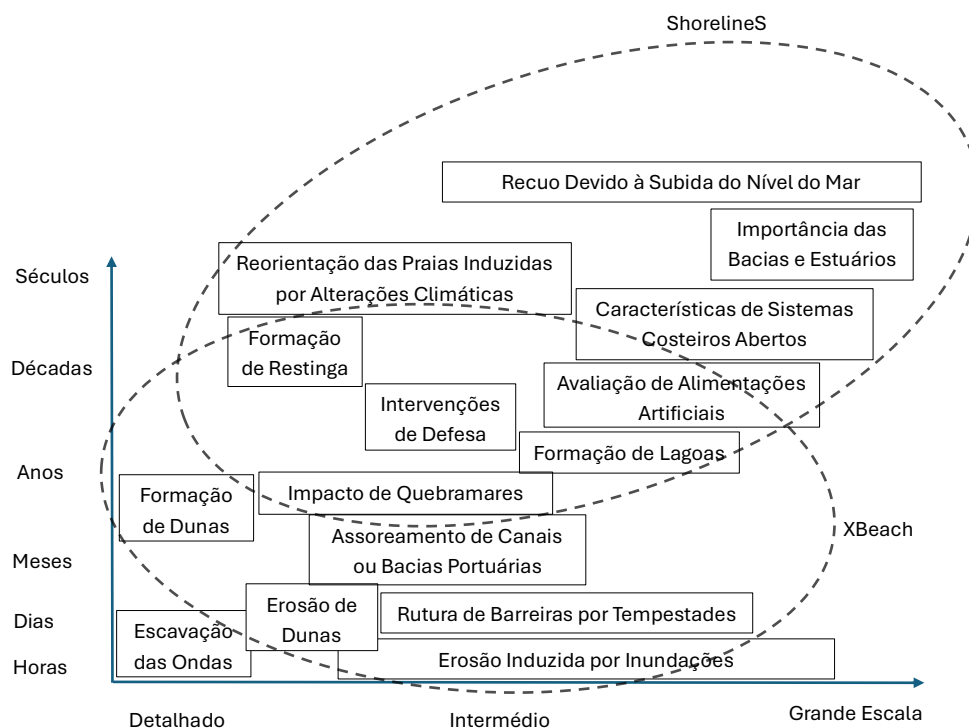


Figura 11 - Comparação entre o XBeach e o ShorelineS para diferentes escalas (adaptado de Huisman e Roelvink, 2022).

A estrutura modular e o código acessível representam também qualidades do modelo *ShorelineS*. A comparação com dados reais permite, através de uma abordagem iterativa simples, a calibração do modelo. A baixa exigência computacional permite realizar múltiplas simulações num tempo relativamente reduzido, o que permite que o modelo se assuma como uma ferramenta robusta e eficiente no apoio às análises de estratégias e tomadas de decisão de gestão costeira.

3.2. SHORELINES

Desenvolvido no instituto *Deltares*, por J. A. Roelvink e B. J. A. Huisman. O modelo *ShorelineS* (*Shoreline Simulation*) faz parte do complexo ambiente de modelos integrados da plataforma Delft3D. É um modelo numérico de código aberto de complexidade reduzida criado para simular a evolução, em planta, da zona costeira ao longo de escalas temporais extensas, que podem variar entre meses e décadas. Inserido na classe de modelos de “uma linha”, é concebido com o objetivo de representar as dinâmicas morfológicas da linha de costa arenosa sujeita a processos costeiros consequentes do transporte sedimentar longitudinal, resultante da propagação oblíqua das ondas incidentes.

O *ShorelineS* distingue-se dos demais modelos hidrodinâmicos de alta resolução, como o XBeach, que utiliza sistemas de equações derivadas das leis de conservação de massa e da quantidade de movimento em regimes não-hidrostáticos, por se apoiar numa formulação mais simplificada. Baseia-se em equações unidimensionais para o transporte sedimentar ao longo da costa e conservação de massa (Roelvink *et al.*, 2020). O programa permite um elevado grau de flexibilidade da linha de costa uma vez que esta é representada por uma sequência de pontos de controlo interligados que têm a capacidade de se mover livremente no espaço de acordo com o gradiente local do transporte sedimentar, Figura 12. A criação e utilização de uma grelha flexível é considerada essencial para modelar corretamente elementos curvilíneos complexos, como saliências e tómbolos que se formam devido a estruturas destacadas.

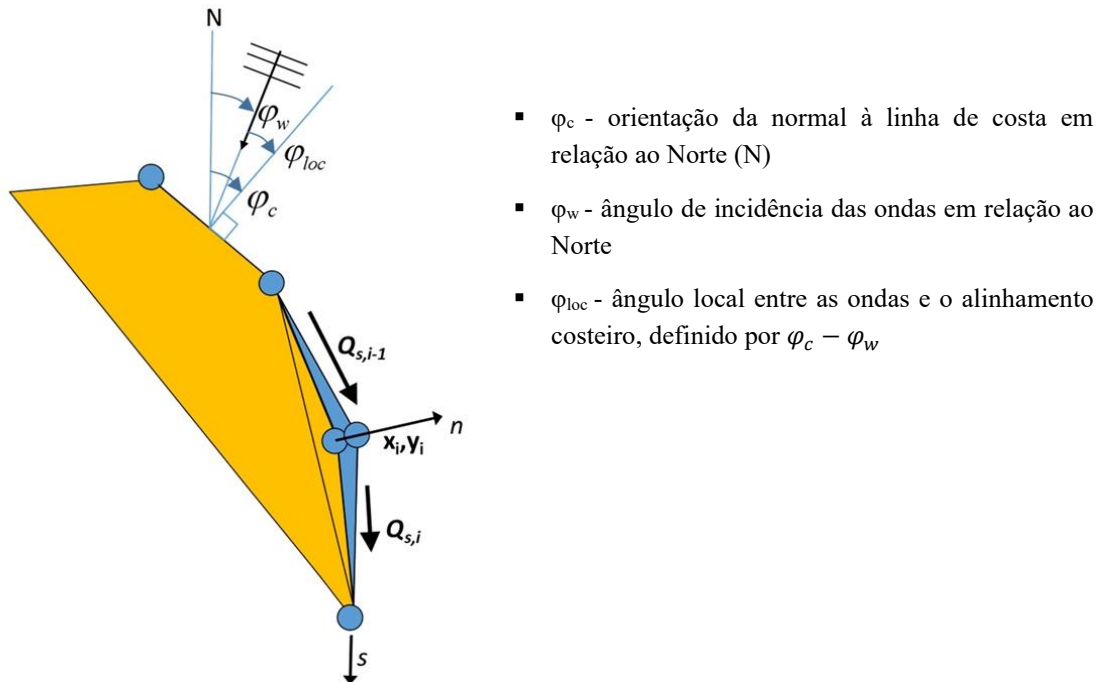


Figura 12 - Sistema de coordenadas ao longo da linha de costa e definição dos ângulos em relação à costa e às ondas (Huisman e Roelvink, 2022).

Um dos principais pontos de destaque do *ShorelineS* é a sua eficiência computacional, que possibilita a simulação de áreas extensas para cenários de longo prazo com baixos requisitos de processamento, particularmente interessante em contextos de planeamento costeiro estratégico, nos quais é necessário analisar os efeitos cumulativos de intervenções antropogénicas (e.g. alimentação artificial de areia, construção de esporões) e das alterações climáticas que resultam na subida do nível médio da água do mar e na alteração do regime de transporte de sedimentos. O modelo procura preencher o espaço existente entre os modelos de uma linha de costa, mais simples, e os modelos costeiros mais complexos (Mudde, 2019), uma vez que alguns desses modelos são geralmente lentos, dispendiosos e excessivamente difíceis para serem usados como modelos unidimensionais em situações costeiras complexas.

O modelo *ShorelineS* contempla a inclusão de estruturas costeiras fixas e móveis, representadas de forma paramétrica, que influenciam localmente o regime de transporte de sedimentos através de mecanismos de sombreamento e bloqueio das ondas incidentes. A modelação da propagação das ondas até à linha de costa é obtida simplificada considerando alterações na altura e direção de propagação a sotavento de obstáculos, por meio de coeficientes de transmissão ou difração corretamente configurados.

A natureza modular do *ShorelineS* permite a calibração e validação com dados empíricos, como séries históricas, bem como a integração de modelos de previsão do clima marítimo e cenários de alterações climáticas. Deste modo, conclui-se que o modelo *ShorelineS* constitui uma ferramenta capaz e versátil no que concerne à avaliação de estratégias de adaptação e controlo em ambientes costeiros vulneráveis, como é o caso do Furadouro, sendo particularmente relevante para estudos da evolução da linha de costa em zonas arenosas, extensas e de interesse para a preservação do território.

3.3. FORMULAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO MODELO

O *ShorelineS* é um modelo numérico de complexidade reduzida, destinado à simulação e análise da evolução morfológica da linha costeira provocada pelo transporte longitudinal de sedimentos motivado pela ação das ondas. Matematicamente o modelo baseia-se na conservação da massa de sedimentos ao longo da costa, recorre a formulações paramétricas para prever o transporte sedimentar e algoritmos capazes de estimar a evolução da linha de costa nos planos espacial e temporal.

A equação fundamental utilizada pelo modelo para caracterizar a evolução da posição da linha de costa, descreve a conservação de massa de sedimentos:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{D_c} \frac{\partial Q_s}{\partial s} - \frac{RSLR}{\tan \beta} + \frac{1}{D_c} \sum q_i \quad (1)$$

em que n representa a coordenada transversal à costa, t o tempo, s a coordenada ao longo da costa, Q_s o transporte longitudinal de sedimentos (m^3/ano), D_c a altura do perfil costeiro ativo (m), $RSLR$ a subida relativa do nível da água do mar (*Relative Sea Level Rise*) expresso em metros por ano, $\tan \beta$ a inclinação média do perfil da praia, e q_i um parâmetro associado aos fluxos sedimentares transversais ($m^3/m/\text{ano}$) que podem derivar de processos como *overwash*, alimentações artificiais de areia, extração ou troca de sedimentos com rios.

3.3.1. TRANSPORTE

A evolução do posicionamento da linha de costa é desencadeada pelo transporte de sedimentos ao longo da costa, que por sua vez é provocado pela ação das ondas. Este transporte sedimentar é determinado por um conjunto de fórmulas empíricas, devendo cada uma ser aplicada de acordo com o contexto da aplicação em análise e dos dados disponíveis. Estas fórmulas devem ser calibradas de modo a simular corretamente as taxas de transporte sedimentar observadas na área de estudo.

Na Tabela 1 estão descritas as fórmulas utilizadas pelo *ShorelineS* cujos parâmetros angulares seguem as definições expostas na Figura 12.

Tabela 1 - Fórmulas de Transporte Sedimentar (Roelvink *et al.*, 2020).

Autor	Notação	Fórmula
USACE (1984)	CERC1	$Q_s = bH_{s0}^{5/2} \sin 2(\varphi_{loc})$
Ashton and Murray (2006)	CERC2	$Q_s = K_2 H_{s0}^{12/5} T^{1/5} \cos^6(\varphi_{loc}) \sin(\varphi_{loc})$
USACE (1984)	CERC3	$Q_s = bH_{sb}^2 \sin 2(\varphi_{locb})$
Kamphuis (1991)	KAMP	$Q_s = 2.33 H_{sb}^2 T^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\varphi_{locb})$
Van Rijn (2014)	VR14	$Q_s = \frac{1}{(\rho_s - \rho_w)(1 - p)} 0.0006 K_{swell} \rho_s \tan \beta^{0.4} D_{50}^{-0.6} H_{s,br}^{2.5} V_{total}$

Adicionalmente, na Tabela 1 são ainda mencionados os parâmetros H_{s0} e H_{sb} que representam, respetivamente, à altura de onda significativa em zona offshore e no ponto de rebentação expressa em metros. T_p representa o período de pico das ondas (s), D_{50} o diâmetro médio dos sedimentos (m), m_b é o declive médio do perfil da praia na zona de rebentação e φ_{locb} caracteriza o ângulo relativo das ondas na zona de rebentação. Os parâmetros b e K_2 são os coeficientes de calibração das fórmulas CERC1 e CERC2, respetivamente, e contemplam fatores como a densidade da água, a densidade dos sedimentos, a aceleração gravítica, um critério de rebentação das ondas e ainda um coeficiente de calibração adicional estabelecido pelo *Shore Protection Manual* (USACE, 1984). Enquanto as fórmulas CERC dependem apenas de um coeficiente de calibração, a fórmula apresentada por Kamphuis exige parâmetros mais detalhados e consequentemente imprecisos.

Conforme referido anteriormente, cada fórmula tem um uso específico para cada cenário em análise, obrigando, portanto, o utilizador a uma escolha criteriosa que se adequa ao estudo em prática.

- CERC1: é uma fórmula simplificada que assenta na energia das ondas em águas profundas. Relevante para fins ilustrativos e simulações preliminares, apesar da sua estrutura facilitar a compreensão do modelo, é limitada no que toca a precisão física.

- CERC2: um avanço da fórmula original, que contempla os efeitos de refração e espraçamento. Permite uma reprodução mais realista dos processos costeiros e garante a compatibilidade com outros modelos de evolução costeira.
- CERC3: considera as condições de onda no ponto de rebentação, o que resulta numa caracterização mais precisa do transporte sedimentar onde efetivamente este ocorre.
- KAMP: integra aspetos adicionais como o declive da praia e o diâmetro médio dos sedimentos, o que resulta numa opção mais precisa e robusta na simulação do transporte sedimentar. No entanto, está sujeita a maior incerteza se estes parâmetros não forem corretamente definidos.
- VR14: esta é uma formulação semi-empírica desenvolvida por Van Rijn (2014) que considera a granulometria dos sedimentos, o que aumenta a sensibilidade em termos das características físicas da praia em estudo. Esta formulação é especialmente relevante em ambientes nos quais os sedimentos sejam heterogêneos por considerar o diâmetro médio dos sedimentos (D_{50}), o que, por sua vez, pode dificultar a calibração uma vez que são necessários valores precisos.

O modelo *ShorelineS* dispõe ainda de outras alternativas recentes que incluem o efeito de *swell* e transformações completas das ondas no perfil transversal da praia quando utilizado em conjunto com outros modelos numéricos, o que garante maior rigor físico na simulação numérica. Porém exige maior complexidade computacional e requer maior detalhe nos dados de entrada, nomeadamente parâmetros de maré, coeficientes de fricção de fundo e perfis batimétricos rigorosos.

3.3.1.1. Condições de Fronteira

As condições de fronteira determinam a resposta da linha de costa nas extremidades do domínio simulado, isto é, como o sistema é influenciado pelo transporte sedimentar nos limites Norte e Sul. Este conceito procura representar o impacto do transporte sedimentar das células adjacentes sobre a zona de estudo, condição necessária para a modelação de linhas de costa não cíclicas (Mudde, 2019).

O *ShorelineS* contempla vários tipos de condições de fronteira no seu funcionamento, cuja seleção deve ser feita criteriosamente com base nas características da área de estudo. Os tipos de condição de fronteira incluídos no modelo são:

- *Open*: Fronteiras abertas, o que permite que a entrada e saída de sedimentos no sistema, bem como a evolução da linha de costa seja livre. Deve ser utilizado em sistemas longos nos quais não existam estruturas de proteção.
- *Closed*: Não permite que existam entradas nem saídas de sedimentos. Deve ser utilizado quando a área de estudo é limitada por uma barreira física como esporões ou falésias.
- *Fixed*: Fixa a posição da linha de costa nas extremidades não existindo variações ao longo do tempo.
- *Gradient Zero*: Assume o gradiente do transporte longitudinal como nulo, o que mantém um fluxo sedimentar constante nas fronteiras. Condição útil para incluir o transporte longitudinal sem definir q_i .
- *Angle Constant*: A orientação da linha de costa mantém-se constante podendo avançar ou recuar paralelamente, o modelo permite que o ângulo seja definido pelo utilizador.
- *Periodic*: Utilizado no estudo de ilhas, a fronteira inicial e final unem-se criando um comportamento em anel. Conceito raro em cenários reais, utilizado para testes teóricos.

3.3.2. Funcionamento Numérico

O modelo é executado em ambiente MATLAB e utiliza uma malha unidimensional ao longo da linha de costa, composta por pontos de controlo (x,y) e permite representar cada secção como aberta, no caso de uma linha de costa, ou fechada quando se trata de ilhas, lagos ou bancos de areia. O modelo segue um processo de cíclico cuja repetição é executada a cada intervalo temporal, que deve ser definido pelo utilizador. Os passos do funcionamento do modelo são apresentados na Figura 13.

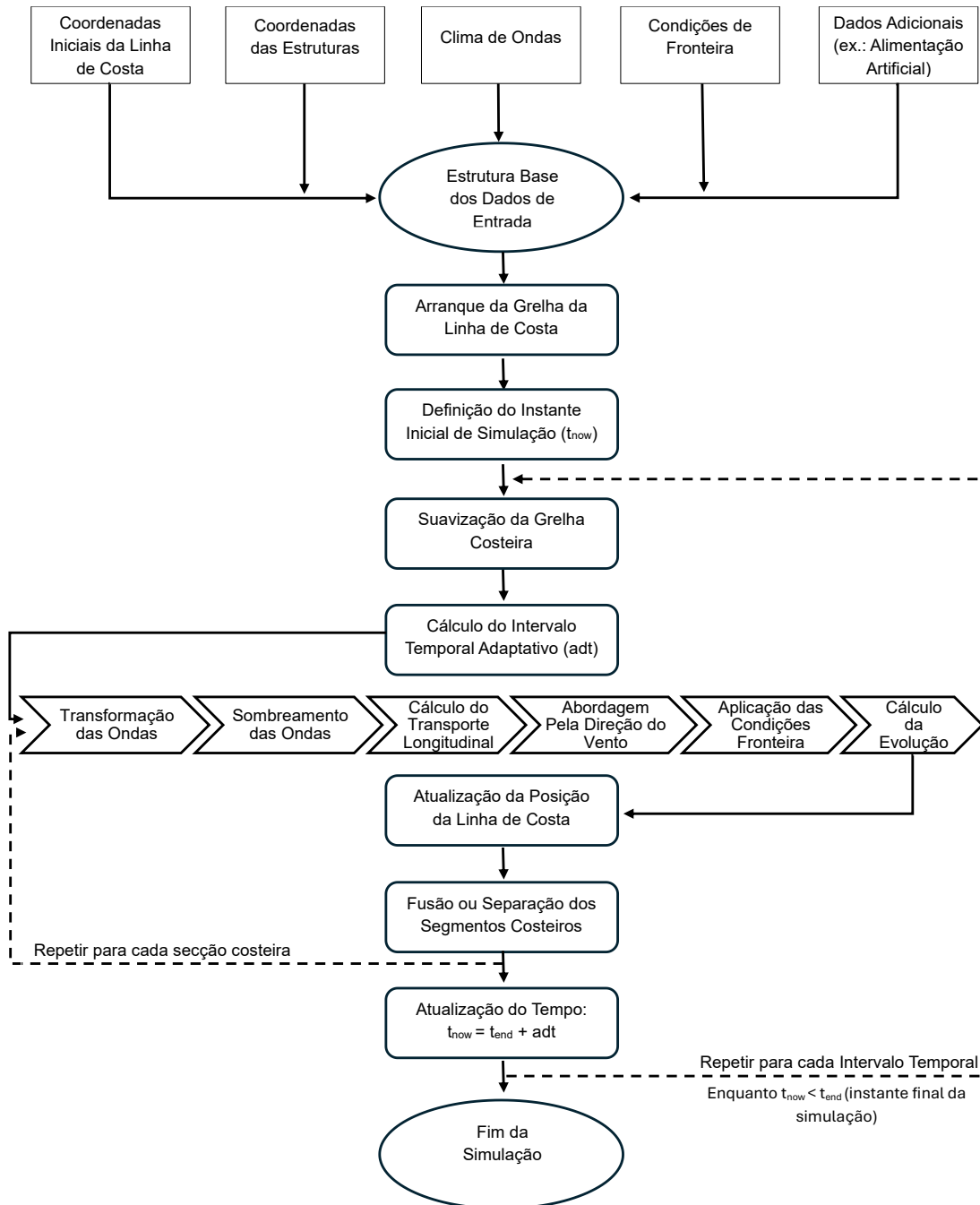


Figura 13 - Esquema representativo do funcionamento do modelo *ShorelineS* (adaptado de Roelvink e Huisman, 2015).

3.3.3. TRATAMENTO DE ESTRUTURAS E PROCESSOS COSTEIROS

Um dos principais pontos de destaque do *ShorelineS* é a forma flexível e eficiente como integra vários tipos de intervenções antropogénicas e processos costeiros naturais com impacto na morfodinâmica do alinhamento da costa, fundamental para a correta simulação de ambientes costeiros.

O modelo permite ao utilizador reproduzir estruturas costeiras através de linhas poligonais (*polylines*) que cruzam a linha de costa e impedem totalmente ou atenuam o transporte de sedimentos, Figura 14. Estas estruturas rígidas são tratadas pelo modelo de acordo com o seu tipo e função que desempenham. No caso de esporões, o *ShorelineS* limita a evolução da linha de costa junto à estrutura, o que permite simular o fenómeno de *bypassing* sedimentar, que consiste no movimento de contorno da estrutura pelos sedimentos.

A simulação do fenómeno de *overwash* é também contemplada pelo modelo. Quando a largura da barreira arenosa se reduz para além de um limite crítico, o modelo reposiciona os sedimentos na face interior da praia com o objetivo de manter a largura da barreira ou restinga.

Adicionalmente, o modelo permite simular alimentações artificiais de sedimentos, através da definição da geometria, do volume total, do período de execução e da taxa de alimentação. Os sedimentos introduzidos no local são então redistribuídos pelo modelo espacial e temporalmente, sendo tratados como um input adicional na equação de conservação de massa.

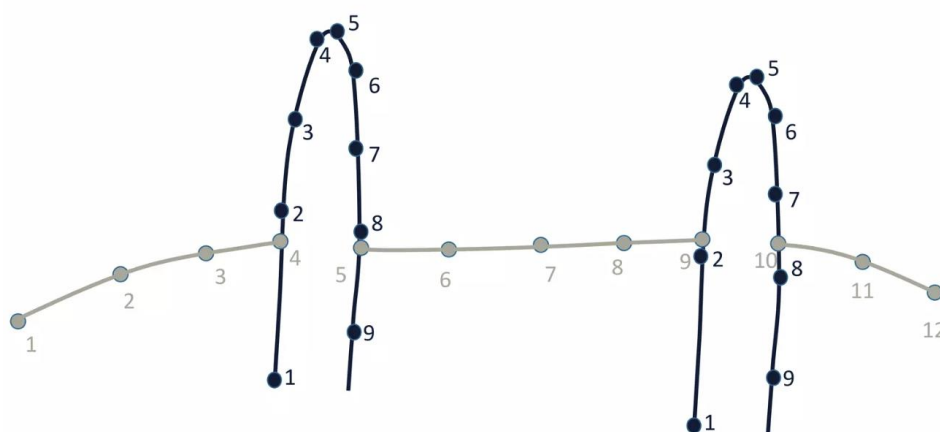


Figura 14 - Representação de esporões e linha de costa – (Roelvink e Huisman, 2015).

3.4. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O *ShorelineS* é uma ferramenta capaz e versátil no que toca à simulação da evolução morfológica da linha de costa, particularmente quando se trata de grandes escalas temporais e espaciais. A simplicidade computacional é uma característica distintiva do modelo.

Aliados à simplicidade do modelo, existem outros aspetos que o tornam relevante no plano dos modelos numéricos de simulação, entre os quais: a flexibilidade na representação da geometria costeira, a integração fácil e eficaz de intervenções humanas e de processos costeiros naturais, a adaptabilidade do código para integração noutras ferramentas de análise espacial e a possibilidade de incluir cenários de subida do nível médio da água do mar e alterações no regime de agitação

marítima, que são aspetos particularmente interessante devido ao fenómeno das alterações climáticas. Por sua vez, o modelo possui limitações relevantes que devem ser tidas em atenção.

O *ShorelineS* baseia-se em parametrizações simplificadas o que não o qualificam para simulações de hidrodinâmicas costeiras que requeiram maior precisão. Adicionalmente, o modelo revela-se limitado na representação de dinâmicas transversais (*cross-shore*), o que limita a sua aplicação a cenários nos quais o transporte longitudinal é o fator predominante. Por fim, a ausência de dados morfológicos e oceanográficos da área de estudo pode conduzir a imprecisões significativas nos resultados, uma vez que estes dados são necessários para a calibração dos coeficientes empíricos nas fórmulas de transporte sedimentar.

Concluindo, apesar de ser uma ferramenta de simulação útil e eficaz, a sua utilização deve ser alvo de uma análise criteriosa considerando as suas limitações e aplicações a cenários específicos.

3.5. ESTUDOS ANTERIORES

O *ShorelineS* é um modelo numérico ainda em desenvolvimento, com resultados promissores relativos a simulações de grandes escalas temporais e costas geometricamente complexas. Assim, são apresentados neste subcapítulo alguns trabalhos anteriores que revelam a capacidade e a versatilidade do modelo na simulação da evolução morfológica de sistemas costeiros.

3.5.1. MODELAÇÃO DA FORMAÇÃO DA RESTINGA DO LOBITO, ANGOLA

O trabalho desenvolvido por Mudde (2019) na Universidade TU Delft procurou avaliar a aplicabilidade do modelo *ShorelineS* na modelação da formação e migração de restingas e utilizou como caso de estudo a restinga natural de Lobito, em Angola, Figura 15. O estudo visou três objetivos principais: a compreensão dos processos físicos determinantes na formação de restingas, a validação do módulo de transporte longitudinal de sedimentos do programa, e ainda verificar e melhorar a capacidade do *ShorelineS* para simular a formação de restingas.

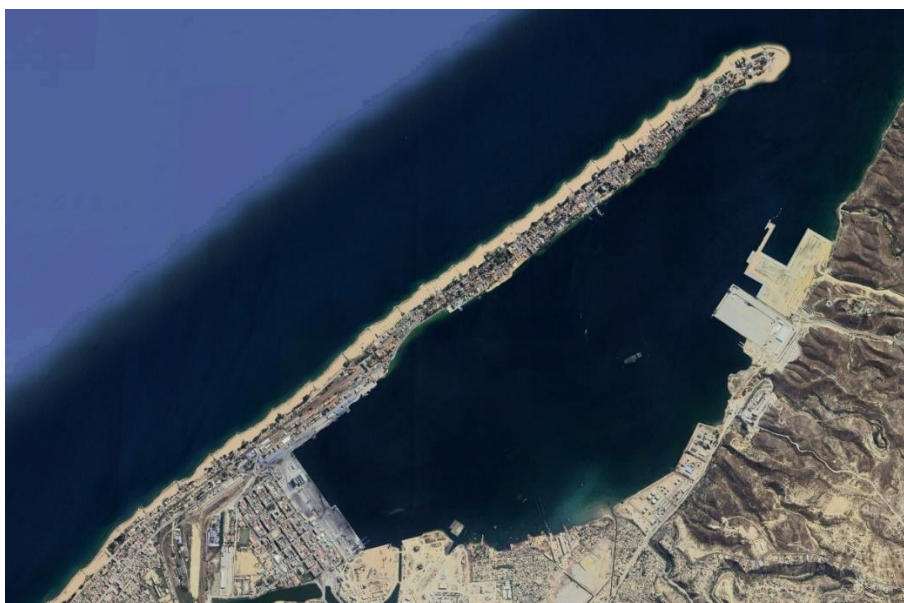


Figura 15 - Restinga de Lobito, Angola (Google Earth).

Com base em dados geográficos e batimétricos locais, procedeu-se à modelação da baía de Lobito, e à definição das condições fronteira. Foram implementadas melhorias no programa, nomeadamente o conceito de *Dynamic Boundary*, que permite a atualização dinâmica da zona de rebentação com base na evolução da linha de costa, tendo-se concluído que este é um aspeto fundamental para determinar corretamente os parâmetros de rebentação de onda, que têm impacto direto no cálculo do transporte sedimentar. Para além desta adição ao modelo, foi criada também uma nova rotina de cálculo para encontrar o ângulo crítico de transporte, isto é, ângulo de transporte máximo, o que foi considerado fulcral para a reprodução correta da formação de restinga.

Os resultados deste trabalho revelaram que, com os conceitos adicionados, o modelo teve a capacidade de produzir uma simulação robusta da evolução morfológica da restinga, coerentes com os padrões naturais que se observam.

3.5.2. VALIDAÇÃO DO MODELO COM O PROJETO SAND MOTOR EM TER HEIJDE, PAÍSES BAIXOS

O *ShorelineS* foi aplicado ao caso de estudo do *Zandmotor*, (Roelvink *et al.*, 2020). Este megaprojeto consistiu na alimentação artificial de 21 milhões de m³ ao largo de Ter Heijde na costa da Holanda do Sul, Figura 16.



Figura 16 - Vista aérea sobre o projeto *Zandmotor* (den Haag.com).

O principal objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade do *ShorelineS* para reproduzir o transporte e os padrões de dispersão do volume sedimentar, e ainda estudar a evolução morfológica local. Para isso foi criada e calibrada uma linha de costa inicial baseada em dados históricos de 2011, o ano da deposição inicial dos sedimentos no local. Posteriormente foi utilizada uma previsão retrospectiva (*hindcast*) da agitação marítima, bem como séries temporais

de transporte longitudinal, para simular 20 km de costa ao longo de 8 anos. Os resultados da simulação foram então comparados com levantamentos topográficos reais de 2012 a 2019.

O modelo apresentou resultados interessantes e provou a sua capacidade de simulação e previsão da migração de sedimentos, da formação de saliências e evolução da linha de costa. Verificaram-se também algumas limitações de pequena escala, mas ainda assim o modelo foi capaz de manter a coerência entre a simulação e os dados reais. Este estudo confirma a validade do *ShorelineS* como ferramenta eficaz na modelação de intervenções costeiras de grande escala.

3.5.3. MODELAÇÃO DA DINÂMICA E GESTÃO DA LINHA DE COSTA EM ADELAIDE, AUSTRÁLIA

O estudo consistiu na modelação, utilizando o *ShorelineS*, da dinâmica da linha de costa e da sua gestão nas praias de Adelaide, Austrália. Figura 17, (Perry, 2025).



Figura 17 - Região de Adelaide, Austrália (Google Earth).

Foi realizada uma simulação *hindcast* de 32 anos, com recurso a dados históricos do clima, séries temporais de agitação marítima e diferentes abordagens e soluções de intervenções. A calibração do modelo baseou-se em dados observados e recolhidos por instituições locais. Foi ainda analisada a sensibilidade do modelo a vários parâmetros da agitação marítima, entre os quais a altura e direção de onda, variações sazonais e alterações no nível médio da água do mar.

O *ShorelineS* apresentou resultados robustos, revelando tendências de erosão e de acumulação de sedimentos nesta região, assim como a influência das variações sazonais no clima de ondas sobre a redistribuição sedimentar. Neste estudo concluiu-se ainda que era necessário realizar alimentações artificiais futuras em troços mais vulneráveis, o que facilita a estratégia de gestão costeira ao priorizar intervenções com base na eficácia expectável.

4

CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1. PRAIA DO FURADOURO

Situada no Noroeste de Portugal, a praia do Furadouro localiza-se no litoral do concelho de Ovar, no distrito de Aveiro. Caracteriza-se como uma praia de elevada relevância associada ao turismo balnear, que se assume como uma das principais atividades económicas da região, e que, consequentemente resulta numa flutuação significativa da população (Perdiz, 2020). Devido ao crescimento deste tipo de turismo em meados do século XX, verificou-se na zona do Furadouro uma expansão considerável e uma sofisticação das infraestruturas e equipamentos (Pinto, 2022). No entanto, devido à falta de conhecimento, organização e planeamento, esta expansão resultou na destruição de zonas dunares vulneráveis. Assim, a praia do Furadouro é descrita há décadas como uma zona onde se reconhece o insuficiente planeamento da orla costeira (Fonseca, 2015).



Figura 18 - Trecho Central da Praia do Furadouro (Lopes, 2022).

Esta praia contempla várias atividades, tanto recreativas como económicas, para além do já mencionado turismo balnear. Entre elas destacam-se a pesca desportiva e tradicional, com distinção pela manutenção da clássica Arte Xávega. O Furadouro é amplamente descrito como a primeira colónia de pescadores no concelho de Ovar (Bastos *et al.*, 2015).

A costa do Furadouro, com orientação Nor-nordeste – Su-sudoeste (NNE-SSW), divide-se em três trechos distintos. A secção a Norte estende-se por 8 km – dos quais 83% encontram-se em erosão e destes 56% em situação de “erosão extrema”, Figura 19 (APA, 2022) – e é limitada a Sul pelo Quebra-mar Salvador. Na zona central, entre esporões, é atualmente impossível realizar atividades balneares pois é neste trecho onde o recuo da linha de costa é visivelmente mais notório pelo desaparecimento total do areal, Figura 18.



Figura 19 - Recuo da linha de costa na secção Norte da Praia do Furadouro (APA, 2022).

A população residente nesta zona enfrenta os problemas associados aos galgamentos, cada vez mais frequentes e intensos. Este fenómeno coloca em risco as estruturas e a segurança geral da população. Mais frequentes no Inverno devido à agitação marítima, os galgamentos obrigam particulares a adotar medidas de emergência, nomeadamente a colocar sacos de areia e barreiras (Pinto, 2022).

Na zona da Praia do Furadouro foram implementadas várias estratégias de mitigação dos impactos provocados pela erosão costeira, desde a construção de obras pesadas (*e.g.*, esporões e obras longitudinais aderentes em enrocamento) até à colocação de geotubos - geralmente, com uma abordagem reativa, focada em ações de emergência (Mesuras, 2018). A intervenção mais recente, iniciada em fevereiro de 2025 e com uma verba de 2,4 milhões de euros, tem como objetivo proteger a frente urbana desse trecho, ao reforçar as estruturas transversais e longitudinais aderentes numa extensão total superior a 1500 m (CM Ovar, 2025).

Apesar de existir uma clara aceleração do processo erosivo, este fenómeno é um problema crónico na região, existindo documentos que reportam os avanços marítimos que remontam a 1857 (Pinto, 2022).

4.1.1. CONDIÇÕES MARÍTIMAS

A evolução morfológica da Praia do Furadouro está diretamente relacionada com o regime hidrodinâmico do litoral português, caracterizado por um clima marítimo altamente energético. A região é classificada como uma área de planície costeira arenosa de cotas baixas e revela uma elevada fragilidade à ação do mar, evidenciado pelo desequilíbrio do perfil costeiro.

A Praia do Furadouro está exposta principalmente à agitação marítima provenientes do quadrante Noroeste (NW) com altura significativa média entre 2 e 3 m e períodos que variam entre os 8 e os 12 s, podendo ultrapassar 16 s em situação de tempestade (Taveira-Pinto *et al.*, 2009). A quantidade de energia é proporcional ao período, pelo que se conclui que este é um fator de enorme relevância para avaliar a agitação marítima (Pinto, 2022). A direção e altura das ondas são representadas através da rosa de direção de ondas, Figura 20.

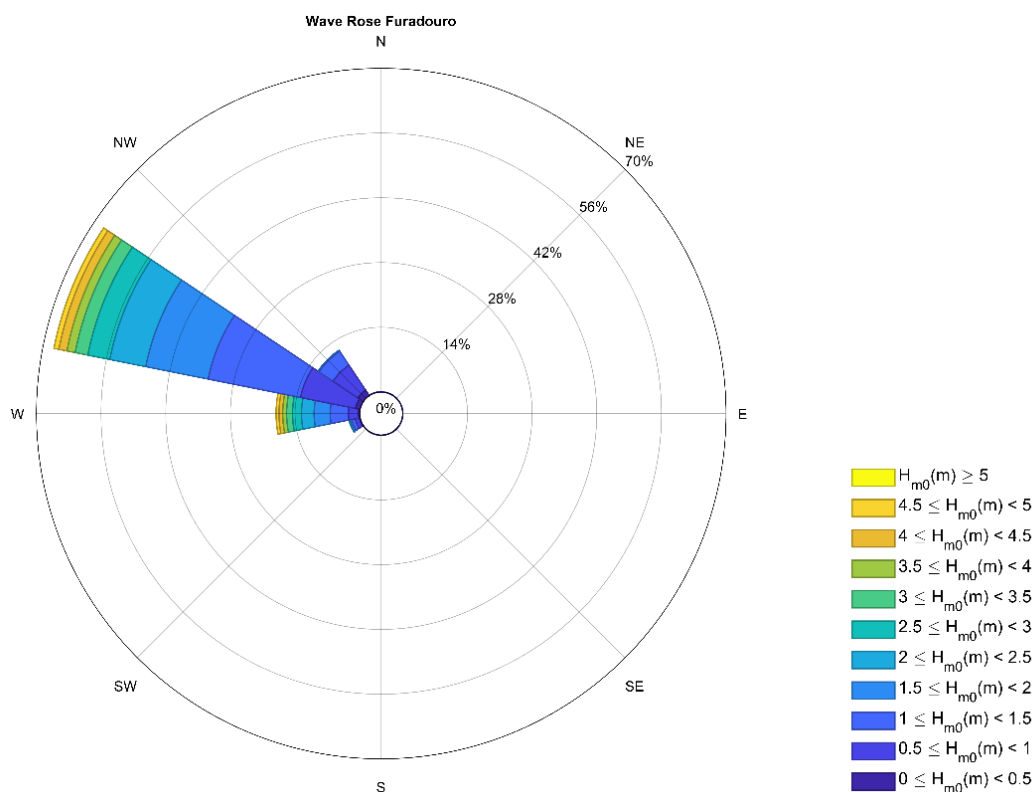


Figura 20 - Rosa de direção das ondas na Praia do Furadouro (dados de 1991 a 2020).

O regime de marés é também, por sua vez, um fator preponderante para a dinâmica costeira, uma vez que estas definem e moldam os perfis e as faixas emersas e submersas, e ainda a zona de rebentação. A maré tem também um impacto direto sobre a corrente de deriva litoral que tende a intensificar-se com a sua subida. O Furadouro está inserido numa massa de água com características mesotidais, isto é, uma amplitude de maré entre 2 e 4 m, podendo atingir 3 m durante as marés vivas. A conjugação da maré alta com forte agitação marítima permite que o nível de água atinja zonas superiores da praia, o que provoca a erosão do cordão dunar que por sua vez poderá conduzir a danos na frente urbana.

A subida do nível médio da água do mar é também um fenómeno que deve ser mencionado, uma vez que é um dos principais fatores naturais a contribuir para a erosão costeira, e ainda pela classificação do Furadouro como Área com Risco Potencial Significativo de Inundação (ARPSI). No Noroeste da costa portuguesa, o nível médio da água do mar é de +2 m ZH (Zero Hidrográfico) (Silva, 2010) embora existam estudos nos quais se prevê uma subida do nível médio da água do mar 1.125 cm/ano para esta região (Coelho *et al.*, 2023). Este fator é particularmente interessante, uma vez que a linha de costa é habitualmente definida pela linha de máxima preia-mar de marés vivas equinociais (Santos *et al.*, 2014).

Em Fevereiro de 2014, durante uma tempestade, registaram-se amplitudes de maré de 4 m e ondulação média atingiu 6 m, com a altura máxima a atingir 15 m o que levou a grandes inundações e perdas na frente costeira do Furadouro (Pinto, 2022).

4.1.2. CARACTERÍSTICAS E TRANSPORTE SEDIMENTAR

O transporte sedimentar ao longo da costa é fundamental para a manutenção do equilíbrio morfodinâmico de um trecho costeiro e, principalmente, em casos como o do Furadouro, nos quais a instabilidade resulta numa erosão progressiva da frente costeira. A Praia do Furadouro está inserida na subcélula sedimentar 1b, Figura 21, que se estende desde a foz do Rio Douro até ao Cabo do Mondego. O Grupo de Trabalho do Litoral refere que esta subcélula apresenta valores expressivos de um défice sedimentar negativo, na ordem dos $6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$. Este défice sedimentar resulta numa erosão expressiva em toda a subcélula, sendo o troço entre Espinho e a Torreira onde a situação é mais alarmante (Mesuras, 2018).

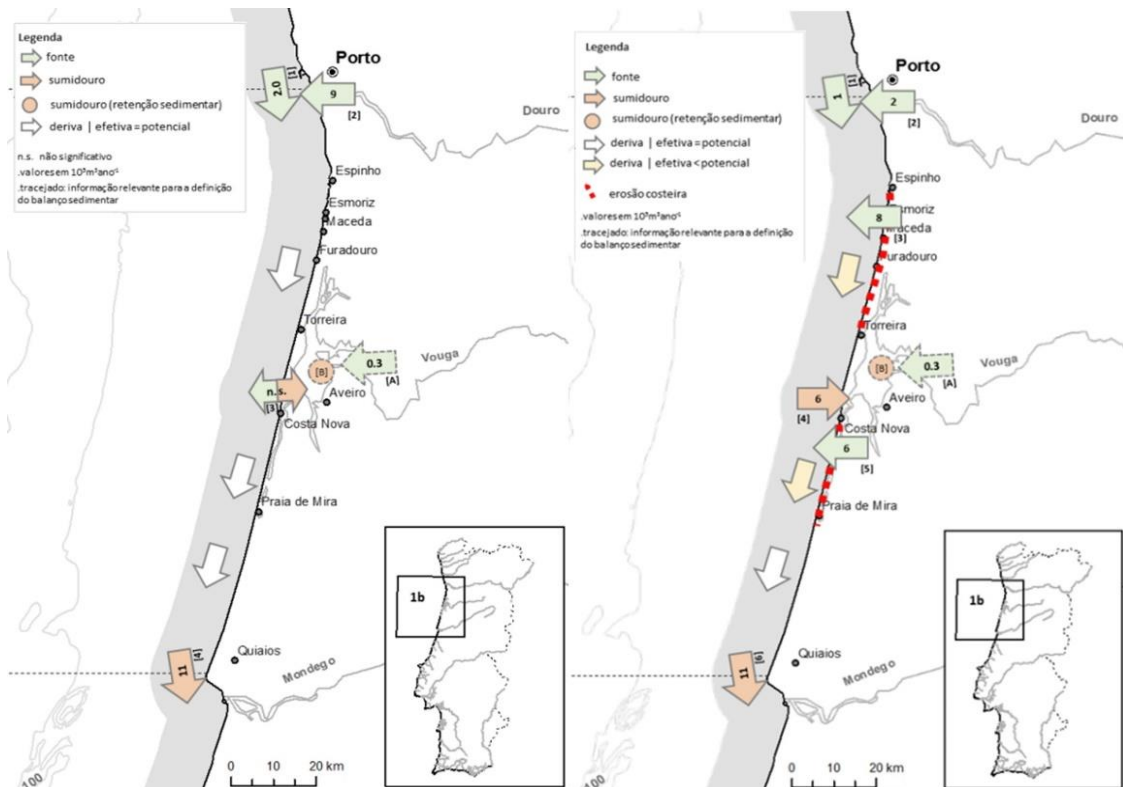


Figura 21 - Balanço sedimentar da subcélula 1b (Santos *et al.*, 2014).

O resultado negativo do balanço sedimentar deve-se, principalmente, à redução do fornecimento fluvial do Rio Douro, devido à construção de barragens. Estima-se que o seu caudal sólido natural seja cerca de 1,8 milhões de m^3/ano , neste momento reduzido drasticamente para 0,25 milhões de m^3/ano (Freitas e Dias, 2015).

Embora a redução do aporte sedimentar seja apontada como a principal causa deste recuo notório da linha de costa, existem outros fatores que contribuem para este processo, entre os quais:

- Dragagens nos canais de navegação e remoção de areia nos leitos fluviais e praias sem a sua restituição.
- Construção de obras pesadas de engenharia costeira, como é o caso do porto de Leixões, os molhes do Douro, os esporões a Norte do Furadouro (entre Espinho e Cortegaça) (Freitas e Dias, 2015). Estas infraestruturas afetam o transporte longitudinal de sedimentos, retendo areias a barlamar (Norte) o que resulta em erosão a sotamar (Sul) (Bastos *et al.*, 2015).

- A destruição do cordão dunar para a construção de infraestruturas, dado que esta prática elimina defesas naturais e reduz a disponibilidade de areia armazenada (Pinto, 2022).

A conjugação destes fatores resulta num défice sedimentar significativo cuja compreensão é fundamental para a definição de estratégias de defesa eficazes. A necessidade de uma estratégia de gestão de sedimentos que envolva a revitalização dos rios como fontes e a realocização dos sedimentos dragados são essenciais para garantir a estabilidade a longo prazo (Mesuras, 2018).

4.2. O PROBLEMA DA EROSÃO COSTEIRA

Inserida num trecho costeiro identificado pela sua alta vulnerabilidade relativamente à erosão costeira, a Praia do Furadouro é uma das áreas costeiras mais altamente afetadas por este fenómeno, tendo um longo historial de galgamentos e inundações costeiras (Mesuras, 2018). Registou-se no trecho Norte (Cortegaça-Furadouro) desta praia, entre 2018 e 2021, um recuo médio anual da linha de costa de 3,6 m, e um recuo máximo observado de 33,5 m. No entanto, estima-se que estas taxas de recuo se agravem para cerca do dobro, seguindo as tendências evolutivas registadas na última década (APA, 2022).

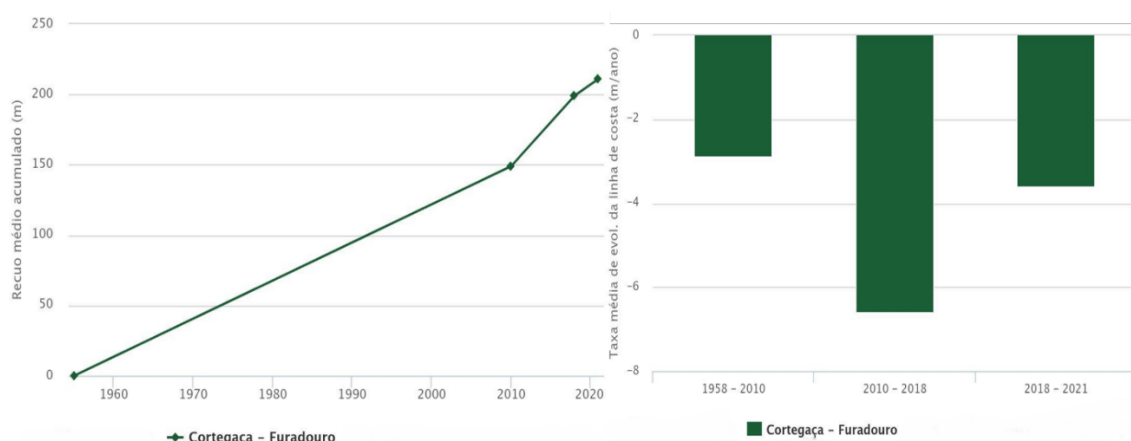


Figura 22 - Recuo médio acumulado e taxa média de evolução da linha de costa (APA, 2024).

Ao analisar a evolução da linha de costa nas últimas décadas, Figura 22, evidencia-se a tendência acentuada de recuo continuado, reforçando a fragilidade dessa região. Numa primeira fase, relativamente estável, entre 1958 e 2010, registou-se uma taxa média de recuo anual de aproximadamente -2,9 m/ano, que resultou num recuo acumulado de cerca de 149 m ao longo de 52 anos. O intervalo de tempo onde os dados mostram resultados mais preocupantes é entre 2010 e 2018 no qual se verifica uma taxa média de erosão de -6,6 m/ano, o que provocou, em apenas oito anos, uma perda de 50,2 m. Esta aceleração abrupta da taxa erosiva poderá estar associada ao aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos, bem como ao desequilíbrio sedimentar do Furadouro.

Apesar de se verificar uma ligeira redução na taxa de erosão entre 2018 e 2021, que passou para -3,6 m/ano, o balanço total atinge valores de recuo médio acumulado superiores a 211 m em 70 anos, o que revela a dimensão preocupante da crise erosiva na região do Furadouro.

A tendência erosiva, tal como em outras regiões do litoral português, tem sido acelerada por diversos fatores, entre os quais a natureza dinâmica das zonas costeiras, alterações climáticas e intervenções antropogénicas (Silva, 2010). Por sua vez, em zonas costeiras arenosas, como é o caso do Furadouro, o défice sedimentar e a deficiente distribuição de sedimentos são apontados como o principal desafio (Lima *et al.*, 2021). A enorme pressão urbana na zona do Furadouro é uma agravante relativamente ao recuo da linha de costa. A frente costeira está exposta às ações do mar, o que acarreta um enorme risco em termos de segurança das infraestruturas e da população da região. O fenómeno da erosão na região conduziu a perdas significativas de território, Figura 23, danos em edifícios públicos e privados e ainda ao agravamento de fenómenos associados como galgamentos e inundações costeiras.

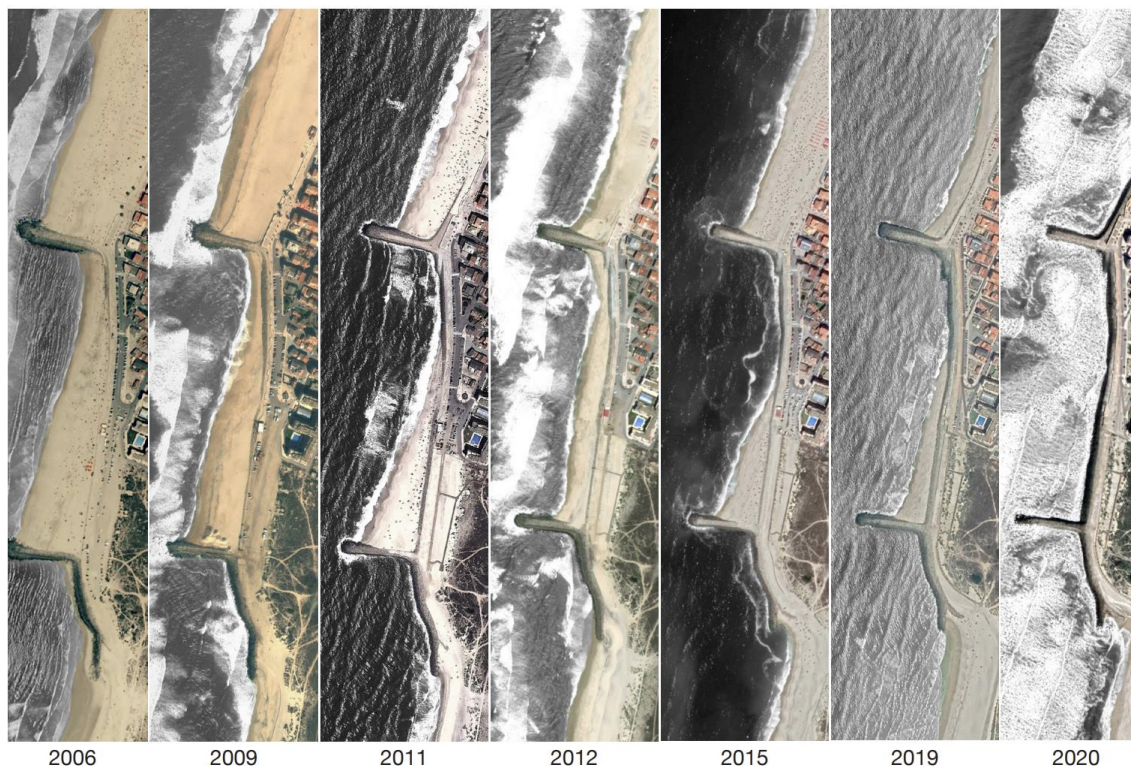


Figura 23 - Evolução morfológica da Praia do Furadouro (Ferreira, 2023).

4.3. MITIGAÇÃO DO PROBLEMA

No concelho de Ovar, o Furadouro é uma das regiões urbanas com o registo do maior investimento em intervenções costeiras de manutenção ou emergência (Pinto, 2022). No passado, face à crescente vulnerabilidade, a solução para enfrentar os avanços do mar e defender a frente litoral do Furadouro apoiou-se na construção de estruturas rígidas de defesa costeira, Figura 24. Contudo, estas grandes obras de engenharia provocaram na população uma falsa sensação de segurança, o que contribuiu para uma crescente ocupação das zonas em perigo, aumentando assim a vulnerabilidade dos habitantes (Ferreira, 2023). Inicialmente, estas intervenções permitiram travar o recuo da linha de costa, garantindo o equilíbrio sedimentar especialmente no trecho Norte da praia. No entanto, apesar de travarem a erosão, esta proteção é limitada ao local da obra e verifica-se que o processo erosivo se mantém e é até intensificado a Sul da zona protegida. O

prolongamento em forma de Y na extremidade Sul da estrutura aderente, foi uma tentativa de reduzir a erosão na transição para o sistema natural a Sul da região (Mesuras, 2018).



Figura 24 - Estruturas de defesa na praia do Furadouro (CM Ovar, 2012).

Para além das estruturas fixas, foram conduzidas ações de reconstrução dunar e implementadas soluções baseadas na natureza nos trechos Norte e Sul da praia. Entre as medidas destacam-se a alimentação artificial de areia, que é considerada uma estratégia essencial para restabelecer o equilíbrio sedimentar, a fixação de sedimentos com vegetação dunar e ainda a instalação de vedações e paliçadas de madeira. O principal objetivo destas intervenções é restabelecer o natural funcionamento natural dos sistemas dunares que atuam como barreiras físicas aos galgamentos costeiros (Projeto Portugal 2020). Apesar de apresentarem vantagens consideráveis e promoverem uma adaptação dinâmica e resiliente face às alterações climáticas, estas soluções exigem monitorizações contínuas, e reforços, no caso das alimentações artificiais. São limitadas pela sua vulnerabilidade face a eventos extremos como tempestades. Defende-se também que seja estudado e aplicado um reordenamento da orla costeira a médio e a longo prazo, que passa pela realocação planeada das infraestruturas colocadas na frente marítima do Furadouro (Mesuras, 2018).

Existem atualmente propostas e estratégias para o futuro com o objetivo de travar a erosão descontrolada que se tem verificado. O Ministério do Ambiente propôs a implementação de dois quebra-mares destacados com cerca de 250 m de comprimento cada. A opinião da comunidade local acerca desta solução dividiu-se, apesar da sua eficácia na dissipação da energia da ondulação e retenção de sedimentos (Ferreira, 2023). Tem vindo também a ser estudada a possibilidade da implementação de um esporão em “T” ou “Y” com base no esporão já existente mais a Norte (Coelho *et al.*, 2023).

O Furadouro é considerado um caso de estudo de particular interesse e a necessidade de intervir nesta região é clara. Devem, por isso, ser conduzidos esforços que procurem articular soluções de defesa rígidas com soluções sustentáveis com o objetivo de repor o balanço sedimentar e garantir espaço público seguro e funcional.

5

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será descrita a metodologia adotada para a simulação da evolução morfológica da linha de costa na zona da Praia do Furadouro, bem como a análise dos resultados obtidos deste estudo. A modelação numérica das dinâmicas costeiras desempenha um papel fundamental no apoio à gestão integrada do litoral, permitindo antecipar ocorrências de risco e avaliar a eficácia e os impactos das diferentes intervenções costeiras existentes. Para o desenvolvimento deste trabalho, recorreu-se ao modelo *ShorelineS* devido à sua estrutura simplificada e pela sua capacidade de processar e simular, de modo eficiente, a evolução da posição da linha de costa com base no transporte sedimentar longitudinal induzido pela agitação marítima.

A utilização deste modelo numérico no caso de estudo da Praia do Furadouro permite uma análise detalhada dos efeitos das condições marítimas e da presença de estruturas de defesa pesadas sobre a dinâmica sedimentar local. A metodologia deste trabalho inclui a recolha e tratamento de dados, a configuração do modelo numérico, a calibração dos parâmetros envolvidos na simulação com base em dados reais, e posterior análise e validação dos resultados da simulação. Este processo tem como objetivo avaliar a relevância do modelo numérico perante as condições específicas da região do Furadouro de modo a contribuir para a compreensão dos processos físicos, bem como dos fenómenos erosivos que ocorrem nesta zona, de modo a apoiar na tomada de decisão e no desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação da erosão costeira.

5.2. DADOS UTILIZADOS

5.2.1. LEVANTAMENTOS TOPO-HIDROGRÁFICOS E PROCESSAMENTO DA LINHA DE COSTA

A posição da linha de costa foi obtida de acordo com os dados disponibilizados pelo Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental (Programa COSMO), resultantes dos levantamentos topo-hidrográficos realizados entre 2018 e 2020. Estes levantamentos, efetuados utilizando técnicas avançadas de alta resolução, combinam medições altimétricas e batimétricas, o que permite a obtenção de Modelos Digitais de Elevação (DEM) com elevada resolução espacial, particularmente de 0,3 m, que abrangem as zonas emersa e imersa da praia, Figura 25. As técnicas utilizadas para a produção dos DEM baseiam-se no sistema de referência vertical Zero Hidrográfico (ZH), que atua como plano de referência vertical para todos os levantamentos. Na caracterização da costa portuguesa, é afirmado que o nível médio da água do mar se encontra

situado à cota de +2 m ZH e que este se mantém constante para efeitos de simulações e estudos (Silva, 2010).

As técnicas de aquisição de dados a partir das quais foram produzidos os DEM incluem:

- **Levantamento Aerofotogramétrico:** aplicado na zona terrestre entre a duna e a cota aproximada de 1 m ZH. A resolução original deste levantamento é de 0,03 m, sendo posteriormente generalizada para 0,3 m e o erro médio quadrático (RMSE) associado é de 0,55 m, em ambos os planos horizontal e vertical.
- **Levantamento GNSS (Global Navigation Satellite System):** executado entre as cotas de 1 m ZH e -0,5 m ZH, com fiadas de 30 m. Este tipo de levantamento possui uma resolução média de 1 m e apresenta uma incerteza horizontal de 0,022 m e vertical de 0,026 m.
- **Interpolação de áreas em falta:** produzida com recurso a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), entre as cotas de -0,5 m ZH e -1 m ZH.
- **Levantamento por Feixe Simples:** realizado entre as cotas de -1 m ZH e -3 m ZH e interpolado a cada 30 m. Com uma resolução espacial de 1 m e incertezas posicionais semelhantes ao sistema GNSS.
- **Levantamento Multifeixe:** produzido com uma densidade média de 40 pontos por metro quadrado e uma incerteza na ordem dos 0,031m.

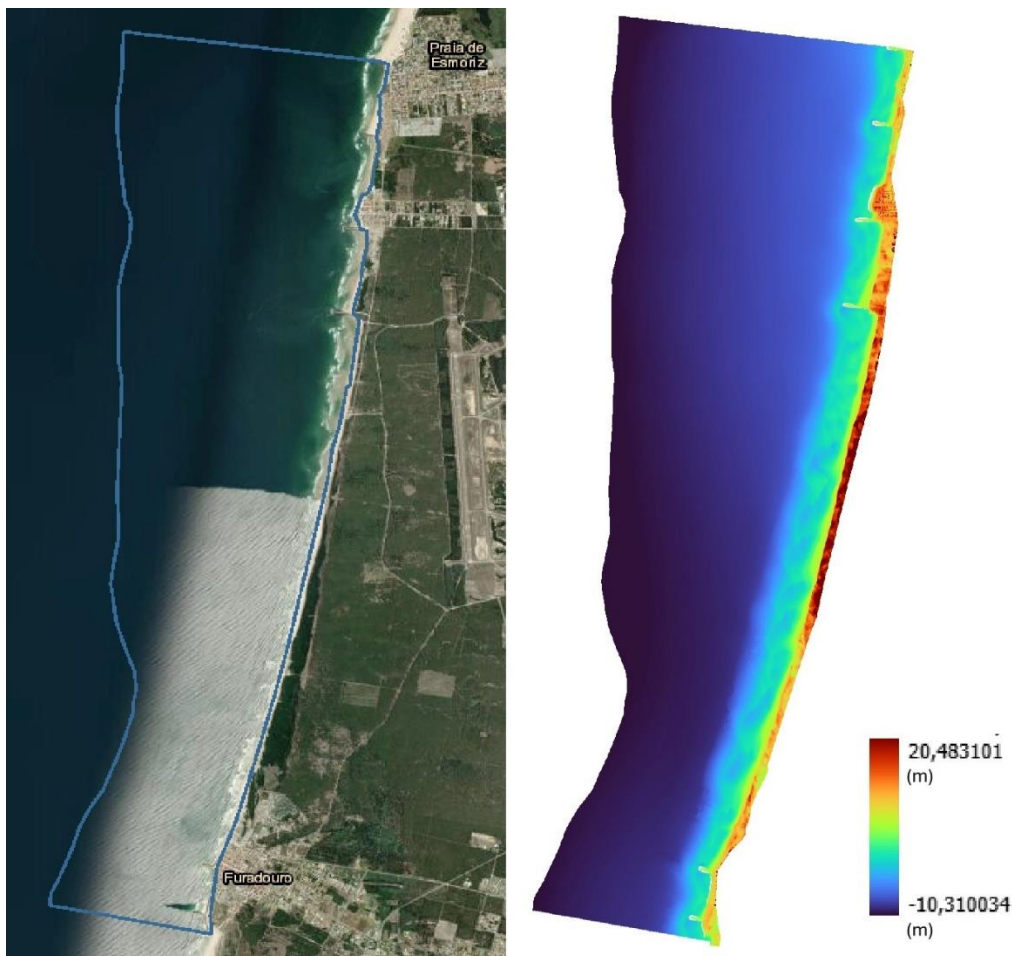


Figura 25 – Área do levantamento topo-hidrográfico e modelo digital de elevação de 2020.

A elevada qualidade dos dados recolhidos através destas técnicas permitiu gerar uma superfície continua com excelente definição espacial e exatidão vertical, o que garante uma base robusta para a extração rigorosa da linha de costa. Os dados foram recolhidos ao longo do trecho Esmoriz-Furadouro, aproximadamente 10 km de linha de costa, e posteriormente processados de modo a extrair as coordenadas representativas da posição da linha de costa para cada um dos anos de referência (2018-2020).

Deve ser mencionado que a recolha e produção dos Modelos Digitais de Elevação utilizados neste trabalho foram realizados sob responsabilidade da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) no âmbito do desenvolvimento do Programa COSMO, e como tal, o autor desta dissertação de mestrado não participou diretamente na produção dos levantamentos, tendo atuado apenas ao nível do processamento, interpretação e extração da linha de costa para efeitos de modelação numérica.

A extração da linha de costa foi realizada através do programa de informação geográfica QGIS, considerando como referência a cota de 2 m (ZH) para representar a posição da linha de costa. Assim, procedeu-se à alteração da simbologia da rampa de cores do DEM, ao fixar uma cor específica para a cota de referência, Figura 26, e seguidamente foi traçada manualmente uma linha vetorial de pontos ao longo da linha representativa da linha de costa, assegurando a extensão pretendida para a área em estudo.



Figura 26 - Imagem real e representação da linha de costa à Cota 2 m (ZH).

Posteriormente, foram extraídas as coordenadas X e Y dos vértices da linha vetorial traçada, Figura 27, no sistema de referência geográfica ETRS89 / PT-TM06 (EPSG:3763). Estas coordenadas foram então organizadas num documento de texto estruturado (.txt), compatível com o funcionamento do modelo *ShorelineS*, e utilizadas como linha de costa inicial (2018) e linha de referência (2019 e 2020) para calibração e validação do modelo. Além das coordenadas da posição da linha de costa, também as coordenadas das posições dos esporões e das obras longitudinais aderentes foram extraídas pelo mesmo procedimento.



Figura 27 - Representação dos pontos extraídos.

5.2.1. SÉRIE TEMPORAL DAS CONDIÇÕES MARÍTIMAS

A série temporal das condições marítimas utilizada neste trabalho foi desenvolvida e fornecida pelo CIIMAR (Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental), com recurso a um modelo numérico SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) implementado internamente. O modelo foi calibrado e validado com base nos dados medidos pela boia de agitação marítima do Porto de Leixões no período compreendido entre 2004 e 2019.

Após a sua validação, o modelo SWAN foi então utilizado para simular as condições da agitação marítima ao largo da Praia do Furadouro, o que serviu para extrair as condições de fronteira de onda para o modelo *ShorelineS* numa localização específica, Figura 28, posicionada a aproximadamente 12 m de profundidade, considerada a zona de interesse representativa da entrada de energia de ondas na região costeira.



Figura 28 - Localização do ponto de extração das condições marítimas.

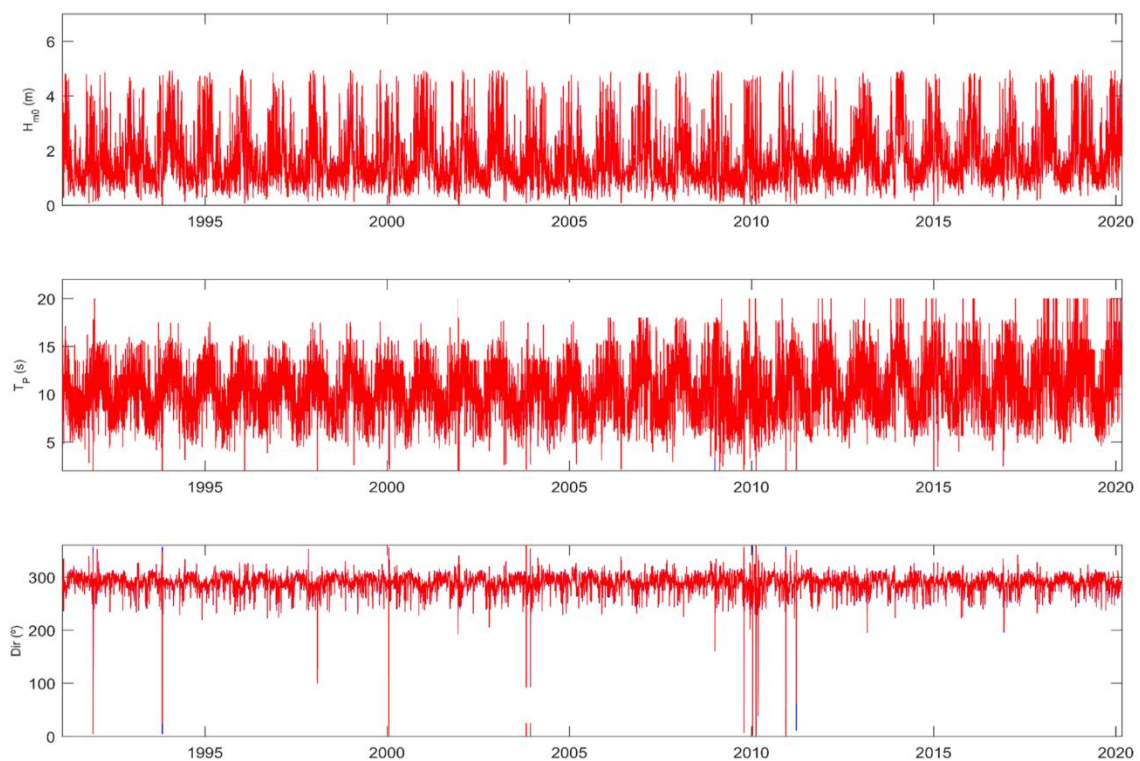


Figura 29 - Série temporal das ondas no período 1990-2020.

A série simulada, Figura 29, cobre um intervalo temporal extenso de 30 anos, da qual foram extraídos os dados considerados relevantes para este estudo, no período entre 2018 e 2020. As

variáveis extraídas incluem a altura de onda significativa (H_s), o período de pico (T_p) e a direção de propagação das ondas. Estes dados foram posteriormente tratados, organizados e convertidos para o formato compatível com o modelo *ShorelineS* (formato .wvt), o que permitiu a inclusão direta da série temporal nos ficheiros de entrada do modelo para proceder à simulação da evolução da linha de costa.

5.2.3. PROFUNDIDADE DE FECHO

A profundidade de fecho é um conceito fundamental na delimitação do perfil ativo da praia e na definição dos limites offshore dos modelos numéricos de evolução da linha de costa, como é o caso do *ShorelineS*.

No desenvolvimento deste estudo adotou-se um valor de -10,5 m para a profundidade de fecho em relação ao nível médio da água do mar (NMM), tendo por base os resultados experimentais obtidos para o trecho Esmoriz-Furadouro no âmbito da dissertação de Mestrado de Ferreira (2023). Nessa dissertação, a autora estudou a variabilidade de perfis morfológicos provenientes dos levantamentos topo-hidrográficos do Programa COSMO e recorreu a um algoritmo de deteção automática da profundidade de fecho. O valor de -10,5 m (NMM) é referido como uma profundidade estável em vários perfis do setor costeiro analisado.

Para validação da coerência do valor experimental obtido, foram também utilizadas estimativas obtidas por fórmulas empíricas, nomeadamente:

- Fórmula de Hallermeier (1981):

$$h_c = 2.28H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT_p^2} \right) \quad (2)$$

- H_s representa a altura de onda significativa excedida durante 12 horas por ano, o que representa eventos extremos;
- T_p é o período de pico associado a esses eventos;
- g é a aceleração gravítica (9,81 m/s²).

Para o trecho Esmoriz-Furadouro, esta fórmula resulta em valores compreendidos entre -9,7 m e -10,2 m para profundidade de fecho.

A adoção do valor -10,5 m para a profundidade de fecho justifica-se pelo seu suporte de observações reais e pela sua coerência com os resultados provenientes da fórmula de Hallermeier. Esta escolha de valor tem como objetivo garantir a correta definição do perfil ativo da praia, fundamental para o cálculo da altura do perfil ativo no modelo *ShorelineS*, que influencia diretamente os gradientes de transporte sedimentar.

5.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO SHORELINES

A calibração do modelo numérico consistiu num processo inicialmente exploratório e posteriormente iterativo, crucial para assegurar que a simulação da evolução morfológica da linha de costa fosse o mais realista possível e se aproximasse dos padrões erosivos observados no período entre 2018 e 2020 no Furadouro. O processo iterativo de calibração visou corrigir os principais parâmetros de entrada do modelo de modo a minimizar o desvio entre a linha simulada e a linha de costa real observada, obtida a partir dos levantamentos topo-hidrográficos.

A análise dos resultados baseou-se na comparação espacial direta entre a linha de costa simulada pelo modelo, e a linha de referência extraída do ano 2020, com recurso à medição do desvio no

plano horizontal entre pontos de controle correspondentes ao longo de toda a linha de costa. Esta metodologia permitiu analisar e avaliar a fidelidade e o realismo da simulação no domínio da posição planimétrica da linha de costa. Assim, o objetivo ao minimizar esse desvio do posicionamento, era garantir a coerência física dos parâmetros bem como a correta representação dos processos físicos morfodinâmicos preponderantes na região em estudo. Os parâmetros-chave presentes no modelo *ShorelineS*, para os quais foram testados diversos conjuntos de valores são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros-chave iterados no modelo *ShorelineS*.

Parâmetro (código)	Descrição Técnica	Valor Utilizado
S.b	Coefficiente que controla o transporte sedimentar na fórmula empírica CERC3. (Posteriormente substituída pela fórmula Van Rijn 2014).	0.5e ⁶ a 1.0e ⁶ (CERC3)
S.d	Altura do perfil ativo, isto é, a zona onde efetivamente ocorre o transporte, tem impacto direto sobre o volume sedimentar mobilizável.	12 m
S.boundary_condition_start	Condições Fronteira	'Fixed'
S.boundary_condition_end		'Fixed'

Durante os testes iterativos ao modelo, constatou-se que a configuração do modelo com a formulação CERC3 tendia a produzir padrões de erosão excessiva, sobretudo a barlamar da zona entre esporões. Para atenuar este comportamento errado, procedeu-se a uma nova configuração do modelo utilizando a fórmula VR14 (Van Rijn, 2014), mais avançada e que considera explicitamente as dimensões dos sedimentos, ao contrário da formulação CERC3. Esta inclusão do diâmetro médio dos sedimentos (D_{50}) permite uma modelação mais sensível e próxima do comportamento real da praia.

Além disso, foi testado ainda o impacto da ativação e desativação de processos físicos, nomeadamente a difração de ondas (S.diffraction) e o fenómeno de overwash (S.overwash), processos que influenciam diretamente a distribuição dos sedimentos nas imediações das estruturas rígidas. O estudo da configuração destes fenómenos permitiu observar que a sua ativação conjugada ao correto ajuste dos parâmetros físicos, contribuiu para melhorias significativas nos resultados da evolução da linha de costa. No final do processo iterativo selecionou-se a configuração de parâmetros que melhor representava a evolução da praia, isto é, a configuração que apresentava a correspondência mais próxima entre a linha simulada e a linha de costa de referência.

Além dos parâmetros mencionados anteriormente (coeficiente de transporte sedimentar, a altura do perfil ativo, o declive médio do perfil da praia e condições fronteira), a configuração do modelo *ShorelineS* exige a definição de um conjunto adicional de parâmetros operacionais e físicos que garantem o correto funcionamento do programa bem como o realismo da simulação. Estes parâmetros têm influência direta sobre a estabilidade, a resolução e a representação dos processos hidrodinâmicos simulados. Na Tabela 3 estão descritos os valores adotados para cada parâmetro, bem como a descrição fundamental de cada um.

Tabela 3 - Parâmetros de configuração do modelo *ShorelineS*.

Parâmetro (código)	Descrição Técnica	Valor Utilizado
S.phif	Orientação offshore da linha de costa. Determina o eixo de referência para a transformação angular das ondas, crucial para o cálculo do transporte direcional.	290° Norte
S.ds0	Espaçamento inicial da grelha – define a resolução espacial. Quanto mais baixo o valor, mais alta a resolução, porém torna o modelo mais pesado.	50 m
S.maxangle	Ângulo máximo admitido entre a direção de propagação das ondas e a linha de costa.	45°
S.smothfac	Fator de suavização – evita oscilações numéricas bruscas, maior detalhe implica valores mais baixos.	0.01
S.ld	Comprimento ao longo do qual é dissipada ou difratada a energia das ondas.	1000 m
S.diffraction	Difração das ondas – Quando ativo, simula a dispersão da energia das ondas em zonas protegidas (ou zonas de sombra) por estruturas.	1 (ativo)
S.overwash	Simula o transporte de sedimentos por sobrelevação se a largura do cordão dunar for inferior ao limiar definido.	1 (ativo)
S.spit_width	Largura mínima definida do cordão dunar. Abaixo do valor definido o modelo considera o transporte por sobrelevação.	50 m
S.beta	Declive médio do perfil transversal da praia ($\tan\beta$). Controla o transporte nas fórmulas que o incluem, como VR14. Praias dissipativas apresentam habitualmente valores entre 0.015 e 0.025.	0.025
S.dnearshore	Profundidade da zona de rebentação ou zona ativa. Utilizada no cálculo da direção de onda na aproximação à costa.	10 m
Sddeep	Profundidade de referência em offshore. Utilizada na simulação da transformação das ondas e no cálculo do transporte.	20 m
S.dirspr	Espalhamento direcional das ondas. Distribui a energia das ondas por mais direções, o que resulta na atenuação da ação direta da agitação marítima.	20°
S.Aw	Influência angular no cálculo do transporte. Controla a sensibilidade das taxas de transporte com base no ângulo de incidência das ondas.	5

5.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo consiste na comparação direta entre os resultados provenientes da simulação final da evolução da linha de costa e a linha real observada com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo *ShorelineS* de previsão e representação dos processos físicos. Assim, procedeu-se à comparação da linha de costa final, obtida da simulação do período entre setembro de 2018 e julho de 2020, com a linha de costa extraída do levantamento topo-hidrográfico de 2020 conduzido pelo Programa COSMO.

A simulação foi conduzida com dados de entrada reais da posição da linha de costa e das condições da agitação marítima referentes ao período mencionado, e calibrada iterativamente com base na análise dos resultados, até estes serem satisfatórios. A comparação foi feita através da sobreposição espacial das linhas de costa simulada e real, com recurso ao software QGIS, que permitiu a análise visual, bem como a medição ponto-a-ponto dos vértices de referência ao longo do perfil da costa com o intuito de identificar as zonas de maior e menor precisão.

De um modo geral, os resultados finais da simulação revelam boa correspondência com a linha de referência. Embora estes resultados sejam bastante próximos, verificam-se algumas imprecisões de pequena escala nas zonas adjacentes aos esporões, Figura 30, o que se justifica pela complexidade dos processos hidrodinâmicos e a interação com as estruturas rígidas que dificultam a reprodução exata dos padrões de erosão e acumulação. Por sua vez, nas zonas livres da faixa costeira, a simulação demonstrou estabilidade e boa concordância com a linha de costa real, Figura 31.



Figura 30 - Comparação nas zonas adjacentes aos esporões. a) esporão sul, b) esporão norte.

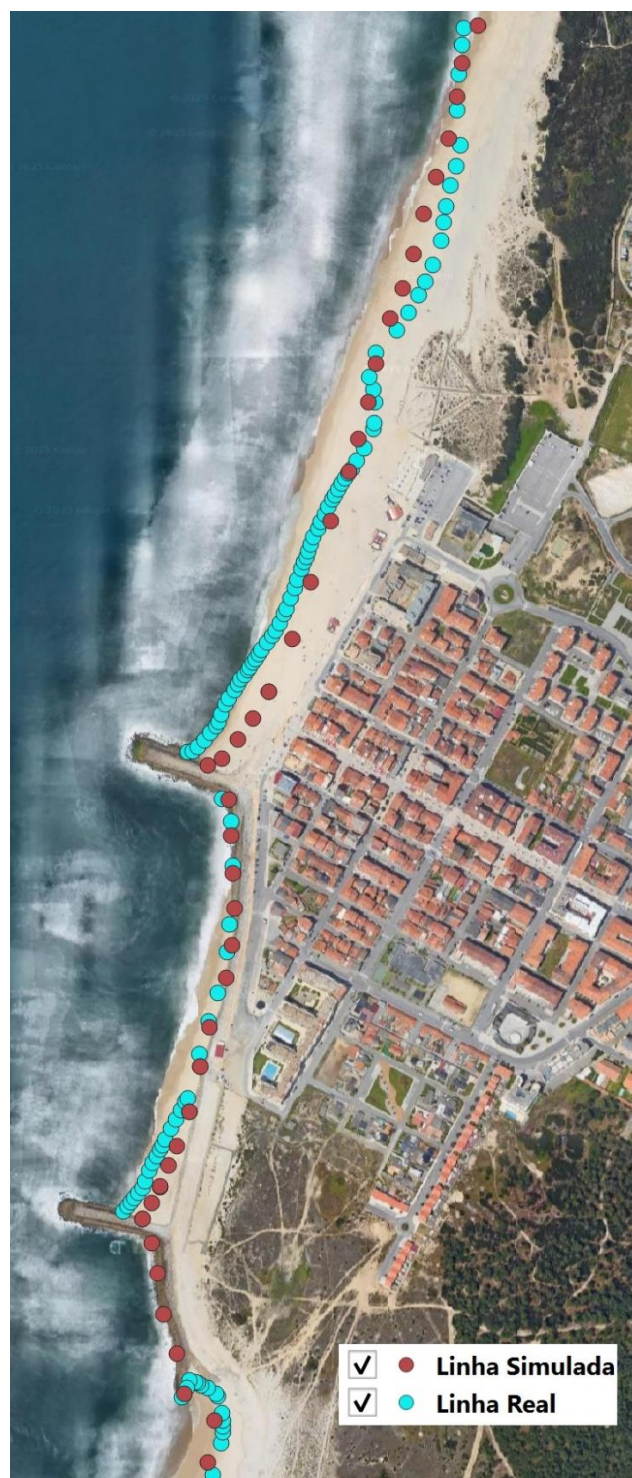


Figura 31 - Comparação entre a linha de costa simulada e linha real observada.

Esta análise dos resultados confirma que, apesar de algumas limitações pontuais de pequena escala, o modelo *ShorelineS* apresenta um comportamento satisfatório no estudo da evolução morfológica da linha de costa, revelando-se assim como uma ferramenta capaz e robusta para aplicação em cenários reais após a correta calibração.

5.5. VANTAGENS E LIMITAÇÕES OBSERVADAS

A aplicação do modelo *ShorelineS* ao caso de estudo da Praia do Furadouro revelou-se significativamente vantajosa, ilustrando que o modelo é uma ferramenta robusta e promissora para estudos de evolução costeira. Uma das principais mais-valias do programa é a sua capacidade de simular os processos morfodinâmicos da linha de costa para largas escalas temporais e espaciais com base em parâmetros físicos realistas e fórmulas empíricas de transporte sedimentar bem estabelecidas. A baixa exigência computacional e a relativa simplicidade de configuração, associadas à possibilidade de integrar estruturas costeiras e variações sedimentares, permitem adaptações eficazes a diferentes cenários em estudo, bem como a diferentes realidades geomorfológicas.

A possibilidade de utilizar diferentes formulações de transporte e adaptar o modelo a cada caso de estudo e a inclusão de variáveis geométricas como a dimensão dos sedimentos, contribuem para a coerência do modelo em termos da representação dos processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos. No presente caso de estudo, a substituição da formulação CERC3 pela VR14 revelou melhorias evidentes na representação do modelo dos padrões de erosão e deposição.

Por sua vez, durante o processo de calibração e validação do modelo, identificaram-se algumas limitações do modelo. Nomeadamente, verificou-se que as zonas com maiores discrepâncias entre os resultados simulados e os dados reais eram as áreas adjacentes aos esporões existentes. Nestas zonas, a complexidade da interação entre os processos hidrodinâmicos e as estruturas rígidas não foi totalmente reproduzida pelo programa, o que resultou em desvios, de pequena escala, na representação da posição da linha de costa no final da simulação.

Importa mencionar que estas limitações não invalidam a capacidade do modelo. No entanto sublinham a importância de um processo de calibração extenso e minucioso, bem como da inclusão de dados e parametrizações detalhadas para a correta representação dos efeitos das estruturas costeiras sobre a dinâmica sedimentar. Adicionalmente, concluiu-se que a ausência de processos transversais, como o transporte *cross-shore* ou as variações do perfil batimétrico, limitam a aplicação do modelo *ShorelineS* em casos de estudo nos quais estes sejam os processos dominantes.

Concluindo, o modelo *ShorelineS* revelou um desempenho robusto e coerente em zonas livres e afastadas das estruturas de defesa costeira, devolvendo resultados bastante próximos da realidade da evolução da linha de costa, validando assim a sua aplicabilidade em estudos de planeamento e apoio à tomada de decisão no contexto da gestão costeira.

6

ANÁLISE DE PROPOSTAS DE INTERVENÇÃO

Com base na análise da evolução morfológica da linha de costa desenvolvida no capítulo anterior, verificaram-se padrões sistemáticos de remoção de sedimentos na faixa costeira do Furadouro, com impactos particularmente visíveis no trecho central da praia, entre esporões. Esta constatação revela a necessidade de implementação de medidas mais eficazes de mitigação da erosão que promovam a estabilidade costeira. Assim, neste capítulo são propostas três soluções distintas para enfrentar os problemas na Praia do Furadouro, testadas numericamente com recurso ao modelo *ShorelineS*, com as quais se espera contribuir para a reconfiguração sustentável do perfil costeiro nesta região. As simulações foram realizadas para um período de 10 anos, de modo a compreender a evolução morfológica da linha de costa em resposta a este tipo de intervenções.

6.1. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE AREIA**6.1.1. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA**

A primeira proposta consiste na execução de duas alimentações artificiais de sedimentos no trecho a norte da Praia do Furadouro, numa extensão de aproximadamente 600 m, Figura 32. Cada operação de alimentação consiste em 600 000 m³ de areia num processo contínuo ao longo de 6 meses, e um intervalo temporal de 5 anos entre cada intervenção.

A alimentação artificial foi integrada no modelo *ShorelineS* através da função própria de inserção de sedimentos, assegurando assim uma taxa contínua e constante de alimentação ao longo desse período. Este tipo de abordagem pretende maximizar a redistribuição natural dos sedimentos pela ação das ondas e das correntes longitudinais.

6.1.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos, Figura 33, revelam que a introdução de sedimentos no sistema resultou numa clara redistribuição dos mesmos ao longo do domínio modelado. Observou-se uma tendência de acumulação significativa no trecho imediatamente a Sul do setor urbano da Praia do Furadouro. Este tipo de comportamento confirma a eficácia parcial deste tipo de intervenção em promover a acumulação de sedimentos a jusante, em resposta ao transporte litoral, dominante de Norte para Sul.

No entanto, no trecho Norte da praia, incluindo na própria zona de alimentação, verificou-se um padrão de intensa erosão que resultou no recuo significativo da linha de costa. A ausência de mecanismos de retenção sedimentar ao longo da zona de intervenção parece ter dificultado a fixação do volume de sedimentos introduzido, permitindo um transporte quase imediato para sotamar. Este tipo de comportamento é comum em cenários de alimentações artificiais mal confinadas, nas quais os sedimentos colocados não permanecem no local pretendido, diluindo o seu volume ao longo do litoral. Adicionalmente, foi possível identificar que na zona entre esporões, no trecho central da Praia do Furadouro, não se registaram alterações significativas ao cenário atual, não se verificando a ocorrência de acumulação sedimentar.

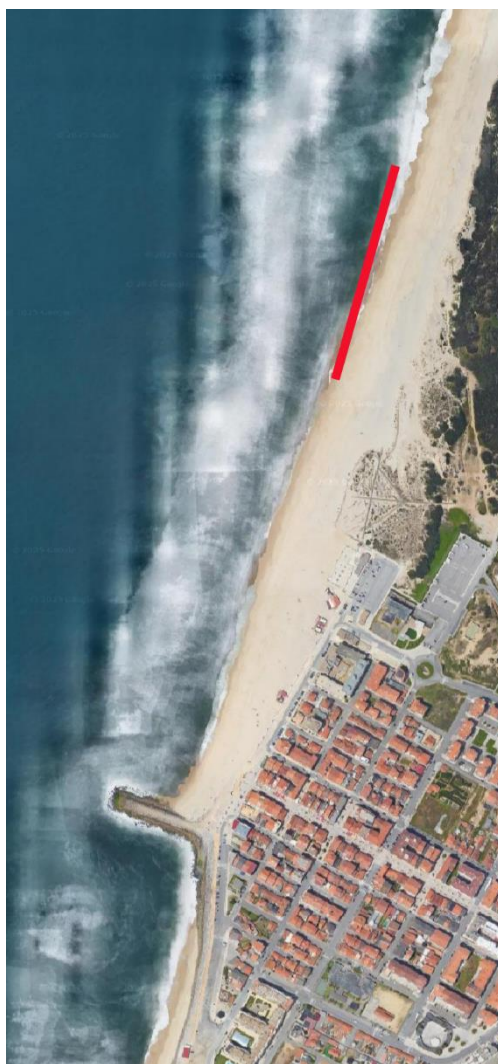


Figura 32 - Localização da alimentação artificial.

Na Figura 33, é representada a posição inicial da linha de costa e a sua evolução ao longo do período simulado. A linha que limita a área preenchida em cada figura corresponde à posição da linha de costa em cada iteração.

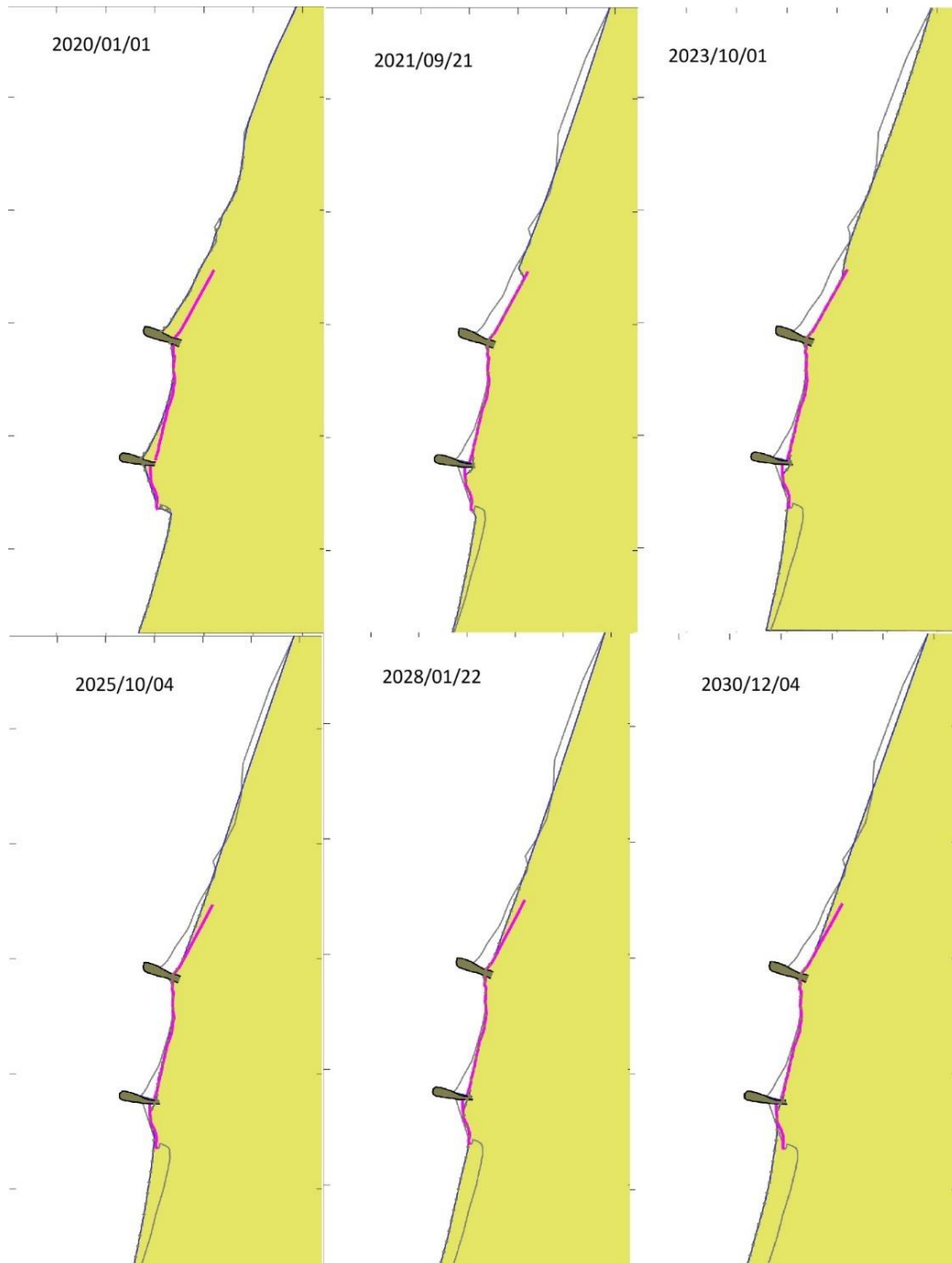


Figura 33 - Resultados da simulação, proposta 1.

Concluindo, a proposta de alimentação artificial revelou-se eficaz em promover a acumulação de sedimentos no setor Sul da praia, mas falhou em assegurar condições de proteção generalizada e homogênea ao longo do trecho costeiro. A concentração do volume sedimentar a jusante e a erosão verificada a montante, indicam que este tipo de intervenção poderá necessitar de ser realocizada ou complementada com mecanismos de retenção de sedimentos de modo a maximizar os benefícios da operação.

6.2. PROLONGAMENTO DOS ESPORÕES EXISTENTES EM “T”

6.2.1. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

A segunda intervenção é baseada na proposta apresentada por Ferreira (2023), na qual é sugerido o prolongamento dos esporões existentes na Praia do Furadouro e a construção de uma proteção paralela à linha de costa, formando esporões em “T”, Figura 34.



Figura 34 - Proposta de intervenção na Praia do Furadouro (Ferreira, 2023).

Esta configuração em “T” tem como objetivo criar zonas de sombra hidrodinâmica a sotamar das estruturas, o que potencia a acumulação de sedimentos, e consequentemente, o alargamento da praia nessa região. Estes tipos de estruturas demonstraram elevada eficácia em sistemas costeiros em situação de déficit sedimentar, ao promoverem a estabilidade da linha de costa e a proteção da zona de praia emersa.

A proposta consiste no prolongamento de cerca de 100 m do esporão Norte e de 60 m no esporão sul, visando aumentar a sua eficácia na interrupção da deriva litoral. Adicionalmente, visa um alargamento transversal na zona da cabeça de cada um dos esporões, de aproximadamente 200 m no esporão Norte e 150 m no esporão sul. Não se prevê a alteração da altura das estruturas, mantendo a cota máxima atual.

Esta proposta foi integrada no modelo *ShorelineS* através da atualização do ficheiro de coordenadas dos esporões existentes. Com recurso ao QGIS, foram alteradas as coordenadas das estruturas de modo a replicar a nova configuração. Os restantes parâmetros de configuração do modelo numérico foram mantidos de modo a isolar o efeito da alteração da geometria das estruturas.

6.2.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados da simulação da segunda proposta testada indicaram uma resposta morfodinâmica distinta face à proposta anterior, Figura 35. Verificou-se, tal como no cenário da alimentação artificial, uma situação de erosão no trecho Norte da praia. No entanto, a resposta na restante faixa costeira foi significativamente mais positiva. Observou-se, na zona central entre esporões, uma acumulação expressiva de sedimentos, o que evidencia o efeito esperado de retenção e proteção local dos prolongamentos laterais nas cabeças dos esporões. Na zona a jusante das estruturas, verificou-se a estabilidade da linha de costa, com variações pontuais, refletindo um equilíbrio sedimentar eficiente.

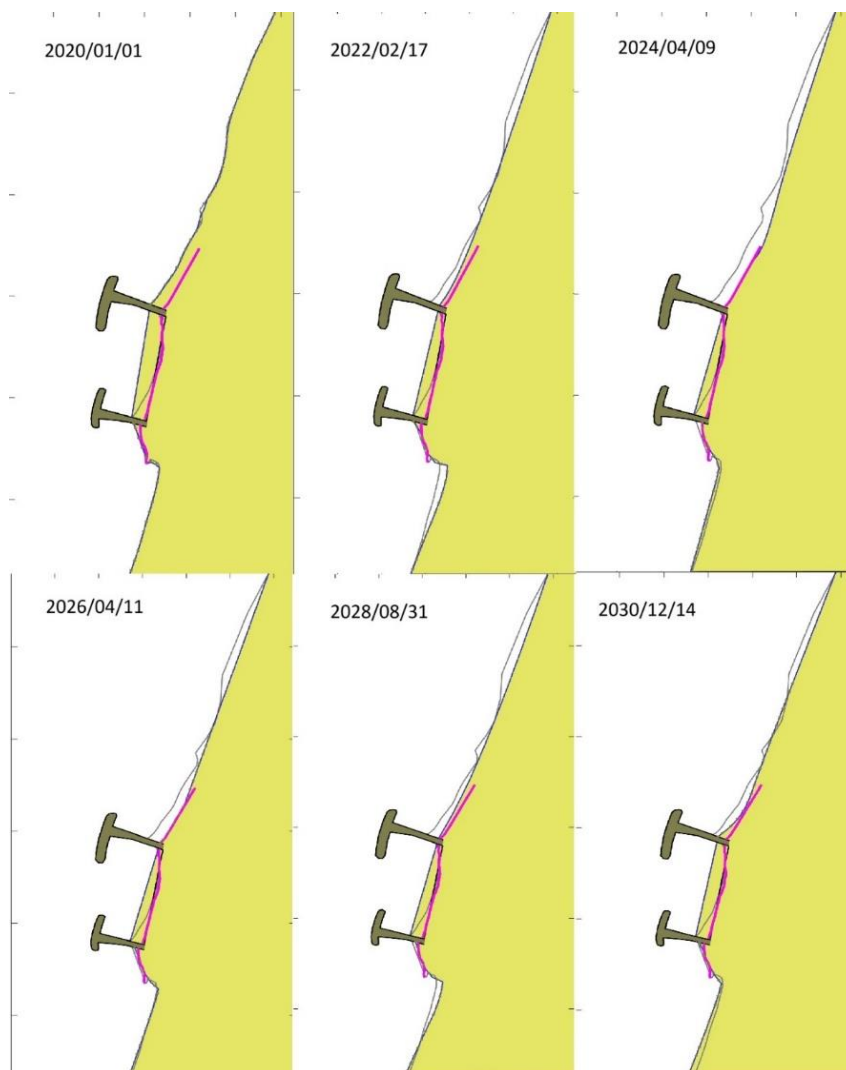


Figura 35 - Resultados da simulação, proposta 2.

Apesar das melhorias observadas em termos de acumulação sedimentar entre estruturas e estabilidade no setor Sul da praia, é importante referir que os prolongamentos considerados nesta proposta foram bastante expressivos em termos de dimensões. A sua implementação, à escala real, poderá revelar-se tecnicamente desafiante e economicamente dispendiosa, para além de que seriam expectáveis impactos negativos significativos a sul, pelo que esta proposta, apesar de eficaz do ponto de vista da modelação numérica, poderá ser considerada irrealista em termos práticos.

6.3. PROLONGAMENTO EM “Y” DO ESPORÃO NORTE

6.3.1. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

A terceira proposta apresentada consiste na reconfiguração do esporão norte da Praia do Furadouro, adotando uma geometria em “Y”, baseada na proposta desenvolvida por Marques (2021), Figura 36. Nesta proposta, o esporão existente no local, é prolongado 40 m e a sua cabeça é modificada em forma de “Y”. A estrutura proposta é do tipo mergulhante, ou submersa, com o objetivo de reduzir o seu impacto visual e os custos associados (Marques, 2021). Este tipo de estrutura de defesa em “Y”, ou “Rabo de Peixe”, pretende melhorar a eficiência da estrutura na difração das ondas e na redução da sua energia, e ainda promover a acumulação de sedimentos na zona protegida, representada na Figura 37.

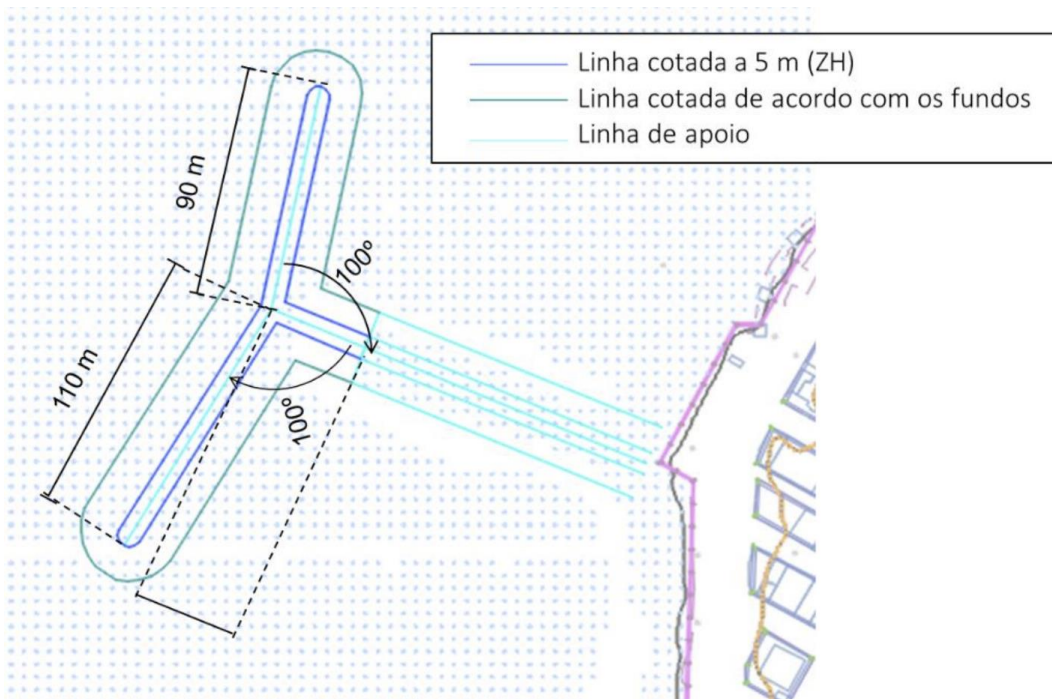


Figura 36 - Dimensões em planta da proposta de reconfiguração do esporão norte da Praia do Furadouro (Marques, 2021).

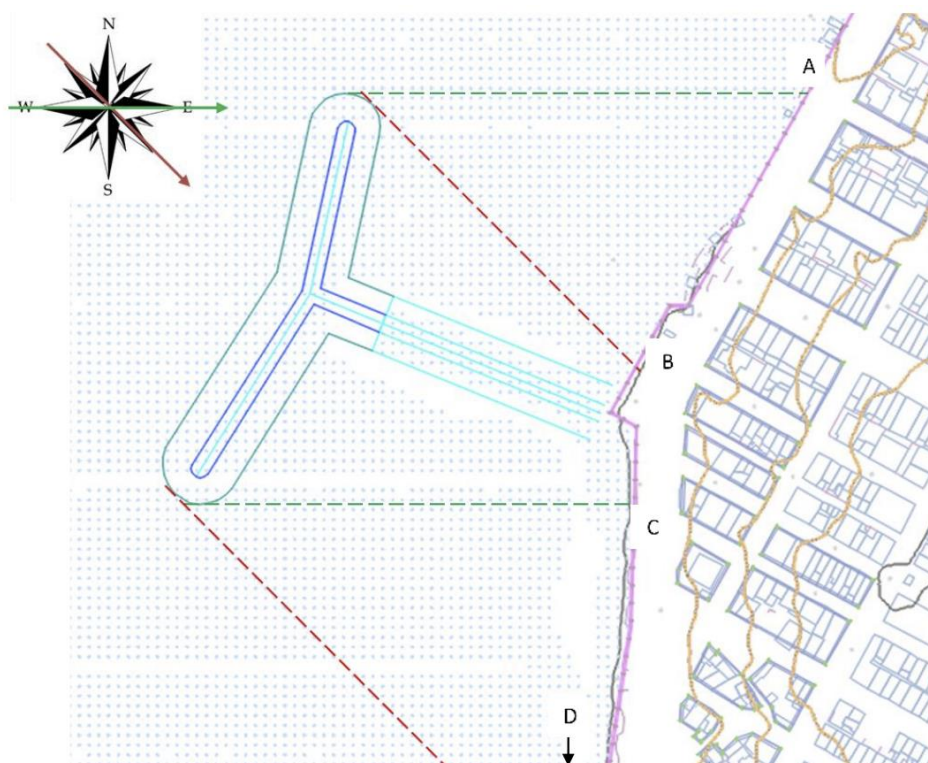


Figura 37 - Esquema representativo da área protegida pelo esporão (Marques, 2021).

Esta proposta foi testada no modelo *ShorelineS*, considerando as mesmas condições hidrodinâmicas aplicadas nos cenários anteriores.

6.3.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos com esta terceira proposta de intervenção, revelam um comportamento em geral positivo e mais equilibrado da linha de costa ao longo de todo o domínio simulado, Figura 38. Destaca-se, na simulação da reconfiguração do esporão, uma acumulação de sedimentos na zona protegida pela estrutura, o que sugere que as modificações estruturais foram capazes de atenuar a deriva litoral predominante, criando uma zona de sombra hidrodinâmica que favorece a retenção de sedimentos.

Ao contrário das propostas anteriores, nas quais se observou um recuo acentuado da linha de costa a Norte das intervenções, neste cenário verificou-se um comportamento compatível com os padrões erosivos naturais da região, e ainda o avanço geral da linha de costa em certos anos.

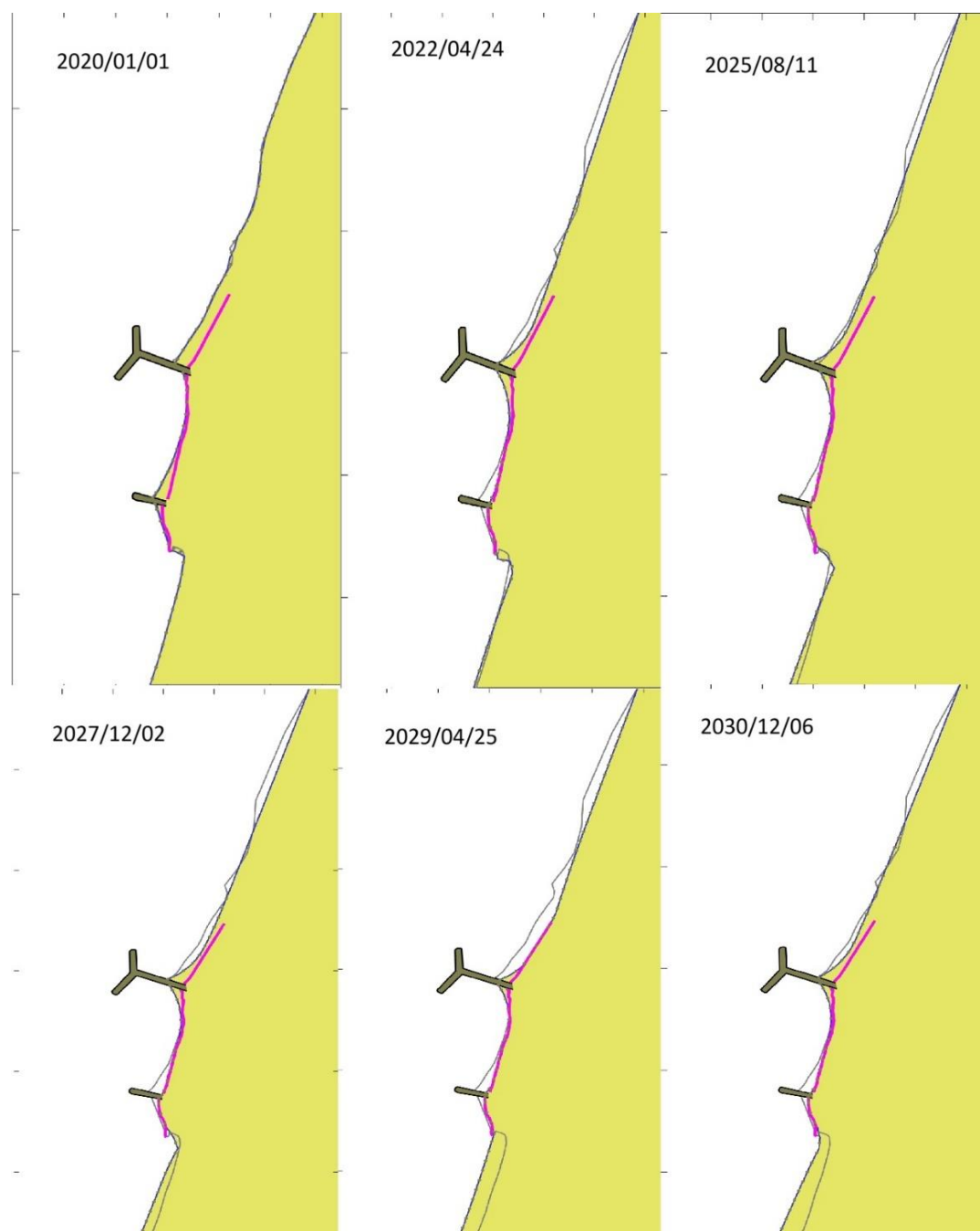


Figura 38 - Resultados da simulação, proposta 3.

De um modo geral, esta proposta não promove uma expansão expressiva da linha de costa, mas consegue garantir uma proteção eficaz contra a erosão, assegurando assim a estabilidade da faixa costeira e a salvaguarda das infraestruturas e zonas mais vulneráveis. Trata-se, assim, de uma solução que procura promover a estabilização morfológica sustentável em detrimento do aumento do território arenoso disponível.

6.4. COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

A comparação entre as três soluções propostas para a mitigação da erosão costeira evidencia diferentes abordagens com vantagens e limitações específicas. A primeira proposta – alimentação artificial de sedimentos – destaca-se pela relativa facilidade de implementação e pela reposição direta de areia na faixa costeira, o que promove um ganho imediato de volume sedimentar. No entanto, esta intervenção apresenta um curto prazo de eficácia e elevada suscetibilidade à erosão, pelo que exige a repetição periódica e tem, por isso, elevados custos de manutenção associados.

A proposta dos prolongamentos em “T” dos esporões, oferece maior eficácia na retenção de sedimentos e proteção localizada, nomeadamente na zona entre as estruturas. Apesar da eficácia observada, esta intervenção tem impactos significativos no regime hidrodinâmico e paisagístico, bem como os elevados custos de implementação.

O prolongamento em “Y” do esporão norte insere-se como uma solução intermédia, garantindo a estabilidade do comportamento da linha de costa e redução dos padrões erosivos ao longo da praia. Contudo, a sua configuração mais complexa e pouco convencional pode levantar dúvidas quanto à sua viabilidade técnica, bem como a aceitação social. Concluindo, a escolha da intervenção que melhor se insere no caso de estudo está dependente do equilíbrio entre eficácia, durabilidade, impacto ambiental e custos associados.

6.5. CONCLUSÕES

A simulação de intervenções costeiras no modelo *ShorelineS* permite uma avaliação detalhada do seu funcionamento e eficácia a médio e longo prazo, representando o comportamento da linha de costa em resposta a diferentes tipos de estratégias de mitigação da erosão. Cada proposta estudada apresenta interações distintas com os processos de transporte sedimentar contemplados no modelo numérico, demonstrando a forma como o *ShorelineS* retrata a hidrodinâmica costeira e os processos físicos associados à deposição ou remoção de sedimentos.

Na proposta de alimentação artificial, o modelo permite a introdução direta de volumes sedimentares em zonas definidas pelo utilizador, bem como a definição da duração do intervalo de tempo no qual são distribuídos. Esta funcionalidade do programa representa corretamente a dinâmica inicial de distribuição dos sedimentos, especialmente a sotamar da zona de alimentação. No entanto, uma vez que o *ShorelineS* não contempla diretamente mecanismos e processos de compactação e distribuição transversal dos sedimentos, o modelo tende a representar uma redistribuição rápida o que resulta em pouca retenção no local de deposição, particularmente em zonas expostas. Esta limitação poderá explicar a erosão verificada no trecho alimentado, o que por sua vez evidencia a sensibilidade do modelo perante a intensidade do transporte litoral.

Para simular a proposta dos prolongamentos em “T” dos esporões, recorreu-se à capacidade do modelo de representar estruturas rígidas, através da definição de linhas de bloqueio que condicionam o transporte sedimentar. O modelo revelou-se eficaz na representação da acumulação de sedimentos na zona entre as estruturas, onde a influência da deriva litoral é

significativamente reduzida, e possibilitou a simulação de padrões de deposição típicos em zonas protegidas. Porém, a simplificação da hidrodinâmica costeira limita a simulação completa de fenómenos complexos como a reflexão das ondas ou variações tridimensionais que influenciam o comportamento real das estruturas.

Por fim, verificou-se uma resposta positiva do modelo à introdução da proposta do prolongamento em “Y” do esporão Norte. A reconfiguração geométrica foi introduzida como uma combinação de linhas de bloqueio, respeitando a configuração em planta proposta por Marques (2021). O *ShorelineS* confirmou a sua capacidade de representar eficazmente a acumulação de sedimentos na zona protegida pela nova configuração, adicionalmente o modelo previu um comportamento estável da linha de costa com menor erosão a montante das estruturas. A resposta obtida é coerente com a capacidade do modelo de representar variações nos padrões de refração e de materialização de uma zona de sombra promovida por estruturas costeiras, apesar de se verificarem algumas limitações na representação dos processos hidrodinâmicos nas imediações das estruturas.

Concluindo, o modelo numérico *ShorelineS* afirma-se como uma ferramenta útil e relativamente robusta para a análise preliminar de intervenções costeiras de grande escala, permitindo simular cenários com diferentes tipologias estruturais e várias estratégias de proteção costeira. Importa referir que a interpretação dos resultados deve considerar as limitações intrínsecas do modelo, nomeadamente a representação de processos tridimensionais e interações complexas da dinâmica costeira sobre estruturas.

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A presente dissertação teve como principal objetivo a análise da evolução morfológica da linha de costa na Praia do Furadouro, através da aplicação do modelo numérico *ShorelineS*. Com base numa abordagem fundamentada em dados reais e em simulações numéricas sistemáticas, foi possível a reprodução dos principais padrões de erosão e acumulação observados na área em estudo, ou seja, a validação do modelo numérico e a análise de diferentes intervenções.

O estudo realizado para o intervalo de 2018 a 2020, com recurso a levantamentos topo-hidrográficos e séries temporais de condições marítimas, permitiu verificar que o modelo *ShorelineS* consegue representar de forma satisfatória a evolução da linha de costa. Apesar da identificação de algumas irregularidades, sobretudo nas imediações das estruturas existentes, a concordância em geral foi positiva, confirmando a utilidade da ferramenta na representação e simulação de processos físicos da morfodinâmica costeira.

A introdução das propostas de estratégias de mitigação permitiu aprofundar a análise bem como a compreensão do comportamento da linha de costa perante as diferentes intervenções simuladas. A alimentação artificial de sedimentos, apesar de representar uma solução ambientalmente mais sustentável, revelou fragilidades no que concerne à retenção de sedimentos, que resultou em erosão expressiva em grande parte do domínio simulado, incluindo o próprio local de deposição. Esta resposta evidencia a limitação do modelo na representação dos processos transversais do transporte sedimentar e revela ineficácia da intervenção na ausência de mecanismos de retenção física.

A proposta da reconfiguração em “T” dos esporões revelou-se eficaz na acumulação de sedimentos entre as estruturas, assegurando a proteção da zona de praia entre os esporões. No entanto, identificou-se, à semelhança da proposta anterior, a aceleração significativa do processo erosivo no trecho Norte da praia. Adicionalmente, a dimensão dos prolongamentos propostos pode ser considerada irrealista em termos técnicos e ambientais, o que põe em causa a viabilidade prática da sua implementação.

Por fim, a terceira proposta – o prolongamento em “Y” do esporão norte – revelou um comportamento mais equilibrado globalmente, no qual se verificaram acumulações de sedimentos nas zonas protegidas e uma redução da erosão nas zonas mais expostas, consequentemente mais vulneráveis. Esta modificação da geometria do esporão permitiu a criação de uma zona de sombra energética, que contribuiu para a estabilização da posição da linha de costa, sem comprometer significativamente os fluxos sedimentares. Apesar de, tal como a proposta anterior, ser uma intervenção estrutural, o seu impacto visual e físico pode ser reduzido em comparação com outras propostas mais intrusivos.

Assim, é possível concluir que o modelo *ShorelineS* representa uma ferramenta robusta para a análise de longo prazo da evolução morfológica da linha de costa, particularmente quando combinado com dados reais de elevada resolução. No entanto, como já foi mencionado anteriormente, importa sublinhar que a abordagem unidimensional limita a representação de fenómenos complexos, incluindo processos tridimensionais, processos transversais de transporte e efeitos de eventos extremos.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No seguimento deste trabalho, identificam-se diversas direções promissoras para investigações futuras que poderão contribuir para o enriquecimento da compreensão da dinâmica costeira e da melhoria da eficácia das estratégias de mitigação. Uma das recomendações de maior interesse é a integração do modelo *ShorelineS* com outros modelos numéricos complementares mais complexos, como o XBeach ou o Delft3D, permitindo assim caracterizar com maior detalhe a resposta morfodinâmica do perfil costeiro.

Outra vertente relevante consiste na utilização do *ShorelineS* para o estudo de soluções híbridas como a combinação de alimentações artificiais com estruturas de retenção, como esporões ou barreiras submersas. Este tipo de abordagem poderá otimizar o volume de sedimentos necessário para garantir a máxima eficácia na estabilização da linha de costa. Paralelamente, propõem-se a realização de análises de sensibilidade dos principais parâmetros do modelo – como a granulometria, a inclinação média do perfil ou a influência angular das ondas - com o objetivo de detalhar a sua compreensão e otimizar o processo de calibração do modelo. Adicionalmente, é cada vez mais relevante desenvolver estudos e simulações que incluam cenários de subida do nível médio da água do mar e alterações climáticas, nomeadamente a maior frequência e intensidade de tempestades. Este tipo de análise permitiria avaliar a eficácia e resiliência das soluções propostas para cenários futuros. Por fim, destaca-se a importância de integrar uma avaliação económica e ambiental das soluções apresentadas, de modo a comparar o custo-benefício e os impactos ambientais associados a cada intervenção. Esta abordagem permitiria alinhar as capacidades da modelação científica com as necessidades práticas do planeamento sustentável do litoral.

Assim, a aplicação do modelo *ShorelineS* ao caso de estudo da Praia do Furadouro constitui um contributo relevante para a compreensão da erosão costeira em Portugal, reforçando a posição da modelação numérica como ferramenta prática e robusta de apoio à decisão e à definição de estratégias eficazes de proteção e adaptação da faixa costeira.

7.3. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Tabela 4 - Contributos da dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ODS	Meta	Contribuição	Indicadores de desempenho e métricas
ODS 13 – Ação Climática	Meta 13.1 – Reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados com o clima e catástrofes naturais	A dissertação contribui para a gestão costeira resiliente, através da simulação e análise de soluções que mitiguem os efeitos da erosão e da subida do nível da água do mar.	Avaliação qualitativa da eficácia das propostas de mitigação; comparação da evolução da linha de costa com e sem medidas
ODS 14 – Proteger a Vida Marinha	Meta 14.2 – Gerir e proteger de forma sustentável os ecossistemas marinhos e costeiros	As propostas de intervenção consideram soluções sustentáveis que minimizam a degradação ambiental, como a alimentação artificial.	Análise da estabilidade morfológica e potencial redução de intervenções invasivas no futuro
ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis	Meta 11.5 – Reduzir o impacto de desastres naturais nas populações costeiras	A aplicação do modelo <i>ShorelineS</i> permite simular impactos e planear medidas preventivas, protegendo infraestruturas e populações locais.	Número de cenários simulados e comparação dos efeitos com e sem intervenção
ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestruturas	Meta 9.5 – Melhorar a investigação científica e a capacidade tecnológica dos setores industriais e de engenharia	A dissertação promove o uso de modelação em engenharia costeira, contribuindo para inovação na gestão litoral.	Aplicação e validação do modelo numérico com dados reais; reprodutibilidade do método

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beach Nourishment – The addition of new material to a beach artificially, such as the dumping of large amounts of sand or shingle. Disponível em WWW: <<https://mammothmemory.net/geography/geography-vocabulary/coastal-landscapes-2/beach-nourishment.html>>. ISBN/ISSN:
- Abreu, Álvaro - Estudo da Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar na Zona Costeira de Esposende Recorrendo ao Modelo X-Beach. FEUP: Universidade do Porto, 2021. ISBN/ISSN:
- APA - Programa de Orla Costeira Ovar - Marinha Grande. (2015). ISSN:
- APA - APA atualiza diagnóstico do estado da faixa costeira. 2022. Disponível em WWW: <<https://apambiente.pt/destaque2/apa-atualiza-diagnostico-do-estado-da-faixa-costeira>>. ISBN/ISSN:
- APA - Riscos Ambientais - Linha de Costa em Situação de Erosão. 2024. Disponível em WWW: <<https://rea.apambiente.pt/content/linha-de-costa-em-situa%C3%A7%C3%A3o-de-eros%C3%A3o>>. ISBN/ISSN:
- Bastos, Rosário; Dias, João; Pereira, Olegário - Ressacas do mar/temporais e gestão costeira. Fortaleza, CE, Brasil: Editora Premium, 2015. Disponível em WWW: <https://www.researchgate.net/publication/282848752_Em_tempos_de_temporais_o_caso_do_Furadouro_NW_de_Portugal_como_exemplo_de_ingestao_do_litoral>.Cap. 3 - Em tempos de temporais: o caso do Furadouro (NW de Portugal) como exemplo de ingestão do litoral. ISBN:
- Bastos, Rosário; Pereira, Olegário - Mares e Litorais: Perspectivas transdisciplinares. UERJ, 2018. - Bem conhecer para melhor agir. A História Ambiental como ferramenta para a gestão costeira - o exemplo do Furadouro (PT). ISBN: 978-85-87245-02-1
- Coelho, Carlos; Lima, Márcia; Alves, Filipe Moreira; Roebeling, Peter; Ferreira, Ana Margarida; Matos, Fábio; Barbosa, Joaquim Pais; Filho, Luiz Magalhães; Vizinho, André; Santos, Filipe Duarte - INCCA: Adaptação Integrada às Alterações Climáticas para Comunidades Resilientes. Universidade de Aveiro, 2023. Disponível em WWW: <<http://hdl.handle.net/10773/36619>>. ISBN: 978-972-789-837-4
- Cruz, Telmo - Análise Custo-Benefício de Obras Longitudinais Aderentes. Universidade de Aveiro, 2015. ISBN/ISSN:
- DELTARES - DSD 2020: XBeach Basic Course - Morphodynamic modelling during storm conditions. 2020. ISBN/ISSN:
- Elghandour, Ahmed - Efficient modelling of coastal evolution - Development, verification and validation of ShorelineS model. Delft University of Technology, 2018. ISBN/ISSN:
- Fernandes, Luís - Modelação Numérica do Desempenho Hidráulico do Bloco de Proteção Costeira SWED-Block. FEUP: Universidade do Porto, 2018. ISBN/ISSN:
- Fernandes, Sofia - Analysis of Coastal Morphodynamics at Monthly Scale Using Bathymetric Surveys and Satellite Images. Universidade do Porto, 2025. ISBN/ISSN:
- Ferreira, Andreia; Fortes, Conceição; Reis, Maria; Garzon, Juan - Análise de eventos de risco através de modelação numérica XBeach. Caso de Estudo - Costa da Caparica. *Revista Recursos Hídricos*. Vol. 41. (2020). Disponível em WWW: <<https://www.researchgate.net/publication/350767443>>. ISSN:
- Ferreira, Daniela Gonçalves - Avaliação da Profundidade de Fecho ao Longo do Litoral de Portugal Continental. Universidade de Lisboa, 2023. Disponível em WWW: <[https://repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10451/64088/1/TM_Daniela_Ferreira.pdf#:~:text=Foi%20ainda%20calculada%20a%20profundidade%20de%20fecho,Algarve%20foi%20de%20cerca%20de%206m%20\(NMM\)](https://repositorio.ulisboa.pt/bitstream/10451/64088/1/TM_Daniela_Ferreira.pdf#:~:text=Foi%20ainda%20calculada%20a%20profundidade%20de%20fecho,Algarve%20foi%20de%20cerca%20de%206m%20(NMM))>. ISBN/ISSN:

- Ferreira, João - Projetar a frente marítima do Furadouro. Universidade do Minho, 2023. ISBN/ISSN:
- Fonseca, Diogo - Modelação da evolução da costa do Furadouro (Aveiro). Instituto Superior Técnico, 2015. ISBN/ISSN:
- Freitas, Joana; Dias, João - O Homem e as Zonas Costeiras. Faperj, 2015. Disponível em WWW: <https://www.researchgate.net/publication/282650796_Erosao_costeira_percecoes_impactes_e_estrategias_de_protecao_Os_casos_historicos_de_Espinho_e_do_Furadouro_Portugal>. Cap. - Erosão costeira: perceções, impactes e estratégias de proteção. Os casos históricos de Espinho e do Furadouro (Portugal). ISBN:
- Huisman, Bas; Roelvink, Dano - ShorelineS Reduced complexity coastline modelling for the assessment of climate impacts. Deltares, 2022. Disponível em WWW: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/dsdint-2022-shorelines-reduced-complexity-coastline-modelling-for-the-assessment-of-climate-impacts-huisman/254954294#1>>. ISBN/ISSN:
- Lima, Márcia; Marto, Marco; Alves, Filipe; Coelho, Carlos - Medidas de mitigação e adaptação à erosão costeira e aos efeitos das alterações climáticas. 2021. Consult. em 02-06-2025. Disponível em WWW: <https://www.researchgate.net/publication/354659176_Medidas_de_mitigacao_e_adaptacao_a_erosao_costeira_e_ aos_efeitos_das_alteracoes_climaticas>. ISBN/ISSN:
- LNEC - Efeitos de Escala em Modelação Numérica da Erosão de um Perfil de Praia. Lisboa: 2012. ISBN/ISSN:
- Marques, Maria - Avaliação de Soluções Para Redução do Risco de Galgamento em Frentes Costeiras Urbanizadas Para Diferentes Cenários de Alterações Climáticas. Universidade do Porto, 2021. ISBN/ISSN:
- Martins, Bernardo - Caracterização da Evolução Recente da Linha de Costa e Identificação de Zonas Vulneráveis no Trecho Costeiro Caminha - Espinho. FEUP: Universidade do Porto, 2023. ISBN/ISSN:
- Mesuras, Tiago - Estratégia de Adaptação de Frentes Urbanas ao Risco de Galgamentos e Inundações Costeiras - O Caso de Estudo do Furadouro (Ovar). Universidade Nova de Lisboa, 2018. ISBN/ISSN:
- Mudde, Casper - Development and Verification of ShorelineS on Longshore Sediment Transport and Spit Formation - A Case Study of Lobito, Angola. Delft University of Technology, 2019. ISBN/ISSN:
- Oliveira, Maria - Managed Retreat in low urbanized high-risk coastal areas: Proposal for a new Methodology Application to the Portuguese coast. Universidade do Porto, 2024. Disponível em WWW: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/165117/2/707282.pdf>>. ISBN/ISSN:
- Overgaauw, T. - Modelling shoreline evolution in the vicinity of shore normal structures - Implementation and validation of ShorelineS model using the case study of Constanta, Romania. Delft University of Technology, 2021. Disponível em WWW: <<https://resolver.tudelft.nl/uuid:ced9a5ad-fc3e-4e91-a2a2-1aa0d69af270>>. ISBN/ISSN:
- Perdiz, Luís - Galgamentos Costeiros na Costa Ocidental Portuguesa - Análise do Risco em Três Casos de Estudo. Universidade de Coimbra, 2020. ISBN/ISSN:
- Perry, Benjamin - Modelling Shoreline Dynamics and Management of Adelaide's Beaches at Seasonal to Decadal Timescales. Flinders University, 2025. ISBN/ISSN:
- Roelvink, Dano; Huisman, Bas - ShorelineS Technical Reference - Model description and reference guide to functionalities. Deltares, IHE Delft Institute of Water Education, 2015. ISBN/ISSN:

- Roelvink, Dano; Huisman, Bas; Elghandur, Ahmed; Ghonim, Mohamed; Reyns, Johan - Efficient Modeling of Complex Sandy Coastal Evolution at Monthly to Century Time Scales. *Frontiers in Marine Science*. (2020). ISSN:
- Santos, Filipe; Lopes, António; Moniz, Gabriela; Ramos, Laudemira; Taborda, Rui - Gestão da Zona Costeira O Desafio da Mudança -Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral. 2014. Disponível em WWW: <https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/docs/Relatorio_Fin al_GTL2015.pdf>. ISBN: 978-989-99962-1-2
- Silva, Raquel - Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa. Universidade do Porto, 2010. ISBN/ISSN:
- Taveira-Pinto, Francisco; Pais-Barbosa, Joaquim; Veloso-Gomes, Fernando - Coastline Evolution at Esmoriz-Furadouro Stretch (Portugal). *Journal of Coastal Research*. n.º 56 (2009). ISSN:
- Taveira Pinto, Francisco - Erosões Localizadas em Intervenções de Proteção Costeira Destacadas. Universidade do Porto, 2020. ISBN/ISSN:
- Veloso-Gomes, Fernando - Atas das 5ªs Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (ed. F. Taveira-Pinto). 2010. Disponível em WWW: <<https://hdl.handle.net/10216/102430>>. Cap. - Contributos para a revisão do plano de ordenamento da orla costeira na região Centro. ISBN: 978-989-95557-4-7
- Wiezer, Job - Improving a 1D coastline model for mega nourishments. Delft University of Technology, 2024. Disponível em WWW: <<https://repository.tudelft.nl/record/uuid:eff17878-5e1e-42cf-8f22-3b0fb4d437ed>>. ISBN/ISSN: