

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2020/2021

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA INTERVENÇÃO DE PROTEÇÃO COSTEIRA NO GANA: CASO DE ESTUDO

CAROLINA DIAS ANDRADE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Cidália Maria de Sousa Botelho

(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

Orientador académico: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

(Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia
Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Orientadora na empresa: Professora Doutora Luciana das Neves

(Engenheira Costeira Sénior na IMDC e Professora Auxiliar Convidada do
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto)

SETEMBRO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ catc@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

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

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

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

À minha família.

*However difficult life may seem, there is always
something you can do and succeed at.*

Stephen Hawking

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que me acompanharam e apoiaram na minha vida académica e pessoal, especialmente nesta etapa muito importante, e também aqueles que contribuíram para a realização e concretização desta dissertação.

Em primeiro lugar, um agradecimento especial ao Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos, como meu orientador académico, e à Professora Doutora Luciana das Neves, como minha orientadora da empresa, por toda a disponibilidade, orientação e apoio que me foi dada ao longo da realização desta dissertação.

Um agradecimento ao IMDC que tornou este trabalho possível, fornecendo dados referentes ao local de estudo.

Um agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por me ter proporcionado todo o material e conhecimento durante o Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente.

Um grande obrigado à minha família, que sem ela não conseguia alcançar o que já alcancei até hoje, que sempre me ajudou e apoiou nos bons e maus momentos da minha vida.

Ao Pedro Reis, por estar sempre ao meu lado e por me apoiar nos bons e maus momentos, ajudando a tornar-me numa pessoa melhor.

Por fim, não posso deixar de agradecer aos meus amigos que me acompanharam e apoiaram ao longo da minha vida académica e pessoal.

RESUMO

As zonas costeiras atraem cada vez mais pessoas pelo seu elevado valor turístico, habitacional e comercial. Por esse motivo, ao longo dos anos temos vindo a assistir a um contínuo e crescente desenvolvimento económico do litoral que, muito provavelmente, persistirá no presente século. Este crescimento resultou no aumento da densidade populacional nas zonas costeiras, sendo que atualmente 15 das 20 megacidades (mais de 10 milhões de habitantes) estão localizadas próximo da costa.

A alteração da morfologia costeira e dos padrões de transporte sedimentar, quer devido à construção de grandes infraestruturas (como portos ou barragens), quer devido à fixação de determinadas zonas da costa naturalmente dinâmicas, tem resultado num desequilíbrio do balanço sedimentar ao longo da costa e em situações de erosão costeira crónica. Atualmente, a erosão costeira afeta cerca de 70% das praias existentes no mundo.

Deste modo, esta dissertação teve como objetivo a análise do desempenho de uma intervenção de proteção costeira em Ada, no Gana, que envolveu a construção de um campo de esporões e uma intervenção de alimentação artificial com areias, tendo por base imagens de satélite. O trabalho desenvolvido compreendeu a análise da linha de costa de Ada, durante 8 anos de estudo (2013 – 2021) por compartimentos, a análise das zonas imediatamente a sotamar e a barlamar dos esporões, a análise do comportamento natural da linha de costa (antes da intervenção de alimentação artificial), e a análise do desempenho e da eficácia do sistema de proteção costeira implementado (após a intervenção de alimentação artificial).

Os resultados obtidos nesta dissertação mostram que apesar da tendência negativa na evolução da linha de costa que se verificou em dois dos 21 compartimentos analisados, das limitações do próprio método de análise (discutidas criticamente ao longo da dissertação) e das condicionantes locais e técnicas associadas ao dimensionamento das estruturas de proteção costeira, a linha de costa apresentou, globalmente, uma tendência positiva caracterizada por um significativo avanço da posição da linha de costa ao longo do período em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Alimentação artificial, Esporões, Gana, Proteção costeira, Soluções baseadas na natureza, *Coastsat*.

ABSTRACT

Coastal areas have become more popular due to their high tourist, housing, and commercial value. Therefore, over the years, a continuous and growing economic development of the coast has been observed, which will persist in the next years. This coastal growth has resulted in an increase in population density in coastal areas, where 15 of the world's 20 megacities (with more than 10 million people) are located.

The change in coastal morphology and sedimentary transport patterns, due to the construction of large infrastructures (such as ports or dams) or the fixing of naturally dynamic areas, has resulted in a disproportion of the sedimentary balance along the coast and in situations of chronic coastal erosion. Currently, coastal erosion affects about 70% of the world's beaches.

Thus, this dissertation aimed at analyzing the performance of a coastal protection intervention in Ada, Ghana, which involved the construction of a groynes field and an artificial sand nourishment operation, based on satellite images. The study carried out included the detailed analysis of the Ada coastline for 8 years (2013 – 2021) by compartments, the analysis of the areas updrift and downdrift of the groynes, the analysis of the natural behavior of the shoreline (before the artificial nourishment intervention), and the analysis of the performance and effectiveness of the coastal protection system implemented (after the artificial nourishment intervention).

The results obtained in this dissertation shown that despite the negative tendency in the evolution of the coastline observed in two of the 21 compartments analyzed, the intrinsic limitations of the method of analysis and the local and technical constrains in the design of the coastal protection structures, in general, the shoreline evolution showed a positive trend that can be characterized by a significant advancement of the position of the shoreline throughout the study period.

KEYWORDS: Artificial nourishment, Groynes, Ghana, Coastal protection, Nature based solutions, *Coastsat*.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
 2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA BASEADOS NA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE AREIAS E ESPORÕES	 5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CASOS DE ESTUDO INTERNACIONAIS	6
2.2.1. Flórida	6
2.2.2. Croácia	10
2.2.3. Bélgica.....	13
2.2. CASOS DE ESTUDO NACIONAIS.....	15
2.2.1. Costa da Caparica	15
2.2.2. Algarve	18
2.2.2.1. Praia da Rocha	18
2.2.2.2. Praia da Quarteira	20
2.2.2.3. Vale do Lobo	21
2.2.3. Figueira da Foz	21
2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
 3. CONCEÇÃO E DIMENSIONAMENTO	 25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. ESPORÃO.....	25
3.2.1. Transposição de Sedimentos.....	26
3.2.2. Processos de Transformação de Ondas	27
3.3. DIMENSIONAMENTO E CONCEÇÃO DO ESPORÃO	29

3.3.1. Tipos de esporões	31
3.3.1.1. Configuração em perfil.....	31
3.3.1.2. Configuração em planta	32
3.3.1.3. Classificação em relação ao tipo de material.....	33
3.3.2. Modo de construção	36
3.4. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL.....	37
3.5. DIMENSIONAMENTO E CONCEÇÃO DA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL.....	38
3.5.1. Alimentação artificial distribuída.....	38
3.5.1.1. Alimentação imersa	38
3.5.1.2. Alimentação emersa	39
3.5.1.3. Alimentação do perfil transversal da praia	40
3.5.2. Alimentação artificial pontual.....	41
3.5.3. Modo de construção	42
3.6. MODELOS NUMÉRICOS.....	43
3.6.1. Modelos de curto termo.....	45
3.6.1.1. Modelo <i>XBeach</i>	45
3.6.1.2. Modelo Delft3D.....	46
3.6.1.3. Comparação entre os modelos <i>Xbeach</i> e Delft3D.....	47
3.6.2. Modelos de longo termo	47
3.6.2.1. Modelo <i>ShorelineS</i>	48
3.6.2.2. Modelo UNIBEST	49
3.6.2.3. Modelo LITPACK.....	50
3.6.2.4. Comparação entre os modelos <i>ShorelineS</i> , UNIBEST e LITPACK	51

4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO..... 53

4.1. ENQUADRAMENTO	53
4.2. ANÁLISE HISTÓRICA	54
4.3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS	56
4.4. CARACTERIZAÇÃO DA INTERVENÇÃO	57
4.4.1. Medições em campo	58
4.4.2. Modelação numérica	58
4.4.3. Sistema de proteção e método construtivo	59

5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	61
5.1. METODOLOGIA	61
5.1.1. <i>Input</i>	62
5.1.2. Ferramentas	64
5.1.2.1. Missões de satélites (L5, L8 e S2)	64
5.1.3. <i>Output</i>	66
5.2. RESULTADOS	69
5.2.1. Análise Individual de cada Compartimento.....	70
5.2.1.1. Análise das linhas de costa, entre 2013 e 2021	70
5.2.1.2. Análise das Linhas de Costa a Barlamar e a Sotamar do esporão.....	88
5.2.2. Análise Global da posição da linha de costa	97
5.2.2.1. Datas de <i>output</i> compreendidas entre 2013 e 2021	98
5.2.2.2. Datas de <i>output</i> compreendidas entre 1984 e 2014	99
5.3. DISCUSSÃO	100
 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	103
6.1. CONCLUSÕES.....	103
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
 7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
 8. ANEXOS.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa do programa de alimentações artificiais realizado no Condado de Miami-Dade (USACE, 2016).	7
Figura 2.2 – Fases do programa de alimentações artificiais na zona costeira de Miami-Dade (USACE, 2016).	8
Figura 2.3 - Mapa da zona litoral da Croácia com as duas zonas de estudo (Pikelj et al., 2018).	11
Figura 2.4 - Mapa da praia de Dugi Rat (A); Condições da praia em 2005 (B) e em 2012 (C) (Pikelj et al., 2018).	11
Figura 2.5 - Zona de estudo escolhida para a análise da zona costeira de Dugi Rat (Pikelj et al., 2018).	12
Figura 2.6 - Mapa da zona litoral da Bélgica (Willekens e Maes, 2008).	13
Figura 2.7 - Mapa das áreas mais críticas na zona litoral da Bélgica (Broeck, 2017).	14
Figura 2.8 - Mapa da zona litoral da Costa da Caparica ao longo dos anos (Veloso-Gomes et al., 2006).	16
Figura 2.9 - Fases de intervenção ao longo da zona costeira da Costa da Caparica (Veloso-Gomes et al., 2006).	17
Figura 2.10 - Praia da Rocha na década de 1960, antes da primeira intervenção (Freitas e Dias, 2012).	18
Figura 2.11 - Praia da Rocha na década de 1970, depois da primeira intervenção (Freitas e Dias, 2012).	19
Figura 2.12 - Praia da Rocha em 2019 [1].	20
Figura 2.13 - Praia da Quarteira depois da construção do campo de esporões na década de 1970 (Taborda et al., 2005).	20
Figura 3.1 - Tipos de transposição de sedimentos em estruturas pesadas, como os esporões (CEM, 2002 - Adaptado).	26
Figura 3.2 - Processo de refração das ondas (Soprani, 2010 - Adaptado).	28
Figura 3.3 - Apresentação de três zonas distintas na mesma situação: a zona onde não há alteração da onda (I), a zona onde ocorre o processo de difração (II) e a zona onde ocorre o processo de reflexão (III).	29
Figura 3.4 - Exemplo de perfil transversal de um esporão emerso (1) e submerso (2) (CIRIA, 2007 - Adaptado).	32
Figura 3.5 - Diferentes formas de esporões possíveis (CEM, 2002).	32
Figura 3.6 - Esporões com diferentes configurações em planta ao longo da linha de costa romena (fonte: Google Earth).	33
Figura 3.7 - Perfil transversal e configuração em planta de um esporão vertical em madeira (Averini Rodeia, 2014 - Adaptado).	34

Figura 3.8 - Perfil transversal de um esporão de taludes em enrocamento (Averini Rodeia, 2014 - Adaptado)	35
Figura 3.9 - Disposição do campo de esporões recomendada pelo (CEM, 2002 - Adaptado).....	36
Figura 3.10 - Alimentação artificial imersa na zona de rebentação da praia (Mangor et al., 2017 - Adaptado).	39
Figura 3.11 - Alimentação artificial emersa na zona das dunas (1) e na zona superior do perfil da praia (2) (Mangor et al., 2017 - Adaptado).	39
Figura 3.12 – Alimentação artificial emersa na zona balnear da praia (Mangor et al., 2017 - Adaptado).....	40
Figura 3.13 - Alimentação artificial do perfil transversal da praia (Mangor et al., 2017 - Adaptado).....	40
Figura 3.14 – Exemplo de uma praia alimentadora realizada nos Países Baixos [2].	41
Figura 4.1 – Mapa da República do Gana marcada a vermelho (fonte: Google Earth).....	53
Figura 4.2 - Sequência temporal (1972, 1987, 1999 e 2013) da linha de costa de Ada (fonte: USGS).	55
Figura 4.3 - Área do projeto desenvolvido em duas fases de construção diferentes (Bolle et al., 2015).	57
Figura 4.4 – 1) Construção dos esporões da fase 1 do projeto com um jetty principal e dois auxiliares; 2) Construção da fase 2 do projeto com dois jetties principais (Bolle et al., 2015).	59
Figura 5.1 - Numeração dos esporões e dos compartimentos criados.	61
Figura 5.2 - Organograma do trabalho prático realizado na presente dissertação.	62
Figura 5.3 - Mapa da zona de estudo com os esporões (vermelho) e os transectos (amarelo), com a indicação das 3 zonas utilizadas no Coastsat.	63
Figura 5.4 - Criação de uma linha de referência no Spyder.....	66
Figura 5.5 - Esquema para o cálculo das coordenadas do ponto C.	66
Figura 5.6 - Esquema para o cálculo da distância entre o ponto A e a linha de costa de referência (março 2013).....	68
Figura 5.7 - Compartimentos A e B do projeto delimitados pelos esporões 1, 2 e 3.	71
Figura 5.8 – Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento A, ao longo do período em estudo.	71
Figura 5.9 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento B, ao longo do período em estudo.	71
Figura 5.10 - Compartimentos C e D do projeto delimitados pelos esporões 3, 4 e 5.....	72
Figura 5.11 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento C, ao longo do período em estudo.....	72
Figura 5.12 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento D, ao longo do período em estudo.....	73
Figura 5.13 - Compartimentos E e F do projeto delimitados pelos esporões 5, 6 e 7.	73

Figura 5.14 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento E, ao longo do período em estudo.....	74
Figura 5.15 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento F, ao longo do período em estudo.....	74
Figura 5.16 - Compartimentos G e H do projeto delimitados pelos esporões 7, 8 e 9.	75
Figura 5.17 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento G, ao longo do período em estudo.	75
Figura 5.18 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento H, ao longo do período em estudo.	76
Figura 5.19 - Compartimentos I e J do projeto delimitados pelos esporões 9, 10 e 11.....	76
Figura 5.20 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento I, ao longo do período em estudo.	77
Figura 5.21 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento J, ao longo do período em estudo.	77
Figura 5.22 - Compartimentos K e L do projeto delimitados pelos esporões 11, 12 e 13.....	78
Figura 5.23 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento K, ao longo do período em estudo.....	78
Figura 5.24 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento L, ao longo do período em estudo.	79
Figura 5.25 – Compartimentos M e N do projeto delimitados pelos esporões 13, 14 e 15.	79
Figura 5.26 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento M, ao longo do período em estudo.	80
Figura 5.27 – Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento N, ao longo do período em estudo.	80
Figura 5.28 - Compartimentos O e P do projeto delimitados pelos esporões 15, 16 e 17.....	81
Figura 5.29 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento O, ao longo do período em estudo.	81
Figura 5.30 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento P, ao longo do período em estudo.....	81
Figura 5.31 – Compartimentos Q e R do projeto delimitados pelos esporões 17, 18 e 19.....	82
Figura 5.32 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento Q, ao longo do período em estudo.	82
Figura 5.33 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento R, ao longo do período em estudo.	83
Figura 5.34 - Compartimentos S e T do projeto delimitados pelos esporões 19, 20 e 21.	83
Figura 5.35 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento S, ao longo do período em estudo.....	84

Figura 5.36 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento T, ao longo do período em estudo.	84
Figura 5.37 – Compartimento U do projeto delimitados pelos esporões 21 e 22.	85
Figura 5.38 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento U, ao longo do período em estudo.	85
Figura 5.39 - Apresentação da planta dos esporões 2, 3 e 4 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	89
Figura 5.40 - Apresentação da planta dos esporões 5, 6 e 7 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	89
Figura 5.41 - Apresentação da planta dos esporões 8, 9 e 10 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	90
Figura 5.42 - Apresentação da planta dos esporões 11, 12 e 13 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	90
Figura 5.43 - Apresentação da planta dos esporões 14, 15 e 16 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	91
Figura 5.44 - Apresentação da planta dos esporões 17, 18 e 19 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	91
Figura 5.45 - Apresentação da planta dos esporões 20, 21 e 22 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.	92
Figura 5.46 – Gráfico de todos os transectos das datas output na época depois da alimentação artificial, entre 2015 e 2021.	98
Figura 5.47 - Gráfico global que apresenta todos os transectos das datas de output durante o tempo de estudo (8 anos).	99
Figura 5.48 - Gráfico que apresenta todos os transectos de todas as datas de output desde 1984 até 2014.	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fases do programa de alimentações artificiais (USACE, 2016 - Adaptado).	8
Tabela 2.2 - Alimentações artificiais realizadas após a intervenção do ano de 1988 (USACE, 2016 - adaptado).....	9
Tabela 2.3 - Informação do volume da praia durante o período da última monitorização (Pikelj et al., 2018 - adaptado).....	12
Tabela 2.4 - Resumo dos casos de estudo abordados.	23
Tabela 3.1 - Tipos de transposição e os respetivos parâmetros de controlo (CEM, 2002 - Adaptado).	27
Tabela 3.2 - Processos de transformação da agitação marítima (CEM, 2002; CIRIA, 2007).	27
Tabela 3.3 - Processos de transformação da agitação marítima (CEM, 2002; CIRIA, 2007).	28
Tabela 3.4 - Características que influenciam a linha de costa após a construção de esporões (CEM, 2002 - Adaptado).	30
Tabela 3.5 - Principais tipos de esporão e os respetivos materiais.	34
Tabela 3.6 - Vantagens e desvantagens da alimentação artificial pontual (Mangor et al., 2017 - Adaptado).	42
Tabela 3.7 - Caracterização dos modelos numéricos de curto termo, Xbeach e Delft3D.....	47
Tabela 3.8 - Caracterização dos modelos numéricos de longo termo, ShorelineS, UNIBEST e LITPACK.	51
Tabela 5.1 - Coordenadas da área de projeto, no sistema de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326)....	63
Tabela 5.2 - Parâmetros inseridos no ambiente Coastsat.	64
Tabela 5.3 - Características dos satélites Landsat-5, Landsat-8 e Sentinel-2 (adaptado).....	65
Tabela 5.4 - Limites estabelecidos para as taxas de avanço e recuo da linha de costa.....	69
Tabela 5.5 - Limites estabelecidos para as distâncias entre as linhas de costa e a linha de referência (março 2013).	69
Tabela 5.6 - Síntese das tendências da evolução da linha de costa ao longo de todos os transectos.....	86
Tabela 5.7 - Continuação da síntese das tendências da evolução da linha de costa ao longo de todos os transectos.	87
Tabela 5.8 - Comprimento total e comprimento útil dos esporões para as linhas de costa relativas às 9 datas analisadas e para a linha de referência (março de 2013).	92
Tabela 5.9 - Comprimento total e comprimento útil dos esporões para as linhas de costa relativas às 9 datas analisadas e para a linha de referência (março de 2013).	93
Tabela 5.10 - Comprimento total dos esporões e o rácio comprimento útil/comprimento total para todas as 9 datas analisadas.	94
Tabela 5.11 - Distâncias entre as linhas de costa (2015, 2016, 2020 e 2021) e a linha de referência (março de 2013), nas zonas a sotamar e a barlamar das estruturas.....	94

Tabela 5.12 - Distâncias entre as linhas de costa (2015, 2016, 2020 e 2021) e a linha de referência (março de 2013), nas zonas a sotamar e a barlamar das estruturas.	95
Tabela 5.13 - Classificação das distâncias (em m) para os anos 2015, 2016, 2020 e 2021.	95
Tabela 5.14 - Continuação da classificação das distâncias para os anos 2015, 2016, 2020 e 2021....	96
Tabela 5.15 - Informação do espaçamento entre esporões (m) e do rácio entre o comprimento/espaçamento entre esporões.....	97
Tabela 5.16 - Tendência das linhas de costa depois da alimentação artificial, entre 2015 e 2021.	98
Tabela 5.17 - Tendência global das linhas de costa durante o tempo de estudo (8 anos).	99
Tabela 5.18 - Tendência global das linhas de costa, desde 1984 e 2021.	100

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

H_s	Altura de onda significativa
H_{so}	Altura de onda significativa <i>offshore</i>
Z	Altura da suspensão de sedimentos em relação ao fundo do mar
α	Ângulo de incidência das ondas na linha de costa
Φ_{loc}	Ângulo de incidência das ondas <i>offshore</i>
b	Coefficiente de calibração do modelo <i>ShorelineS</i>
k	Coefficiente de calibração do modelo <i>ShorelineS</i>
$\varepsilon_{s, cw}$	Coefficiente de mistura de sedimentos do modelo UNIBEST
C	Concentração de sedimentos em relação a um tempo médio
T	Período de onda
T_p	Período de onda de pico
q_b	Taxa de transporte de sedimentos em relação a um tempo médio
W_s	Velocidade de queda dos sedimentos suspensos

UNIDADES

m	Metros
km	Quilómetros
s	Segundos

ACRÓNIMOS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
GEE	<i>Google Earth Engine</i>

LITPACK	<i>Littoral Processes and Coastline Kinetics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UNIBEST	<i>Uniform Beach Sediment Transport</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
XBEACH	<i>Extreme Beach Behavior</i>

ABREVIATURAS

ECL	<i>Erosion Control Line</i>
E	Este
LAT	<i>Lowest Astronomical Tide</i>
MLST	<i>Mean Local Solar Time</i>
MLWL	<i>Mean Low Water Level</i>
NMM	Nível Médio do Mar
NE	Nordeste
NNE	Nor-nordeste
NO	Noroeste
N	Norte
O	Oeste
SE	Sudeste
SSO	Su-sudoeste
S	Sul
ZH	Zero Hidrográfico

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

As zonas costeiras atraem cada vez mais pessoas pelo seu elevado valor turístico, habitacional e comercial e, por isso, ao longo dos anos e décadas, temos vindo a assistir a um contínuo e crescente desenvolvimento económico do litoral que, muito provavelmente, persistirá no presente século. Este crescimento litoral resultou no aumento de densidade populacional nas zonas costeiras, em que 15 das 20 megacidades do mundo estão localizadas próximas da costa, alcançando valores superiores a 10 milhões de pessoas (Luijendijk *et al.*, 2018).

A alteração da morfologia costeira e dos padrões de transporte sedimentar, quer devido à construção de grandes infraestruturas (como portos ou barragens) ou à artificialização dos terrenos, por exemplo a impermeabilização dos solos, realizada próximo dos rios ou de zonas costeiras, quer devido à fixação de determinadas zonas da costa naturalmente dinâmicas, tem resultado num desequilíbrio do balanço sedimentar ao longo da costa e em situações de erosão costeira crónica. Atualmente, a erosão costeira afeta cerca de 70% das praias existentes no mundo (Ferreira, 2014; Luijendijk *et al.*, 2018).

Segundo Doody (2004), a combinação da pressão urbanística (em direção ao mar) com o avanço do mar devido a erosão (em direção a terra), resulta no fenómeno habitualmente designado por *coastal squeeze*, e é caracterizado por uma estreita faixa costeira entre o mar e a primeira linha da frente urbana. A largura desta faixa costeira é por si só insuficiente para proteger a frente urbana de tempestades, o que habitualmente leva à construção de obras de proteção costeira. Efetivamente, *coastal squeeze* vai prejudicar a dinâmica e a estabilidade das zonas costeiras agravando os riscos costeiros para as pessoas, para o ambiente e para as atividades económicas (Luijendijk *et al.*, 2018).

Para além disso, espera-se que o efeito das alterações climáticas, em particular a subida do nível médio do mar (NMM) e o aumento da frequência de ocorrência de tempestades, venha acelerar os processos erosivos em curso e, como consequência, agravar os riscos costeiros e os danos na vida humana e nos bens materiais causados pela ocorrência de galgamentos e inundações mais graves e mais frequentes (Anim *et al.*, 2013; Luijendijk *et al.*, 2018; Vousdoukas *et al.*, 2018).

As estratégias de adaptação climática incluem, além das tecnologias de proteção, a acomodação e a retirada. Linham *et al.* (2010) apresenta uma compilação relevante de diversas tecnologias em cada uma das estratégias referidas, tais como os esporões, a alimentação artificial de areia, os mapas de risco e recuperação de zonas húmidas, indicando para cada uma as principais vantagens, desvantagens e desafios tecnológicos, jurídicos e económicos. As tecnologias de proteção e de retirada podem, ainda, incorporar abordagens baseadas na natureza, como a renaturalização.

As estratégias de adaptação climática, em particular quando integram sistemas de proteção baseados na natureza, requerem um estudo contínuo da zona de intervenção. Em particular, é importante a avaliação dos riscos costeiros e das oportunidades, no imediato e no futuro. Para tal, utilizam-se dados de monitorização e outras ferramentas de apoio à decisão (como os modelos numéricos, os modelos físicos, entre outros) que facilitam as análises de curto e longo termo, a avaliação da eficiência dessas estratégias e, finalmente, a melhoria das políticas de ordenamento e das estratégias de adaptação (Linhm *et al.*, 2010).

A situação de vulnerabilidade à erosão costeira ao longo da costa Ocidental Africana e, em particular, ao longo da costa do Gana, onde se situa o caso de estudo abordado nesta dissertação, não é muito distinta da observada em outros países. A diminuição da quantidade de sedimentos transportados pela corrente de deriva litoral reflete-se num acentuado recuo da linha de costa e, em consequência, no dano ou destruição de infraestruturas e habitações localizadas perto da linha de costa. A costa do golfo da Guiné, onde se encontra a costa do Gana são caracterizadas pela predominância de sistemas lagunares e, portanto, as zonas costeiras situam-se a cotas mais baixas e, por isso, são vulneráveis a inundações costeiras (Bolle *et al.*, 2015).

Desde há vários anos que a cidade de Ada Foah e as cidades adjacentes que se prolongam até à cidade de Totope sofrem de erosão costeira contínua, com consequentes impactos negativos para a sociedade. Por serem áreas muito baixas e apresentarem um estado de erosão excessiva, estas zonas são sujeitas, com grande frequência, a galgamentos e inundações quando ocorrem eventos mais energéticos, o que vai criar riscos para a vida humana e para as infraestruturas que estão próximas da linha de costa. Apesar das inúmeras oportunidades de investimento, verifica-se uma estagnação no investimento e no desenvolvimento desta zona devido ao estado das praias e aos respetivos riscos costeiros (Bolle *et al.*, 2015).

A primeira fase do projeto de proteção da cidade de Ada Foah foi concluída em 2013. Esta fase consistiu na construção de 7 esporões ao longo de 4.7 km da linha de costa a partir do estuário do rio Volta para oeste (O) (Bolle *et al.*, 2015).

A segunda fase do projeto de proteção consistiu na continuação da construção de esporões para a proteção de mais 10 km da linha de costa, desde o último esporão da fase 1 até à cidade de Totope situada a oeste, bem como a alimentação artificial de areia num comprimento de 15 km de costa e a criação de um cordão dunar contínuo desde o estuário do rio Volta até à cidade de Totope (Bolle *et al.*, 2015).

Os principais objetivos desta intervenção foram reduzir os danos provocados pela erosão costeira ao longo da linha de costa da cidade de Ada Foah, reduzir as ocorrências de inundações nas áreas mais baixas e aumentar a qualidade das praias para atividades de lazer (Bolle *et al.*, 2015).

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação teve como objetivo a análise do desempenho de uma intervenção de proteção costeira em Ada, no Gana, que envolveu a construção de um campo de esporões e uma operação de alimentação artificial com areias, tendo por base dados de campo e imagens de satélite. A análise do desempenho compreendeu:

- Análise do comportamento natural do sistema costeiro (antes da intervenção);
- Análise da influência do sistema de proteção no trecho costeiro (durante a realização da intervenção);

- Análise do desempenho e da eficácia do sistema de proteção na manutenção da linha de costa (após a intervenção).

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Após este capítulo de introdução, que engloba o enquadramento do tema, os objetivos da dissertação e a sua organização, a dissertação é constituída por 6 capítulos.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de proteção costeira baseados na alimentação artificial com areias e em esporões, e é constituído por 4 subcapítulos, a começar com uma breve introdução sobre os sistemas de proteção a estudar, seguindo-se de uma análise de casos de estudo internacionais e nacionais e as suas considerações finais.

No terceiro capítulo recorre-se à realização da conceção e dimensionamento das estruturas em estudo, mais especificamente os esporões e a alimentação artificial.

No quarto capítulo é feita a caracterização do caso de estudo. Em particular, vai englobar o enquadramento do projeto em estudo, as condições ambientais do local em estudo e a caracterização da intervenção realizada.

No quinto capítulo é feita a avaliação do desempenho do projeto de alimentação artificial com areias e esporões na cidade de Ada, no Gana, englobando a metodologia para a análise dos dados e a apresentação e discussão dos resultados, e a discussão do estudo realizado.

Finalmente, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação e sugeridos desenvolvimentos futuros.

2

SISTEMAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA BASEADOS NA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE AREIAS E ESPORÕES

2.1. INTRODUÇÃO

Pela sua localização estratégica e qualidades ambientais, as zonas costeiras trazem importantes benefícios sociais e económicos (como o comércio e as pescas) que devem ser protegidos e preservados. As ações antrópicas, em particular a pressão urbanística e o desenvolvimento de infraestruturas, e as ações naturais, como os eventos extremos de tempestade, geram riscos costeiros que ameaçam o desenvolvimento social e económico e causam a degradação ambiental das zonas costeiras. Diversas estruturas de defesa costeira foram sendo construídas ao longo da faixa costeira para mitigar as consequências da elevada vulnerabilidade a que estavam sujeitas as frentes edificadas que essas obras vieram proteger. De uma maneira geral, as estruturas de defesa costeira dividem-se em estruturas pesadas e estruturas *soft* (Bergh, 2014; Broeck, 2017).

As estruturas pesadas, onde se incluem as obras transversais (como os esporões) e as obras longitudinais à linha de costa, que incluem as estruturas destacadas e aderentes (como os quebramares e os paredões, respetivamente) e, de uma maneira geral, todas as intervenções realizadas, com o objetivo de forçar uma posição fixa para a linha de costa, são o método mais tradicional de proteção costeira. Apesar dos custos de construção e manutenção elevados, essas estruturas são muito eficazes na diminuição das consequências dos riscos costeiros e permitem que o desenvolvimento da pressão urbanística se mantenha inalterado. Para além disso, as estruturas de defesa costeira pesadas têm um efeito prejudicial no transporte sedimentar e na dinâmica natural das zonas costeiras. O emagrecimento ou o total desaparecimento de uma praia, ou a aceleração dos processos erosivos em praias a sotamar são efeitos comuns em zonas costeiras protegidas por estruturas pesadas (Broeck, 2017).

As estruturas *soft*, onde se incluem a alimentação artificial de areias, o reforço de cordões dunares e, de uma maneira geral, as intervenções que facilitam a preservação e a regeneração da dinâmica natural dos processos costeiros, são também soluções baseadas na natureza, e por isso, são cada vez mais promovidas pelo efeito positivo que têm na manutenção e na regeneração dos ambientes costeiros. No entanto, apresentam importantes desafios de dimensionamento, de construção (por exemplo, devida à reduzida experiência na sua utilização) e de previsão do seu comportamento (por exemplo, devido à elevada incerteza dos modelos de previsão a curto e a longo prazo). Além disso, necessitam de muito mais espaço na faixa litoral para a sua construção, competindo com as áreas adjacentes interiores ou

obrigando a construir em direção ao mar o que comporta mais custos e mais desafios tecnológicos (Broeck, 2017).

O foco desta dissertação são os sistemas de proteção costeira híbridos, combinando a alimentação artificial de areias e os esporões. A combinação destas duas tecnologias de defesa costeira é uma estratégia cada vez mais comum para atenuar alguns dos efeitos negativos observados quando essas tecnologias são implementadas individualmente, sendo que, por um lado a alimentação artificial de areias é uma medida de compensação da interrupção do transporte sedimentar pelos esporões atenuando os efeitos negativos a sotamar e, por outro lado, os esporões dão um reforço estrutural à alimentação artificial, prolongando a sua longevidade (Broeck, 2017).

Os esporões são estruturas construídas transversalmente à linha de costa e, por isso, criam uma barreira ao transporte de sedimentos por corrente de deriva. Além disso, ajudam a dissipar parte da energia das ondas antes destas chegarem à costa. Os esporões podem ser construídos com diversos tipos de materiais (como a rocha, a madeira ou o betão), ter diversas formas em planta e em perfil, ser emersos (galgáveis ou não galgáveis) ou mergulhantes. Além disso, podem ainda ser em taludes ou verticais. Quando construídos em grupo são designados por campos de esporões (Perdok, 2002; Broeck, 2017).

A alimentação artificial protege a linha de costa e preserva os recursos naturais das praias (Klein e Osleeb, 2010). Embora a alimentação artificial interfira nos habitats existentes nas praias e no seu equilíbrio, continua a ser a opção preferida em comparação às estruturas pesadas, por apresentar menos resultados negativos. De notar que esta interferência ocorre sobretudo durante a fase de construção (Broeck, 2017). Quando combinada com o reforço, ou a construção de cordões dunares, o processo de alimentação tem, potencialmente, ainda mais benefícios (Fanini *et al.*, 2009).

Por um lado, as dunas são uma componente muito importante dos ecossistemas presentes na costa, e conferem uma proteção adicional às zonas interiores localizadas em frente à praia. Por outro lado, é uma fonte de sedimentos, em caso de erosão excessiva da praia frontal (Bergh, 2014).

Nos subcapítulos seguintes são apresentados alguns casos de estudo internacionais e nacionais. No final do capítulo é feito um sumário dessas intervenções e retiradas algumas relações pertinentes para o presente estudo.

2.2. CASOS DE ESTUDO INTERNACIONAIS

2.2.1. FLÓRIDA

O Condado de *Miami-Dade*, mais conhecido por Condado de *Dade*, está localizado ao longo da costa sudeste (SE) da Flórida, onde se situa a cidade de *Miami*. A linha de costa do condado de *Dade* estende-se por duas ilhas barreira, separadas do centro da cidade pela Baía *Biscayne*. Esta região costeira, mas principalmente o centro da cidade de *Miami*, situa-se a uma cota baixa, apenas a 3 m acima do nível médio da água do mar (NMM). As ilhas apresentam uma maior elevação, logo são mais resilientes, mas não totalmente imunes à subida do nível das águas (USACE, 2016)

Ao longo de três décadas, entre 1970 e 2000, o Governo Federal da Flórida investiu mais de 500 milhões de dólares (em valores de 2007) num programa de alimentações artificiais. Atualmente, uma grande extensão da costa atlântica da Flórida encontra-se protegida por alimentação artificial, e a manutenção da qualidade das praias num destino turístico, como o caso da Flórida, é fundamental (Montague, 2006; Klein e Osleeb, 2010).

As praias de *Miami-Dade* têm sido sujeitas a uma extrema e contínua erosão há algumas décadas, que tem resultado na diminuição da área da praia ao longo de 11.8 km de costa (FDEP, 2018). Segundo

Montague (2006), acredita-se que a erosão costeira nesta zona foi causada pelas dragagens realizadas, ao longo dos anos, no mar e nos portos na costa da Flórida, levando à diminuição de sedimentos nas praias. Sendo esta a principal causa de erosão, as características da agitação marítima local também contribuem para o processo erosivo.

A erosão costeira continuada tem um impacto negativo na atividade económica que depende do turismo, bem como um impacto social que coloca em risco as frentes edificadas e ameaça a segurança de pessoas e dos bens materiais (Klein e Osleeb, 2010).

O referido programa de alimentações artificiais compreendeu intervenções em dois segmentos distintos, o segmento Principal e o segmento de *Sunny Isles*, com comprimentos de 17 km e de 4 km, respetivamente (Figura 2.1), e foi dividido em diversas fases (Figura 2.2). Este programa foi criado para controlar a erosão costeira e proteger as praias e as dunas que são sujeitas a eventos mais energéticos no segmento Principal, e para proteger as praias do segmento de *Sunny Isles*. Na Tabela 2.1, estão apresentados os parâmetros mais importantes para cada fase, como o comprimento (km) de costa que cada fase inclui, a data do início da intervenção e a quantidade de sedimentos (m³) projetada para a alimentação (USACE, 2016).

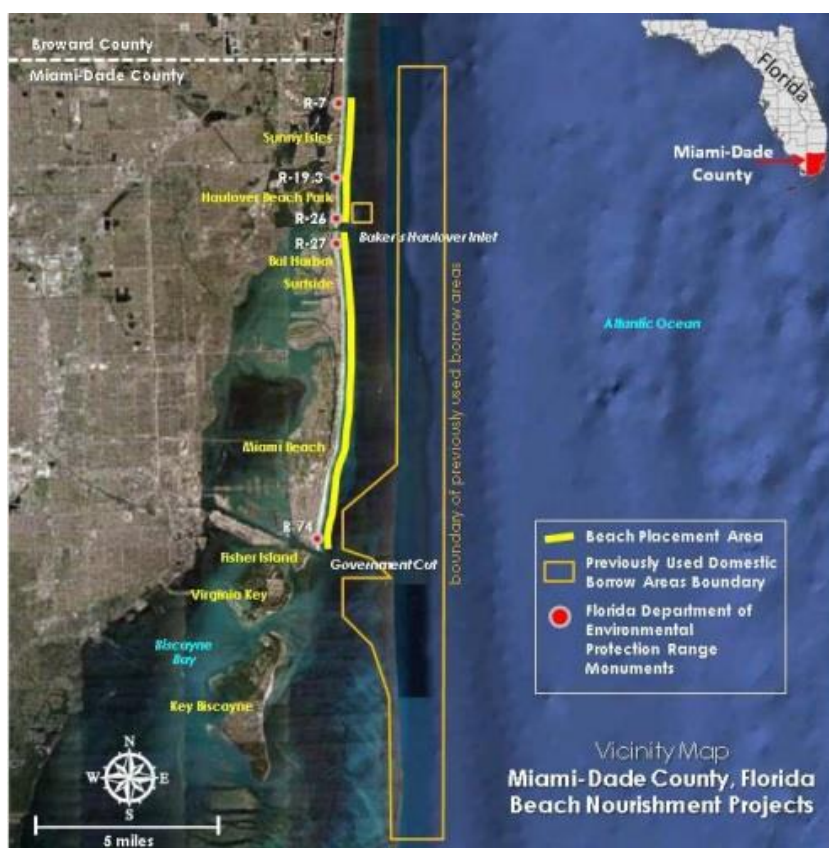


Figura 2.1 - Mapa do programa de alimentações artificiais realizado no Condado de Miami-Dade (USACE, 2016).

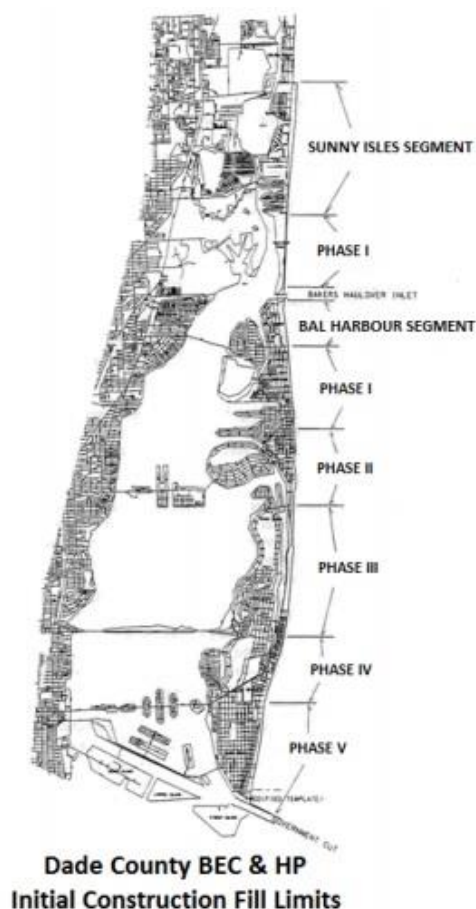


Figura 2.2 - Fases do programa de alimentações artificiais na zona costeira de Miami-Dade (USACE, 2016).

Tabela 2.1 - Fases do programa de alimentações artificiais (USACE, 2016 - Adaptado).

SEGMENTO	COMPRIMENTO (KM)	DATA DE INÍCIO	VOLUME (m ³)
<i>Sunny Isles</i>	4.0	1988	1 009 212
Fase 1 (Secção Norte)	1.8	1978	229 367
<i>Bal Harbour</i>	1.4	1975	1 242 402
Fase 1 (Secção Sul)	2.4	1978	2 018 425
Fase 2	2.4	1979	1 169 769
Fase 3	3.9	1980	2 429 067
Fase 4	2.3	1981	1 682 021
Fase 5	3.1	1982	1 834 932

A primeira intervenção de alimentação artificial foi no segmento Principal, que incluiu o segmento de Bal Harbour e as fases 1 (secção norte e sul), 2, 3, 4 e 5, situado entre *Government Cut* e *Bakers Haulover Inlet*, teve início em 1975 e acabou em 1982. Esta intervenção incluiu a criação de dunas com 6 m de largura e com uma altura de 3.5 m acima do nível médio da água do mar em baixa-mar (*Mean low water*

level - MLWL), em conjunto com a formação das bermas com uma largura de 15.2 m e uma altura de 2.7 m com taludes naturais. Para além disso foi ainda previsto a introdução de uma quantidade de areia na zona da praia, situada à frente da berma (USACE, 2016).

A segunda intervenção, projetada para o segmento de *Sunny Isles*, foi adicionada ao programa em 1985, mas teve início apenas em 1988. Esta fase incluiu a construção de uma berma de praia de cerca de 6 m acima da Linha de Controlo de Erosão (*Erosion Control Line* – ECL), com um declive de 1V:10H, entre a crista da berma e o nível médio da água do mar em baixa-mar (MLWL) e com um declive de 1V:25H para a base já existente, e ainda, um volume de alimentação de cerca de 547 mil m³ de areia proveniente de fontes situadas a *offshore* (USACE, 2016).

O projeto previa a necessidade de re-alimentações para compensar as perdas causadas pela erosão costeira, embora não estabelecesse um intervalo de tempo específico para as mesmas (USACE, 2016). Assim, na Tabela 2.2, estão apresentadas as alimentações artificiais realizadas após as intervenções (1975-1988) mencionadas anteriormente.

Tabela 2.2 - Alimentações artificiais realizadas após a intervenção do ano de 1988 (USACE, 2016 - adaptado).

DATA DE INTERVENÇÃO	ZONA DE INTERVENÇÃO	VOLUME (m ³)
1990	Bal Harbour	172 025
	Sunny Isles	24 466
1994	Haulover Beach Park	18 778
	Miami Beach	116 286
1996	Miami Beach	6 116
1997	Sunny Isles	6 881
	Miami Beach	64 987
	Sunny Isles e Miami Beach	427 439
1998	Miami Beach	13 762
1999	Surfside e South Miami Beach	552 009
2001/2002	Sunny Isles e Miami Beach	668 843
2003	Bal Harbour	143 736
2009	Bal Harbour	11 468
	Sunny Isles	7 646
	Miami Beach	7 646
2010	Bal Harbour	25 291
2012	Miami Beach	265 454
2014	Bal Harbour	180 231

A monitorização mais recente para a avaliação das condições do projeto e a quantificação dos volumes de areias necessários para as próximas intervenções de alimentação artificial, realizada em janeiro de 2014, indicou que, para recuperar as condições originais das praias eram necessários 1.44 milhões m³

de areia, colocadas ao longo de toda a extensão coberta pelo programa, exceto nas zonas de *Bal Harbour* que já tinha sido sujeita a um processo de alimentação em 2014 (USACE, 2016). Ainda de acordo com USACE (2016), o volume de perdas anuais estimado, tendo em conta os processos erosivos, foi de cerca de 765 mil m³ de areia no segmento Principal, e cerca de 355 mil m³ de areia no segmento de *Sunny Isles*. Estes volumes adicionais foram acrescentados ao volume estabelecido anteriormente (1.44 milhões m³).

O custo de toda a intervenção realizada até ao ano 2016, devido aos imprevistos que foram aparecendo, foi mais elevada do que estava previsto, alcançando um custo de 118.7 milhões de dólares (em valores de 1994, não atualizado), para o segmento de *Sunny Isles*, e um custo de 310.8 milhões de dólares para o segmento Principal (em valores de 1974, não atualizado) (USACE, 2016).

Apesar do elevado investimento e da necessidade de re-alimentação periódica, o rácio custo-benefício deste programa de alimentações artificiais foi positivo (USACE, 2016).

2.2.2. CROÁCIA

O turismo na Croácia teve início nos anos 60, tendo atingido o seu pico em 1988 seguido de um forte declínio durante a Guerra da Independência da Croácia até 1995, ano a partir do qual os números do turismo voltaram a subir. De acordo com a República da Croácia, apenas cerca de 150 km da sua zona costeira tinham sido urbanizadas até 1960. Com o aumento do turismo aumentou também a urbanização que abrangia, no início do século 21, mais de 800 km. Esse aumento resultou também num conjunto de construções não planeadas que, além disso, eram na sua maioria discordantes com o património cultural e natural da zona costeira croata. Atualmente, a gestão das zonas costeiras está a cargo das autoridades locais, que tem a responsabilidade de planear o desenvolvimento de infraestruturas, preservar o património cultural e gerir os impactos causados pela erosão costeira (Pikelj *et al.*, 2018).

A Croácia, apresentada na Figura 2.3, é um país que se tem vindo a tornar cada vez mais procurado pelo turismo, o qual deve proporcionar um desenvolvimento costeiro mais sustentável e, ao mesmo tempo, preservar o ambiente natural das praias. Toda a linha de costa da Croácia, banhada pelo Mar Adriático que se estende ao longo de 6 mil km de comprimento, está exposta a eventos naturais e a pressões antropogénicas que vão afetar a sua estabilidade (Pikelj *et al.*, 2018).

A geologia da costa da Croácia (Figura 2.3) divide-se em dois tipos de rocha: carbonatos (calcário) e rocha *flysch* (composta por rochas sedimentares), sendo mais abundante o calcário. As praias, localizadas em zonas em que os carbonatos são abundantes, apresentam sedimentos de maior dimensão (como o cascalho), enquanto as praias localizadas em zonas em que a rocha *flysch* é mais abundante apresentam características mais arenosas (Pikelj *et al.*, 2018).

A zona costeira da Croácia está sujeita a um regime microtidal com uma amplitude de maré diária compreendida entre 0.2 e 0.5 m. Normalmente, a agitação marítima é pouco energética, mas na ocorrência de tempestades, a agitação marítima torna-se mais energética em conjunto com os ventos provenientes de *Bora* (NE) e *Sirocco* (SE) (Pikelj *et al.*, 2018).

Para a proteção desta zona foram construídas muitas obras de defesa costeira, junto às quais se verificou, mais tarde, a ocorrência de erosão costeira causada por estas estruturas. Perante esta realidade, foi possível concluir que a gestão costeira não estava a ser bem planeada (Pikelj *et al.*, 2018).

Para reduzir os efeitos erosivos na costa e também aumentar as atividades de lazer, foram construídas praias artificiais entre as estruturas de defesa costeira existentes (esporões). Assim, como exemplo, a

praia de *Dugi Rat* é uma praia criada artificialmente em 2008 para compensar as perdas contínuas de sedimentos (Pikelj *et al.*, 2018).

Através de um método de monitorização que se baseou na produção de imagens aéreas em 3D das zonas costeiras para a análise das alterações morfológicas e da erosão costeira que se verifica ao longo do tempo, foi realizado o estudo de uma praia artificial, a praia de *Dugi Rat*, como se pode ver na Figura 2.3 (Pikelj *et al.*, 2018).

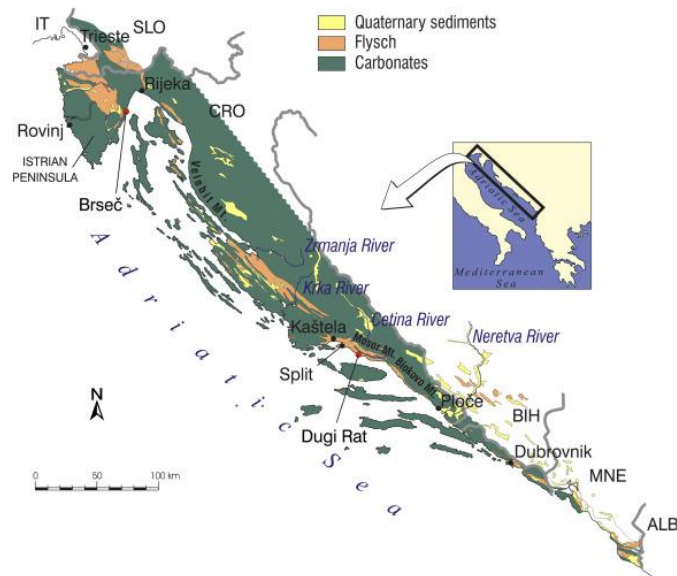


Figura 2.3 - Mapa da zona litoral da Croácia com as duas zonas de estudo (Pikelj *et al.*, 2018).

A praia de *Dugi Rat* (Figura 2.4) é uma praia artificial com um comprimento de 80 m e, no início do século 21, foi sujeita a inúmeras intervenções de defesa costeira. O perfil da praia foi estabelecido em 2008, e é sujeito a intervenções de alimentação artificial anualmente. Na Figura 2.4, é possível ver a diferença das condições desta praia num espaço de tempo relativamente curto, entre 2005 e 2012 (Pikelj *et al.*, 2018).



Figura 2.4 - Mapa da praia de *Dugi Rat* (A); Condições da praia em 2005 (B) e em 2012 (C) (Pikelj *et al.*, 2018).

Apesar desta zona costeira incluir vários esporões, foi escolhida uma zona em específico para fazer a análise do desempenho das intervenções de defesa costeira. A Figura 2.5 apresenta a zona escolhida para o estudo.

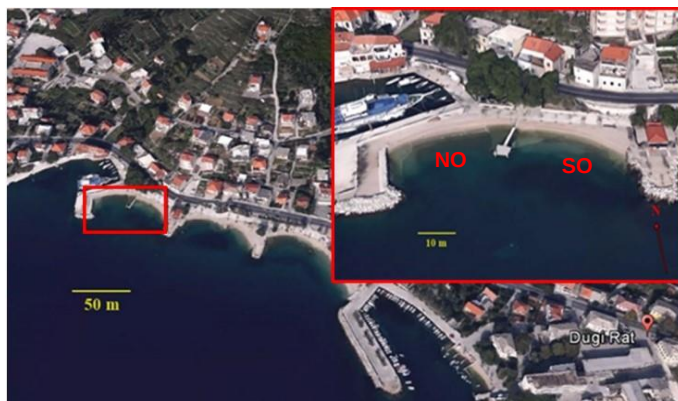


Figura 2.5 - Zona de estudo escolhida para a análise da zona costeira de Dugi Rat (Pikelj *et al.*, 2018).

A praia é delimitada por dois esporões e a meio desta praia foi construído um porto que faz a divisão da praia em dois trechos, o trecho noroeste (NO) e o trecho sudoeste (SO) (Pikelj *et al.*, 2018).

A última monitorização desta zona foi realizada em 5 fases (Tabela 2.3) no período entre 21 de fevereiro e 27 de junho de 2016, com o objetivo de avaliar a zona, antes e depois de uma tempestade. Nas primeiras duas fases (fevereiro de 2015) verificou-se um pequeno aumento de cerca de $+3 \text{ m}^3$ de sedimentos, na terceira fase (entre junho de 2015 e janeiro de 2016) verificou-se uma redução de sedimentos no trecho NO de -18 m^3 , no entanto, o trecho SO revelou um aumento do volume de sedimentos de $+15 \text{ m}^3$. Nas duas últimas fases (entre janeiro e junho de 2016) verificou-se um aumento de volume, cerca de $+12 \text{ m}^3$ de areia no trecho SO, e uma redução de -2 m^3 de areias no trecho NO. Para além da acumulação de sedimentos que se verificou ao longo das 5 fases, também foi possível observar a ocorrência de erosão a sudeste (SE) de ambos os trechos. Em contrapartida, verificou-se uma acumulação de sedimentos a noroeste (NO) dos dois trechos (Pikelj *et al.*, 2018).

Tabela 2.3 - Informação do volume da praia durante o período da última monitorização (Pikelj *et al.*, 2018 - adaptado)

FASE DE MONITORIZAÇÃO	DATA DE MONITORIZAÇÃO	VOLUME DA PRAIA (m^3)		
		TRECHO NO	TRECHO SO	ÁREA TOTAL DA PRAIA
1	21 de fevereiro de 2015	168	123	291
2	24 de fevereiro de 2015	170	124	294
3	24 de junho de 2015	152	139	291
4	17 de janeiro de 2016	159	129	288
5	27 de junho de 2016	157	141	298

A acumulação que se verificou a SE dos esporões após a tempestade de fevereiro de 2015 permitiu confirmar a direção predominante do transporte longitudinal de sedimentos (SE-NO). Posto isto, ainda foi possível confirmar que o transporte longitudinal causado pelas ondas geradas pelos ventos de *Sirocco* foi o processo responsável por transportar os sedimentos que estavam no trecho SO para o trecho NO (Pikelj *et al.*, 2018).

Após a avaliação desta zona costeira, prevê-se a necessidade de realizar uma alimentação artificial de 50 a 70 m³ de sedimentos todos os anos e, uma consequente perda de 50% dos sedimentos existentes. Ainda, é possível prever que a areia permaneça na praia num período aproximado de 6 meses. Segundo as autoridades locais responsáveis por este processo, o trecho NO é sujeito a acumulação natural, enquanto o trecho SO é considerado um trecho de erosão, mas mesmo assim, no processo de alimentação artificial, o material adicionado é distribuído pelos dois trechos, de cerca de 50 m³ de areia, 10 m³ para o trecho NO e 40 m³ para o trecho SO (Pikelj *et al.*, 2018).

Devido ao desenvolvimento da linha de costa nos últimos anos, foi necessário a criação de um plano de monitorização das praias da costa da Croácia, que inclui estratégias de gestão da costa e das praias (Pikelj *et al.*, 2018).

2.2.3. BÉLGICA

A zona litoral da Bélgica, situada na sua totalidade na região de Flandres banhada pelo Mar do Norte, tem 67 km de comprimento ao longo da costa, e 10 e 15 km para o interior (Figura 2.6). Quase 85% dessa extensão encontra-se abaixo da cota +5 m em relação ao nível médio das águas do mar (NMM), o que faz com que esta zona costeira seja uma das mais vulneráveis na Europa. Uma característica da zona costeira belga é a existência de áreas interiores abaixo do NMM (*polders*), que são usadas geralmente para a agricultura (Willekens e Maes, 2008).



Figura 2.6 - Mapa da zona litoral da Bélgica (Willekens e Maes, 2008).

Há 200 anos que a zona costeira da Bélgica está em constante mudança, devido aos processos erosivos que aí ocorrem. Por isso, a costa belga é sujeita a intervenções humanas desde o final do século 19, com o objetivo de proteger as infraestruturas que se situam mais próximas da linha de costa e as áreas mais baixas, de inundações regulares (Willekens e Maes, 2008).

Hoje em dia, esta zona costeira é constituída por extensas praias de areia, dunas e *polders*, e apresenta uma grande densidade populacional, o que revela uma importância a nível económico, designadamente para o turismo e para a pesca intensiva. Por esta razão, numa extensão de 38 km, estão presentes obras de defesa costeira pesadas (e.g., diques, quebramares, esporões e paredões), e ainda obras de defesa mais *soft* (e.g., alimentação artificial de dunas e praias) (Willekens e Maes, 2008; Eede, 2013).

Nesta zona costeira verifica-se um regime de marés semi-diurno, com uma amplitude média de 4 m. As ondas que incidem na costa seguem uma direção oeste-este (O-E). A combinação da batimetria com as condições hidrodinâmicas e meteorológicas locais são os principais responsáveis pelos diferentes tipos de sedimentos que se encontram na zona (Willekens e Maes, 2008; Eede, 2013).

A costa belga está parcialmente protegida, no entanto podem ocorrer problemas nas zonas menos protegidas que vão estar sujeitas a inundações com mais frequência (Willekens e Maes, 2008). Por isto, em 2010, o Governo belga decidiu elaborar um estudo de todas as zonas críticas ao longo da linha de costa, para promover a proteção da costa contra inundações, considerando a subida do NMM. Assim, na Figura 2.7, estão apresentadas as 63 zonas mais críticas identificadas ao longo de toda a costa belga.



Figura 2.7 - Mapa das áreas mais críticas na zona litoral da Bélgica (Broeck, 2017).

Uma dessas zonas é a cidade de *Wenduine* na província de *West-Flanders*, localizada entre *De Haan* e *Blankenberge*. De notar que na Bélgica, de acordo com o plano para a segurança da zona costeira, as obras de defesa costeira têm que garantir um nível de proteção adequado para eventos de tempestade com um período de retorno mínimo de 1 vez em 1000 anos. Este elevado nível de proteção não era garantido pelo dique existente na praia de *Wenduine*, também porque a praia frontal a esse dique sofre uma contínua erosão pela ação das correntes e do vento, devido a um balanço sedimentar negativo (Broeck, 2017).

Assim, em 2001, a praia de *Wenduine* foi alimentada artificialmente com mais de 700 mil m³ de areia, ficando com uma largura compreendida entre 35 e 55 m. Após esta intervenção, a praia voltou a perder muita areia e, por isso, foi re-alimentada em 2016. De acordo com Broeck (2017), dois meses depois

dessa intervenção, a costa da Bélgica foi devastada pela tempestade *Dieter*, onde se estima que se tenha perdido cerca de 1 milhão m³ de areia das praias.

As sucessivas intervenções nesta praia demonstraram que as intervenções compreendendo apenas a alimentação artificial não são suficientes. Assim, foi proposto completar essas intervenções com a construção de esporões, considerada a opção com um melhor rácio de custo-efetividade. Esta intervenção tem como objetivo a redução da perda significativa de areia e manter a estabilidade da praia, para que as alimentações artificiais e o seu impacto negativo sejam reduzidos (Broeck, 2017; Baelus *et al.*, 2019).

2.2. CASOS DE ESTUDO NACIONAIS

A zona costeira de Portugal Continental apresenta uma extensão de cerca de 987 km, desde a foz do rio Minho até à foz do rio Guadiana, apresentando diversas formas costeiras, como as praias, as arribas e os estuários. Atualmente, grande parte da costa portuguesa é afetada pela erosão costeira e, em alguns casos, tem-se verificado um recuo da linha de costa mais acentuado, tomando valores superiores a 1 m/ano (Taborda *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2014).

Os problemas da zona costeira de Portugal deve-se essencialmente a ações antropogénicas realizadas ao longo dos anos, como a construção de barragens, a exploração de areias e as dragagens realizadas nos estuários dos rios, que estão a contribuir para a redução de sedimentos existentes na costa (Taborda *et al.*, 2005).

A costa oeste portuguesa é sujeita a um regime de agitação marítima muito energético, nomeadamente ondas provenientes do quadrante NO, que apresentam uma altura de onda significativa média (H_s) entre 1 e 3 m, e um período de onda médio (T) entre 5 e 9 s. A costa sul portuguesa está sujeita a um regime de agitação marítima menos energético, caracterizado por uma altura de onda significativa média (H_s) entre 0 e 2 m e um período de onda médio (T) entre 3 e 7 s (Costa *et al.*, 2001).

Ainda, segundo os valores medidos no marégrafo de Cascais, as marés astronómicas são do tipo semi-diurno e apresentam valores máximos em preia-mar em águas-vivas de 3.8 m e em baixa-mar em águas-vivas de 0.3 m. As marés meteorológicas podem atingir 0.5 m (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

2.2.1. COSTA DA CAPARICA

Desde o final do século 19, a zona costeira da Costa da Caparica é afetada pela erosão costeira, nomeadamente entre as praias de São João e as praias da Costa da Caparica. A erosão na linha de costa, como se pode ver na Figura 2.8, já resultou no recuo significativo da linha de costa, bem como no recuo da restinga em 3 km, e no recuo e redução da elevação da crista da duna em 100 e 6 m, respetivamente (Veloso-Gomes *et al.*, 2006; Almeida, 2019).

Localizada na margem sul do rio Tejo, a Costa da Caparica é uma cidade turística que concentra um elevado número de pessoas, principalmente no Verão. É uma zona que apresenta uma batimetria dos fundos muito suave e uma inclinação relativamente reduzida, adjacente a dois bancos de areia paralelos ao canal de navegação da embocadura do estuário do Tejo (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).



Figura 2.8 - Mapa da zona litoral da Costa da Caparica ao longo dos anos (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Por um lado, verifica-se a contínua erosão da zona costeira e, por outro lado, o aumento de pressão antropogénica, urbanística e turística, ao longo dos anos. Duas situações que vão dificultar a boa gestão da zona costeira (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

A agitação marítima local apresenta, em média, uma altura de onda significativa média (H_s) entre 0.5 e 2.5 m e um período de onda médio (T) entre os 5 e os 15 s. Na embocadura do estuário, as correntes em marés-vivas podem apresentar valores superiores a 2.0 m/s durante a enchente e a 1.8 m/s durante a vazante. No entanto, as correntes residuais de maré, que se observam na zona frontal da praia, são menos energéticas e tomam valores na ordem dos 0.2 m/s, com uma direção de S-N (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Para tentar travar o processo de erosão contínua, procedeu-se, entre a década de 50 e 70, à construção de um campo de esporões. Embora houvesse uma constante perda de sedimentos, a linha de costa manteve-se estável até ao ano 2000. A partir deste ano, o cenário mudou significativamente, passando a observar-se grandes perturbações nas praias e nas dunas existentes, sendo necessário recorrer a intervenções de emergência durante o inverno de 2002/2003 e 2006/2007 (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Para a proteção da zona costeira foi assumida a política que apoia a manutenção da linha de costa (*Hold the Line*) e, por isso, recorreu-se a intervenções de defesa costeira. Assim, foi necessário intervir com a recuperação das estruturas existentes ou mesmo com a construção de novas estruturas de defesa, apresentando um programa de defesa costeira dividido em três fases (Figura 2.9):

- A primeira fase baseou-se na alteração da configuração dos esporões existentes;
- Na segunda fase procedeu-se à alimentação artificial das praias e dunas, à reabilitação da frente marítima e de dunas onde não existiam obras de defesa aderentes, e ao controlo do desenvolvimento urbano na zona costeira a sul da Costa da Caparica;
- Por fim, a terceira fase, depois de cinco anos de monitorização, baseou-se na tomada de decisões sobre a possibilidade de remoção de três esporões e a extensão dos restantes, as novas operações

de alimentação artificial possíveis e o reajustamento de estruturas de defesa (Veloso Gomes *et al.*, 2006a; Veloso-Gomes *et al.*, 2006).



Figura 2.9 - Fases de intervenção ao longo da zona costeira da Costa da Caparica (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

A monitorização da zona costeira consistiu na execução de levantamentos hidrográficos, antes e depois do processo de alimentação, levantamentos das estruturas existentes, levantamentos hidrográficos globais e locais, e levantamentos de fotografias aéreas, para avaliar e ajustar os procedimentos técnicos necessários. A análise destes levantamentos topo-hidrográficos permitiu estabelecer um volume de, aproximadamente, 500 mil m³ de areias para a alimentação artificial (Veloso-Gomes *et al.*, 2006, 2007).

Assim, em 2007, recorreu-se à primeira alimentação artificial de areias que teve um custo de 2.9 milhões de euros (em valores de 2017). A segunda alimentação, no ano 2008, teve uma dimensão de 1 milhão m³ de areia, e a terceira, no ano 2009, baseou-se na deposição, também, de 1 milhão m³ de areia (Veloso-Gomes *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2013).

Após estas intervenções, entre 2007 e 2010, verificou-se uma recuperação de sedimentos na praia de, aproximadamente, 640 mil m³/ano, principalmente na zona submersa da praia entre os esporões. Para além disso, os esporões fizeram uma boa retenção de sedimentos (Silva *et al.*, 2013).

Resumindo, durante este período de tempo (2007 – 2010), foram depositados cerca de 2.5 milhões m³ de areia na zona costeira da Costa da Caparica, e anualmente, esta zona precisa de um volume médio de 290 mil m³ para se manter estável (Silva *et al.*, 2013).

Toda a zona costeira da Caparica sofre graves problemas de erosão costeira que podem criar impactos patrimoniais e socioeconómicos, e por isso, é uma zona que necessita de elevados volumes de

sedimentos para as alimentações artificiais. Por esta razão, é importante que haja estratégias de defesa costeira, que incluam estruturas pesadas e *soft* para reduzir a erosão costeira (Veloso Gomes *et al.*, 2006a).

2.2.2. ALGARVE

O aumento acentuado do turismo provocou sérios problemas na dinâmica da costa algarvia, intensificando a erosão costeira, mas também provocando alterações morfológicas da praia, por exemplo, o recuo das arribas.

Os processos erosivos observados na costa Algarvia são dos mais severos ao longo da costa portuguesa. Na sua maioria, esses processos erosivos resultaram da interrupção do transporte sedimentar, por corrente de deriva, devido às estruturas pesadas de defesa costeira que foram sendo construídas ao longo da costa e que, por sua vez, aceleraram os processos erosivos a sotamar. O elevado impacto ambiental e a eficácia reduzida dessas intervenções, sobretudo quando se considera a totalidade da costa e não apenas o problema local que se pretende resolver, levou a que se procurassem outras soluções de proteção, designadamente a alimentação artificial (Pinto *et al.*, 2020).

Esta parte da costa portuguesa está sujeita um regime de ondas relativamente pouco energético que, aliado às características morfológicas da costa (praias encaixadas entre arribas irregulares) representam condições ideais para a implementação desta tecnologia de proteção costeira (Pinto *et al.*, 2020).

Na costa sul, a alimentação artificial, tipicamente com volumes abaixo de 1 milhão de m³ de areia, tem vindo a ser realizada, desde 1970. Até hoje, um total de 10.4 milhões de m³ de areia já foram depositados nas praias algarvias (Pinto *et al.*, 2020).

2.2.2.1. Praia da Rocha

No final do século 20, a praia da Rocha sofreu um desenvolvimento acentuado no turismo, tornando-se um destino de grande valor turístico que atrai um grande número de pessoas no Verão, o que tem provocado efeitos negativos na dinâmica da zona costeira (Freitas e Dias, 2012). Na Figura 2.10 está apresentada a praia da Rocha na década de 1960, antes da primeira intervenção de alimentação artificial.



Figura 2.10 - Praia da Rocha na década de 1960, antes da primeira intervenção (Freitas e Dias, 2012).

A pressão exercida pelo Homem levou à necessidade de alargar a praia com o objetivo de corresponder à procura turística, e compensar as alterações negativas das arribas. Por isto, foi estabelecida, em 1970, a primeira intervenção de alimentação artificial, uma das pioneiras em Portugal (Freitas e Dias, 2012).

A primeira intervenção de alimentação artificial foi realizada numa extensão de praia de 1.3 km, com um volume de 880 mil m³ de areias para aumentar a largura da praia da Rocha em 100 m, de modo a melhorar as condições da praia para as atividades de lazer. Esta intervenção resultou num aumento da largura da praia em 120 m, mais 20 m do que o esperado, como se pode ver na Figura 2.11. Esta intervenção apresentou resultados positivos em relação à durabilidade dos sedimentos na praia (Freitas e Dias, 2012; Pinto *et al.*, 2020).



Figura 2.11 - Praia da Rocha na década de 1970, depois da primeira intervenção (Freitas e Dias, 2012).

Para além da alimentação artificial, foi construído um molhe na área adjacente ao Rio Arade, local onde ocorre acumulação de sedimentos na praia da Rocha. Assim, esta zona é apoiada pela alimentação artificial, mas também pelo molhe do rio. Estas intervenções permitiram o aumento da largura da praia de 120 m para 230 m (Pinto *et al.*, 2020).

No entanto, a extremidade ocidental da Praia da Rocha apresentava uma diminuição de sedimentos anormal, local onde o mar se aproximava cada vez mais da arriba, tornando-se numa zona de perigo. Assim, em 1983, foi necessário alimentar esta zona com 100 mil m³ de areias. Após alguns anos, foi possível constatar a diferença das dimensões da praia, antes e depois da segunda intervenção, onde houve um aumento considerável da largura da praia (Freitas e Dias, 2012; Pinto *et al.*, 2018, 2020).

Depois de 5 anos da intervenção, em 1988, os levantamentos de perfis da praia demonstraram que 80% da areia depositada ainda estava na praia, uma vez que o transporte longitudinal era reduzido, a agitação marítima era pouco energética e a praia era protegida pelas arribas (Freitas e Dias, 2012).

Apesar da zona ocidental da praia estar mais exposta à ação das ondas, os processos de alimentação artificial foram bem sucedidos, pela durabilidade de sedimentos na praia, mas também pelos impactos quase insignificantes que a alimentação originou na praia (Freitas e Dias, 2012).

Assim, a praia da Rocha é um exemplo de caso de estudo que, em termos de custo-efetividade e de durabilidade, apresentou resultados positivos (Pinto *et al.*, 2020). Atualmente, com a ajuda do molhe, a praia da Rocha mantém-se estável, apresentando um areal de grande dimensão (Figura 2.12).



Figura 2.12 - Praia da Rocha em 2019 [1].

2.2.2.2. Praia da Quarteira

A zona costeira da Quarteira é constituída por uma praia estreita acompanhada de arribas, compostas por arenito vermelho e com alturas entre os 10 e 15 m, que suportam a praia. Estas são a principal fonte de sedimentos que alimenta a praia da Quarteira, no entanto esta praia também é alimentada através da deriva litoral (cerca de 10 mil a 100 mil m³/ano) (Taborda *et al.*, 2005).

A praia da Quarteira apresenta problemas de erosão costeira desde os anos 40, verificando-se um recuo do perfil da praia de 0,5 m/ano, entre 1958 e 1969. Para travar este problema, uma vez que esta zona apresenta um elevado valor turístico, recorreu-se à construção de um campo de esporões na década de 70, para fazer a retenção de areias provenientes de oeste (O). Após esta intervenção, a zona costeira da Quarteira (Figura 2.13), encontra-se limitada pelo campo de esporões, composto por 6 estruturas com comprimentos entre 100 e 140 m, e que se estende por 1.5 km ao longo da linha de costa (Taborda *et al.*, 2005).



Figura 2.13 - Praia da Quarteira depois da construção do campo de esporões na década de 1970 (Taborda *et al.*, 2005).

Na época do verão, os esporões mantêm os sedimentos no sistema, mas quando as condições se tornam mais energéticas, principalmente no inverno, há uma perda de sedimentos para *offshore*. Para além disso, o campo de esporões foi o responsável pela erosão contínua a sotamar das estruturas ao longo do tempo, resultando em efeitos negativos nas zonas adjacentes, onde se situam outros *resorts*, levando à necessidade de mais intervenções de proteção costeira (Taborda *et al.*, 2005; Garzon *et al.*, 2020).

Devido à importância turística que esta zona tem, a hipótese da realização de mais intervenções com estruturas de proteção costeira com um menor impacto visual e ambiental, como a alimentação artificial, deve ser tida em conta. Ao optar por esse tipo de soluções, o valor ambiental e natural da zona mantém-se protegido, o recuo das arribas é atenuado e é garantida uma largura das praias adequada para as atividades balneares, de modo a reduzir os possíveis riscos para a sociedade que está mais próxima da costa (Taborda *et al.*, 2005; Garzon *et al.*, 2020).

Assim, em 1998, foi realizada uma alimentação artificial na praia, que consistiu na deposição de 280 mil m³ de areia com um custo de 1.1 milhões de € (em valores de 1998). Anos mais tarde, foi possível assistir a um avanço da linha de costa (Taborda *et al.*, 2005; Proença e Oliveira, 2010).

2.2.2.3. Vale do Lobo

Vale do Lobo, onde está localizado um *resort* turístico, está dependente das praias e das suas condições, uma vez que a praia é a principal atração desta zona costeira. Ao longo do tempo, tem-se verificado uma contínua erosão costeira, causada pela construção da Marina de Vilamoura e das obras de defesa costeira realizadas na Quarteira, fazendo com que a largura da praia seja cada vez menor. Por isto, mas também para manter a estabilidade da linha de costa, foi assumida a política que apoia a manutenção da linha de costa (*Hold the Line*) e por isso recorreu-se ao processo de alimentação artificial desta zona costeira (Veloso Gomes *et al.*, 2006; Oliveira, 2011; Pinto *et al.*, 2018).

A primeira intervenção, realizada entre 1998 e 1999, envolveu a deposição de um volume de 700 mil m³ de areia ao longo de 1.1 km de comprimento da linha de costa, e teve um custo de 3.2 milhões de € (em valores de 1997). A segunda intervenção, realizada em 2006, consistiu na deposição de 370 mil m³ de areia num comprimento de 1.1 km da linha de costa, com um custo de quase 4.3 milhões de € (em valores de 2005), e foi responsável pelo aumento de 30 m de largura da praia. Um ano depois, em 2007, a areia depositada na alimentação artificial foi sofrendo erosão, tendo-se registado um recuo da linha de costa de 4 m (Taborda *et al.*, 2005; Veloso Gomes *et al.*, 2006b; Proença e Oliveira, 2010).

2.2.3. FIGUEIRA DA FOZ

A Figueira da Foz é uma cidade localizada no estuário do Rio Mondego e sempre foi muito conhecida pelo tráfego e comércio marítimos, em particular desde o século 18. Cerca de 100 anos mais tarde, a zona costeira da Figueira da Foz começa a atrair pessoas como estância balnear, o que provocou um aumento acentuado no turismo (Freitas e Dias, 2011).

Num período entre 1940 e 1950, a zona costeira da Figueira da Foz foi sujeita a um grande progresso urbano devido ao aumento de densidade populacional e à consequente evolução da zona urbana. Devido ao decaimento do turismo, nos anos 60, esta zona sofreu um grande desenvolvimento urbano para atrair de novo as pessoas (Freitas e Dias, 2011).

Em 1965, esta zona foi sujeita à construção de molhes no porto da Figueira da Foz, o que criou um impacto significativo no litoral e nas áreas adjacentes. Após esta intervenção, em 1976 verificou-se um recuo acentuado da linha de costa que atingiu valores até 30 m/ano (Freitas e Dias, 2011).

As sucessivas dragagens realizadas no rio e o prolongamento dos molhes levaram à redução do volume de sedimentos transportados pelo rio, o que criou mais efeitos negativos para as praias localizadas a sul do estuário. Assim, na década de 70, recorreu-se a intervenções de emergência para proteger as zonas de Cova-Gala, Lavos e Leirosa, onde foi construído um campo de esporões e, mais tarde, foi realizada uma alimentação artificial. Assim, em 1979, foram construídos 5 esporões, em que 4 deles apresentam

um comprimento de 100 m e o outro 150 m, com uma elevação de +5 m acima do zero hidrográfico (ZH) (Freitas e Dias, 2011; Ruas, 2017).

O objetivo desta intervenção baseava-se no aumento de retenção de sedimentos e da estabilidade da dinâmica da praia, mas apenas contribuiu para o aumento da erosão do perfil destas praias (Oliveira *et al.*, 2018).

Mais tarde, as praias de Cova-Gala, Lavos e Leirosa foram sujeitas a um processo de alimentação artificial, que teve início em 2012 e terminou em 2013, que se baseou na deposição de 356 mil m³ de areia. Um ano depois, estas praias voltaram a ser alimentadas com 110 mil m³ de areias. Esta alimentação foi uma alimentação do tipo imersa, entre os -2 m e os -8 m abaixo do ZH (Pinto *et al.*, 2018).

A praia do Cabedelo, com um comprimento de cerca de 1 km, também foi sujeita a alimentação artificial, diretamente na praia, realizada num período de três anos, entre 1973 e 1975, com 209 mil m³ de areias para o alargamento das praias. Um ano depois, em 1976, foi realizada uma nova alimentação com 85 mil m³ de areia. Esta praia está situada numa zona mais abrigada e, por isso, tem pouca capacidade de retenção de areias. No entanto, apresenta capacidade para manter a areia depositada artificialmente. Por esta razão, depois da alimentação de 1976, não foram realizadas mais intervenções até aos dias de hoje (Oliveira *et al.*, 2018; Pinto *et al.*, 2018).

A costa da Figueira da Foz é um dos exemplos onde se pode verificar que as intervenções realizadas pelo Homem podem provocar efeitos extremamente negativos para a natureza da zona costeira (Freitas e Dias, 2011; Oliveira *et al.*, 2018). No início de 2021, em janeiro, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) deu início a um concurso público relativo a um projeto de alimentação artificial para a zona das praias Cova-Gala e Lavos, que inclui um estudo de Impacte Ambiental e uma análise de custo-benefício.

2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados vários casos de estudo (Tabela 2.4), internacionais e nacionais, onde foi possível observar a diversas zonas costeiras que foram sujeitas a intervenções de proteção costeira, tanto com estruturas pesadas (esporões) como também com estruturas *soft* (alimentação artificial).

A nível internacional, foram abordados os casos da Flórida (*Miami*), uma zona costeira onde foi construído um campo de esporões e alimentada artificialmente para reduzir a erosão costeira contínua, da Croácia (*Dugi Rat*), uma zona costeira onde foi contruída uma praia artificial para a proteção da linha de costa e também para fins recreativos, e da Bélgica (*Wenduine*), uma zona costeira onde se recorreu à alimentação artificial da praia, mas mais tarde foi necessário recorrer à construção de um campo de esporões.

A nível nacional, foram apresentados os casos da Costa da Caparica, uma zona onde foram alteradas as configurações de esporões já existentes e foi alimentada artificialmente para reduzir a erosão costeira contínua, do Algarve (praias da Rocha, da Quarteira e de Valo do Lobo), em que na primeira e na terceira praia apenas se recorreu à alimentação artificial, e na segunda recorreu-se à construção de um campo de esporões e depois à alimentação artificial da praia, e da Figueira da Foz (praias de Cova-Gala, Lavos, Leirosa e Cabedelo), em que as três primeiras foram sujeitas à construção de um campo de esporões e depois à alimentação artificial das praias, e a última apenas foi sujeita a alimentação artificial.

Relativamente às estruturas pesadas existentes, foi possível verificar que em nenhum caso de estudo se recorreu exclusivamente à construção de esporões porque apesar destes poderem contribuir positivamente para a dinâmica de uma zona costeira, também podem criar efeitos negativos na zona ou mesmo, nas zonas adjacentes (como erosão costeira). Foi o que aconteceu nos casos de estudo da

Flórida, da Costa da Caparica, da Quarteira e da Figueira da Foz (praias de Cova-Gala, Lavos e Leirosa), em que estas zonas, depois da construção de um campo de esporões, tiveram que ser alimentadas artificialmente com areia.

Relativamente à alimentação artificial, foi possível verificar que em todos os casos de estudo mencionados neste capítulo, optou-se por esta estratégia de defesa costeira, pelo seu mínimo impacto nas zonas costeiras e, por motivos recreativos. Apesar das suas vantagens, para algumas zonas costeiras (como o caso da Flórida, da Costa da Caparica e da Figueira da Foz), estas operações devem ser realizadas periodicamente porque são zonas que sofrem de erosão costeira crónica.

Tabela 2.4 - Resumo dos casos de estudo abordados.

CASOS DE ESTUDO	OBRAS DE DEFESA	CAUSAS DE EROSÃO	VOLUME (M ³)	COMPRIMENTO (M)	MANUTENÇÃO
Praia de Miami (Flórida)	Alimentação artificial	Ação antropogénica (dragagens) Agitação marítima	11 615 195	17 000	2014
Praia de Dugi Rat (Croácia)	Alimentação artificial e esporões	Intervenção humana	50 a 70	80	Por ano
Praia de Wenduine (Bélgica)	Alimentação artificial (2012) Campo de esporões	Agitação marítima Localização (zonas baixas)	717 000	500	2016
Praia da Costa da Caparica	Alimentação artificial Campo de esporões	Pressão urbanística, eventos meteorológicos energéticos	500 000	2 500	-
Praia da Rocha (Algarve)	Alimentação artificial (1970)	Pressão urbanística e localização desfavorável	880 000	1 300	1983
Praia de Quarteira (Algarve)	Alimentação artificial (1998) Campo de esporões (1970)	Intervenção humana; Eventos meteorológicos energéticos	280 000	1 500	-
Praia de Vale do Lobo (Algarve)	Alimentação artificial (1998/1999)	Intervenção humana	700 000	1 100	2006
Praias de Cova-Gala, Lavos e Leirosa (Figueira da Foz)	Alimentação artificial (1979) Campo de esporões (2012/2013)	Pressão urbanística	355 630	10 500	2014
Praia do Cabedelo (Figueira da Foz)	Alimentação artificial (1973/1975)	Pressão urbanística e retenção de sedimentos fraca	208 580	1 000	1976

3

CONCEÇÃO E DIMENSIONAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo vai abordar a importância das obras de defesa costeira utilizadas para o caso de estudo desta dissertação (os esporões e a alimentação artificial) e os aspetos importantes para o seu dimensionamento e conceção (como as características morfológicas e hidrodinâmicas do local de intervenção e as características estruturais das obras de defesa costeira).

Ainda, vão ser abordados os modelos numéricos, nomeadamente os modelos de curto termo (*Xbeach* e *Delft3D*) e os modelos de longo termo (*ShorelineS*, *UNIBEST* e *LITPACK*), e as suas funcionalidades nas zonas costeiras.

3.2. ESPORÃO

Os esporões, considerados como intervenções do tipo pesado, são as estruturas de defesa costeira mais comuns no mundo, proporcionando uma certa estabilidade numa determinada zona costeira. No entanto, estas estruturas podem causar efeitos negativos e positivos ao longo da linha de costa. São conhecidos por estarem enraizados à linha de costa e, geralmente, são perpendiculares ou quase perpendiculares à mesma, atuando como um obstáculo para o transporte longitudinal de sedimentos. Normalmente, esta obstrução vai resultar na acumulação de sedimentos a barlar da estrutura, e possivelmente na ocorrência de erosão costeira a sotamar (CEM, 2002).

Os esporões podem ser projetados com uma estrutura que pode ser adaptada às alterações na linha de costa ao longo do tempo, ou com uma estrutura fixa (Simm *et al.*, 2020). As intervenções de proteção costeira podem incluir um único esporão ou serem constituídas por um campo de esporões, dependendo das condições locais. Na maioria das situações recorre-se à construção de um campo de esporões, para reduzir a erosão a sotamar das estruturas e os respetivos efeitos negativos que pode ocorrer (CEM, 2002).

Os principais objetivos desta estrutura de defesa baseiam-se em assegurar uma largura mínima da praia, sob condições de eventos extremos do ambiente marítimo, para a proteção da linha de costa e garantir uma quantidade média de sedimentos suficiente para haver transposição para a zona a sotamar da estrutura, com o intuito de reduzir os impactos negativos nesta zona (CEM, 2002).

Estas estruturas não evitam as perdas de sedimentos para *offshore* durante a ocorrência de eventos extremos porque este tipo de estruturas não afeta os processos transversais à linha de costa, apenas afeta os processos longitudinais que ocorrem ao longo da costa (Simm *et al.*, 2020).

Em muitos países, a construção de esporões tem sido desvalorizada pela má gestão costeira e pelo mau dimensionamento das estruturas. No entanto, quando são bem dimensionadas, construídas e apoiadas com intervenções de alimentação artificial das praias com areia, os esporões conseguem cumprir os seus objetivos em determinadas condições, principalmente quando o objetivo se centra em aumentar o tempo de permanência da areia depositada nas praias (CEM, 2002).

Atualmente, é comum combinar a construção de esporões com intervenções de alimentação artificial, para acelerar a evolução da dinâmica da zona costeira, principalmente no que toca às transposições de sedimentos pela estrutura, de modo a ter resultados num curto espaço de tempo (CEM, 2002).

3.2.1. TRANSPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

O esporão é uma estrutura complexa em diversos aspetos porque, apesar de haver acumulação a barlamar do esporão, existem outros processos a acontecer, tais como a transposição de sedimentos pela estrutura. Isto é, há uma parte dos sedimentos que não ficam retidos a barlamar e são transportados para sotamar da estrutura. É uma vantagem importante porque contribui para a redução da erosão costeira a sotamar da estrutura (CEM, 2002; Sousa, 2012).

Na presença de um esporão, a transposição dos sedimentos para sotamar da estrutura dá-se de várias formas distintas, apresentadas na Figura 3.1, que vão depender das características e da natureza da própria estrutura. Deste modo, a circulação dos sedimentos pode ser feita por: *bypassing*, quando os sedimentos contornam a estrutura; por *over-passing*, quando os sedimentos passam por galgamento pela estrutura; por *through-passing*, quando os sedimentos atravessam pela estrutura; e por *shore-passing*, quando é possível a passagem dos sedimentos pela zona de enraizamento da estrutura por ação do vento (CEM, 2002; Sousa, 2012).

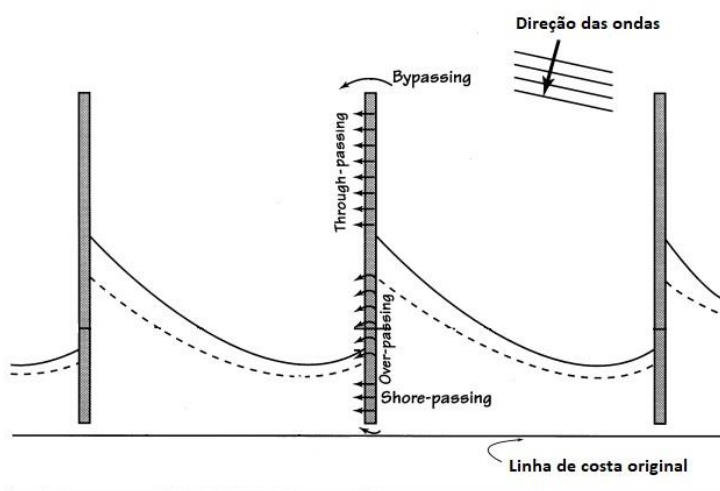


Figura 3.1 - Tipos de transposição de sedimentos em estruturas pesadas, como os esporões (CEM, 2002 - Adaptado).

A quantidade de sedimentos transportada pela estrutura, através das diferentes formas de transposição, vai depender de alguns parâmetros relacionados com as características das estruturas e com as condições da agitação marítima (Sousa, 2012). Assim, na Tabela 3.1, podemos ver os diferentes tipos de transposição e os respetivos parâmetros que controlam este transporte.

Tabela 3.1 - Tipos de transposição e os respetivos parâmetros de controlo (CEM, 2002 - Adaptado).

PROCESSO	PARÂMETROS
<i>Bypassing</i>	Profundidade na zona da cabeça do esporão Altura de onda na zona de rebentação
<i>Through-passing</i>	Permeabilidade do material da estrutura do esporão
<i>Over-passing</i>	Cota do coroamento e amplitude de maré
<i>Shore-passing</i>	Cota do coroamento do esporão
Transporte longitudinal	Taxa de sedimentos que entram e saem no sistema (praia)

3.2.2. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE ONDAS

À medida que as ondas se aproximam da linha de costa, vão ocorrer processos de transformação de ondas, responsáveis pela alteração contínua das suas características. As alterações nas características das ondas vão depender de diversos fatores, tais como a diminuição da profundidade da água e as características das estruturas (naturais ou antropogénicas) que poderão encontrar pelo caminho (CEM, 2002; Silva, 2018). Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3, estão apresentados os principais fenómenos de transformação de uma onda que se pode verificar próximo ou mesmo na linha de costa.

Em relação aos processos de transformação de ondas criados por obstáculos, quando as ondas incidentes encontram um, como o esporão, vai haver a alteração na dinâmica destas ondas que vão originar processos como a refração, a difração, a reflexão e o galgamento. Estes vão implicar a alteração das características das ondas e, consequentemente, criar efeitos negativos ou positivos na linha de costa (CEM, 2002).

Tabela 3.2 - Processos de transformação da agitação marítima (CEM, 2002; CIRIA, 2007).

PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DE ONDA	CARACTERÍSTICAS
Empolamento	Aumento da altura de onda durante a sua propagação até à linha de costa, causada pela redução da profundidade ao aproximar-se da linha de costa.
Sobreelevação¹ e Depressão²	¹ Elevação do nível médio do mar (NMM). ² Redução do nível médio do mar (NMM).
Rebentação	Resultado da redução de profundidade quando as ondas se aproximam da linha de costa e, consequentemente, da redução da velocidade de propagação, levando à instabilidade da onda e à rebentação, onde vai haver dissipação de energia. Existem três tipos de rebentação: rebentação progressiva, rebentação mergulhante e rebentação oscilante.

Tabela 3.3 - Processos de transformação da agitação marítima (CEM, 2002; CIRIA, 2007).

PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DE ONDA	CARACTERÍSTICAS
Espraçamento³ e Refluxo⁴	³ É definido pela altura máxima alcançada por uma onda quando se aproxima de uma praia ou estrutura, e também por todo o processo hidrodinâmico envolvido até à costa. ⁴ É definido pela altura mínima alcançada por uma onda quando se afasta de uma praia ou estrutura (sentido contrário à propagação das ondas), e também por todo o processo hidrodinâmico que é envolvido.
Difração	Redução de energia das ondas quando colidem com um obstáculo, criando zonas com alturas de onda menores, a sotamar deste obstáculo.
Galgamento	Passagem de água sobre o coroamento de uma estrutura, quando a altura da estrutura é inferior à cota de espraçamento prevista.
Reflexão	Reflexão total ou parcial da energia das ondas incidentes quando estas encontram um obstáculo (normalmente estruturas pesadas).
Refração	Alinhamento da crista da onda com a batimetria dos fundos, causado pela diminuição da profundidade da água na aproximação da linha de costa.

O fenómeno da refração, apresentado na Figura 3.2, ocorre quando as cristas das ondas apresentam uma direção oblíqua em relação à linha de costa. Neste caso, tendem a sofrer uma rotação da crista até se verificar o paralelismo entre a crista da onda e as curvas batimétricas dos fundos, isto é, quando a direção das ondas se torna perpendicular à linha de costa. Este processo ocorre devido à diminuição da velocidade de propagação das ondas com a redução da profundidade, ao aproximarem-se da linha de costa (Andersen e Frigaard, 2011).

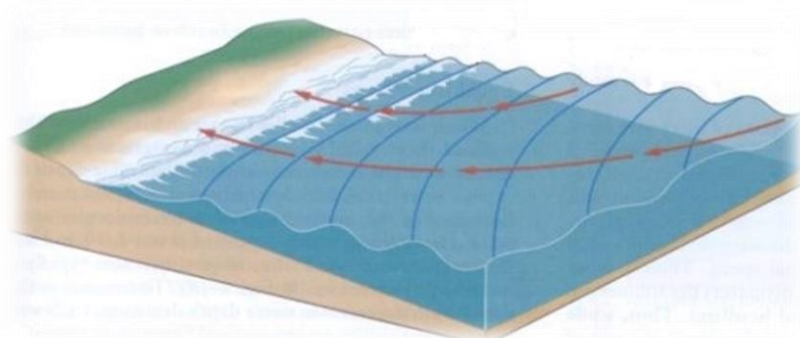


Figura 3.2 - Processo de refração das ondas (Soprani, 2010 - Adaptado).

O fenómeno de difração das ondas, apresentado na Figura 3.3, vai causar a redução da energia das ondas incidentes num obstáculo (por exemplo, um esporão), criando uma alteração nas características das ondas, passando a apresentarem alturas de onda menores a sotamar do obstáculo. A modificação das ondas causada pela difração das ondas pode depender de algumas características, tais como a geometria, o perfil transversal e a permeabilidade do esporão, mas também de alguns parâmetros da agitação marítima, como o comprimento de onda (L) e a altura das ondas (H) (CEM, 2002).

Podendo ocorrer na mesma situação que o processo de difração, ocorre o processo de reflexão total ou parcial da energia das ondas incidentes a barlar da estrutura (Figura 3.3), quando a onda incide num obstáculo (como o esporão) com um determinado ângulo de incidência. A reflexão das ondas vai depender da altura de onda (H), da profundidade de água na zona de rebentação (zona de *surf*), da rugosidade superficial e da inclinação do talude da estrutura (Mangor *et al.*, 2017).

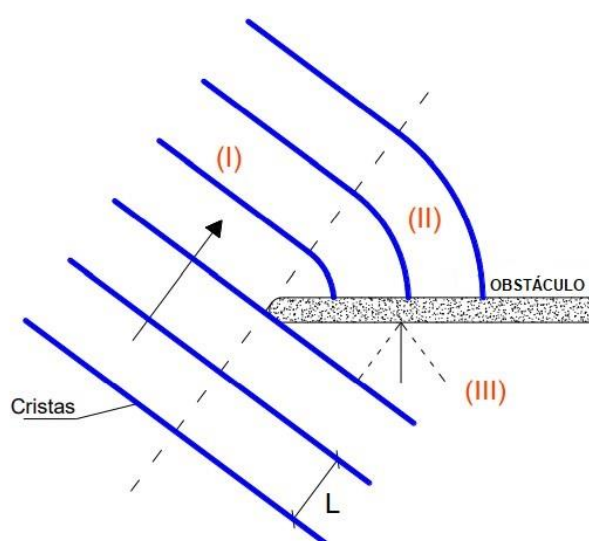


Figura 3.3 - Apresentação de três zonas distintas na mesma situação: a zona onde não há alteração da onda (I), a zona onde ocorre o processo de difração (II) e a zona onde ocorre o processo de reflexão (III).

Por último, o galgamento é um processo de transformação que consiste na passagem de água sobre o coroamento de uma estrutura, quando a altura desta estrutura é inferior à cota de espraçamento fictício da onda. Este processo vai depender da cota de coroamento da estrutura, do nível médio das águas do mar (NMM), das características da agitação marítima local e das características físicas da estrutura, tais como a inclinação do talude, a sua porosidade e a sua rugosidade (Bouma *et al.*, 2009; Stein e Siegle, 2020).

3.3. DIMENSIONAMENTO E CONCEÇÃO DO ESPORÃO

O dimensionamento dos esporões deve ser feito tendo por base as condições locais da zona de intervenção. Por este motivo, foi reunido um conjunto de características, a nível estrutural e local, que podem contribuir para a evolução da linha de costa após a intervenção (Kraus *et al.*, 1994). Assim, as características estão agrupadas em três categorias: as características da estrutura, as características das praias e as condições da agitação marítima e da meteorologia local (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Características que influenciam a linha de costa após a construção de esporões (CEM, 2002 - Adaptado).

ESTRUTURA	PRAIA E SEDIMENTOS	AGITAÇÃO MARÍTIMA, CORRENTES E VENTOS
Extensão	Profundidade de água na zona da cabeça do esporão	Altura de onda
Elevação	Profundidade de fecho	Período de onda
Porosidade	Quantidade de sedimentos disponível	Direção da onda incidente
Configuração (linear, T, L, etc.)	Dimensão média dos sedimentos	Amplitude de maré
Orientação em relação à linha de costa	Massa volúmica dos sedimentos	Velocidade do vento
Espaçamento entre esporões	-	Direção do vento
Comprimento dos esporões	-	Duração do vento

Os fatores que influenciam a evolução da configuração da linha de costa, tanto os relativos aos esporões como os relacionados com a praia e as condições climáticas e de agitação marítima, estão todos interligados havendo uma dependência entre eles na zona costeira.

Assim, o dimensionamento de esporões obriga ao estudo de todas as características, apresentadas na Tabela 3.4, para uma determinada zona costeira. Apesar do conhecimento de todos os parâmetros que vão influenciar a linha de costa, é também importante seguir um conjunto de regras para que todo o processo de dimensionamento e conceção do projeto seja realizado com sucesso. Para tal, foram reunidas um conjunto de propriedades funcionais relativamente aos esporões e à sua construção, tendo em conta as condições que se vão verificar no local de intervenção:

- Para esporões fixos, o ângulo de incidência das ondas e a altura de onda são parâmetros favoráveis ao transporte longitudinal de sedimentos;
- O campo de esporões deve apresentar uma redução do comprimento das estruturas ao longo da costa, se este for adjacente a uma praia não protegida;
- O comprimento do esporão deve ser definido em relação à largura da zona de rebentação;
- A transposição de sedimentos *bypassing*, a permeabilidade da estrutura e as alterações no transporte de sedimentos são os responsáveis pela impossibilidade da linha de costa chegar à cabeça do esporão;
- O quociente entre o comprimento do esporão e o espaçamento entre esporões é um dos principais parâmetros para o dimensionamento de esporões;
- O campo de esporões deve ser preenchido e as praias devem ser alimentadas a sotamar da estrutura, de modo a haver transposição por *bypassing* e a consequente redução da erosão a sotamar;
- O esporão apresenta uma maior eficácia nas praias, quando está projetado para aproveitar a direção predominante do transporte longitudinal de sedimentos;

- O quociente entre o espaçamento entre esporões e o tempo de retenção de sedimentos também é um dos parâmetros essenciais para o dimensionamento deste tipo de estruturas;
- O campo de esporões deve ser construído na direção sotamar-barlamar, tendo em conta as condições de agitação marítima locais e a localização da intervenção;
- O esporão permeável permite um maior transporte de sedimentos pela estrutura, e como consequência, permite reduzir a formação de correntes de retorno nos compartimentos. O esporão impermeável, que inclui uma camada de filtro para limitar o transporte de sedimentos pela estrutura, causa uma maior disparidade nas linhas de costa a barlamar e a sotamar da estrutura;
- Geralmente, há acreção a barlamar e erosão a sotamar da estrutura. Tanto o material da estrutura (permeabilidade), como a alimentação artificial não garantem a 100% a transposição de sedimentos (CEM, 2002; Mangor *et al.*, 2017).

O dimensionamento dos esporões deve ter por base inúmeros fatores, entre os quais, aqueles relacionados com a facilidade de construção e de manutenção, tendo em conta as características do local e da própria estrutura (CEM, 2002).

3.3.1. TIPOS DE ESPORÕES

Tendo em conta as condições locais e o tipo de proteção que uma determinada linha de costa necessita, os esporões podem ser agrupados em diferentes categorias, nomeadamente tendo em consideração a sua configuração em perfil, em planta e em termos de tipo de material utilizado na sua construção.

3.3.1.1. Configuração em perfil

Relativamente à configuração em perfil, os esporões, como obra de defesa costeira, podem ser agrupados em 3 categorias: emersos, submersos e de cota de coroamento baixo (*low-crested structures*) (Mangor *et al.*, 2017).

Os esporões emersos são estruturas projetadas para o seu coroamento estar sempre, ou quase sempre, acima do nível da água. Os esporões submersos são estruturas projetadas para o seu coroamento estar sempre, ou quase sempre, abaixo do nível da água. Por outro lado, os esporões de cota de coroamento baixo, também designadas de estruturas *low-crested*, são esporões que são sujeitos a uma grande amplitude das ondas, podendo ser galgáveis ou não galgáveis, de modo a não alterar as condições da agitação marítima e do transporte de sedimentos. Estas estruturas podem apresentar características do tipo emerso e do tipo submerso, ou parcialmente submerso (CIRIA, 2007).

O dimensionamento das estruturas *low-crested* deve ter em conta a profundidade da água, a que foi construída a estrutura, e a rebentação das ondas, que pode afetar a estabilidade da estrutura. Por isso, quanto maior a profundidade a que estiver a estrutura, maior estabilidade apresentará (CIRIA, 2007).

O dimensionamento das estruturas emersas deve ter em conta a ação das ondas incidentes, que apenas afeta a estabilidade do talude anterior (I) da estrutura quando não há galgamento, no entanto devido às variações do NMM, pode haver galgamento da estrutura que pode afetar a estabilidade do talude anterior (I), do coroamento (II) e do talude posterior (III) (CIRIA, 2007).

Assim, o perfil transversal das estruturas emersas (1) e submersas (2), tendo em conta as ondas incidentes com determinada altura de onda (H) e determinado período de onda (T), está apresentado na

Figura 3.4. No entanto, quando a estrutura é sujeita a uma amplitude de onda elevada, por exemplo se houvesse a evolução frequente da posição 1 para a posição 2, ou vice versa (Figura 3.4), a estrutura seria do tipo *low-crested* (CIRIA, 2007).

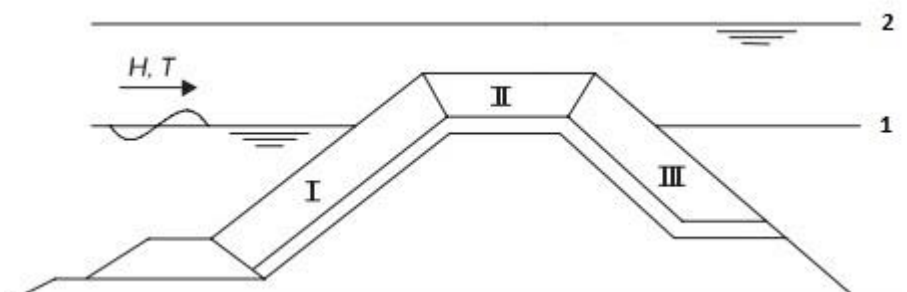


Figura 3.4 - Exemplo de perfil transversal de um esporão emerso (1) e submerso (2) (CIRIA, 2007 - Adaptado).

Relativamente às características estruturais, esporões *low-crested* apresentam uma diminuição da sua cota desde o enraizamento até à cabeça do esporão, apresentando uma inclinação ao longo do desenvolvimento da estrutura. Para um maior grau de proteção da linha de costa, é recomendada uma inclinação do coroamento entre 4H:1V e 10H:1V, que visa também, minimizar a erosão localizada na cabeça do esporão. Estas estruturas favorecem a deposição de sedimentos a sotamar da estrutura (Oosting *et al.*, 2015).

3.3.1.2. Configuração em planta

Relativamente à configuração em planta, grande parte dos esporões apresentam características tradicionais (lineares e perpendiculares à linha de costa). No entanto, ainda podem ser apresentados com outras formas menos tradicionais, apresentados na Figura 3.5 (CEM, 2002; Sousa, 2012).

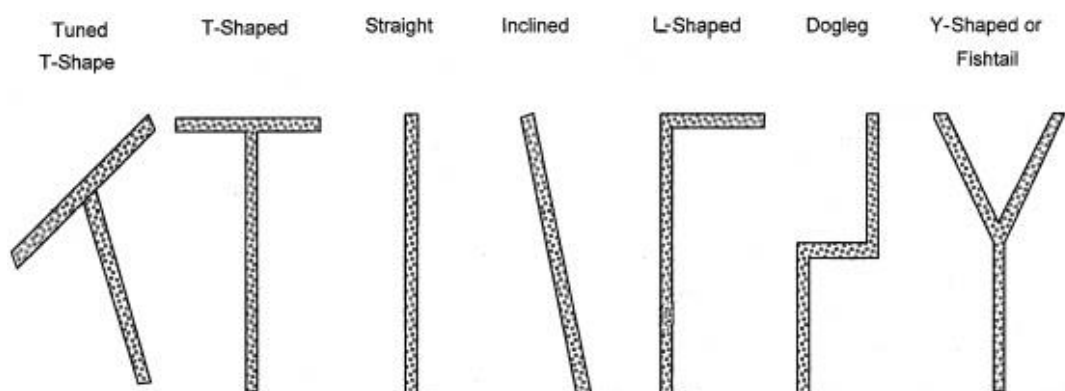


Figura 3.5 - Diferentes formas de esporões possíveis (CEM, 2002).

Numa perspetiva mais realista, a Figura 3.6 apresenta as diferentes configurações em planta de esporões que foram construídos ao longo da linha de costa da Roménia.

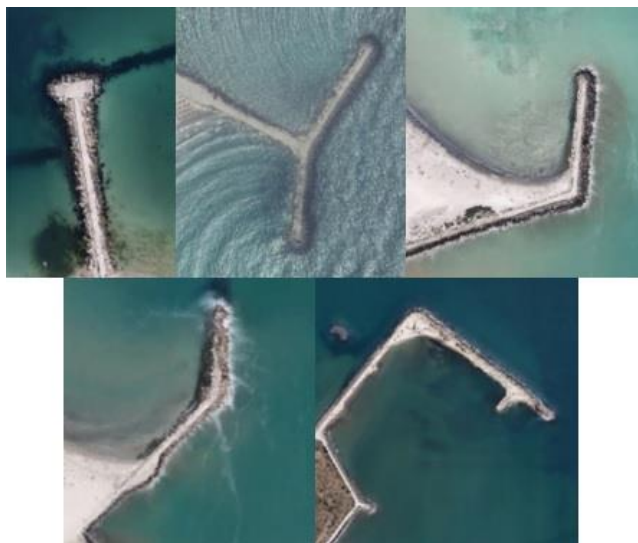


Figura 3.6 - Esporões com diferentes configurações em planta ao longo da linha de costa romena (fonte: Google Earth).

Estas configurações são apenas o exemplo das configurações que os esporões podem apresentar, sendo que a sua forma não é o único parâmetro que pode ser alterado. Com efeito, também o seu comprimento, as cotas de coroamento e a sua permeabilidade podem variar. Estas configurações menos comuns podem ser usadas para a mitigação de impactos negativos a sotamar da estrutura ou simplesmente por motivos paisagísticos, de modo a reduzir o impacto visual na linha de costa (CEM, 2002; Sousa, 2012).

Os esporões em T são semelhantes aos quebra-mares quando a zona do esporão paralela à costa estiver acima do NMM. Por outro lado, os esporões inclinados, quando apresentam uma inclinação na direção do transporte sedimentar, podem reduzir as correntes ao longo da zona a barlar da estrutura (CEM, 2002).

De um modo geral, todas as formas apresentadas nas Figura 3.5 e Figura 3.6 fornecem um grau de estabilidade para a linha de costa (CEM, 2002).

3.3.1.3. Classificação em relação ao tipo de material

Relativamente a características mais particulares, os esporões podem apresentar diferenças em termos de permeabilidade e longevidade da estrutura, da adaptação aos eventos de erosão, e do impacto no transporte longitudinal de sedimentos. Posto isto, na Tabela 3.5 são apresentados os diferentes tipos de esporões, o tipo de material que pode ser usado e algumas observações úteis para a escolha do tipo de esporão para uma determinada aplicação (Simm *et al.*, 2020).

Tanto os esporões verticais como os esporões de taludes podem ser permeáveis ou impermeáveis. No entanto, os esporões impermeáveis podem perder a sua permeabilidade ao longo do tempo, causada pela deterioração do material da estrutura (Simm *et al.*, 2020).

Tabela 3.5 - Principais tipos de esporão e os respectivos materiais.

TIPO DE ESPORÃO	ESPORÃO	TIPO DE MATERIAL	OBSERVAÇÕES
Vertical	Estacas; Estacas-prancha	Madeira; Ferro; Madeira-Ferro	Elevada reflexão das ondas incidentes
Talude	Esporão de taludes	Rocha; Geossistemas de confinamento	Redução da energia das ondas incidentes
Permeáveis	Esporão vertical; Esporão de taludes	Betão; Madeira; Rocha	Transposição <i>Through-passing</i> ; Redução da erosão a sotamar da estrutura
Impermeáveis	Esporão vertical; Esporão de taludes	Rocha; Betão	Elevada reflexão das ondas incidentes

O esporão vertical é um tipo de esporão que apresenta uma forma direita com uma pequena largura, sem taludes. Estas tipo de estruturas pode atuar como uma barreira para o transporte de sedimentos, dependendo do grau de permeabilidade da estrutura. Se o esporão for impermeável, não há transporte de sedimentos através da estrutura e a reflexão das ondas incidentes é favorecida, provocando uma maior erosão na zona de reflexão. As estacas podem ser usadas na construção de esporões verticais, compostos por uma placa horizontal, entre colunas, que vai atuar como uma barreira para o transporte de sedimentos (Simm *et al.*, 2020).

São estruturas semelhantes aos esporões de enrocamento, mas sujeitos a um processo de manutenção mais complexo. Geralmente, são estruturas construídas em madeira, mas também pode ser usado o ferro para a sua construção. Para além disso, ainda podem apresentar uma forma linear ou em *zig-zag* (Simm *et al.*, 2020). Na Figura 3.7 é apresentado o perfil transversal e a configuração em planta de um esporão vertical em madeira.

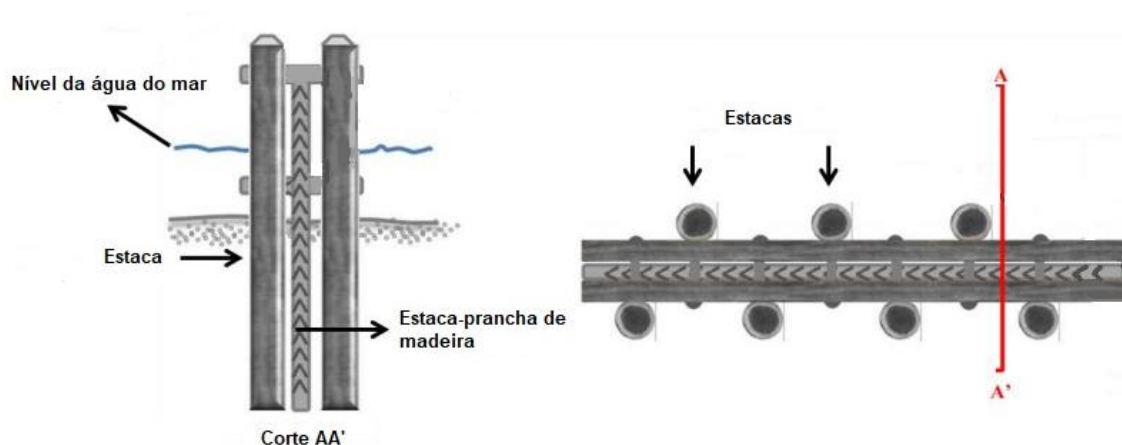


Figura 3.7 - Perfil transversal e configuração em planta de um esporão vertical em madeira (Averini Rodeia, 2014 - Adaptado).

A estaca-prancha metálica são estruturas verticais temporárias ou permanentes, que normalmente funciona como um esporão terminal ou como um esporão temporário, usada para o auxílio de

construções. Pela sua estética e desempenho, esta estrutura pode ser projetada com outros materiais, como a madeira, mas também podem ser usados vários materiais em simultâneo, como por exemplo, a madeira e o ferro (CEM, 2002; Simm *et al.*, 2020).

Em relação aos esporões de taludes, são estruturas que apresentam uma secção transversal em forma de trapézio, com uma determinada inclinação dos taludes, por exemplo de 1:1, 2:1 ou 3:2. Geralmente, são construídos esporões de enrocamento pela sua eficácia, devido à sua inclinação e ao seu material, que permite reduzir a reflexão das ondas que incidem na estrutura. Apesar deste tipo de esporões com enrocamento apresentarem características vantajosas, podem ser utilizados outros materiais, como os blocos artificiais em betão (tetrápodes) (Bezerra, 2008). Na Figura 3.8, como exemplo, é apresentado o perfil transversal de um esporão em enrocamento.

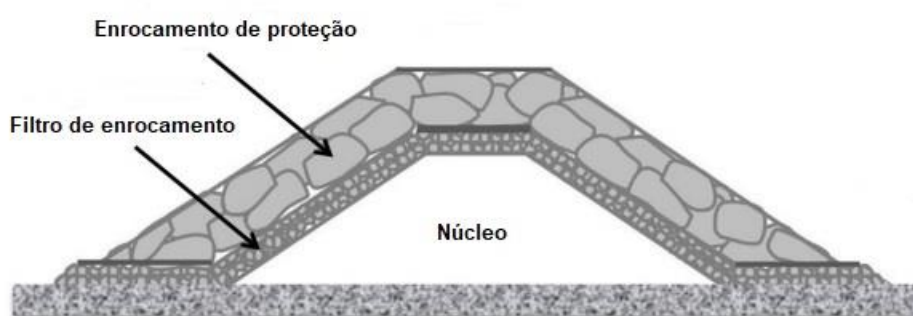


Figura 3.8 - Perfil transversal de um esporão de taludes em enrocamento (Averini Rodeia, 2014 - Adaptado)

Os esporões de enrocamento são constituídos por um manto resistente de enrocamento e por uma camada de filtro interior, com uma determinada permeabilidade. As suas características dependem de vários fatores, como por exemplo, o tipo de sedimentos no local, o transporte litoral de sedimentos e a presença de correntes marítimas. Este tipo de estruturas é geralmente mais dispendioso, mas apresenta vantagens em relação à sua adaptação em situações de erosão e à sua elevada longevidade no local. Devido à forma que apresenta, ao seu tamanho e à sua natureza semi-porosa, são estruturas que conseguem reduzir a energia das ondas incidentes sem haver a completa reflexão da mesma, podendo, no entanto, verificar ainda assim erosão localizada no manto resistente em enrocamento (CEM, 2002; Simm *et al.*, 2020).

Para além deste tipo esporão ser, normalmente, projetado com enrocamento, devido às suas vantagens, onde se inclui a longa durabilidade da estrutura, os esporões em talude podem ser construídos com outros materiais como o betão, a madeira e os geossistemas de confinamento com enchimento de areia ou betão/argamassa (Mangor *et al.*, 2017; Simm *et al.*, 2020). Os geossistemas de confinamento de areia, tal como nos tipos de esporões já descritos, apresentam capacidade de reduzir a erosão costeira, mas com a diferença de apresentarem um menor impacto nos sistemas naturais existentes na costa (Lopes *et al.*, 2016).

Em relação aos esporões permeáveis, são projetados para minimizar a erosão a sotamar da estrutura, através da transposição de sedimentos *through-passing*, devido à sua permeabilidade. A transposição de sedimentos *through-passing* vai permitir uma menor discrepância da quantidade de sedimentos nas linhas de costa a barlar e a sotamar da estrutura, sendo a principal vantagem deste tipo de esporões (Simm *et al.*, 2020).

Por último, os esporões impermeáveis são projetados e construídos com o intuito de haver retenção total dos sedimentos sem a ocorrência de transposição *through-passing* pela estrutura, alterando o estado das linhas de costa a barlar e a sotamar. Os materiais usados na construção deste tipo de esporões vai sofrer deterioração ao longo do tempo, o que torna a estrutura cada vez menos impermeável e menos eficiente (Simm *et al.*, 2020).

A estaca-prancha, para além de ser um esporão vertical, também é um bom exemplo de estruturas maioritariamente impermeáveis, devido às diversas aplicações que este tipo de esporão pode ter, por exemplo pode ser aplicado como barreiras impermeáveis na construção de outro tipo de esporões, não deixando a água do mar entrar para a zona de construção (CEM, 2002).

3.3.2. MODO DE CONSTRUÇÃO

O dimensionamento de um esporão, ou de um campo de esporões, é um processo que requer um estudo pormenorizado dos seguintes parâmetros locais e estruturais: a largura e a orientação da praia, o comprimento necessário da estrutura, o espaçamento necessário entre estruturas e a configuração das estruturas ao longo da costa. Todos estes parâmetros são projetados para as condições desejadas, tendo em conta o local de intervenção (Simm *et al.*, 2020). Na Figura 3.9 está apresentado um campo de esporões, onde é possível identificar todos os parâmetros necessários mencionados acima.

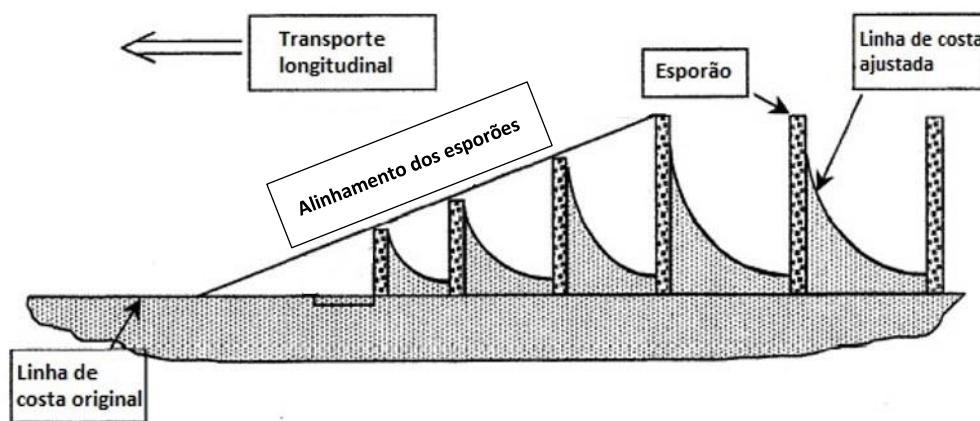


Figura 3.9 - Disposição do campo de esporões recomendada pelo (CEM, 2002 - Adaptado)

A necessidade de aumentar, ou manter, a largura da praia, e, portanto, chegar a uma certa estabilidade da costa, está entre as principais razões para a construção destas estruturas. Ao interromperem o transporte longitudinal de sedimentos, estas estruturas permitem o alargamento da praia, mas também a re-orientação da linha de costa. A largura desejada é avaliada pela largura mínima média que a praia podia apresentar antes da intervenção, capaz de assegurar um grau de proteção para toda a área adjacente interior (Simm *et al.*, 2020).

Em relação ao comprimento dos esporões, é um parâmetro que depende de vários fatores, designadamente, as características da agitação marítima local, como a altura de onda significativa (H_s), o período de onda (T) e o ângulo de incidência das ondas (α), e o estado da praia, como o perfil transversal da praia (Simm *et al.*, 2020). Normalmente, para um bom funcionamento do sistema, o comprimento dos esporões deve diminuir na direção do transporte longitudinal, resultando num

alinhamento das estruturas ao longo do campo de esporões para reduzir os impactos negativos a sotamar das estruturas (CEM, 2002; Sousa, 2012).

O espaçamento dos esporões é um parâmetro que vai depender do material sedimentar da praia, do comprimento da estrutura, do ângulo de incidência das ondas e da capacidade de retenção da estrutura. O espaçamento é estabelecido em relação à largura da praia que se deseja alcançar a sotamar da estrutura, sendo de extrema importância o espaçamento ser ideal para a zona de intervenção. Caso isto não aconteça, se os esporões estiverem muito próximos, vai haver acumulação de areias na praia mais rápido, mas se as estruturas estiverem demasiado afastadas, a largura da praia vai diminuir e criar erosão costeira em todo o compartimento (Simm *et al.*, 2020).

A configuração ideal do esporão depende muito da direção predominante das ondas e do transporte sedimentar ao longo da costa, os quais vão ditar a forma mais adequada para um determinado local de intervenção. Para além da direção das ondas, aquando do projeto do esporão, deve-se ter em consideração os processos de transformação das ondas que a estrutura poderá originar e as vantagens que estes fenómenos podem ter na linha de costa (Simm *et al.*, 2020).

A ordem de construção das estruturas deve ser estabelecida de forma que a construção não afete a zona a sotamar da estrutura. Por isso, a construção deve-se iniciar pelo último esporão, segundo a direção predominante das ondas, denominado esporão terminal, sendo necessário esperar que a linha de costa alcance uma situação de equilíbrio. Por vezes, é necessário recorrer à alimentação artificial. Após a linha de costa apresentar um equilíbrio do sistema, é possível continuar a construção dos restantes esporões que se vão localizar a barlar do primeiro, tendo sempre em consideração a direção das ondas predominante e do transporte de sedimentos (CEM, 2002; Sousa, 2012).

O esporão terminal é o último esporão do campo de esporões e o primeiro a ser construído. Devido à erosão costeira que se pode vir a verificar a sotamar deste esporão, esta estrutura deve ser mais forte para manter a sua estabilidade (Simm *et al.*, 2020). Normalmente são estruturas impermeáveis, com uma cota de coroamento elevada, para impedir a passagem de sedimentos por *through-passing* e *over-passing* pela estrutura (CEM, 2002).

Resumindo, a construção de um campo de esporões deve obedecer a determinadas condições relativas a estes parâmetros, de maneira a criar um sistema o mais eficiente possível (CEM, 2002; Sousa, 2012).

3.4. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

A alimentação artificial com areia, considerada como uma intervenção do tipo *soft*, é um método normalmente usado em combinação com outra estratégia de defesa costeira. A intervenção de alimentação artificial sozinha não resolve o problema de erosão costeira, pelo que deve ser realizada uma manutenção periódica da mesma e combinada com outra obra de defesa costeira, normalmente uma estrutura pesada (RIKZ, 2014). Esta intervenção tem como principal objetivo a mitigação dos riscos costeiros, como as inundações, que poderão existir em consequência de eventos meteorológicos mais energéticos. Deste modo, é uma intervenção que vai assegurar a proteção das estruturas mais próximas da costa e, em alguns casos, permitindo que as atividades de lazer continuem a ocorrer nas praias (CEM, 2002; Bitan e Zviely, 2020).

É um método de defesa costeira que consiste na deposição de sedimentos, semelhantes ao material original do local, em zonas costeiras que apresentam volumes mais baixos de areias e que leva à redução da estabilidade da zona costeira causada pela erosão costeira. Este tipo de estratégia inclui o processo de dragagens realizadas numa fonte sedimentar estável escolhida (RIKZ, 2014).

Apesar de ser uma estratégia que apresenta efeitos positivos na linha de costa, o processo de dragagens vai perturbar a fonte sedimentar, podendo levar à escassez de sedimentos nesta. A fonte sedimentar pode estar localizada num ponto a *offshore*, em rios ou em terra. Se esta fonte se localizar a *offshore* da zona costeira ou nos rios que vão desaguar próximo das praias, a escassez de sedimentos vai influenciar também a dinâmica da praia (RIKZ, 2014).

Globalmente, a alimentação artificial de areias, como método de defesa costeira, tem sido uma opção cada vez mais utilizada, principalmente nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa, pelas vantagens que apresenta em relação aos impactos mínimos que pode criar no meio ambiente existente nas linhas de costa (Giordano *et al.*, 2006; Bitan e Zviely, 2020).

3.5. DIMENSIONAMENTO E CONCEÇÃO DA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL

A intervenção de alimentação artificial, apesar de ser uma estratégia simples, engloba todo um processo de dimensionamento que deve ser definido tendo em conta as condições locais da zona costeira, tais como a agitação marítima, as condições climáticas e as características da praia. Deste modo, o dimensionamento deve ser feito seguindo os requisitos funcionais estabelecidos para cumprir a sua função ao longo da linha de costa.

A eficácia da alimentação artificial não é certa devido às diferentes condições que é possível ver em diferentes zonas costeiras, sendo que há zonas onde a alimentação artificial apresenta resultados positivos, em relação ao grande intervalo de manutenção necessária ou até mesmo não serem necessárias mais intervenções deste tipo. No entanto, existem zonas costeiras em que a operação de alimentação artificial pode ser dispendiosa pelo elevado número de intervenções necessárias. Assim, esta pode ser realizada através de dois métodos diferentes, que diferem na maneira como os sedimentos são depositados, tanto a nível longitudinal como transversal. A nível longitudinal, é feita uma alimentação artificial distribuída ao longo da linha de costa, depositando a mesma quantidade de sedimentos ao longo de todo o comprimento incluído na operação, e a nível transversal, é feita uma alimentação pontual de uma determinada área da linha de costa, sendo uma intervenção que apresenta um menor impacto na zona costeira (Mangor *et al.*, 2017).

3.5.1. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DISTRIBUÍDA

A alimentação artificial distribuída é o tipo de alimentação que permite uma distribuição longitudinal uniforme dos sedimentos ao longo da linha de costa, sendo a areia aplicada em diferentes zonas do perfil transversal da praia: zonas imersas, emersas e em todo o perfil transversal.

A alimentação artificial realizada em zonas imersas da praia, também denominada alimentação imersa, consiste na deposição de sedimentos na zona de rebentação (*Shoreface nourishment*). A alimentação realizada em zonas emersas da praia, também denominada alimentação emersa, consiste na deposição de sedimentos na zona mais elevada da praia/dunas (*Backshore nourishment*) e da zona balnear da praia (*Beach nourishment*). Por outro lado, quando necessário, também pode ser realizada uma alimentação em todo o perfil transversal da praia (Mangor *et al.*, 2017).

3.5.1.1. Alimentação imersa

A alimentação artificial da zona de rebentação da praia, apresentada a cor laranja na Figura 3.10, consiste na criação de elevações de areia submersas próximas da costa, que permitem reforçar o perfil transversal

da praia e adicionar um determinado volume de areia, pela ação das ondas, à zona da praia. Este tipo de alimentação é usado em zonas em que a existência de estruturas de proteção costeira vai influenciar o perfil da praia ou em zonas que sofrem de erosão crónica. Pode ser adicionada a projetos de outros tipos de alimentação, como a alimentação da zona balnear da praia, onde os sedimentos de menor dimensão podem ser aproveitados para alimentar a zona de rebentação, uma vez que o material mais fino não é o mais indicado para a alimentação da zona da praia (Mangor *et al.*, 2017).



Figura 3.10 - Alimentação artificial imersa na zona de rebentação da praia (Mangor *et al.*, 2017 - Adaptado).

Mesmo em situações em que é realizado apenas este tipo de alimentação, esta atua indiretamente como uma medida de proteção da costa, levando à dissipação da energia das ondas, mas também como uma medida de restauração das praias. Embora apresente algumas vantagens, este tipo de alimentação tem a desvantagem de potenciar a erosão costeira nas zonas costeiras adjacentes (Taal *et al.*, 2016).

Importa ainda referir que a alimentação imersa é considerada a opção mais barata porque aproveita a ação das ondas e das correntes para o transporte de areias para as praias (Taal *et al.*, 2016).

3.5.1.2. Alimentação emersa

A alimentação artificial da zona mais elevada da praia está associada à alimentação das dunas (1) ou à zona superior do perfil da praia (2), apresentadas a cor laranja na Figura 3.11. A primeira é projetada como uma barreira natural de defesa contra inundações que resultam de eventos meteorológicos mais energéticos ou como barreira quando existe uma lagoa atrás desta (*coastal lagoon*). A segunda tem como objetivo fortalecer a berma da praia para aumentar a proteção contra eventos meteorológicos mais energéticos e os respetivos riscos costeiros. Assim, o material depositado atua como um *buffer*, o qual é erodido durante os eventos extremos criando elevações submersas de areia próximas da praia.

A alimentação de dunas é realizada devido à erosão costeira que se verifica nas zonas costeiras e permite aumentar o grau de proteção na linha de costa (Mangor *et al.*, 2017).

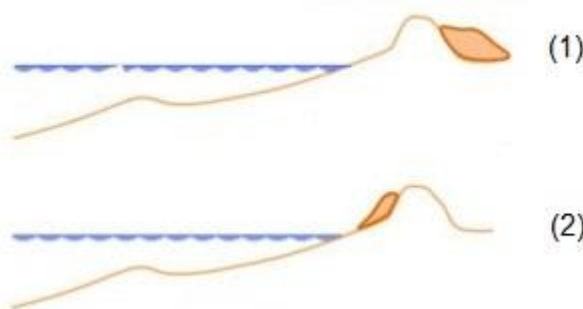


Figura 3.11 - Alimentação artificial emersa na zona das dunas (1) e na zona superior do perfil da praia (2) (Mangor *et al.*, 2017 - Adaptado).

A alimentação realizada nestas zonas mais elevadas é geralmente utilizada em situações de emergências, para evitar danos nas dunas. Por isso, este tipo de alimentação artificial é recomendado para casos de erosão excessiva e, não para casos de erosão crónica (Mangor *et al.*, 2017).

A alimentação artificial da zona balnear da praia baseia-se na alimentação da zona ativa da praia, apresentada com a cor laranja na Figura 3.12, sendo realizada para aumentar o valor recreacional e elevar o grau de segurança contra condições de agitação marítima mais energéticas. Este tipo de alimentação não atua como uma medida de proteção da costa porque não impede, eficazmente, a ocorrência de inundações e de erosão, mas pode atuar como suporte de outra estrutura de defesa costeira (Mangor *et al.*, 2017).



Figura 3.12 - Alimentação artificial emersa na zona balnear da praia (Mangor *et al.*, 2017 - Adaptado).

Uma vez que o processo de alimentação tradicional se baseia na distribuição de areias ao longo da linha de costa, com o passar do tempo, a alimentação da zona balnear da praia tem tendência a desenvolver uma alimentação em todo o perfil da praia, devido ao deslocamento longitudinal e transversal, de sedimentos que se verifica, pela ação dos ventos, numa determinada zona costeira (Mangor *et al.*, 2017).

Tanto a alimentação da zona ativa da praia, como da zona superior e das dunas, contribuem para um maior grau de proteção para a linha de costa, tornando-se muito eficaz na dissipação da energia das ondas e na flexibilidade que as dunas apresentam após eventos mais energéticos (RIKZ, 2014).

3.5.1.3. Alimentação do perfil transversal da praia

Em situações em que toda a área da praia apresenta escassez de sedimentos, é necessário recorrer a uma alimentação artificial em todo o perfil transversal da praia, para restabelecer uma forma de equilíbrio (Mangor *et al.*, 2017). Este tipo de alimentação, apresentado na Figura 3.13 com cor laranja, é realizado em situações de erosão costeira crónica e de erosão excessiva, mas também para evitar a erosão causada pela subida do nível médio das águas do mar (NMM) (Mangor *et al.*, 2017).



Figura 3.13 - Alimentação artificial do perfil transversal da praia (Mangor *et al.*, 2017 - Adaptado).

Este tipo de alimentação vai criar maiores impactos nos sistemas naturais ao longo da costa, em relação a tipos de alimentação menos invasivos, como os que foram mencionados anteriormente (alimentação artificial da zona balnear e da zona superior das praias, e a alimentação artificial das dunas). Deste modo,

pode concluir-se que a alimentação de todo o perfil da praia não é a melhor opção de estratégia (Mangor *et al.*, 2017).

A alimentação artificial distribuída, conhecida como o método mais tradicional, tem vindo a ser analisada ao longo dos anos. Desta análise foi possível concluir que alguns tipos de alimentação deste método não eram a melhor opção devido à perturbação que causavam nos ecossistemas existentes nas zonas de alimentação (Mangor *et al.*, 2017).

3.5.2. ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL PONTUAL

A alimentação artificial pontual consiste na deposição de material novo em áreas limitadas na zona costeira, minimizando o impacto que este processo tem nos ecossistemas presentes em toda a zona costeira. É um método menos invasivo, em comparação com a alimentação artificial distribuída, e aproveita os mecanismos de transporte naturais, mais especificamente a ação das ondas, das correntes e do vento, para permitir a distribuição dos sedimentos ao longo da linha de costa (Mangor *et al.*, 2017).

A praia alimentadora (*sand motor*) é um exemplo deste tipo de alimentação artificial, e consiste na realização de uma mega alimentação, de uma determinada área estabelecida na linha de costa. É uma operação realizada com a deposição de uma determinada quantidade de sedimentos numa determinada área, tendo em conta as condições locais (Taal *et al.*, 2016). Na Figura 3.14, está apresentado um exemplo de uma praia alimentadora realizada nos Países Baixos.



Figura 3.14 - Exemplo de uma praia alimentadora realizada nos Países Baixos [2].

A praia alimentadora é um projeto inovador que tem como objetivo a preservação e a proteção da linha de costa, e ainda a criação de zonas de lazer e o desenvolvimento da natureza na área limitada, de modo a ser possível estudar o comportamento da zona costeira. Tendo em conta as suas vantagens, este projeto é considerado um exemplo de construção com a natureza, isto é, um projeto que aproveita os processos naturais para a recuperação e manutenção das zonas costeiras (Taal *et al.*, 2016).

Apesar de ser um método de alimentação artificial com um impacto muito limitado na zona costeira, também apresenta algumas vantagens e desvantagens na Tabela 3.6 (Mangor *et al.*, 2017).

Tabela 3.6 - Vantagens e desvantagens da alimentação artificial pontual (Mangor *et al.*, 2017 - Adaptado).

VANTAGENS	DESVANTAGENS
A maior parte da linha de costa não é afetada diretamente pela alimentação artificial	A proteção não dá estabilidade uniforme da praia na área alimentada nem nas áreas adjacentes
A areia depositada na área limitada é gradualmente distribuída pelas áreas adjacentes, pela ação das ondas, das correntes e dos ventos	Pode causar erosão costeira ao longo das áreas adjacentes se a área alimentada apresentar uma largura elevada, e se as ondas incidentes apresentarem um grande ângulo de incidência
A área onde foram depositados os sedimentos vai criar zonas para atividades de lazer e permitir identificar os processos costeiros	Desenvolvimento de taludes íngremes na zona interior e na extremidade das restingas, criando riscos para os banhistas
O custo unitário de construção vai ser mais baixo, em comparação com o método tradicional, porque é uma alimentação de uma área menor	Formação de correntes de retorno devido às alterações acentuadas da orientação da área alimentada
Os processos naturais vão desenvolver diferentes formas costeiras, como restingas, que vão permitir o aumento da biodiversidade	-

O método de alimentação pontual é usado normalmente em situações de erosão costeira crónica e consiste, apenas na distribuição gradual de sedimentos para sotamar da área limitada, tendo em conta a direção predominante das ondas e dos ventos, contribuindo para a proteção da linha de costa. Para além disso, este método só pode ser usado como uma alimentação de manutenção em áreas que já estão bem alimentadas e, tanto a praia como as dunas, não estejam sujeitas a erosão costeira (Mangor *et al.*, 2017).

Concluindo, é um método menos invasivo que apenas pode ser utilizado para manutenção da linha de costa, de modo a impedir a evolução da erosão crónica e da erosão causada pela subida do NMM. No entanto, não pode ser usado para situações de erosão excessiva porque não permite uma distribuição uniforme ao longo da linha de costa (Mangor *et al.*, 2017).

3.5.3. MODO DE CONSTRUÇÃO

Para mitigar o impacto do processo de alimentação artificial nas praias e assegurar a estabilidade das mesmas, é recomendado o uso de material semelhante ao original. O uso de material mais grosseiro tende a resultar no aparecimento de efeitos negativos para os ecossistemas que poderão existir nas zonas costeiras. Por isso, tanto os aspetos técnicos como naturais devem ser considerados no projeto de uma alimentação artificial, para assegurar o valor que os ecossistemas presentes possuem na zona costeira. Assim, o processo de alimentação deve ser feito no período de inverno e deve ser alimentada a zona superior do perfil da praia, para evitar perturbações nas espécies existentes na zona costeira (Van Tomme *et al.*, 2013).

O material depositado artificialmente tende a ser erodido ao longo do tempo, sendo necessária uma manutenção periódica da alimentação, o que não garante, por si só, a estabilidade da zona costeira. Para tal, esta estratégia deve ser combinada com outro tipo de obra de defesa costeira, como já foi mencionado anteriormente. O novo material deve ter a mesma dimensão ou ser ligeiramente maior que a areia original da zona costeira em causa, mas se o material apresentar dimensões mais grosseiras em comparação com a areia original, as ondas vão transportar os sedimentos para *offshore* criando um banco de areia submerso próximo da linha de costa, o que poderá ser perigoso para os banhistas (Mangor *et al.*, 2017).

Geralmente, parte da areia depositada é transportada para as zonas costeiras adjacentes, em relação à direção predominante das ondas e do vento, enquanto a outra parte é transportada para *offshore* através do transporte transversal de sedimentos que se verifica na linha de costa, pela ação das correntes de retorno. Isto acontece devido às condições de agitação marítima e climáticas do local de intervenção (Mangor *et al.*, 2017).

Segundo Mangor *et al.* (2017), a operação de alimentação artificial deve ser feita seguindo algumas regras de dimensionamento, para haver um bom funcionamento da intervenção após a sua construção. Assim, a alimentação artificial de areias deve seguir as seguintes regras de dimensionamento e informação de base:

- Ter conhecimento da quantidade de sedimentos existente e da gravidade da erosão costeira no local onde se vai realizar a intervenção;
- Para que se verifique a estabilidade da zona costeira, é essencial que o volume depositado por metro de praia, por ano, seja igual ao déficit de sedimentos existente nessa zona costeira;
- A criação de bancos de areia submersos próximos da praia pode ser utilizada em projetos de alimentação a longo prazo para compensar a erosão costeira crónica que se verifica na zona costeira;
- As operações de alimentação artificial de dunas e de praias podem ser usadas como uma medida de gestão dos riscos costeiros, na medida em que vão compensar a erosão costeira crónica e, também, a erosão costeira excessiva;
- A alimentação de dunas pode ser usada em situações de erosão costeira excessiva;
- Tanto a alimentação da zona balnear da praia como a criação de bancos de areia submersos, e a alimentação em todo o perfil da praia, vão afetar a fauna e a flora existentes na zona costeira.

3.6. MODELOS NUMÉRICOS

A modelação numérica é uma ferramenta de análise que permite aos engenheiros terem uma melhor compreensão do comportamento, tanto dos sistemas naturais como de estruturas de defesa costeira, e os impactos que estas podem criar ou sofrer numa determinada zona costeira (Hussain *et al.*, 2018). A modelação numérica baseia-se, assim, na análise de processos físicos tendo por base equações matemáticas, através de modelos computacionais. Esses modelos são uma ferramenta de análise criada para estudar os processos costeiros e os respetivos problemas que poderão existir na linha de costa, bem como para analisar as melhores opções a nível de medidas de mitigação dos problemas costeiros (Mangor *et al.*, 2017).

Apesar da boa qualidade que os modelos numéricos apresentam atualmente, não substituem o conhecimento dos especialistas, nem os estudos experimentais, e devem ser usados por alguém especializado. Com efeito, estes modelos apenas devem ser considerados como ferramentas de apoio para uma melhor análise e resolução de problemas (Mangor *et al.*, 2017).

A modelação numérica é assim usada para a análise de processos que estão presentes no local de estudo, com o intuito de estudar as condições de agitação marítima do local, e o comportamento e eficácia de projetos baseados na utilização de estruturas de defesa costeira, assim como os seus impactos numa determinada zona costeira (CIRIA, 2007; Mangor *et al.*, 2017). Para além disso, ainda são usados para avaliar o funcionamento e eficácia de estruturas de defesa costeira, como os esporões, ao longo de uma linha de costa, isto é, apresentam informação relativamente aos efeitos, positivos ou negativos, que os esporões criam numa determinada zona (CEM, 2002).

Para se obter bons resultados neste tipo de modelação, os seguintes critérios são importantes:

- A descrição matemática dos processos relevantes através de equações. As batimetrias e os parâmetros físicos a utilizar devem ser precisos;
- A precisão numérica deve ser suficiente para diferenciar as equações matemáticas;
- O processo e o tratamento de dados deve ser o mais correto possível;
- O modelo numérico deve ser calibrado corretamente;
- O modelo numérico deve ser suficientemente validado com dados experimentais ou de campo (CIRIA, 2007).

Embora estes critérios sejam importantes para tirar boas conclusões, a interpretação dos resultados é o critério mais importante nestes modelos porque confirma a veracidade dos resultados (CIRIA, 2007).

Este tipo de modelação apresenta ainda outras vantagens como a possibilidade de modelar regiões de grande dimensão, os resultados não serem afetados por efeitos de escala e a facilidade do cálculo em diversas situações (CIRIA, 2007).

Uma vez que a alimentação artificial de areias se baseia na deposição de sedimentos na praia, com uma dimensão semelhante ou mais grosseira, para atrasar a perda de sedimentos e aumentar a durabilidade da intervenção na praia alimentada, considera-se que o uso de modelos numéricos para o dimensionamento de estruturas de defesa costeira está interligado em termos económicos e financeiros, se estiver incluído no projeto de dimensionamento uma relação de custo-benefício (Tomasicchio *et al.*, 2020).

Geralmente, a modelação numérica pode ser dividida em dois tipos de modelos: os modelos de curto termo e os modelos de longo termo, que têm em conta a duração da análise realizada. No primeiro caso, os modelos são usados para realizar análises com uma duração de horas ou dias, e no segundo caso são usados para realizar análises com uma maior duração, de anos ou décadas (Mangor *et al.*, 2017).

No estudo de zonas costeiras, a erosão costeira é um processo que pode ocorrer em diversas escalas de tempo, quer para um curto intervalo de tempo, aquando da ocorrência de tempestades, quer para um intervalo de tempo mais longo face à existência de diversos fatores, naturais ou antropogénicos, que provocam a erosão costeira ao longo dos anos. Por esta razão, os estudos realizados nas zonas costeiras através de modelos numéricos podem ser de curto termo ou de longo termo (Bolle *et al.*, 2021).

Uma comparação geral entre modelos numéricos, mostra que se tem verificado que muitos modelos conseguem prever a erosão costeira causada por eventos meteorológicos extremos. No entanto, apenas alguns modelos conseguem simular a recuperação das praias, tanto nos modelos de curto termo, como também nos modelos de longo termo (Yuan e Cox, 2013).

3.6.1. MODELOS DE CURTO TERMO

Os modelos de curto termo estudam as alterações no perfil transversal da praia causadas por eventos meteorológicos mais energéticos, que ocorrem num curto espaço de tempo, e ainda fazem uma avaliação do cumprimento dos requisitos de estabilidade e funcionais estabelecidos para a recuperação das praias. Geralmente, este tipo de modelo foca-se no período de maior erosão, devido a eventos climáticos mais extremos, mas pode ser usado para situações de transporte para *offshore* ou *inshore* (González *et al.*, 2007; Mangor *et al.*, 2017).

Para além de permitir analisar as condições hidrodinâmicas e morfológicas da linha de costa depois de eventos climáticos extremos, este tipo de modelo pode fornecer também informação sobre os processos costeiros existentes para uma melhor compreensão das características das praias. O último passo consiste, habitualmente, em estabelecer soluções alternativas para a resolução de um problema encontrado na linha de costa (González *et al.*, 2007).

Os modelos *XBeach* e *Delft3D* são exemplos de modelos numéricos de curto termo.

3.6.1.1. Modelo *XBeach*

XBeach é um modelo a 2DH ou 1DH desenvolvido para a simulação das condições morfológicas e hidrodinâmicas das zonas costeiras face a situações de eventos climáticos mais energéticos, como as tempestades e os furacões, que contribuem para a erosão costeira e o galgamento das dunas, e a ocorrência de erosão localizada à volta das estruturas. Este tipo de modelo permite ajudar na definição e dimensionamento das medidas necessárias face aos impactos criados pelas tempestades e furacões (Oliveira *et al.*, 2020).

Assim, este modelo inclui a análise de vários processos hidrodinâmicos, tais como os processos de transformação de ondas na sua propagação em direção à costa (por exemplo, a refração e a rebentação das ondas), o escoamento médio e as ondas de longo período (ondas infragravíticas), assim como simular as inundações e os galgamentos da zona interior adjacente. Por outro lado, inclui também a análise de processos morfológicos como o transporte de sedimentos, a variação da batimetria dos fundos e os danos nas dunas causados por galgamentos (Roelvink *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2020).

O modelo *Xbeach* foi validado com uma série de dados analíticos, laboratoriais e de campo, onde foram usados um conjunto de parâmetros padrão. Assim, o modelo foi dividido em dois modos diferentes: o modo Hidrostático, que permite a modelação de ondas com períodos curtos; e o modo Não Hidrostático, que é um modo mais complexo porque inclui todos os outros processos costeiros, e com uma maior necessidade computacional (Roelvink *et al.*, 2015; Son e Jung, 2015).

O modo Não Hidrostático, desenvolvido para aumentar a capacidade de simulação do modelo *Xbeach*, permite a modelação de ondas não lineares, as ondas induzidas pelas correntes e a rebentação das ondas. A modelação com este modo é a melhor opção quando as praias são mais íngremes ou quando existe uma estrutura de defesa costeira pesada, como os esporões (Smit *et al.*, 2010).

Após o lançamento do modelo *XBeach*, este foi sujeito a inúmeras atualizações ao longo dos anos, sendo que, hoje em dia, estão disponíveis mais dois modos diferentes: o modo Estacionário e o modo *Surfbeat* (Oliveira *et al.*, 2020).

O modo Estacionário é usado nas situações em que as ondas incidentes são relativamente pequenas ou curtas, durante condições de agitação marítima moderada. Este modo inclui a análise de processos costeiros (por exemplo, a propagação, o empolamento, a refração e a rebentação das ondas), realizada numa área limitada próxima da costa (Roelvink *et al.*, 2015).

O modo *Surfbeat* permite estudar as ondas de longo período, através da análise das variações das ondas de curto período e das variações das ondas de longo período associadas a um grupo de ondas selecionado. Este modo é muito usado na análise dos impactos nas dunas e na zona urbana próxima da costa, causados por tempestades, mas também é válido para a modelação da evolução morfológica de praias dissipativas (Roelvink *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2020).

Assim, na sequência do trabalho de investigação e o desenvolvimento realizado nos últimos anos, foi criado o modelo *Xbeach Duna*, que permite também simular a adaptação da linha de costa face a eventos climáticos mais energéticos. Este modelo permite que os utilizadores do modelo *Xbeach* possam escolher entre três opções: o modo Não Hidrostático, o modo Estacionário e o modo *Surfbeat* (Roelvink e Costas, 2019). Para além disso, a característica que mais se destaca, em relação aos modos já existentes, é a capacidade de simular processos eólicos no sistema praia-duna.

3.6.1.2. Modelo Delft3D

O Delft3D é um modelo multidimensional *open source*, que permite a simulação de processos hidrodinâmicos e morfológicos costeiros, devido à sua capacidade para reproduzir, não só o escoamento local, mas também o transporte sedimentar, a propagação das ondas e a variação da morfologia da zona costeira. O modelo permite estudar a dinâmica de uma zona costeira na presença de esporões, e as consequentes alterações morfológicas e sedimentares que este tipo de obra de defesa costeira pode criar na linha de costa (Trouw *et al.*, 2012; Mendes *et al.*, 2021).

Este modelo é composto por vários módulos com características diferentes, mas que podem funcionar em conjunto para realizar uma determinada simulação. Os módulos existentes são: o Delft3D-FLOW, o Delft3D-WAVE, o Delft3D-SED, o Delft3D-WAQ, o Delft3D-PART e o Delft3D-ECO (Santos Gil, 2014).

O módulo Delft3D-FLOW é um simulador multidimensional (2D e 3D) da evolução das condições hidrodinâmicas de uma determinada zona de estudo, que permite fazer o cálculo de escoamentos e de processos de transporte não estacionários, resultantes da incidência da agitação marítima na costa e das condições meteorológicas (Deltares, 2021).

O módulo Delft3D-WAVE usa o modelo espectral SWAN, que permite calcular as transformações das ondas, de forma a realizar a simulação da evolução das ondas na sua propagação até à costa (Trouw *et al.*, 2012; Deltares, 2014a).

O módulo Delft3D-FLOW é um módulo multidimensional (2D e 3D) e permite fazer a simulação dos processos hidrodinâmicos e dos processos de transporte. As condições hidrodinâmicas calculadas neste módulo são usadas como dados *input* nos outros módulos do modelo Delft3D, mencionados anteriormente (Deltares, 2021).

A análise do transporte sedimentar sob a ação das ondas e correntes é realizada segundo a formulação de Van Rijn (1993). Esta formulação permite o cálculo do transporte de sedimentos que ocorre de duas formas distintas: o transporte de sedimentos junto ao fundo marinho (*bed load transport*) e o transporte de sedimentos em suspensão (*suspended load transport*). De referir que foi estabelecida uma altura de referência para a definição do tipo de transporte que se verifica num caso de estudo (Ruas, 2017).

3.6.1.3. Comparação entre os modelos *Xbeach* e Delft3D

A Tabela 3.7 apresenta uma comparação entre os dois modelos numéricos de curto termo mencionados anteriormente, os módulos de cada modelo, a sua formulação e a sua função para a análise dos dados medidos numa determinada zona costeira.

Tabela 3.7 - Caracterização dos modelos numéricos de curto termo, *Xbeach* e Delft3D.

MODELO	MÓDULOS	FORMULAÇÃO	FUNÇÃO
<i>Xbeach</i>	Hidrostático	-	Simulação das condições hidrodinâmicas e morfológicas das zonas costeiras em situação de tempestade, quando existem obras de defesa costeira.
	Não Hidrostático		
	Estacionário		
	<i>Surfbeat</i>		
Delft3D	Delft3D-FLOW	<i>Van Rijn</i> (1993)	Simulação de processos hidrodinâmicos e morfológicos que se verificam nas zonas costeiras, quando existem obras de defesa costeira.
	Delft3D-WAVE		
	Delft3D-PART		
	Delft3D-WAQ		
	Delft3D-ECO		
	Delft3D-SED		

Na sequência da comparação apresentada na Tabela 3.7, é possível identificar algumas diferenças entre estes dois modelos numéricos em termos de modelação das ondas e dos processos físicos que podem ser identificados em cada módulo.

Feita uma comparação entre estes dois modelos de curto termo, em relação à identificação dos processos físicos presentes numa zona de estudo, o modelo Delft3D não é o mais adequado para a modelação a 2D do comportamento das dunas porque este modelo não inclui a análise da erosão costeira nas dunas e o transporte sedimentar para *offshore*, enquanto o modelo *Xbeach* inclui todos os parâmetros importantes para o estudo do comportamento das dunas (Trouw *et al.*, 2012; Deltares, 2014b; Morales Márquez *et al.*, 2018)

Devido à elevada quantidade e variedade de resultados obtidos com a aplicação destes modelos numéricos, pode-se dizer que ambos são modelos complexos, tanto na simulação como na análise de dados que permitem fazer (Deltares, 2014b; Oliveira *et al.*, 2020).

3.6.2. MODELOS DE LONGO TERMO

Os modelos de longo termo fazem uma análise da evolução da linha de costa num maior intervalo de tempo, e do equilíbrio da linha de costa ao longo do tempo em estudo, devido à erosão crónica que se verifica nas zonas costeiras. A análise é feita numa escala de anos para estudar a funcionalidade de uma estrutura, natural ou antropogénica, ao longo da sua vida útil (González *et al.*, 2007; Mangor *et al.*, 2017).

A formulação para os modelos de longo termo foca-se na magnitude dos processos costeiros, e não nos próprios processos, sendo que as equações mais usadas neste tipo de modelos são baseadas na equação de hipótese de equilíbrio (*Equilibrium Hypothesis*) e na equação de difusão (*Diffusion Equation*) (González *et al.*, 2007).

Os modelos numéricos *ShorelineS*, UNIBEST e LITPACK são exemplos de modelos de longo termo.

3.6.2.1. Modelo *ShorelineS*

O modelo numérico *ShorelineS* permite fazer previsões da evolução da linha de costa ao longo de vários anos, décadas ou mesmo séculos. Este modelo descreve as alterações morfológicas das praias ao longo do tempo de estudo, através de representações simples através de pontos, causadas pela agitação marítima e pelo transporte longitudinal de sedimentos. Deste modo, este modelo permite apresentar modificações reais da linha de costa e a sua forma resultante no final do tempo de estudo (Roelvink *et al.*, 2020).

É um modelo de implementação simples, que apenas requer informações iniciais relativas à posição da linha de costa, das estruturas de defesa costeira pesadas, das condições de agitação marítima *offshore* e das características e parâmetros locais. Normalmente, estes dados são de fácil acesso e podem ser extraídos a partir de imagens de satélite ou através de dados medidos no local. Quando este modelo é combinado com outros modelos, que conseguem prever os efeitos causados pela presença de estruturas de defesa costeira, como os quebra-mares, é possível fazer uma avaliação rápida e eficaz do desenvolvimento morfológico de tômbolos ou saliências atrás das estruturas (Roelvink *et al.*, 2020).

As mudanças observadas na posição da linha de costa são causadas pelo transporte longitudinal, as quais são inseridas num sistema computacional com algumas formulações, que são calibradas para a determinação da taxa de transporte local. Essas formulações são o CERC1 (USACE, 1984) e o CERC2 (Ashton e Murray, 2006), que são definidas para os ângulos de incidência das ondas *offshore*. Assim, a expressão matemática de CERC1, traduzida pela Equação 1, é considerada simples e permite avaliar o comportamento da linha de costa. A expressão de CERC2, traduzida pela Equação 2, derivada da fórmula original de CERC, permite avaliar o comportamento da linha de costa, incluindo os efeitos de refração e empolamento das ondas (Roelvink *et al.*, 2020).

$$Q_s = b \cdot H_{s0}^{5/2} \cdot 2 \sin(\Phi_{lcc}) \quad (1)$$

$$Q_s = K_2 \cdot H_{s0}^{12/5} \cdot T_p^{1/5} \cdot \cos^{6/5}(\Phi_{loc}) \cdot \sin(\Phi_{loc}) \quad (2)$$

Em que H_{s0} representa a altura de onda significativa *offshore* (m), T_p o período de onda de pico (s), Φ_{loc} o ângulo de incidência das ondas *offshore*, e b e K_2 são coeficientes de calibração do modelo (Roelvink *et al.*, 2020).

O modelo *ShorelineS* foi desenvolvido de modo a ser um modelo simples em comparação com outros modelos numéricos, para fazer uma análise da evolução da linha de costa para um longo intervalo de tempo, sem as limitações que os modelos já existentes apresentavam relacionadas com a linha de referência fixa e a complexidade que um sistema baseado em malhas pode apresentar. Assim, este

modelo numérico é capaz de resolver inúmeros problemas que se encontram numa zona costeira devido à flexibilidade do sistema de malhas, permitindo que o modelo consiga fazer a análise de uma zona costeira onde é possível assistir a grandes alterações na sua forma, como o desenvolvimento de saliências e tômbolos (Roelvink *et al.*, 2020).

3.6.2.2. Modelo UNIBEST

O modelo numérico UNIBEST é um modelo baseado na teoria de “uma linha” e engloba um pacote de *software*, constituído por três módulos diferentes: o UNIBEST-TC, desenvolvido para o estudo do transporte transversal de sedimentos e das alterações morfológicas das praias causadas pelas ondas, correntes e ventos; o UNIBEST-LT, desenvolvido para o estudo do transporte longitudinal de sedimentos; e o UNIBEST-CL, desenvolvido para o estudo da dinâmica costeira de uma determinada zona, influenciada pela variação do transporte longitudinal de sedimentos (Kalpias, 2014; Lima, 2018). Os módulos UNIBEST-LT e UNIBEST-CL, estão interligados porque os dados obtidos no módulo -LT vão servir como dados *input* para o módulo -CL (van der Salm, 2013).

A componente UNIBEST-CL+ faz parte do módulo CL e permite fazer a simulação da dinâmica costeira e dos fenómenos costeiros existentes na linha de costa, através da avaliação da posição da linha de costa num maior intervalo de tempo (Lima, 2018). Assim, esta componente baseia-se num modelo que permite avaliar a quantidade de sedimentos transportados ao longo da linha de costa, na presença de obras de defesa costeira, nomeadamente os esporões, e os impactos que estas estruturas podem criar no transporte de sedimentos e, conseqüentemente na linha de costa (van der Salm, 2013; Tomasicchio *et al.*, 2020).

As formulações utilizadas no módulo UNIBEST-LT são as expressões matemáticas de Van Rijn (2004). Esta formulação foi escolhida porque inclui muitos processos físicos que influenciam o transporte longitudinal de sedimentos, e por isso, faz estimativas muito precisas do transporte atual de sedimentos. No entanto, as fórmulas devem ser específicas para o transporte de sedimentos junto ao fundo marinho (*bed load transport*) e para o transporte de sedimentos em suspensão (*suspended load transport*), devido às diferenças existentes nos mecanismos de transporte (Kalpias, 2014). Assim, para o transporte de sedimentos por arrastamento junto ao fundo do mar, a expressão matemática de Van Rijn (2004) utilizada é a relativa ao transporte de sedimentos (Equação 3):

$$q_b = \left(\frac{1}{T}\right) \int (q_{b,t}) \cdot dt \quad (3)$$

Em que q_b representa a taxa de transporte de sedimentos em relação a um tempo médio e T o período de onda (s). Esta equação permite calcular a taxa de transporte instantâneo de sedimentos no fundo do mar, tendo em conta o período das ondas (Kalpias, 2014).

Para o transporte de sedimentos em suspensão, a expressão matemática de Van Rijn (2004) utilizada é a equação de advecção-difusão (Equação 4):

$$CW_s + \varepsilon_{s,cw} \cdot \frac{dc}{dz} = 0 \quad (4)$$

Em que C representa a concentração de sedimentos ao longo do tempo, W_s a velocidade de queda dos sedimentos suspensos (m/s), $\varepsilon_{s,cw}$ o coeficiente de mistura dos sedimentos (m^2/s) e z a altura acima do fundo do mar. Esta equação representa a deposição de sedimentos no fundo e a mistura de sedimentos causada pela agitação marítima (Kalpias, 2014).

Normalmente, a análise do modelo UNIBEST-CL+ é feita nas zonas entre esporões, onde a agitação marítima é reduzida, através de um sistema de malhas relativo a uma componente espacial (*spatial grid*) e à duração necessária de análise (van der Salm, 2013).

3.6.2.3. Modelo LITPACK

O modelo numérico LITPACK, desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI), é um modelo baseado na teoria de “uma linha” que permite a modelação, a longo termo, do transporte potencial de sedimentos não coesos, transversal e longitudinal, na zona costeira causado pelas ondas, correntes e ventos próximos da linha de costa. Para além destes, a deriva litoral, a evolução da linha de costa e o desenvolvimento do perfil da praia também são analisados neste modelo (Ruas, 2017; Noujas e Kankara, 2018).

Para além disso, este modelo numérico também faz uma análise da batimetria, do processo de difração criado por obstáculos, naturais ou antropogénicos, da presença de obras de defesa costeira pesadas, nomeadamente os esporões e os quebramares destacados, e das correntes longitudinais que transportam os sedimentos (Tomasicchio *et al.*, 2020).

O modelo LITPACK, que usa a formulação de CERC (1984), é constituído por um conjunto de módulos individuais que fazem a simulação de processos costeiros específicos, mas sempre interligados entre si, o que permite uma rápida simulação dos problemas costeiros e evita a perda de detalhes importantes para o estudo do local. Assim, os módulos deste modelo numérico são:

- Transporte de sedimentos suspensos em ondas e correntes (STP);
- Correntes e transporte sedimentar longitudinais (LITDRIFT);
- Evolução da linha de costa (LITLINE);
- Criação de valas artificiais nos fundos do mar (LITTREN);
- Desenvolvimento do perfil transversal da praia (LITPROF) (DHI, 2009).

O módulo STP permite calcular a quantidade de sedimentos suspensos transportados pelas ondas e correntes, permitindo fazer uma descrição detalhada desse transporte de sedimentos (DHI, 2009).

O módulo LITDRIF permite fazer uma simulação detalhada da distribuição dos sedimentos num determinado perfil transversal de uma praia, para estados de mar regular e irregular, e pode ser utilizado para a distribuição litoral de sedimentos e para a transposição *bypassing* de sedimentos por uma estrutura, a partir de duas partes distintas que constituem este módulo, o modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte sedimentar (DHI, 2009).

O módulo LITLINE permite simular, com os dados obtidos do módulo LITDRIFT, a resposta da linha de costa às diferentes quantidades de sedimentos transportados devido aos processos naturais ou à presença de estruturas de defesa costeira (DHI, 2009).

O módulo LITTREN permite arranjar soluções para zonas que não apresentam um equilíbrio entre a quantidade de sedimentos suspensos e as condições hidrodinâmicas locais, de modo a manter uma interação morfológica-hidrodinâmica na mesma zona (DHI, 2009).

O módulo LITPROF permite fazer, com os dados obtidos no módulo STP, uma descrição das alterações do perfil transversal de uma praia. É um módulo que funciona no domínio do tempo e pode ser aplicado em situações de tempestades (DHI, 2009).

Portanto, o modelo LITPACK é uma boa ferramenta para diversos campos de aplicação como a análise do desenvolvimento de uma zona costeira, a proteção da zona costeira e o dimensionamento de um porto ou de uma estrutura portuária.

3.6.2.4. Comparação entre os modelos *ShorelineS*, UNIBEST e LITPACK

A Tabela 3.8 apresenta as principais características dos três modelos numéricos de longo termo mencionados anteriormente, os módulos de cada modelo, a sua formulação e a sua função para a análise dos dados medidos numa determinada zona costeira.

Tabela 3.8 - Caracterização dos modelos numéricos de longo termo, *ShorelineS*, UNIBEST e LITPACK.

MODELO	MÓDULOS	FORMULAÇÃO	FUNÇÃO
ShorelineS	-	CERC1 (USACE, 1984)	Previsões da evolução da linha de costa num longo intervalo de tempo (anos a séculos), com a descrição das alterações morfológicas das praias.
		CERC2 (<i>Ashton e Murray</i> , 2006)	
UNIBEST	UNIBEST-TC	<i>Van Rijn</i> (2004)	-TC: Estudo do transporte transversal de sedimentos e das alterações morfológicas das praias.
	UNIBEST-LT		-LT: Estudo do transporte longitudinal de sedimentos.
	UNIBEST-CL+		-CL: Estudo da dinâmica costeira de uma determinada zona costeira, influenciada pelo transporte de sedimentos longitudinal.
LITPACK	STP	CERC (1984)	Estuda a evolução da linha de costa, em termos de transporte de sedimentos e de desenvolvimento do perfil transversal da praia.
	LITDRIFT		
	LITLINE		
	LITTREN		
	LITPROF		

Na sequência da comparação apresentada na Tabela 3.8, é possível chegar à conclusão que os três modelos numéricos de longo termo relacionam as alterações na linha de costa com o transporte de sedimentos, mas que usam formulações diferentes para a mesma finalidade, exceto o modelo LITPACK que usa a formulação de CERC (1984) como o modelo *ShorelineS*.

Ainda, o modelo numérico *ShorelineS* foi desenvolvido em substituição de outros modelos numéricos, para tornar o estudo da morfodinâmica de uma zona costeira mais simples e reduzir a complexidade dos sistemas computacionais que se verifica em outros modelos. Posto isto, este modelo tem uma capacidade de análise igual ou semelhante aos outros modelos, mas com a vantagem de apresentar um sistema mais simples (Roelvink *et al.*, 2020).

E, ao contrário do modelo *ShorelineS*, os modelos numéricos LITPACK e UNIBEST são modelos baseados na teoria de “uma linha”, isto é, o modelo apresenta a linha de costa através de uma linha de contorno unidimensional (1D) para a representação dos processos costeiros. Esta configuração é muito comum e dá bons resultados. No entanto, é muito limitada na sua análise (Kalpias, 2014; Ruas, 2017).

4

CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1. ENQUADRAMENTO

Toda a costa Africana do Atlântico Oeste, no golfo da Guiné, tem vindo a sofrer alterações profundas devido à urbanização na zona litoral e à erosão costeira verificada em diversos trechos costeiros. A subida do nível médio da água do mar (NMM) e o aumento da frequência de tempestades por efeito das alterações climáticas, favorece o processo erosivo e, como consequência, o agravamento dos riscos costeiros. Efetivamente, prevê-se que os processos erosivos se venham a agravar nos próximos anos (Bolle *et al.*, 2021).

A República do Gana (Figura 4.1), que engloba uma vasta extensão de linha de costa, é um dos países da costa Africana do Atlântico Oeste mais vulneráveis a riscos costeiros e à degradação dos sistemas costeiros. A principal razão da degradação destes sistemas, no Gana, está associada a uma má gestão da zona urbana situada próximo da linha de costa e, de uma maneira geral, de toda a zona costeira (Bolle *et al.*, 2021).



Figura 4.1 - Mapa da República do Gana marcada a vermelho (fonte: Google Earth).

De acordo com Bolle *et al.* (2021), com base em dados de 2015, os impactos sociais e ambientais no Gana devido à erosão costeira são verificados numa área relativamente limitada, mas afetam uma quantidade elevada de pessoas que vivem perto da costa. Quando se trata de inundações costeiras, o

panorama é distinto, porque os mesmos impactos são verificados numa área maior, embora estes afetem um menor número de pessoas. Ainda de acordo com Bolle *et al.* (2021), estima-se que cerca de 2.6% da zona costeira do Gana vai ser erodida até 2100.

A cidade de Ada, localizada no Gana imediatamente a Oeste do estuário do rio Volta, é uma zona que sofre de erosão costeira continuada desde há vários anos. Além disso, é caracterizada pela existência de várias zonas interiores de baixa altitude, sujeitas a galgamentos e a inundações costeiras frequentes. Tanto a erosão costeira, como as inundações, fazem aumentar a vulnerabilidade das zonas urbanas mais próximas da costa, causando estragos e destruição frequentes, e ainda riscos para a vida humana (Bolle *et al.*, 2015).

De acordo com Bolle *et al.* (2015), a linha de costa em Ada apresenta taxas de recuo médio entre 1 e 2 m/ano e um recuo máximo, localmente junto à zona do estuário do rio Volta, de 6 m/ano (Bolle *et al.*, 2015).

Esses riscos costeiros impulsionaram o Governo do Gana a promover um projeto com o objetivo de aumentar o nível de proteção costeira à cidade de Ada ao longo de cerca de 15 km, através da construção de esporões e alimentação artificial de areias (Bolle *et al.*, 2015).

Nesta dissertação é feita uma análise da evolução dos 15 km de linha de costa ao longo de um período de 8 anos, de 2013 a 2021, com base na análise de imagens de satélite. Essa análise é apresentada no capítulo 5 enquanto neste capítulo é feita uma análise histórica dessa evolução e é apresentada uma caracterização da área de estudo em termos de condições ambientais, assim como dos estudos realizados durante o projeto de intervenção em Ada.

4.2. ANÁLISE HISTÓRICA

A análise histórica tem por base imagens de satélite anteriores à intervenção, bem como referências bibliográficas.

A Figura 4.2 apresenta uma sequência de imagens de satélite do local de estudo para os anos 1972, 1987, 1999 e 2013. Estas imagens foram extraídas utilizando a ferramenta *Earth Explorer* do site *U.S. Geological Survey* (USGS). Devido à baixa resolução destas imagens de satélite, a sequência apresentada na Figura 4.2 apenas permite avaliar qualitativamente a evolução da restinga do Volta ao longo dos 40 anos.

Em particular, é possível verificar, a partir dessas imagens, que a restinga do Volta sofreu inúmeras alterações ao longo dos anos, tendo alcançado o máximo do seu comprimento no final dos anos 80. Em 2013, a restinga apresentava uma diminuição significativa do seu comprimento, que pode ter sido causada por diversos fatores que influenciaram o transporte de sedimentos na zona de estudo, desde fatores ambientais até fatores antropogénicos como a construção de estruturas portuárias e barragens, ou mesmo dragagens de areias realizadas ao longo do rio. É de salientar que, nestas imagens de satélite, o efeito da maré não foi tido em consideração.

Devida à impossibilidade de fazer uma análise pormenorizada através das imagens de satélite extraídas do site USGS (Figura 4.2), a análise histórica da evolução da linha de costa foi complementada com uma análise bibliográfica de estudos realizados nas zonas costeiras do Gana no geral, e de Ada em particular.



Figura 4.2 - Sequência temporal (1972, 1987, 1999 e 2013) da linha de costa de Ada (fonte: USGS).

Appaning Addo *et al.* (2008) apresenta um estudo baseado em dados de monitorização e na previsão da posição da linha de costa para um período de 100 anos (1904-2002) para a capital do Gana, Acra, situada a Oeste de Ada.

Os dados da monitorização do estudo de Appaning Addo *et al.* (2008) apresentaram um aumento do nível médio das água dos mar (NMM) em cerca de 2 mm/ano nos anos de estudo, sendo que, para anos futuros estima-se um aumento gradual deste valor para cerca de 6 mm/ano, causando o agravamento da erosão costeira. Importa ainda referir que, nesse período de 100 anos, foi verificado um recuo da linha de costa em cerca de 1.13 m/ano, o que revelou que 82 % da costa de Acra está a sofrer erosão.

Este estudo permitiu avaliar a erosão costeira que se verifica na costa de Acra e fazer uma previsão da recessão da linha de costa face à subida do NMM, durante um grande período de tempo. Pela razão de existirem poucos dados relativos a esta zona costeira, os resultados obtidos deste estudo podem ser usados para a gestão da zona costeira de modo a evitar os possíveis impactos sociais, económicos e ecológicos.

Outro estudo realizado ao longo da costa do Gana, desta vez por Jonah (2015) e para a frente costeira da cidade de Moree, localizada a oeste de Ada e também a oeste da capital Acra, indica um valor médio de recessão da costa estimado em 1.2 m/ano. No entanto, esta zona costeira não apresenta valores de erosão constantes ao longo da costa, mas sim áreas de maior erosão, *hotspots*. Tal situação não acontece na costa de Ada, mas é um bom exemplo de estudo porque afirma que grande parte da costa do Gana tem vindo a sofrer erosão desde 1985, o que obriga a melhorar a sua gestão costeira com o objetivo de proteger as zonas urbanas que estão situadas perto da costa.

Boateng (2012) analisou a evolução de toda a zona costeira do Gana, durante um período de 107 anos (1895-2002), tendo indicado um valor para a taxa de recuo em Ada de 0.4 m/ano.

Segundo Ly (1980), a diminuição das taxas de sedimentos transportados para a costa, principalmente ao longo do delta do Volta, é um fator que tem contribuído para o aumento da erosão costeira na cidade de Ada. Essa diminuição deve-se principalmente a uma barragem que foi construída no rio Volta em 1964, mas também a dragagens. Segundo Armah (1991), os impactos criados por ações antropogénicas, a má gestão da costa e o aumento do NMM são os fatores que mais influenciam a linha de costa de Ada e favorecem o processo erosivo da mesma.

4.3. CONDIÇÕES AMBIENTAIS

O projeto de um sistema de proteção costeira carece de uma caracterização e uma análise das condições morfológicas e hidrodinâmicas, tanto em condições normais, como em condições de tempestade.

No caso específico do projeto de Ada, as condições de agitação marítima muito energéticas foram um dos grandes desafios para o projeto. Conforme referido anteriormente, a zona costeira do Gana apresenta uma grande vulnerabilidade a riscos costeiros, à erosão costeira e a inundações, mas também a impactos devidos a outros eventos meteorológicos extremos, como ondas de calor e precipitação (Codjoe *et al.*, 2020).

Nos últimos 50 anos, o Gana foi sujeito a, pelo menos, 17 inundações graves na zonas urbanas, com um impacto para cerca de 16 milhões de pessoas (Codjoe *et al.*, 2020).

Relativamente à meteorologia local, o Gana apresenta uma temperatura média anual normal do ar, aproximadamente, de 34°C. Os dados indicam que, entre 1960 e 2012, a temperatura média anual aumentou cerca de 1°C e estima-se que, em 2050, a temperatura média anual possa vir a aumentar cerca de 2°C. Ao contrário do previsto para os valores de temperatura local, no futuro estima-se uma diminuição da ocorrência de precipitação em cerca de 11% (Codjoe *et al.*, 2020; Djido *et al.*, 2021).

A meteorologia no sul do Gana, isto é, na zona costeira, é caracterizada por duas estações por ano, a estação de Harmatão e a estação de chuva bimodal. A estação de Harmatão, que ocorre entre os meses de dezembro e março, é composta por ventos de poeira provenientes do deserto Saara (nordeste), enquanto a estação de chuva bimodal, que ocorre entre abril e novembro, é composta por ventos de monção provenientes do sul (Dzebre e Adaramola, 2020).

Relativamente à agitação marítima ao longo da zona costeira de Ada pode referir-se que é dominada pela ondulação (*swell*) e por eventuais ondas geradas localmente pelo vento (vagas). A direção predominante das ondas incidentes está compreendida entre 170°N e 210°N, o que cria um transporte longitudinal de sedimentos que segue a direção oeste-este. A ondulação (*swell*), ao longo da costa de Ada, apresenta valores de altura de onda significativa média entre 1 e 2 m e períodos de onda médios superiores a 10 s (Bolle *et al.*, 2015).

Em relação às marés, verifica-se que as marés astronómicas são predominantes apresentando uma amplitude média de 1 m e o NMM de 1.15 m, em relação às marés em baixa-mar (*Lowest Astronomical Tide* - LAT). Esta zona costeira é também sujeita a marés meteorológicas, embora sejam raras (Bolle *et al.*, 2015; Haigh, 2017).

Finalmente, as condições morfológicas que podem influenciar a evolução da linha de costa ao longo da costa de Ada incluem o fenómeno de erosão costeira, a batimetria, as correntes de retorno junto à costa, as áreas interiores de baixa elevação e a presença de sedimentos não consolidados (Bolle *et al.*, 2015).

Até ao final do século passado, foi possível observar o crescimento da restinga do rio Volta. Estima-se que uma grande quantidade de sedimentos era transportada para Este da costa, na ordem dos 0.4 - 0.8 milhões m³/ano. No entanto, essa tendência foi invertida nas últimas décadas. Atualmente, a restinga do rio Volta apresenta uma dimensão muito reduzida (Bolle *et al.*, 2015).

4.4. CARACTERIZAÇÃO DA INTERVENÇÃO

O projeto de Ada foi desenvolvido em duas fases de construção distintas (Figura 4.3), em que a primeira teve início em 2012 e a segunda em 2014. A primeira fase consistiu na construção de 7 esporões na zona imediatamente a oeste do estuário do Rio Volta, e a segunda fase consistiu na construção de mais 15 esporões também para oeste, até à cidade de Totopé, bem como uma intervenção de alimentação artificial das praias e a construção de uma duna artificial ao longo de toda a área do projeto (Bolle *et al.*, 2015).



Figura 4.3 - Área do projeto desenvolvido em duas fases de construção diferentes (Bolle *et al.*, 2015).

Para o desenvolvimento do sistema de proteção foram efetuados diversos estudos, designadamente das características locais, tanto a nível das condições de agitação marítima ao longo da costa, como das condições morfológicas, com o objetivo de desenvolver uma maior compreensão sobre a dinâmica da linha de costa e, como consequência, uma melhor conceção das estruturas de defesa costeira e do sistema construtivo (Bolle *et al.*, 2015). Conforme referido anteriormente, a agitação marítima de elevada energia foi um dos principais desafios do projeto, tanto na conceção como na construção.

Devido à limitação de dados disponíveis para a área de investigação, foi necessário realizar medições no campo, em termos de batimetria, condições hidrodinâmicas e condições geológicas. Os dados obtidos

em campo resultaram da aplicação de diversas ferramentas de monitorização, tais como levantamentos topográficos e batimétricos, levantamentos de fotografias aéreas e levantamentos realizados em *jetski*. As medições em campo foram complementadas com simulações numéricas, tendo também sido usados para calibrar e validar essas mesmas simulações. De referir que as estruturas de proteção costeira propostas foram testadas em modelo físico. Nas secções seguintes é feito um resumo desses estudos complementares, sendo que, mais informação pode ser encontrada em Bolle *et al.* (2015). Para além disso, também é feita uma referência ao método construtivo.

4.4.1. MEDIÇÕES EM CAMPO

As medições em campo, que serviram como base para o dimensionamento da intervenção proposta, tiveram início em 2010. Foram realizados levantamentos topográficos e batimétricos em 2010 e 2011 para o dimensionamento da fase 1 do projeto, e levantamentos realizados em *jetski* e levantamentos aéreos para o dimensionamento da fase 2 do projeto (Bolle *et al.*, 2015).

Os levantamentos topográficos e batimétricos permitiram identificar os processos costeiros, tais como a evolução da linha de costa e os processos de transformação de ondas na zona de rebentação, e avaliar o desempenho de uma estrutura de defesa costeira e os respetivos impactos na zona costeira (Bolle *et al.*, 2015).

Os levantamentos aéreos permitiram obter imagens aéreas e a topografia de toda a zona de estudo (incluindo a zona da praia e a zona de rebentação). Este tipo de levantamentos faz a monitorização dos processos costeiros e, também, das estruturas de defesa costeira existentes, bem como os seus efeitos na linha de costa (Bolle *et al.*, 2015).

A monitorização intensiva da área de projeto permitiu ajudar na compreensão dos processos costeiros presentes na linha de costa antes, durante e depois da intervenção de defesa costeira (Bolle *et al.*, 2015).

4.4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para uma melhor compreensão do sistema costeiro, a modelação numérica é uma ferramenta importante, designadamente para simular os processos costeiros, com e sem estruturas, e a esperada evolução da linha de costa (Bolle *et al.*, 2015).

Os modelos numéricos usados para a análise de curto termo, da morfologia e da hidrodinâmica da área de projeto foram o SWAN e o Delft3D. O SWAN permitiu propagar as condições da agitação marítima desde as águas profundas até ao local, enquanto o modelo Delft3D permitiu identificar os processos costeiros, como o espraçamento e os galgamentos, responsáveis pela erosão costeira e pelas inundações na zona costeira, mas também permitiu identificar as correntes de deriva litoral (Bolle *et al.*, 2015).

Neste trabalho, foi ainda usado o modelo numérico *Xbeach* 1DH, que permitiu analisar os processos costeiros existentes na zona de estudo, como o espraçamento, os galgamentos e a erosão costeira, de modo a ajudar no dimensionamento da intervenção de alimentação artificial. O modelo *Xbeach* 2DH foi também utilizado para fazer a simulação das ondas, das correntes e do transporte de sedimentos que se verificam na área mais próxima dos esporões (Bolle *et al.*, 2015).

Por fim, com o intuito de estudar a evolução da linha de costa a longo termo, foi usado o modelo LITPACK para avaliar o comportamento da linha de costa na presença das estruturas de defesa costeira, durante um período de 10 anos (Bolle *et al.*, 2015).

4.4.3. SISTEMA DE PROTEÇÃO E MÉTODO CONSTRUTIVO

O processo de alimentação artificial consiste numa deposição de sedimentos uniforme, com uma inclinação de 1V:25H na zona da praia e uma inclinação de 1V:6H na duna, ao longo da área de projeto. O volume total de sedimentos depositados foi de cerca de 0.6 milhões de m³ na fase 1 do projeto e, cerca de 3.4 milhões de m³ na fase 2. As praias e a duna alimentadas formam um *buffer* contra a erosão costeira causada pelas condições de agitação marítima mais energéticas (Bolle *et al.*, 2015).

Os sedimentos utilizados no processo de alimentação artificial foram dragados de uma fonte sedimentar *offshore* (Bolle *et al.*, 2015).

De acordo com os dados obtidos da modelação da área de projeto, foi decidido construir esporões em enrocamento com 180 m de comprimento médio, com uma largura de coroamento de 3.5 m e taludes com uma inclinação de 1V:3H. Os esporões incluídos em ambas as fases são do tipo mergulhante, mas apresentam características distintas, principalmente em relação à altura do coroamento, que se deve ao facto de os esporões da fase 1 terem sido construídos antes do processo de alimentação e os esporões da fase 2 terem sido construídos após o processo de alimentação. Enquanto que os esporões da fase 1 são mais uniformes ao longo do seu perfil longitudinal, apresentando apenas duas partes: uma horizontal no enraizamento, e uma mergulhante em direção à cabeça do esporão, os esporões da fase 2 apresentam um perfil longitudinal que é dividido em 4 zonas distintas: uma zona horizontal *onshore* (zona do enraizamento), uma zona de talude *onshore*, uma zona horizontal *offshore* e uma zona mergulhante *offshore* (Bolle *et al.*, 2015).

Normalmente, no processo de construção de um campo de esporões, estão incluídas obras temporárias que vão ajudar na construção de cada esporão. Neste caso, em ambas as fases do projeto, os esporões foram construídos por terra com o auxílio de obras temporárias, nomeadamente os *jetties* (IMDC and PMI).

Deste modo, estas obras temporárias, para cada esporão, englobaram o dimensionamento e a construção de *jetties* em toda o comprimento projetado para o esporão, o dimensionamento e a construção de uma enscadeira à volta da zona de construção do esporão que serviu como uma parede de proteção, e por fim, o desmantelamento dos *jetties* e da enscadeira quando finalizada a construção dos esporões (IMDC and PMI). Especificamente, na primeira fase, foi utilizado apenas um *jetty* principal, com um maior comprimento, com dois *jetties* auxiliares mais curtos, e na segunda fase, foram utilizados dois *jetties* principais, em que os esporões foram construídos entre essas duas estruturas auxiliares (Figura 4.4) (Bolle *et al.*, 2015).



Figura 4.4 - 1) Construção dos esporões da fase 1 do projeto com um *jetty* principal e dois auxiliares; 2) Construção da fase 2 do projeto com dois *jetties* principais (Bolle *et al.*, 2015).

De um modo geral, todo o processo de dimensionamento e conceção destas obras de defesa costeira envolveu inúmeras medições, quer em campo como em modelação numérica. Estas medições incluíram levantamentos topográficos e batimétricos, levantamentos aéreos e levantamentos em *jetskis*, mas também o estudo das condições marítimas, nomeadamente das condições das ondas, correntes e nível da água. As medições envolvidas permitiram fazer um estudo da zona de estudo e foram um contributo para o dimensionamento das estruturas projetadas. Assim, no Anexo A está apresentado o esquema das tarefas realizadas ao longo de todo o processo.

5

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

5.1. METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é analisar a evolução da linha de costa que se observou num trecho costeiro adjacente à cidade de Ada, no Gana, com base em imagens de satélite. O estudo do comportamento desse trecho costeiro, face a intervenções de defesa costeira (construção do campo de esporões e operações de alimentação artificial) realizadas entre 2012 e 2015, compreendeu um período de 8 anos, entre 2013 e 2021, e um período mais longo entre 1984 e 2014 (30 anos).

Para uma análise mais organizada e objetiva, foi necessário numerar os esporões e os respectivos compartimentos criados por estas estruturas. Assim, na Figura 5.1 está apresentada a linha de costa de Ada com as respetivas numerações.



Figura 5.1 - Numeração dos esporões e dos compartimentos criados.

A análise da evolução da linha de costa tem como referência um levantamento topográfico de março de 2013. Nessa análise são também consideradas as duas fases de construção do campo de esporões, que decorreram entre 2012 e 2013 (fase 1) e entre 2014 e 2015 (fase 2), e as duas intervenções de alimentação artificial, sendo que a primeira decorreu entre 2013 e 2014, e a segunda no início de 2015 (ambas na fase 2 do projeto).

A metodologia utilizada nesta dissertação envolveu um processo de análise baseado nas aplicações das ferramentas computacionais apresentadas na Figura 5.2. Esta metodologia divide-se em três fases distintas do processo de análise, começando pelos dados de *input*, as ferramentas utilizadas em todo o processo e, no fim, os dados de *output* que resultaram das ferramentas apresentadas (*Coastsat*, *Excel* e *QGIS*). Assim, os dados do caso de estudo (*input*) foram introduzidos nas ferramentas de análise escolhidas e, por fim, foram obtidos os resultados destas ferramentas (*output*).

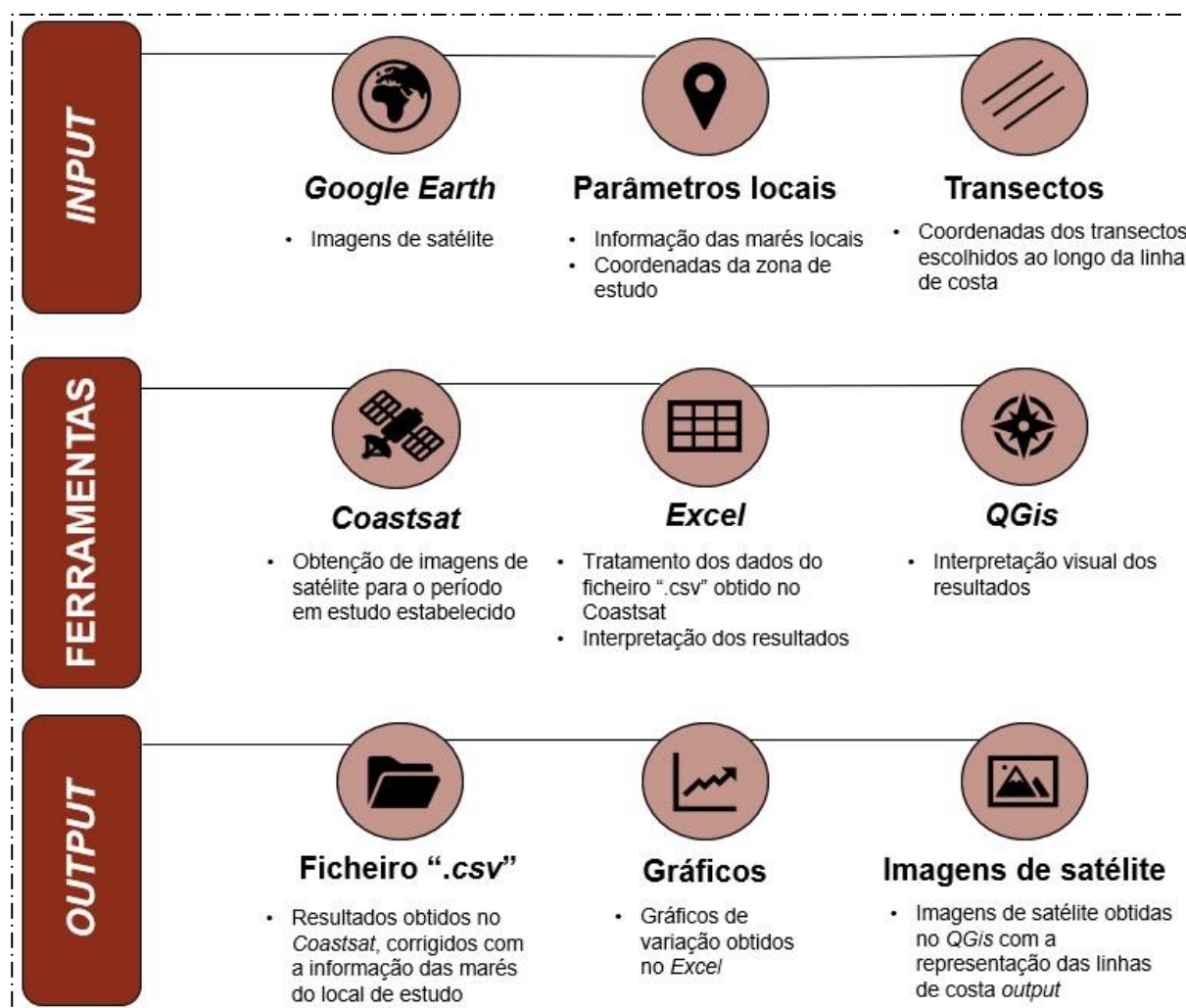


Figura 5.2 - Organograma do trabalho prático realizado na presente dissertação.

5.1.1. INPUT

As ferramentas de “input” são o *Google Earth* que fornece as imagens de satélite, os parâmetros locais relativos às marés locais e às coordenadas da zona de estudo (Tabela 5.1), e as coordenadas dos transectos escolhidos ao longo da linha de costa. Estas dados *input* foram inseridos na ferramenta *Coastsat*, para se obter as imagens de satélite referentes à zona de estudo, tendo em conta todos os dados *input* inseridos no início.

A informação das marés locais é um parâmetro indispensável para o trabalho prático porque, uma vez que as imagens de satélite são capturadas em diferentes fases das marés, é necessário fazer uma correção da linha de costa que tem em consideração a cota do nível da água no momento em que a imagem de satélite é recolhida.

Uma vez que se trata de uma extensa linha de costa, foi necessário dividir a zona de projeto em 3 zonas distintas para reduzir a incerteza relacionada com a resolução espacial de cada satélite. A zona 1 abrange os primeiros 7 esporões, correspondentes à fase 1 do projeto; a zona 2 abrange 6 esporões (do esporão 8 ao 13), correspondentes à fase 2 do projeto; e a zona 3 abrange os restantes 9 esporões (do esporão 14 ao 22), correspondentes à fase 2 do projeto (Tabela 5.1 e Figura 5.3).

Tabela 5.1 - Coordenadas da área de projeto, no sistema de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326).

COORDENADAS DA ÁREA DE PROJETO (ADA)		
LINHA DE COSTA	LONGITUDE	LATITUDE
Zona 1	0.67	5.78
	0.67	5.75
	0.62	5.78
	0.62	5.76
Zona 2	0.62	5.78
	0.62	5.76
	0.58	5.78
	0.58	5.77
Zona 3	0.58	5.78
	0.58	5.77
	0.52	5.79
	0.52	5.77

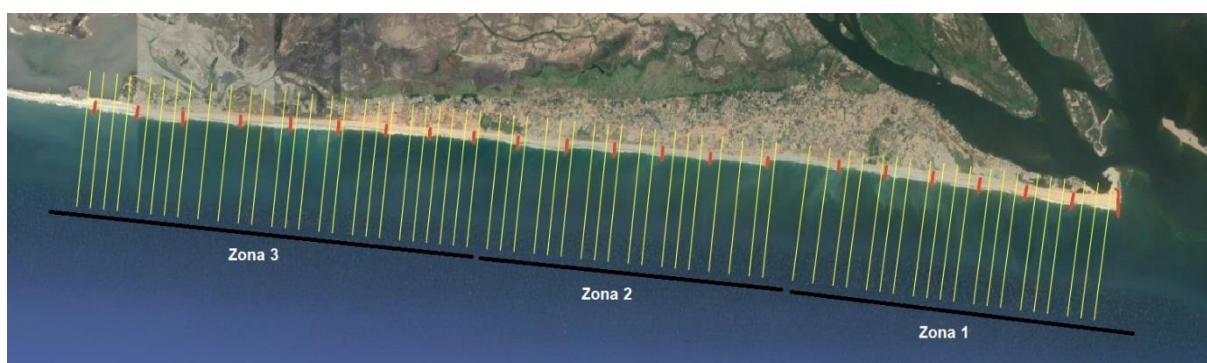


Figura 5.3 - Mapa da zona de estudo com os esporões (vermelho) e os transectos (amarelo), com a indicação das 3 zonas utilizadas no Coastsat.

Ainda, relativamente aos parâmetros para a deteção da linha de costa, foi tido em conta um índice de cobertura de nuvens (*cloud tresh*), o sistema de coordenadas utilizado e a inclinação do talude da praia (*beach slope*). Estes parâmetros são apresentados na Tabela 5.2.

Os dados relativos às marés astronómicas locais foram determinados para a zona de estudo e para o período compreendido entre 1984 e 2021, tendo por base as constantes harmónicas do local. As coordenadas da zona de estudo foram estabelecidas de modo a abranger toda a área que se quer estudar. E as coordenadas dos transectos também foram estabelecidas de modo a permitir o estudo das zonas mais relevantes de cada compartimento (Anexo B).

Tabela 5.2 - Parâmetros inseridos no ambiente *Coastsat*.

PARÂMETROS	
SISTEMA DE COORDENADAS	WGS84 (EPSG: 4326)
COBERTURA DE NUVENS (<i>CLOUD TRESH</i>)	0.5
INCLINAÇÃO DA PRAIA (<i>BEACH SLOPE</i>)	0.08

5.1.2. FERRAMENTAS

A primeira ferramenta a ser usada foi o ambiente *Coastsat*, que é um código em *python*, extraído do site *Github*, usado para fazer a detecção da linha de costa a partir de imagens de satélite, utilizando o *Google Earth Engine* (GEE). Sendo um código em *python*, foi necessário o navegador *Anaconda*, que permite fazer a gestão dos ambientes existentes, e um editor da linguagem *python*, nomeadamente o *Spyder*, um programa de desenvolvimento de *python opensource* incluído no navegador *Anaconda*.

Neste caso, o *Coastsat* realizou a detecção de um conjunto de imagens de satélite da costa de Ada, no Gana, referentes aos períodos de tempo de estudo estabelecidos, através das missões de satélite usados, o *Sentinel-2* (S2), o *Landsat-8* (L8) e o *Landsat-5* (L5).

5.1.2.1. Missões de satélites (L5, L8 e S2)

Na ferramenta *Coastsat*, são utilizadas missões de satélite para a obtenção de imagens de satélite que vão ser relevantes para a análise da linha de costa na zona de estudo. Neste caso, foram usados os satélites *Landsat-5* (L5), *Landsat-8* (L8) e *Sentinel-2* (S2).

Os satélites *Landsat-5* e *Landsat-8* foram criados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e inserem-se no programa da NASA/USGS (*United States Geological Survey*), o programa contínuo mais antigo e que já lançou 9 satélites desde os anos 70. Estes satélites têm como objetivos a obtenção de imagens da terra, de modo a detetar o solo terrestre e marítimo, as zonas costeiras e os recifes de corais. Assim, estes satélites podem contribuir para o estudo de inúmeros fatores, como a agricultura, a geologia, o mapeamento, a resposta a emergências, e ainda permite estudar as alterações climáticas.

Os dois satélites movem-se em órbita heliossíncrona, a uma altitude de 705 km, e tem um ciclo de repetição de 16 dias para cobrir a Terra (resolução temporal), à exceção do horário de cruzamento com o equador, em que o L5 cruza com o equador sempre pelas 9h45m [3][4], e o L8 cruza sempre pelas 10h00m, na hora local. Outro fator que distingue estes dois satélites é a quantidade de bandas espectrais que apresentam, sendo que o L8, o satélite mais recente, apresenta um maior número de bandas espectrais [5][6].

O satélite *Sentinel-2* (S2) foi criado pela *European Space Agency* (ESA), insere-se no programa *Copernicus* e tem como objetivos a obtenção sistemática de imagens multiespectrais de alta resolução, e a criação de dados de observação para produtos, como os mapas de cobertura terrestre, mapas de detecção das alterações do solo e de detecção de variáveis geofísicas [7].

Esta missão baseia-se em dois satélites *Sentinel* idênticos, o *Sentinel-2A* e o *Sentinel-2B*, que trabalham em simultâneo, distanciados de 180°, numa órbita heliossíncrona, a uma altitude média de 786 km, e

têm uma resolução temporal de 5 dias. A captação das imagens é realizada pelas 10h30m (*Mean Local Solar Time* – MLST) (Bezerra *et al.*, 2018). Devido à sua alta resolução e à capacidade de fazer uma classificação terrestre, correção atmosférica e a distinção de nuvens e neve, este satélite contribui para muitos temas de estudo, como o estudo das alterações climáticas, da monitorização da terra e de emergências, e em termos de segurança [7].

Em síntese, na Tabela 5.3, são apresentadas as características mais relevantes dos três satélites utilizados nesta dissertação (L5, L8 e S2), incluindo a data de lançamento, a hora em que o satélite cruza com o equador e a sua resolução espacial.

Tabela 5.3 - Características dos satélites *Landsat-5*, *Landsat-8* e *Sentinel-2* (adaptado).

MISSÃO DE SATÉLITE	<i>Landsat-5</i> (L5)	<i>Landsat-8</i> (L8)	<i>Sentinel-2</i> (S2)
DATA DE LANÇAMENTO	março de 1984	fevereiro de 2013	junho de 2015
DATA DE DESATIVAÇÃO	novembro de 2011	-	-
HORÁRIO DE CRUZAMENTO COM O EQUADOR (<i>EQUATORIAL CROSSING TIME</i>)	9h45m	10h00m	10h30m
RESOLUÇÃO ESPACIAL	30 m	30 m	10 m

Com o ambiente *coastsat*, foi aberto o ficheiro “*example.py*” (inserido na pasta extraída do site *Github*) no *Spyder*. Este ficheiro está localizado na pasta *coastsat-master*, e é composto por um código de *python* que vai criar os dados de *output* para o estudo da linha de costa. Neste estudo, foram usados o *Landsat-5* (L5), o *Landsat-8* (L8) e o *Sentinel-2* (S2). No entanto, a escolha da missão de satélite não é suficiente para a obtenção das imagens de satélite porque é necessário configurar o programa para a zona de estudo, neste caso à costa de Ada. Assim, foi necessário inserir alguns parâmetros locais, nomeadamente as coordenadas do local de estudo (Tabela 5.1), a informação relativa às marés que se verificam no Gana, para adequar as condições das marés locais ao trabalho prático, e a informação das coordenadas dos 64 transectos estabelecidos ao longo da linha de costa (Figura 5.3).

A segunda ferramenta utilizada foi o Excel, designadamente para a análise e visualização de dados. Esta ferramenta foi usada para manipular os dados de *output*, exportados para um ficheiro com o formato “valores separados por vírgulas” (“*.csv*”).

Por último, foi usada a ferramenta *QGIS*, que é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) *opensource*, criado pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), que permite visualizar, editar e analisar dados georreferenciados. É um programa que apresenta inúmeras funcionalidades e que suporta diversos formatos de vetores, bases de dados, *rasters*, entre outros. Devido às suas inúmeras funções, este programa vai permitir fazer a interpretação visual dos dados obtidos no *Coastsat*, nomeadamente das coordenadas das linhas de costa devidamente corrigidas, em comparação com a linha de costa de referência (março de 2013).

5.1.3. OUTPUT

Após a execução do *Coastsat*, foi necessário fazer uma marcação da linha de costa, de modo a criar uma linha de referência para o *Coastsat* (Figura 5.4). Após esta marcação, o programa cria ficheiros com diferentes formatos de *output*: um ficheiro “*Geojson*”, um ficheiro “*pkI*” e um ficheiro “*csv*”. Por defeito, os ficheiros “*Geojson*” e “*pkI*” não apresentam os dados corrigidos com a informação relativa às marés. Por esta razão, foi utilizado o ficheiro “*csv*” para o estudo do caso prático que apresenta as distâncias (em m) entre as coordenadas iniciais dos transectos e cada linha de costa *output*. Estes dados de *output* podem ser abertos com a ferramenta *Excel*.



Figura 5.4 - Criação de uma linha de referência no *Spyder*.

Entre todos os dados de *output* disponíveis, apenas o ficheiro “*csv*” foi usado na análise. Este ficheiro apresenta as distâncias, em m, entre as linhas de costa (representadas pelo ponto C), referentes às imagens de satélite obtidas, e o início de cada transecto (representados pelo ponto A) (Figura 5.5).

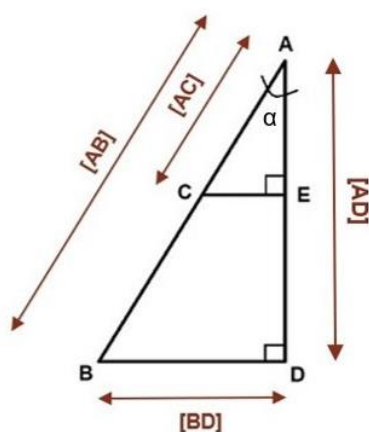


Figura 5.5 - Esquema para o cálculo das coordenadas do ponto C.

Para facilitar o tratamento de dados, foi necessário transformar estas distâncias em coordenadas *WGS84/Pseudo-Mercator* (EPSG:3857), com o auxílio da ferramenta *Excel*. Para isso, foi calculada a distância [AB] com o auxílio das coordenadas dos pontos [AD] e [BD] (Equação 5) (Anexo B). Após

calculada, esta distância permitiu calcular os ângulos que os transectos fazem com a vertical (Equação 6, 7 e 8) (Anexo B).

$$[AB] = \sqrt{[AD]^2 + [BD]^2} \quad (5)$$

$$[AB] = 2023 \text{ m}$$

$$\text{asen}(\alpha) = \frac{[BD]}{[AB]} \quad (6)$$

Nos primeiros 20 transectos:

$$\text{asen}(\alpha) = 0.129 \quad (7)$$

$$\alpha = 7.37^\circ$$

Nos restantes 44 transectos:

$$\text{asen}(\alpha) = 0.102 \quad (8)$$

$$\alpha = 5.84^\circ$$

Sabendo as coordenadas do ponto A e a distância $[AC]$, foi possível chegar às coordenadas do ponto C, através das seguintes equações:

$$x_C = x_A - [[AC] \times \text{sen}(\alpha)] \quad (9)$$

$$y_C = y_A - [[AC] \times \cos(\alpha)] \quad (10)$$

Estes cálculos foram feitos para todos os dados de *output* que resultaram da detecção da linha de costa a partir das imagens de satélite, realizada pelo *Coastsat*. Estas imagens são correspondentes aos satélites L5, L8 e S2, e foram capturadas entre 1984 e 2021. Após determinadas as coordenadas das linhas de costa *output*, foram calculadas as distâncias entre a posição das linhas de costa detetadas a partir de imagens de satélite e a posição da linha de costa de referência (março de 2013) ao longo de cada um dos transectos considerados.

Para isso, foi necessário determinar a distância entre o ponto A e a linha de costa de referência (março de 2013) (Figura 5.6), através da equação 11.

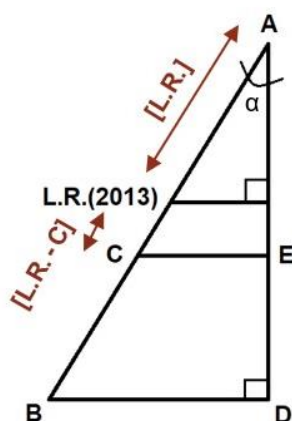


Figura 5.6 - Esquema para o cálculo da distância entre o ponto A e a linha de costa de referência (março 2013).

$$[L.R.] = \sqrt{(x_{L.R.} - x_A)^2 + (y_{L.R.} - y_A)^2} \quad (11)$$

Após a determinação da distância entre o ponto A e a linha de costa de referência (março 2013), foi possível proceder ao cálculo da diferença entre as distâncias *output* e as distâncias correspondentes à linha de referência para todos os transectos, através da seguinte equação:

$$[L.R. - C] = [AC] - [L.R.] \quad (12)$$

Os resultados dos cálculos apresentados acima permitem relacionar a variação da posição da linha de costa ao longo dos anos de estudo com a linha de costa de referência (março de 2013). A linha de costa de referência e as linhas de costa detetadas a partir de imagens de satélite estão posicionadas na elevação 0 m. Importa referir que existe alguma incerteza associada a esse posicionamento: por um lado, a linha de referência resulta da interpolação entre levantamentos batimétricos e topográficos; por outro lado, as linhas de costa detetadas através de imagens de satélite foram corrigidas em relação ao efeito da maré assumindo um talude de inclinação da praia, e para além disso, existe uma incerteza associada à resolução espacial e qualidade (por exemplo, a cobertura de nuvens e a iluminação) de cada imagem de satélite.

Foi também utilizada a ferramenta *QGis* para analisar as 9 datas seleccionadas no período de 8 anos de estudo (2013 a 2021) e comparar com a linha de costa de referência (março de 2013). A escolha destas linhas de costa *output* teve em conta a época do ano de forma a analisar situações hidrodinâmicas equivalentes. Deste modo, foram consideradas linhas de costa para o período de novembro a maio, entre os anos de 2013 a 2021, resultando em 9 datas distintas. Os meses escolhidos para cada ano projetam, em grande parte dos anos, o início e o fim da estação de chuva bimodal, à exceção de 3 datas, que apanham a estação de Harmatão. Por isso, é necessário fazer uma análise cuidada consoante as características normais destas épocas.

Para estas 9 datas, apenas os satélites L8 e o S2 conseguiram detetar as linhas de costa para esta zona de estudo. O satélite L8 detetou as datas correspondentes aos anos 2013, 2014, 2015 e 2021, e o satélite S2

conseguiu detetar as datas correspondentes aos anos 2016, 2017, 2018, 2019 e 2020. Pela razão de estarem envolvidos dois satélites nesta análise, devem ser tidas em conta as incertezas causadas pelas diferenças que estes dois satélites apresentam.

Para a análise das tendências que se vão verificar na análise da linha de costa, foi criada a Tabela 5.4, que apresenta os limites estabelecidos para o avanço e o recuo da linha de costa, em termos de taxas de tendência (m/ano) em relação à linha de costa de referência (março 2013). Estes limites vão proporcionar uma discussão de resultados mais clara e concisa.

Tabela 5.4 - Limites estabelecidos para as taxas de avanço e recuo da linha de costa.

AVANÇO DA LINHA DE COSTA		RECUO DA LINHA DE COSTA	
TAXA (M/ANO)	CLASSE	TAXA (M/ANO)	CLASSE
≤ 0.5	Estável	$\leq - 0.5$	Estável
$> 0.5 - 1.0$	Ligeiro	$> - 0.5 - 1.0$	Ligeiro
$> 1.0 - 3.0$	Moderado	$> - 1.0 - 3.0$	Moderado
≥ 3.0	Significativo	$\geq - 3.0$	Significativo

Para a análise do comportamento das linhas de costa imediatamente a barlamar e a sotamar, foi criada a Tabela 5.5, que apresenta os limites estabelecidos para o avanço e o recuo da linha de costa, em termos da distância (m) em relação à linha de costa de referência (março 2013).

Tabela 5.5 - Limites estabelecidos para as distâncias entre as linhas de costa e a linha de referência (março 2013).

AVANÇO DA LINHA DE COSTA		RECUO DA LINHA DE COSTA	
DISTÂNCIA (M)	CLASSE	DISTÂNCIA (M)	CLASSE
≤ 5	Negligenciável	$\leq - 5$	Negligenciável
$> 5 - 10$	Ligeiro	$> - 5 - 10$	Ligeiro
$> 10 - 30$	Moderado	$> - 10 - 30$	Moderado
≥ 30	Significativo	$\geq - 30$	Significativo

5.2. RESULTADOS

Os resultados obtidos com base na aplicação da metodologia estabelecida para a avaliação da evolução da linha de costa e dos impactos das obras de defesa costeira construídas são expressos na forma de imagens de satélite e gráficos, de modo a tornar a sua interpretação mais clara possível. Assim, a análise foi dividida em duas secções distintas, a primeira relativa à análise individual de cada compartimento durante os 8 anos (2013 a 2021) (secção 5.2.1) e a segunda à análise de longo termo da linha de costa entre 1984 e 2021 que, portanto, inclui um período de mais de 20 anos, anterior à construção das estruturas de defesa costeira (secção 5.2.2).

De um modo geral, neste subcapítulo vão ser apresentados os resultados, na forma de gráficos e imagens de satélite manipuladas no *Qgis*.

A secção 5.2.1 compreende a análise da posição das linhas de costa para as 9 datas seleccionadas por compartimento, a análise das linhas de costa para as mesmas datas nas zonas a barlar e a sotamar de cada esporão, bem como a análise do comprimento ativo de cada esporão.

A secção 5.2.2 compreende a análise da posição das linhas de costa para todas as datas de *output* (31), bem como a análise da posição das linhas de costa antes e depois das duas intervenções de alimentação artificial realizadas na zona de estudo.

5.2.1. ANÁLISE INDIVIDUAL DE CADA COMPARTIMENTO

Ao longo dos parágrafos seguintes, as linhas de costa seleccionadas são apresentadas por agrupamento de 2 compartimentos, ou seja, incluindo três esporões. Logo de seguida, são apresentados gráficos de variação, que relacionam o período de tempo de estudo (8 anos) com as distâncias (m), que correspondem à diferença entre as posições das diferentes linhas de costa *output* e a linha de costa de referência (março de 2013). Essas distâncias podem ser positivas ou negativas.

Importa referir que a fase 1 do projeto, na qual foram construídos 7 esporões (Esporões 1 a 7, na Figura 5.1), foi finalizada em 2013, e a fase 2, na qual foram construídos 15 esporões (Esporões 8 a 22, na Figura 5.1) e realizadas as duas alimentações artificiais em 2015. As datas de construção relativas às diferentes fases são consideradas na análise.

5.2.1.1. Análise das linhas de costa, entre 2013 e 2021

Para a análise quantitativa do avanço e recuo da linha de costa em estudo ao longo de 8 anos, a linha de costa de referência (março de 2013) está representada como zero no eixo dos yy. Assim, nas Figuras Figura 5.7 à Figura 5.13 estão apresentados os resultados para os primeiros 6 compartimentos (A a F) correspondentes aos 7 esporões construídos na 1ª fase do projeto, com as linhas de costa obtidas para as diferentes datas (linhas a cores) e com a linha de referência (linha preta), através da análise de imagens de satélite.

O compartimento A (Figuras Figura 5.7 e Figura 5.8) apresentou alterações positivas e negativas ao longo dos anos, o que quer dizer que este compartimento apresentou um avanço da linha de costa nos anos 2015, 2018 e 2021, e sofreu um recuo nos anos 2016 e 2020. Ainda é possível verificar que, em 2021, a linha de costa apresentou um maior avanço, mais especificamente no segundo transecto, com um aumento da largura da praia de +46 m em relação à linha de referência (março 2013). Em termos de recuo da linha de costa, verifica-se um valor máximo em 2016, no primeiro transecto, com uma redução da largura da praia de -24 m em relação à linha de referência (março 2013).

O compartimento B (Figura 5.7 e Figura 5.9) também apresenta alterações positivas e negativas ao longo dos anos, verificando-se um avanço da linha de costa em 2015, 2017 e 2021, e um recuo em 2016 e 2020. Apesar destas variações positivas e negativas, o ano 2021 apresentou um maior avanço da linha de costa no transecto 6, levando ao aumento de +44 m da largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013). Por outro lado, o ano 2016 apresentou um maior recuo da linha de costa no transecto 4, levando a uma diminuição de -35 m da largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013).

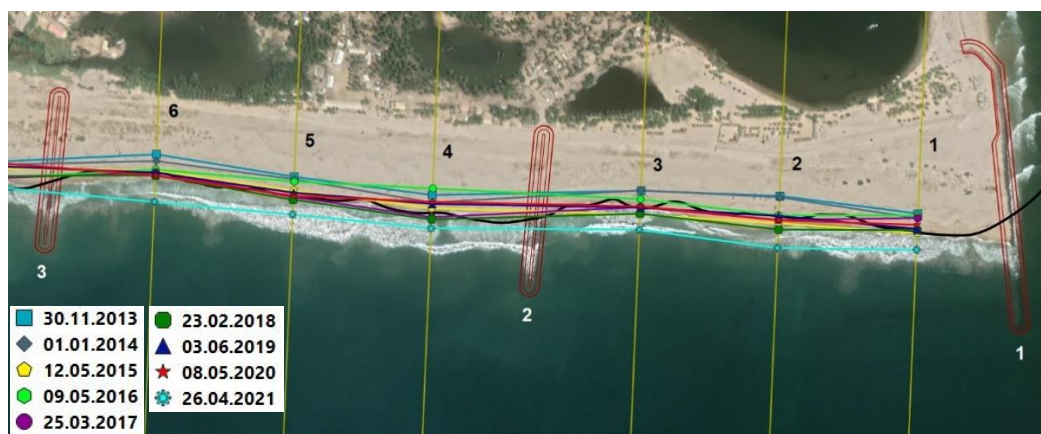


Figura 5.7 - Compartimentos A e B do projeto delimitados pelos esporões 1, 2 e 3.

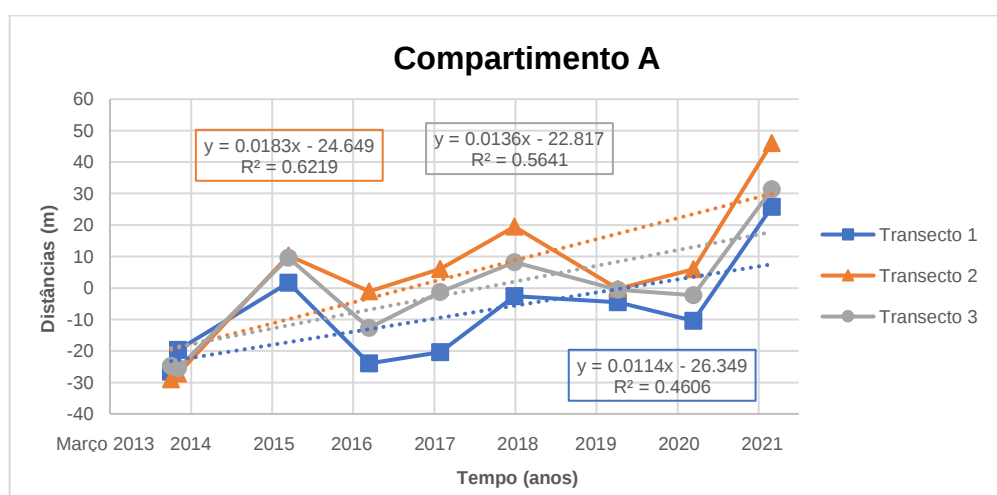


Figura 5.8 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento A, ao longo do período em estudo.

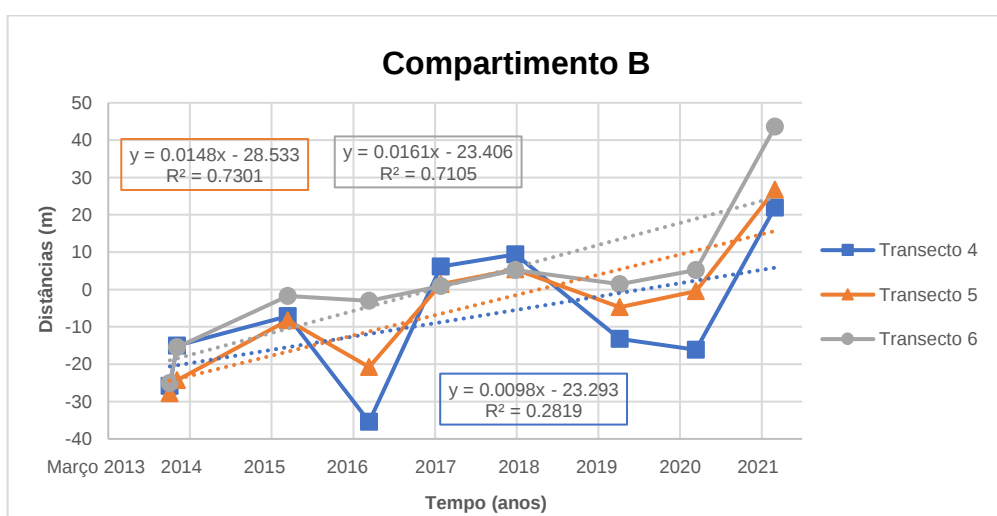


Figura 5.9 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento B, ao longo do período em estudo.

Em suma, ambos os compartimentos analisados (A e B) apresentaram uma evolução positiva da linha de costa ao longo do período em estudo.

O compartimento C (Figura 5.10 e Figura 5.11) apresentou um avanço gradual da linha de costa até ao ano 2017. No entanto, a partir deste ano começou a verificar-se um recuo acentuado da linha de costa até ao ano 2020, que foi invertido em 2021. Efetivamente, em 2021, verifica-se o maior avanço da linha de costa no transecto 9, um aumento de +35 m da largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013). Por outro lado, no final do ano de 2013, verificou-se o maior recuo da linha de costa, de -48 m de largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013), no transecto 8.

O compartimento D (Figura 5.10 e Figura 5.12) não apresenta uma grande alteração da linha de costa entre 2015 e 2020, no entanto, e de um modo geral, é possível observar uma melhoria (avanço da linha de costa). Semelhante ao observado no compartimento C, a linha de costa apresenta o maior avanço em 2021, de +36 m de largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013), no transecto 11. Relativamente ao recuo, a linha de costa apresentou um maior recuo no início do ano 2014, de -31 m de largura da praia em relação à linha de referência (março de 2013).

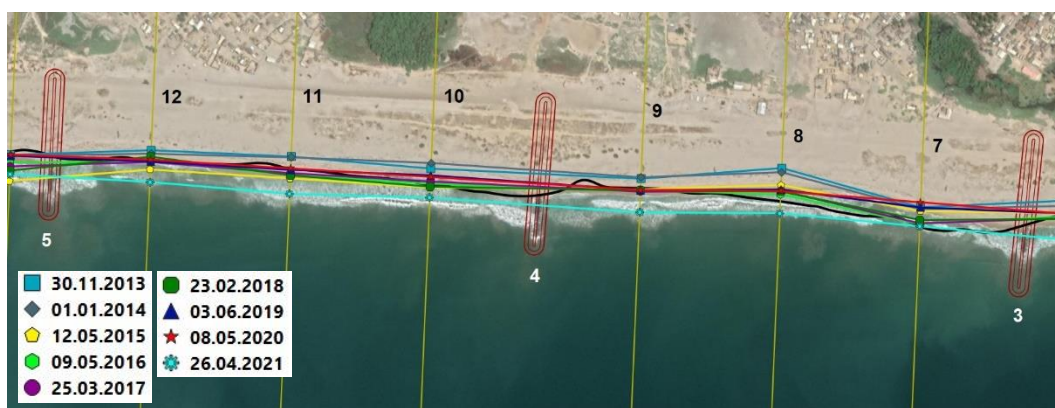


Figura 5.10 - Compartimentos C e D do projeto delimitados pelos esporões 3, 4 e 5.

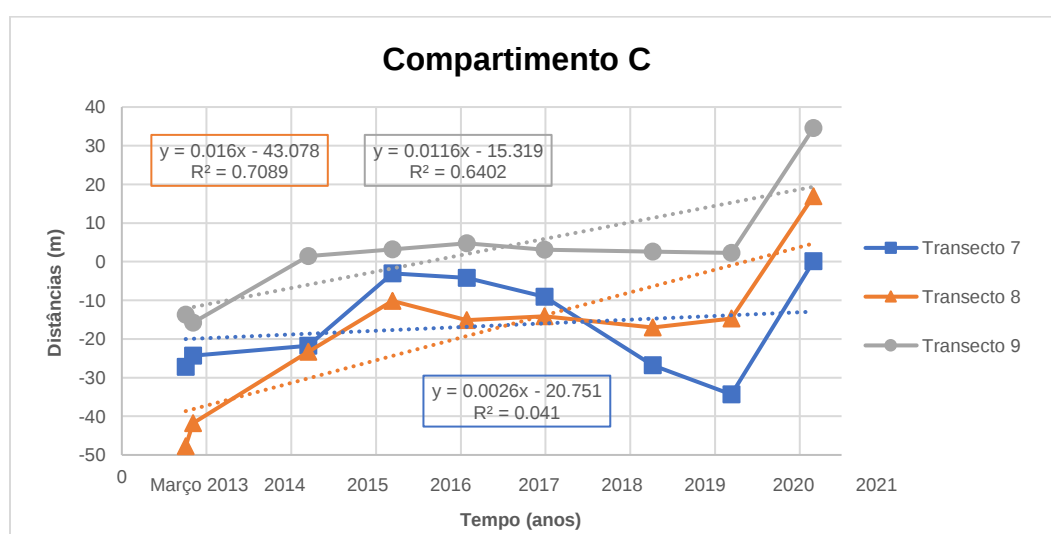


Figura 5.11 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento C, ao longo do período em estudo.

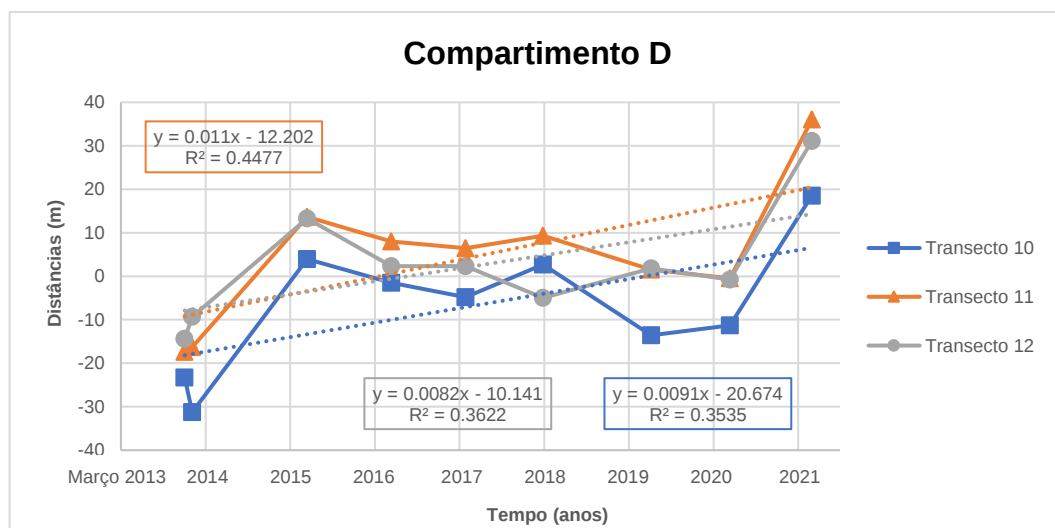


Figura 5.12 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento D, ao longo do período em estudo.

Em suma, ambos os compartimentos (C e D) analisados apresentaram uma evolução positiva da linha de costa ao longo do período em estudo. É de salientar que o maior recuo que se verificou nos dois compartimentos aconteceu durante a construção dos esporões da fase 1 do projeto.

O compartimento E (Figura 5.13 e Figura 5.14) apresentou alterações, positivas e negativas, ao longo do período em estudo. A maior alteração verificou-se em 2015, onde houve um avanço acentuado da linha de costa. Pelo contrário, em 2019, verificou-se um recuo da linha de costa. Especificamente, a linha de costa apresenta um maior avanço em 2015 no transecto 15, de +48 m em relação à linha de referência (março de 2013). Neste compartimento, o transecto 14 apresentou o maior recuo no final do ano de 2013, de -13 m em relação à linha de referência (março de 2013).

No compartimento F (Figura 5.13 e Figura 5.15) verifica-se uma situação contrária aos compartimentos analisados anteriormente, uma vez que este compartimento apresenta uma diminuição gradual da largura da praia. Para além deste recuo, a linha de costa não apresenta alterações importantes ao longo do período em estudo, à exceção do ano de 2015. Esta alteração pode ser atribuída à intervenção de alimentação artificial que foi realizada em fevereiro de 2014. Especificamente, a linha de costa no transecto 16 apresentou um maior avanço em 2015, de cerca de +43 m em relação à linha de referência (março de 2013), e um maior recuo em 2019, de -41 m.



Figura 5.13 - Compartimentos E e F do projeto delimitados pelos esporões 5, 6 e 7.

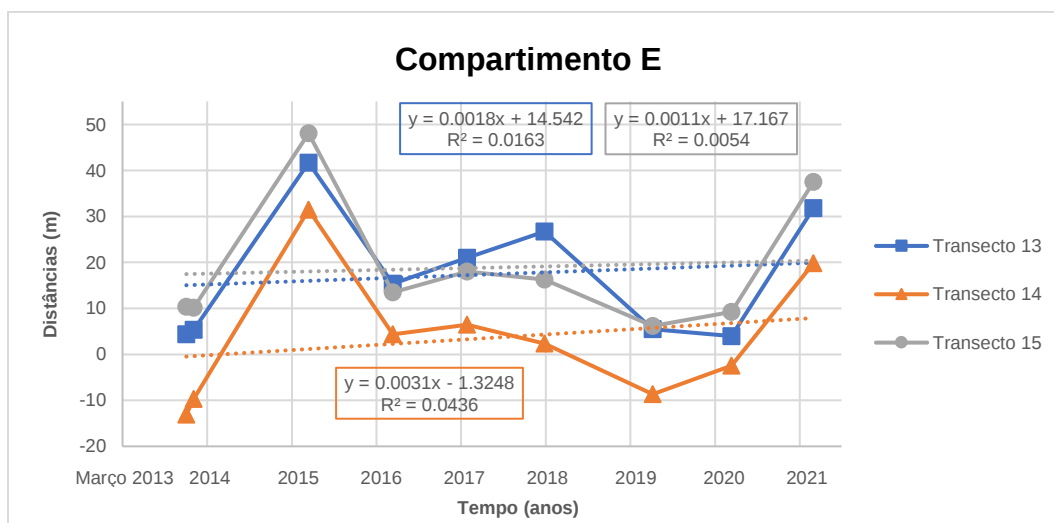


Figura 5.14 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento E, ao longo do período em estudo.

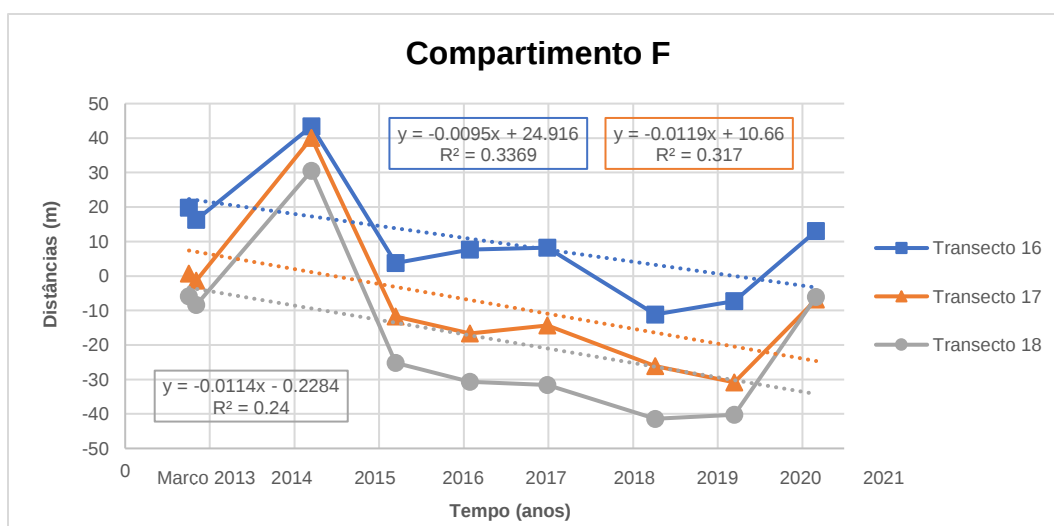


Figura 5.15 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento F, ao longo do período em estudo.

Em resumo, os dois compartimentos apresentam uma diferença significativa na evolução da linha de costa. Enquanto, no compartimento E ainda é possível verificar uma evolução positiva da linha de costa, embora ligeira, no compartimento F verifica-se uma evolução negativa.

A evolução negativa no compartimento F contraria a evolução tendencialmente positiva, ainda que com oscilações, que se pode observar nos restantes compartimentos relativos à fase 1 do projeto, que incluiu a construção de 7 esporões. Essa tendência de evolução no compartimento F é atribuída à sua localização imediatamente a sotamar dos esporões da fase 2 do projeto. Espera-se que essa evolução possa vir a ser atenuada ou até invertida nos próximos anos.

A fase 2 do projeto compreende os restantes 14 compartimentos (G a U, na Figura 5.1) e os restantes 15 esporões (esporões 8 a 22, na Figura 5.1), construídos entre maio de 2014 e julho de 2015. Nas Figura 5.16 à Figura 5.38 são apresentados os resultados para a fase 2 do projeto, incluindo a linha de costa de referência (linha preta).

O compartimento G (Figura 5.16 e Figura 5.17), tal como observado anteriormente para o compartimento F, apresenta uma diminuição gradual da largura da praia ao longo do período em estudo. As alterações na linha de costa são mais significativas em 2015, devido à intervenção de alimentação artificial que decorreu entre janeiro e março de 2015. O maior avanço da linha de costa, de cerca de +47 m em relação à linha de referência (março de 2013), verifica-se em 2015 no transecto 19. O maior recuo, de -64 m, verifica-se em 2020 no transecto 21.

No compartimento H (Figura 5.16 e Figura 5.18) verifica-se uma variação gradual da posição da linha de costa ao longo do período em estudo. Efetivamente, não se observam alterações significativas da linha de costa neste compartimento, exceto devido à alimentação artificial que teve lugar no início de 2015. Nesse ano, observa-se no transecto 22 o maior avanço da linha de costa, de +60 m em relação à linha de referência (março de 2013). Por outro lado, o maior recuo, de -20 m, dá-se em 2016 no transecto 24.

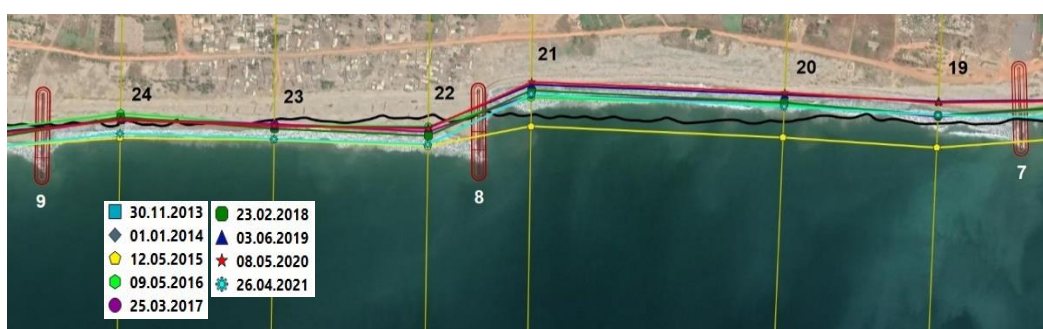


Figura 5.16 - Compartimentos G e H do projeto delimitados pelos esporões 7, 8 e 9.

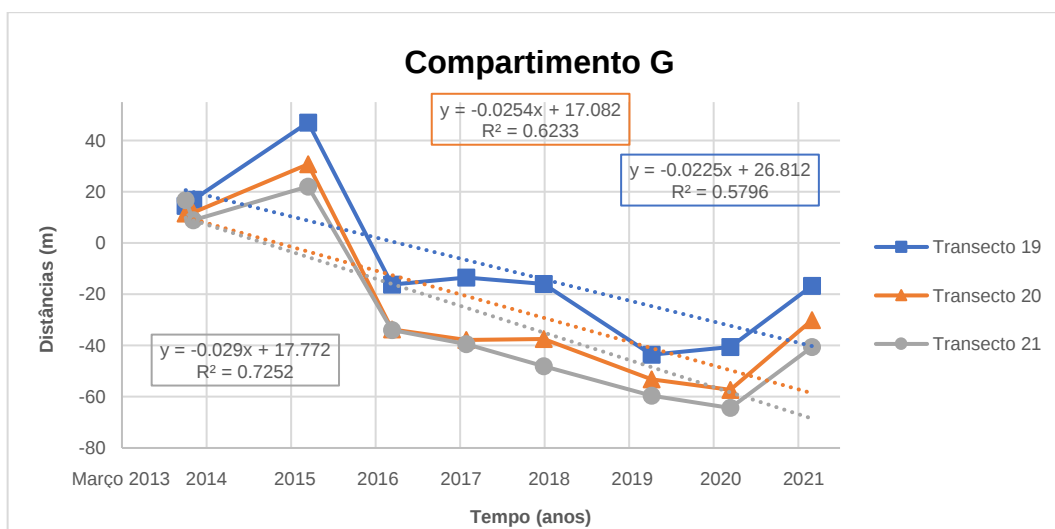


Figura 5.17 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento G, ao longo do período em estudo.

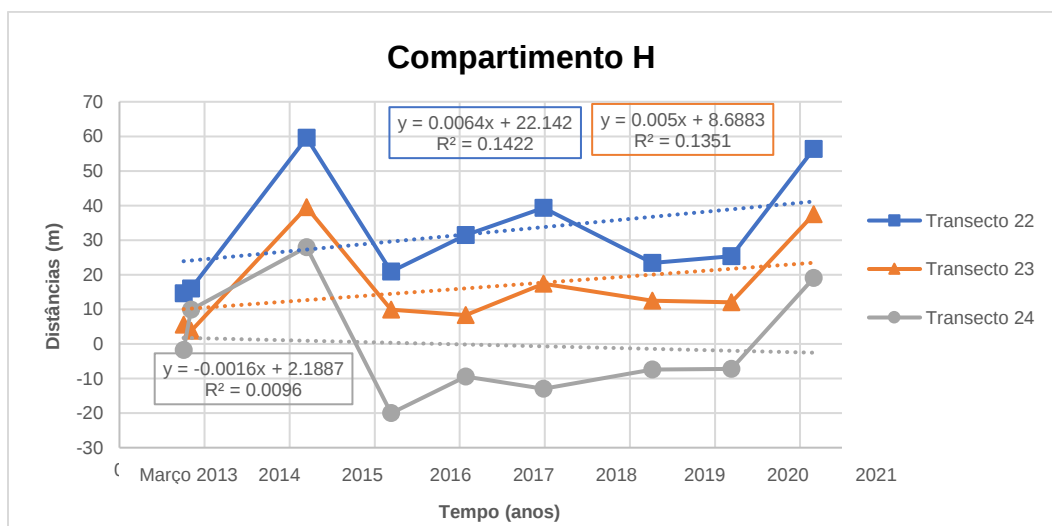


Figura 5.18 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento H, ao longo do período em estudo.

Os compartimentos G e H apresentam tendências de evolução distintas no período em estudo, enquanto, que no compartimento G, a tendência de evolução da linha de costa é geralmente negativa, no compartimento H essa tendência é positiva. Essa tendência de evolução no compartimento G é atribuída, em primeiro lugar, à sua localização a sotamar dos esporões da fase 2 do projeto, tal como já foi observado para o compartimento F, e em segundo lugar, à grande distância entre os esporões 7 e 8.

O compartimento I (Figura 5.19 e Figura 5.20) apresenta oscilações na posição da linha de costa ao longo do período em estudo, sendo possível observar duas instâncias de maior avanço da linha de costa (em 2015 e 2021) e duas de maior recuo (em 2016 e 2020). O maior avanço da linha de costa, em relação à linha de referência (março de 2013), de +47 m, verifica-se em 2021 no transecto 25, e o maior recuo, de -16 m, em 2020 no transecto 27.

A evolução no compartimento J (Figura 5.19 e Figura 5.21) é em tudo semelhante à do compartimento I. O maior avanço da linha de costa, de +54 m, foi observada no transecto 28 em 2021, e o maior recuo, de -9 m, verificou-se em 2019 no transecto 30, apesar de, entre 2016 e 2020, a tendência observada é de estabilidade na posição da linha de costa, ou seja, existem pequenas oscilações e os valores de variação estão próximos entre si.



Figura 5.19 - Compartimentos I e J do projeto delimitados pelos esporões 9, 10 e 11.

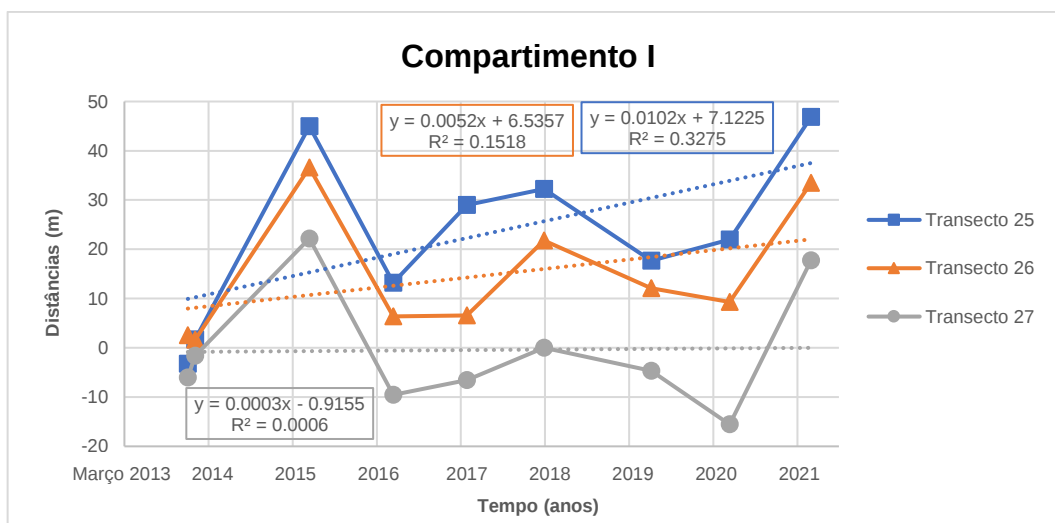


Figura 5.20 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento I, ao longo do período em estudo.

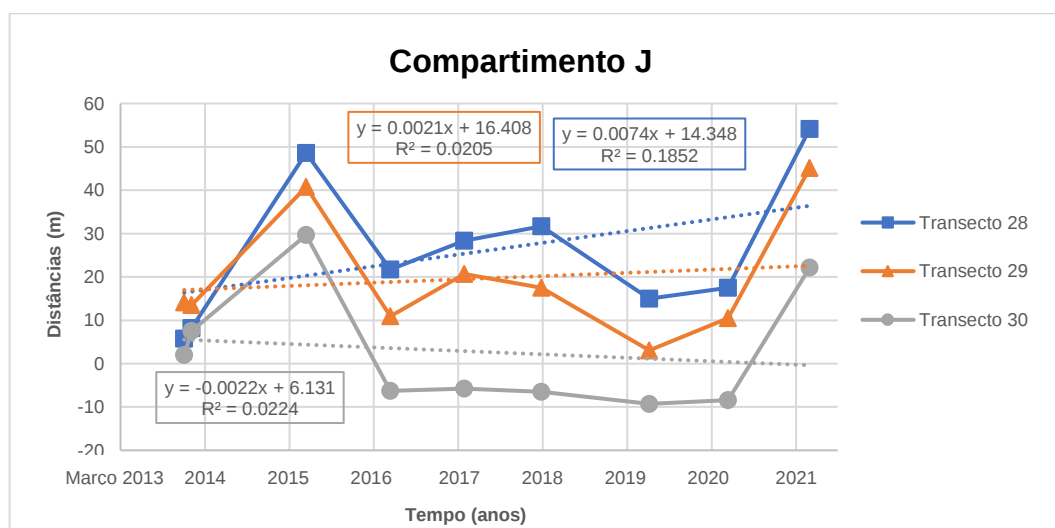


Figura 5.21 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento J, ao longo do período em estudo.

Resumindo, ambos os compartimentos, I e J, apresentaram uma evolução positiva na posição da linha de costa ao longo do período em estudo, com exceção do transecto 30 no compartimento J, onde se verifica uma evolução na posição da linha de costa ligeiramente negativa.

O compartimento K (Figura 5.22 e Figura 5.23) apresenta alguma variação na linha de costa ao longo do período em estudo, sendo possível observar duas instâncias de maior avanço da linha de costa, uma em 2015, que coincide com a altura em que foi realizada a alimentação artificial neste compartimento, e outra em 2021. É ainda, possível observar um grande avanço da linha de costa em 2018, mas apenas no transecto 31. Em 2015 e 2020, o avanço da linha de costa no transecto 31 foi de cerca de +41 m, em relação à linha de referência (março de 2013). O maior recuo neste compartimento, observou-se em 2016 no transecto 33, de -12 m, em relação à linha de referência (março de 2013).

No compartimento L (Figura 5.22 e Figura 5.24) a linha de costa manteve-se geralmente estável, entre 2016 e 2020. Em 2020 e 2015, são observados avanços significativos na posição da linha de costa. Em 2015, este avanço deve-se à intervenção de alimentação artificial que houve nesse mesmo ano. Assim, a linha de costa apresenta o maior avanço em 2021 no transecto 34, de +57 m, em relação à linha de referência (março de 2013). Por outro lado, o maior recuo, de -10 m, verifica-se em 2020 no transecto 36.



Figura 5.22 - Compartimentos K e L do projeto delimitados pelos esporões 11, 12 e 13.

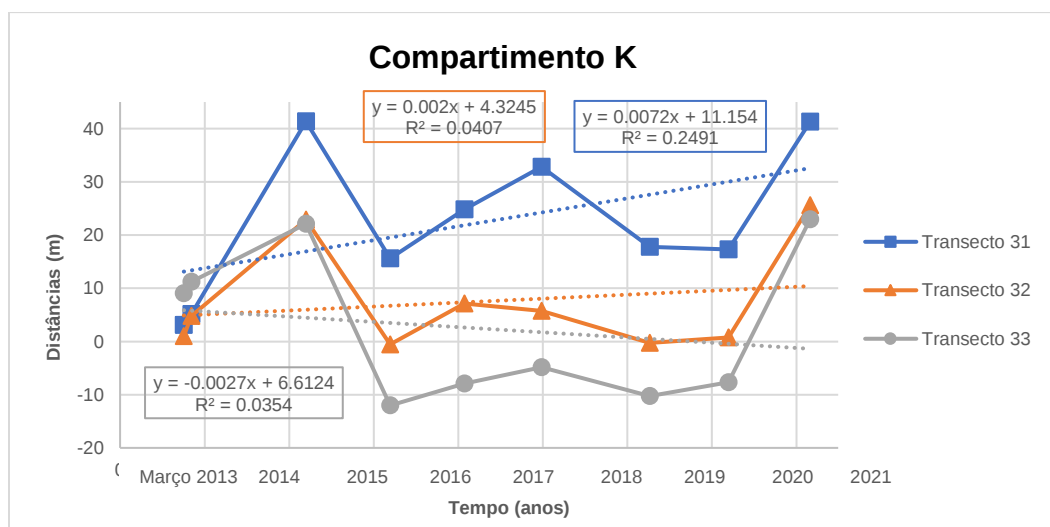


Figura 5.23 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento K, ao longo do período em estudo.

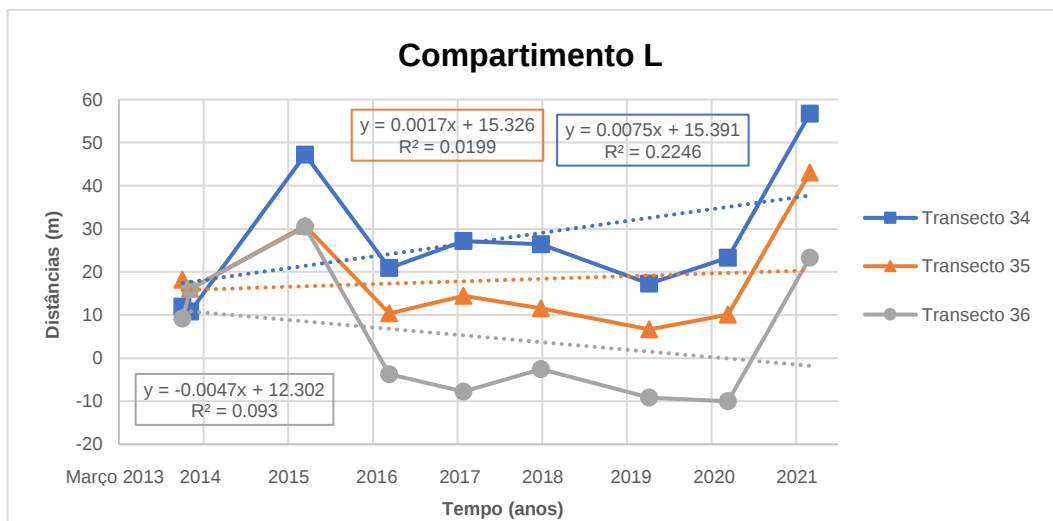


Figura 5.24 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento L, ao longo do período em estudo.

Resumindo, ambos os compartimentos, K e L, apresentam uma evolução da posição da linha de costa muito semelhante, ou seja, apresenta uma estabilidade entre os anos 2016 e 2020, e uma evolução positiva em 2015 e em 2021. De um modo geral, a evolução da posição da linha de costa foi tendencialmente positiva em todo o compartimento, à exceção dos transectos situados a sotamar dos esporões 12 (transecto 33) e 13 (transecto 36).

O compartimento M (Figura 5.25 e Figura 5.26) mantém-se geralmente estável entre os anos 2016 e 2020, com exceção do transecto 37 situado a barlamar do esporão 13, que apresenta um pequeno avanço da linha de costa em relação à linha de referência (março de 2013). Como observado anteriormente noutros compartimentos, nos anos 2015 e 2021 verifica-se um avanço substancial da linha de costa. Em 2015, esse avanço, de +54 m em relação à linha de referência (março de 2013), nos transectos 37 e 38, resulta da intervenção de alimentação artificial de areias que ocorreu até ao início desse ano. O maior recuo no período em estudo, de -16 m, deu-se em 2017, no transecto 38.

A tendência de evolução no compartimento N (Figura 5.25 e Figura 5.27) para o período em estudo é positiva ao longo de todo o compartimento, ou seja, apresenta, desde março de 2013, uma acumulação de sedimentos. Apesar disso, é possível observar alguma variação nessa tendência. Assim, podemos observar que o maior avanço da linha de costa, de +72 m em relação à linha de referência (março de 2013), ocorreu em 2015 no transecto 40.

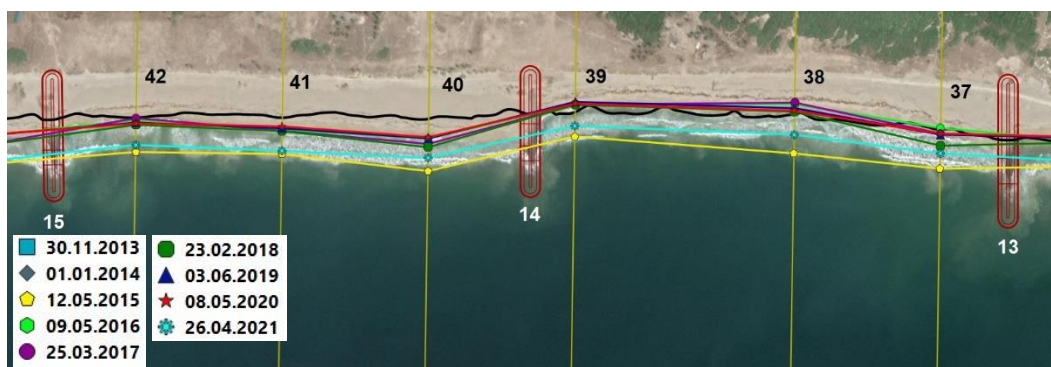


Figura 5.25 - Compartimentos M e N do projeto delimitados pelos esporões 13, 14 e 15.

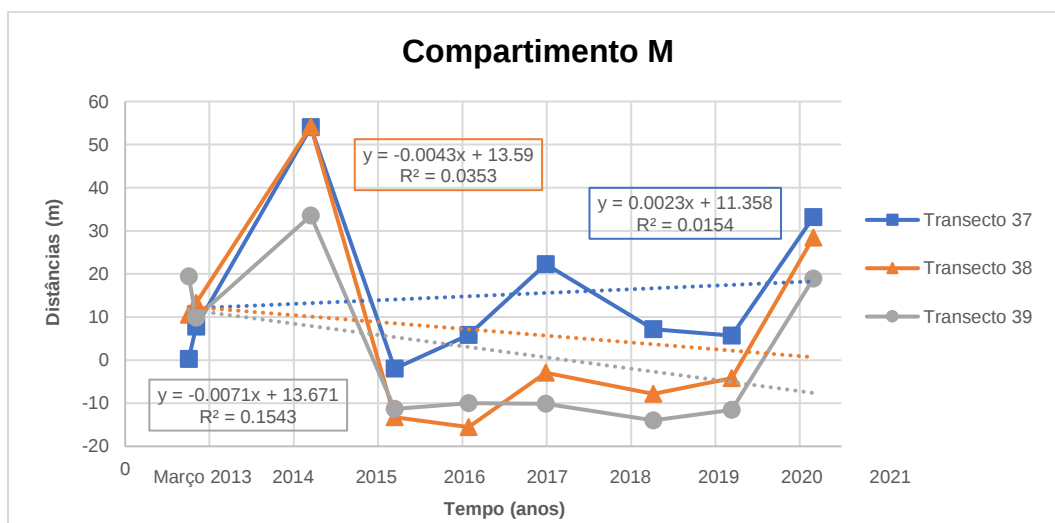


Figura 5.26 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento M, ao longo do período em estudo.

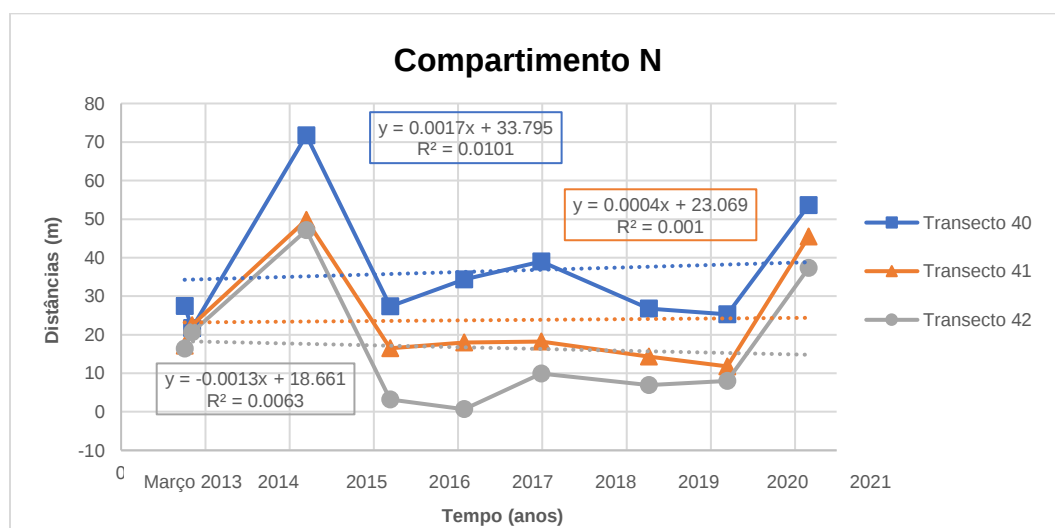


Figura 5.27 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento N, ao longo do período em estudo.

Ao longo do período em estudo, os compartimentos M e N apresentam, depois de um ajuste após a intervenção de alimentação artificial de areia, uma tendência que é geralmente de estabilidade. Será interessante observar se, a tendência positiva observada a partir de 2020, se mantém no futuro.

Os compartimentos O (Figura 5.28 e Figura 5.29) e P (Figura 5.28 e Figura 5.30) apresentam um padrão de evolução semelhante ao observado nos compartimentos anteriores, situados imediatamente a sotamar dos esporões, isto é, apresentam uma pequena variação ou estabilidade da posição da linha de costa entre 2016 e 2020, e avanços significativos em 2015 e 2021. No compartimento O, a linha de costa apresenta o maior avanço, de +61 m em relação à linha de referência (março de 2013), em 2015 no transecto 43. Os maiores recuos foram observados em 2016 e são atribuídos a um ajuste da linha de costa após a intervenção de alimentação artificial de areia. Já no compartimento P, o maior avanço, de +54 m, foi observado em 2015 nos transectos 46 e 48.



Figura 5.28 - Compartimentos O e P do projeto delimitados pelos esporões 15, 16 e 17.

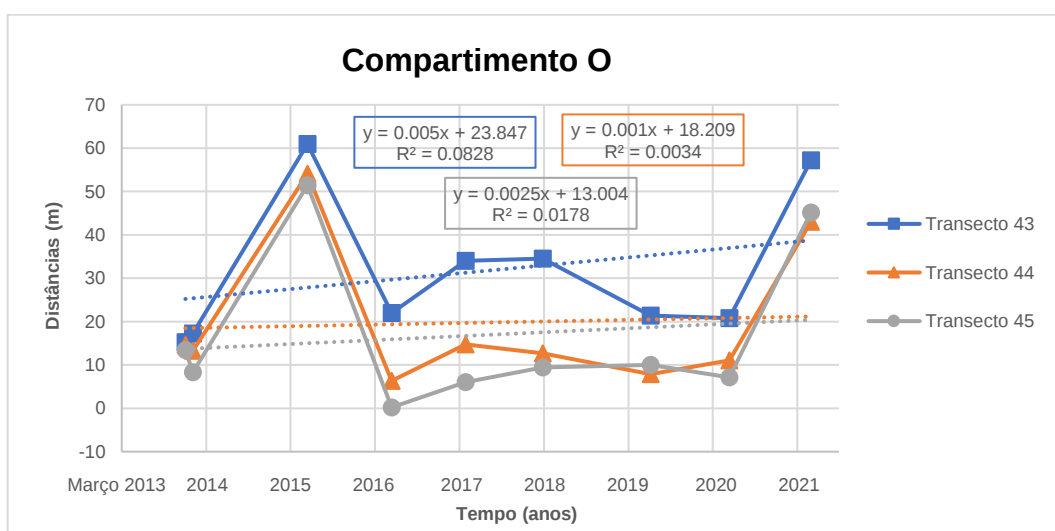


Figura 5.29 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento O, ao longo do período em estudo.

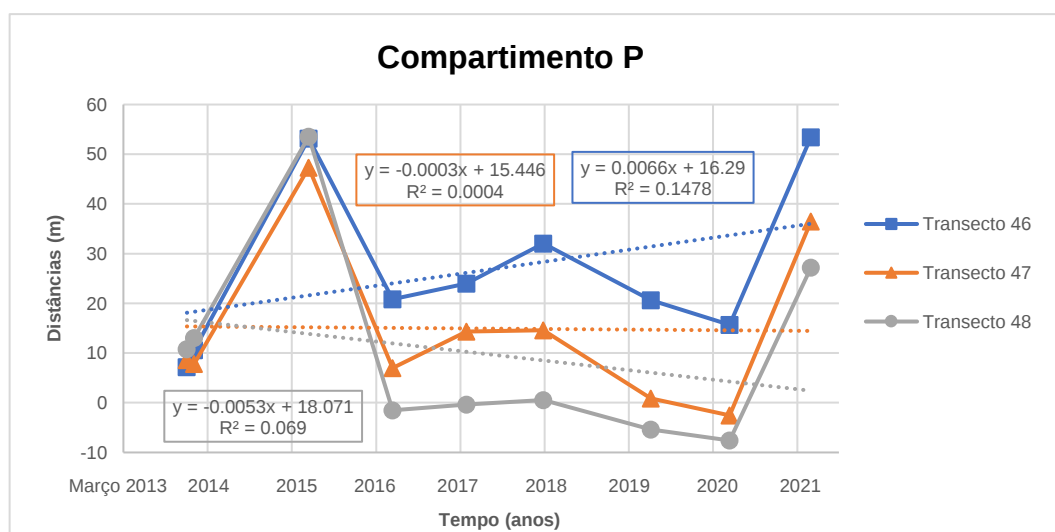


Figura 5.30 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento P, ao longo do período em estudo.

A variação da posição da linha de costa nos compartimentos Q (Figura 5.31 e Figura 5.32) e R (Figura 5.31 e Figura 5.33) é, semelhante à observada nos compartimentos anteriores, ou seja, apresenta pouca variação (ou estabilidade) entre os anos 2016 e 2020, e avanços significativos nos anos 2015 e 2021. Assim, a linha de costa apresenta os maiores avanços, de +53 m e +58 m em relação à linha de referência (março de 2013), em 2021 no transecto 49 do compartimento Q e no transecto 52 do compartimento R, respetivamente. Por outro lado, os maiores recuos, de -24 m e -31 m, dá-se em 2016 nos transectos 50 e 51 do compartimento Q e no transecto 54 do compartimento R, respetivamente, que se atribuem a ajustes da linha de costa após a intervenção de alimentação artificial de areia.

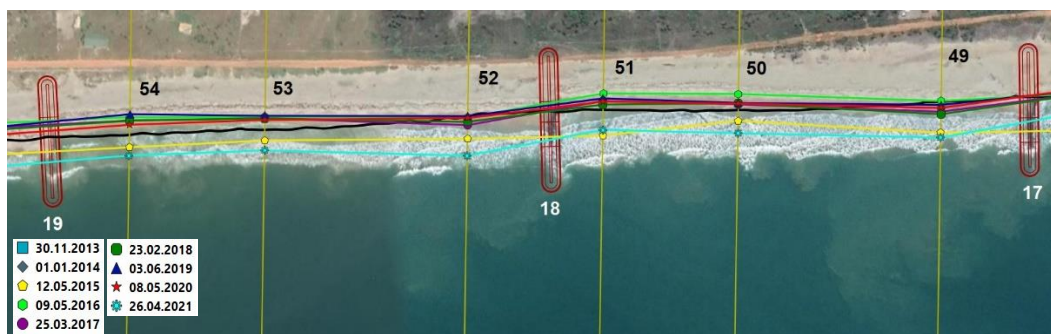


Figura 5.31 - Compartimentos Q e R do projeto delimitados pelos esporões 17, 18 e 19.

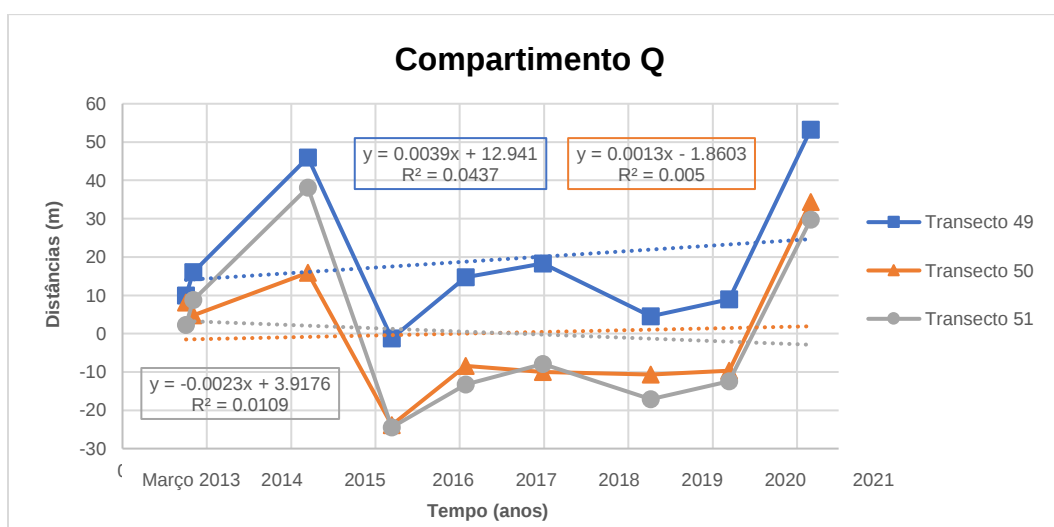


Figura 5.32 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento Q, ao longo do período em estudo.

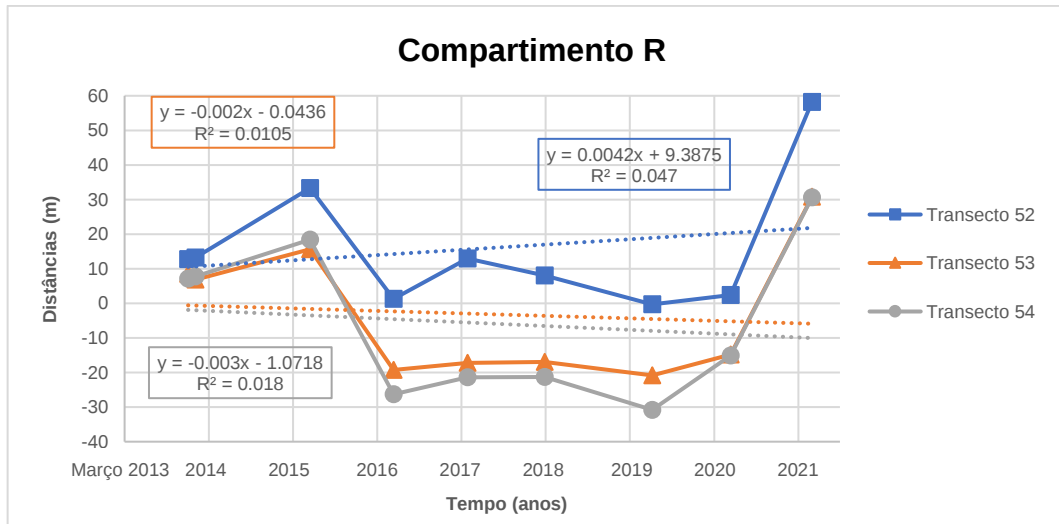


Figura 5.33 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento R, ao longo do período em estudo.

O compartimento S (Figura 5.34 e Figura 5.35) apresenta uma pequena variação da posição da linha de costa entre os anos 2016 e 2019 e, a partir desse ano, um avanço significativo. Uma vez mais, é nos anos 2021 e 2015, que se observam as maiores variações positivas da posição da linha de costa em relação à linha de referência (março de 2013). O maior avanço da linha de costa, de +48 m, verificou-se em 2021 no transecto 55, e o maior recuo, de -40 m, verificou-se em 2016 no transecto 57.

O compartimento T (Figura 5.34 e Figura 5.36) apresenta uma tendência positiva, observando-se, desde o ano 2016, um aumento gradual e consistente da largura da praia. O maior avanço da linha de costa, de +79 m, verificou-se em 2021 nos transectos 58 e 59, e o maior recuo, de -31 m, deu-se em 2016 no transecto 60.



Figura 5.34 - Compartimentos S e T do projeto delimitados pelos esporões 19, 20 e 21.

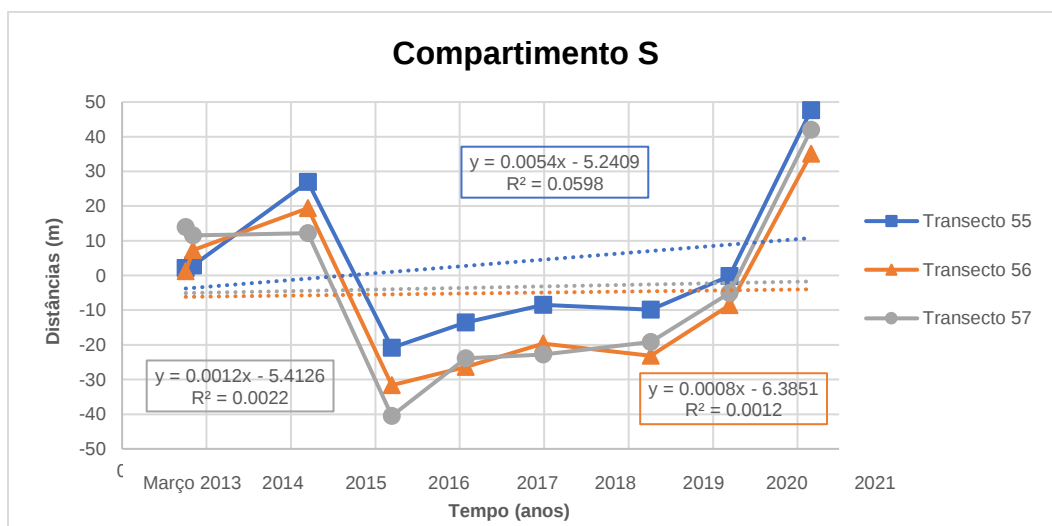


Figura 5.35 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento S, ao longo do período em estudo.

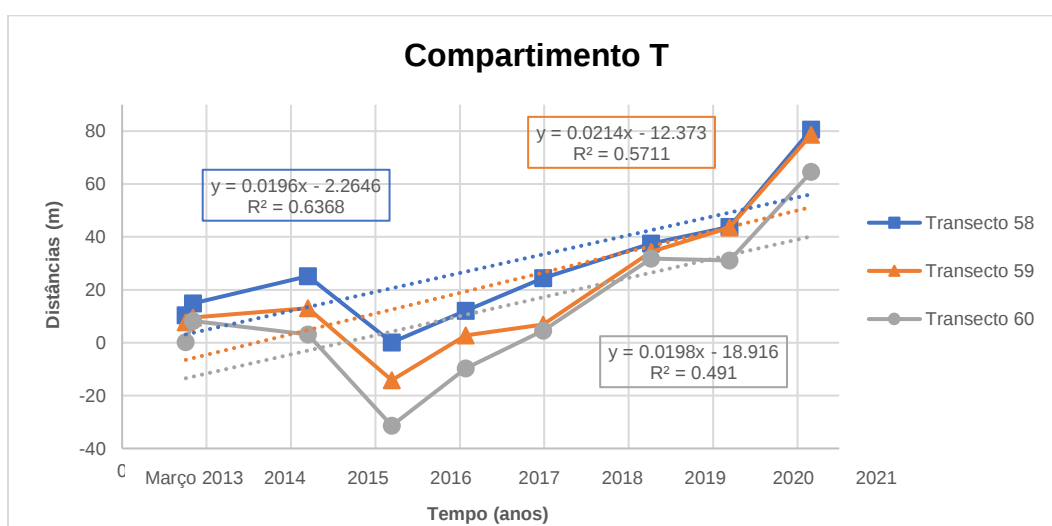


Figura 5.36 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento T, ao longo do período em estudo.

A tendência claramente positiva observada no compartimento T atribui-se à sua posição a barlamar do conjunto das obras de proteção costeira do projeto, e está também associada à evolução da posição da linha de costa no compartimento U (Figura 5.37 e Figura 5.38). À semelhança do observado no compartimento T, no compartimento U observa-se um aumento gradual da largura da praia a partir de 2016. De uma maneira geral, pode afirmar-se que em 2021 esses compartimentos se encontram muito próximos da sua capacidade máxima de retenção de sedimentos, e que, portanto, haverá uma maior transposição de sedimentos para sotamar das estruturas de proteção costeira. Assim, espera-se que essa capacidade máxima venha a ser atingida progressivamente nos compartimentos a sotamar do compartimento T.

Em termos de variações observadas no compartimento U, que integra também o transecto 64 situado a barlamar do esporão 22, o maior recuo, de -17 m em relação à linha de referência (março de 2013), foi observado em 2016 no transecto 64, e os maiores avanços, de +72 m, em 2021 nos transectos 61 e 63.

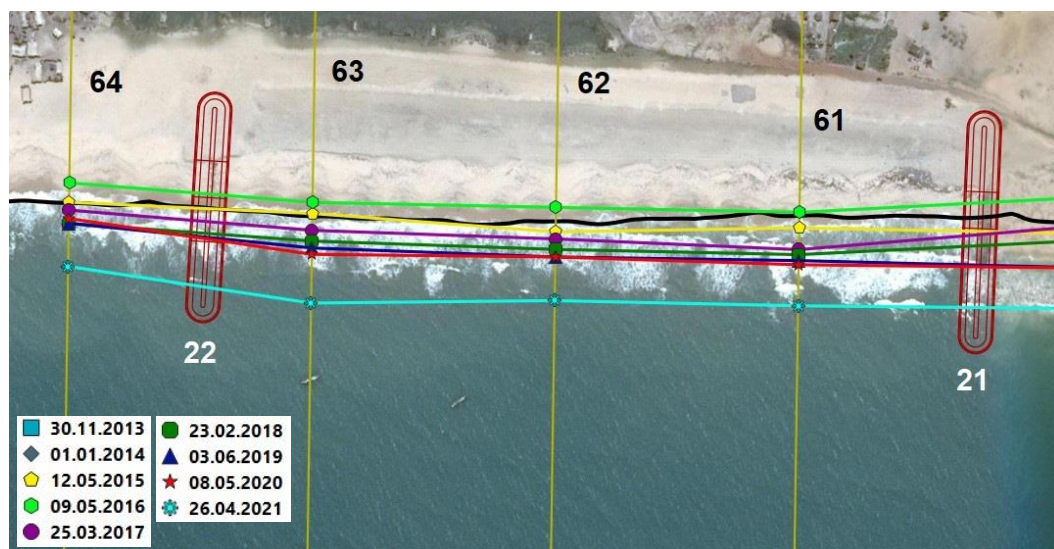


Figura 5.37 - Compartimento U do projeto delimitados pelos esporões 21 e 22.

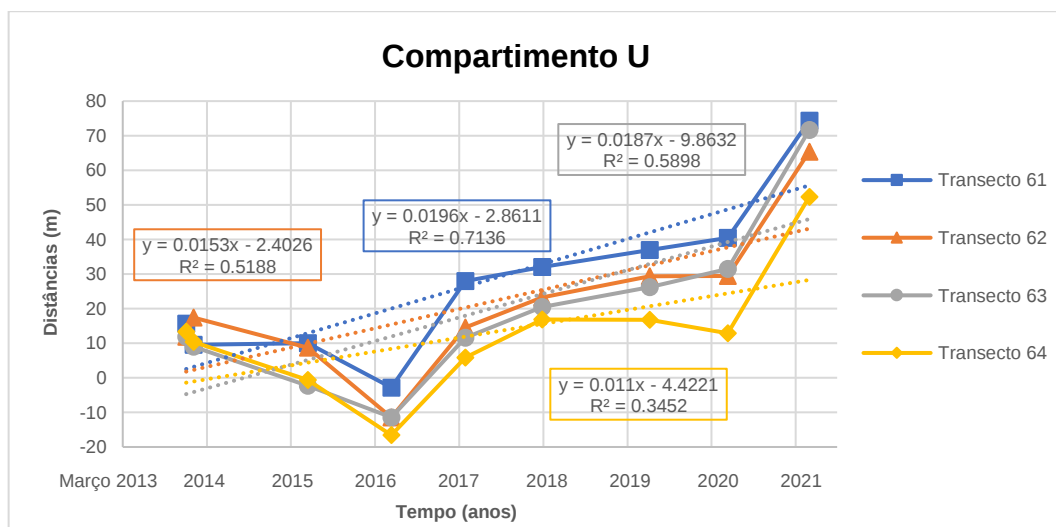


Figura 5.38 - Distância a que as linhas de costa estão da linha de referência (2013), em cada transecto do compartimento U, ao longo do período em estudo.

A Tabela 5.6 e a Tabela 5.7 apresentam uma síntese das tendências de evolução da linha de costa em cada um dos transectos em análise.

Os compartimentos A a E (fase 1 do projeto) e os compartimentos I, O e S a U (da fase 2) apresentaram um avanço da linha de costa em todos os transectos. Mais especificamente, todos os transectos dos compartimentos A, B, D, T e U apresentaram um avanço significativo da linha de costa.

O compartimento T foi o que apresentou o maior avanço, de cerca de +7.8 m/ano, no período em estudo. Em contrapartida, os compartimentos F e G apresentaram um recuo da linha de costa em todos os transectos, sendo que os maiores recuos no período em estudo, de -8.2, -9.3 e -10.6 m/ano, foram observados no compartimento G. Estes dois compartimentos apresentaram um recuo significativo da linha de costa. Ainda, no interior de cada compartimento, verificaram-se tendências de variação relativamente uniformes, exceto nos transectos situados imediatamente a sotamar das estruturas que apresentam uma certa estabilidade na posição da linha de costa, nomeadamente os compartimentos E, I e S. No entanto, o que é mais evidente nesta zona de estudo são as zonas de recuo da linha de costa que se verificam nas zonas imediatamente a sotamar das estruturas e as zonas de avanço nas zonas imediatamente a barlamar. Podemos observar esta situação nos compartimentos H, J a N e P a R. Os restantes compartimentos, C e O, apresentam uma evolução positiva na posição da linha de costa.

Tabela 5.6 - Síntese das tendências da evolução da linha de costa ao longo de todos os transectos.

COMPARTIMENTOS	TRANSECTOS	TENDÊNCIA (M/DIA)	TENDÊNCIA (M/ANO)	CLASSIFICAÇÃO
A	1	+ 0.0114	+ 4.2	Avanço significativo
	2	+ 0.0183	+ 6.7	Avanço significativo
	3	+ 0.0136	+ 5.0	Avanço significativo
B	4	+ 0.0098	+ 3.6	Avanço significativo
	5	+ 0.0148	+ 5.4	Avanço significativo
	6	+ 0.0161	+ 5.9	Avanço significativo
C	7	+ 0.0026	+ 0.9	Avanço ligeiro
	8	+ 0.0160	+ 5.8	Avanço significativo
	9	+ 0.0116	+ 4.2	Avanço significativo
D	10	+ 0.0091	+ 3.3	Avanço significativo
	11	+ 0.0110	+ 4.0	Avanço significativo
	12	+ 0.0082	+ 3.0	Avanço significativo
E	13	+ 0.0018	+ 0.7	Avanço ligeiro
	14	+ 0.0031	+ 1.1	Avanço moderado
	15	+ 0.0011	+ 0.4	Estável
F	16	- 0.0095	- 3.5	Recuo significativo
	17	- 0.0119	- 4.3	Recuo significativo
	18	- 0.0114	- 4.2	Recuo significativo
G	19	- 0.0225	- 8.2	Recuo significativo
	20	- 0.0254	- 9.3	Recuo significativo
	21	- 0.0290	- 10.6	Recuo significativo
H	22	+ 0.0064	+ 2.3	Avanço moderado
	23	+ 0.0050	+ 1.8	Avanço moderado
	24	- 0.0016	- 0.6	Recuo ligeiro
I	25	+ 0.0102	+ 3.7	Avanço significativo
	26	+ 0.0052	+ 1.9	Avanço moderado
	27	+ 0.0003	+ 0.1	Estável
J	28	+ 0.0074	+ 2.7	Avanço moderado
	29	+ 0.0021	+ 0.8	Avanço ligeiro
	30	- 0.0022	- 0.8	Recuo ligeiro

Tabela 5.7 - Continuação da síntese das tendências da evolução da linha de costa ao longo de todos os transectos.

COMPARTIMENTOS	TRANSECTOS	TENDÊNCIA (M/DIA)	TENDÊNCIA (M/ANO)	CLASSIFICAÇÃO
K	31	+ 0.0072	+ 2.6	Avanço moderado
	32	+ 0.0020	+ 0.7	Avanço ligeiro
	33	- 0.0027	- 1.0	Recuo ligeiro
L	34	+ 0.0075	+ 2.7	Avanço moderado
	35	+ 0.0017	+ 0.6	Avanço ligeiro
	36	- 0.0047	- 1.7	Recuo moderado
M	37	+ 0.0023	+ 0.8	Avanço ligeiro
	38	- 0.0043	- 1.6	Recuo moderado
	39	- 0.0071	- 2.6	Recuo moderado
N	40	+ 0.0017	+ 0.6	Avanço ligeiro
	41	+ 0.0004	+ 0.1	Estável
	42	- 0.0063	- 2.3	Recuo moderado
O	43	+ 0.0050	+ 1.8	Avanço moderado
	44	+ 0.0010	+ 0.4	Estável
	45	+ 0.0025	+ 0.9	Avanço ligeiro
P	46	+ 0.0066	+ 2.4	Avanço moderado
	47	- 0.0003	- 0.1	Estável
	48	- 0.0053	- 1.9	Recuo moderado
Q	49	+ 0.0039	+ 1.4	Avanço moderado
	50	+ 0.0013	+ 0.5	Estável
	51	- 0.0023	- 0.8	Recuo ligeiro
R	52	+ 0.0042	+ 1.5	Avanço moderado
	53	- 0.0020	- 0.7	Recuo ligeiro
	54	- 0.0030	- 1.1	Recuo moderado
S	55	+ 0.0054	+ 2.0	Avanço moderado
	56	+ 0.0008	+ 0.3	Estável
	57	+ 0.0012	+ 0.4	Estável
T	58	+ 0.0196	+ 7.2	Avanço significativo
	59	+ 0.0214	+ 7.8	Avanço significativo
	60	+ 0.0198	+ 7.2	Avanço significativo
U	61	+ 0.0196	+ 7.2	Avanço significativo
	62	+ 0.0153	+ 5.6	Avanço significativo
	63	+ 0.0187	+ 6.8	Avanço significativo
	64	+ 0.0110	+ 4.0	Avanço significativo



Importa referir que, entre os esporões da fase 1 (esporões 1 a 7) e da fase 2 (esporões 8 a 22), há uma importante diferença na sua conceção que tem impacto na evolução da posição da linha de costa, a barlar e a sotamar dos esporões, e ao longo do compartimento entre esporões consecutivos. Essa diferença é a permeabilidade dos esporões. Enquanto os esporões construídos na fase 1 não têm núcleo, isto é, são permeáveis, na fase 2 os esporões são parcialmente impermeáveis. Esta característica explica as pequenas diferenças na tendência de evolução da linha de costa ao longo dos compartimentos da fase 1, e uma tendência notória de maior avanço (tendência positiva) na zona a barlar das estruturas, e de maior recuo (tendência negativa) na zona a sotamar. Os compartimentos em que se observa um maior avanço da linha de costa a barlar das estruturas foram o J e o L (transecto 28 e 34), com cerca de +2.7 m/ano, enquanto o compartimento que apresentou um maior recuo a sotamar da estrutura foi o M (transecto 39), com cerca de -2.6 m/ano. Espera-se que as diferenças observadas na fase 2, entre as zonas a barlar e a sotamar das estruturas, venham a ser progressivamente atenuadas à medida que os compartimentos atinjam a sua capacidade máxima de retenção, como já se observa nos compartimentos situados mais a barlar da zona de estudo.

É ainda de salientar, que no período após a alimentação artificial de areia foi observado um ajuste da posição da linha de costa em todos os compartimentos, com exceção do compartimento C. Esse ajuste é considerado natural e expectável e é devido à técnica habitual de construção de uma praia artificial de areia, ou seja, a construção de uma largura superficial maior e de um talude de praia mais inclinado. No caso concreto deste projeto, em vez de cerca de 25 m de largura à cota +4 m e um talude de praia de 1V:25H, a praia alimentada foi construída com cerca do dobro dessa largura à cota +4 m e um talude de 1V:15H. Assim, o parâmetro controlado durante a construção foi o volume de sedimentos depositado em cada compartimento. Após a construção, o perfil construído foi-se ajustando ao perfil do projeto.

Por fim, é preciso salientar que o coeficiente de determinação (R^2) é baixo na maioria dos gráficos apresentados. No entanto, estes valores não são relevantes para este tipo de estudo.

5.2.1.2. Análise das Linhas de Costa a Barlar e a Sotamar do esporão

Nesta secção é analisada com mais pormenor a linha de costa nas zonas imediatamente a barlar e a sotamar dos esporões. É também feita uma análise do comprimento útil ativo dos esporões e os seus efeitos nas linhas de costa. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da estrutura na evolução da linha de costa ao longo dos 8 anos em estudo (2013 – 2021).

Os 6 esporões da fase 1 e os 15 esporões da fase 2 são apresentados em planta nas Figura 5.39 e Figura 5.40, e nas Figura 5.41 à Figura 5.45, respetivamente. Essas figuras apresentam também a linha de costa de referência (março de 2013) e a linha de costa detetada a partir das imagens de satélite nas datas selecionadas, ao longo do período em estudo.

Conforme referido anteriormente, e observável nas Figura 5.39 e Figura 5.40, não existem diferenças notáveis entre as zonas a barlar e a sotamar dos esporões da fase 1. Existem apenas pequenas diferenças e, de uma maneira geral, transientes.

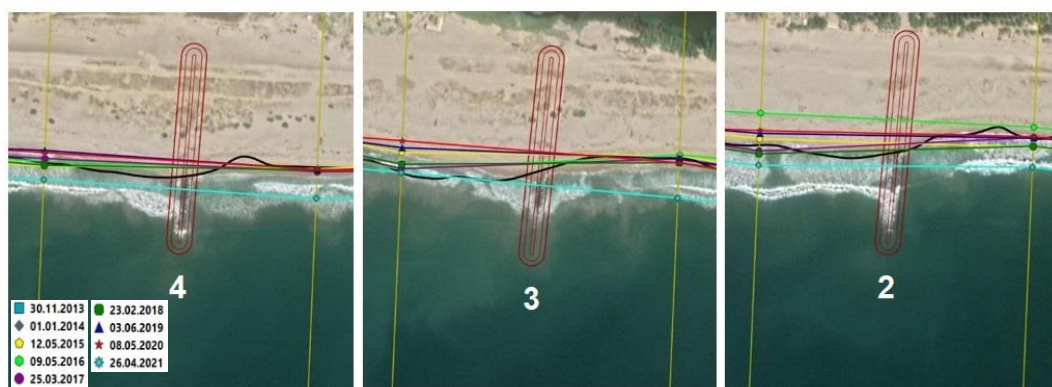


Figura 5.39 - Apresentação da planta dos esporões 2, 3 e 4 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

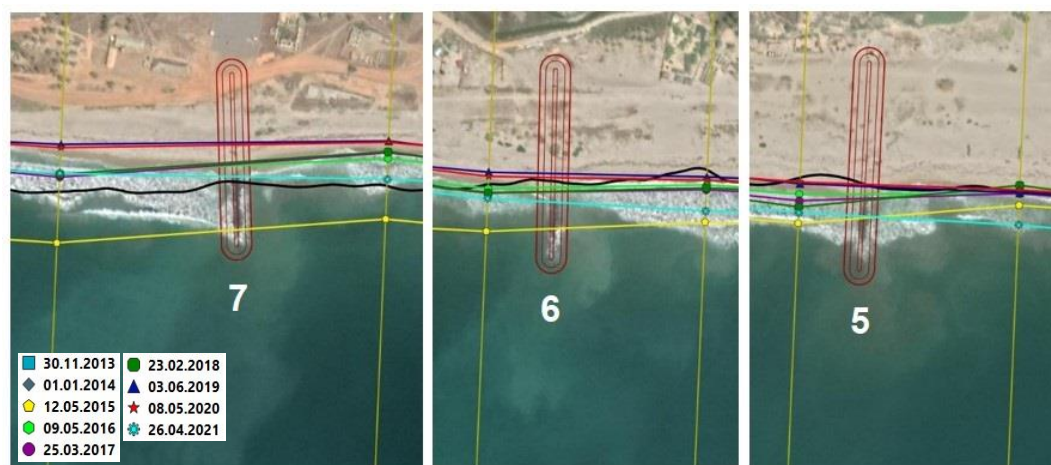


Figura 5.40 - Apresentação da planta dos esporões 5, 6 e 7 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

De acordo com a Figura 5.41, os três esporões representados (8, 9 e 10) criam uma diferença notável na linha de costa nas zonas a sotamar e a barlamar da estrutura, embora essa diferença seja mais importante em torno do esporão 8. De referir que este é o esporão mais a sotamar da fase 2 do projeto e, portanto, o menos alimentado. Além disso, existe uma grande distância entre este esporão e o último esporão da fase 1.

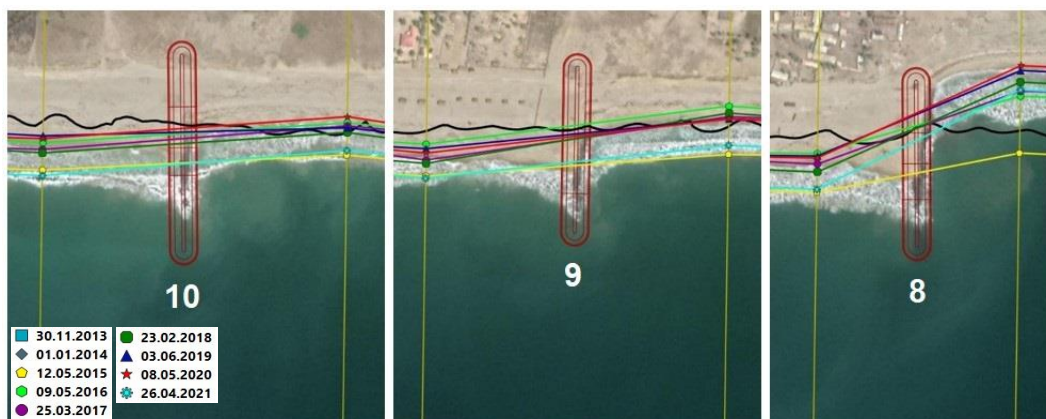


Figura 5.41 - Apresentação da planta dos esporões 8, 9 e 10 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

Os três esporões representados na Figura 5.42 (11, 12 e 13) geram diferenças notáveis na linha de costa nas zonas a sotamar e a barlamar das estruturas. Essas diferenças são mais importantes em torno do esporão 12. Mais a barlamar, na Figura 5.43, observa-se que em torno do esporão 14 existe ainda uma diferença notável entre as zonas a barlamar e a sotamar do esporão, mas em torno dos esporões 15 e 16, essa diferença é menos notável.

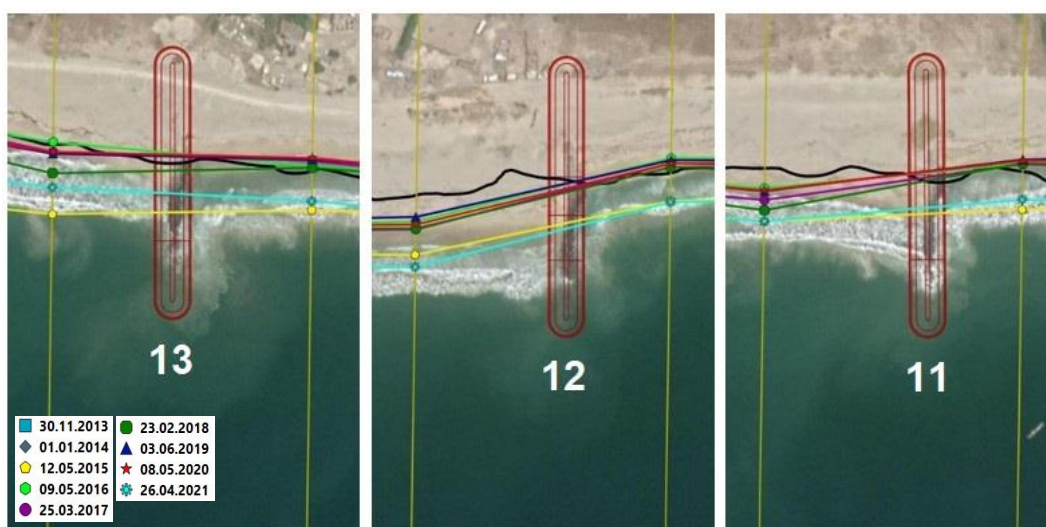


Figura 5.42 - Apresentação da planta dos esporões 11, 12 e 13 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

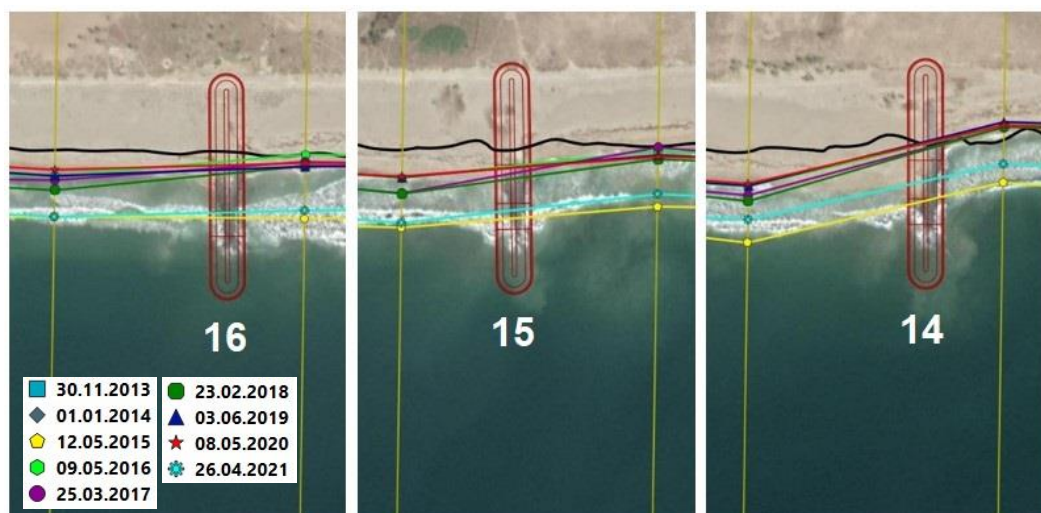


Figura 5.43 - Apresentação da planta dos esporões 14, 15 e 16 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

Prosseguindo ainda mais para barlamar, as três estruturas representadas na Figura 5.44 (17, 18 e 19) e as três estruturas representadas na Figura 5.45 (20, 21 e 22) apresentam apenas pequenas diferenças entre as zonas a sotamar e a barlamar dos esporões.

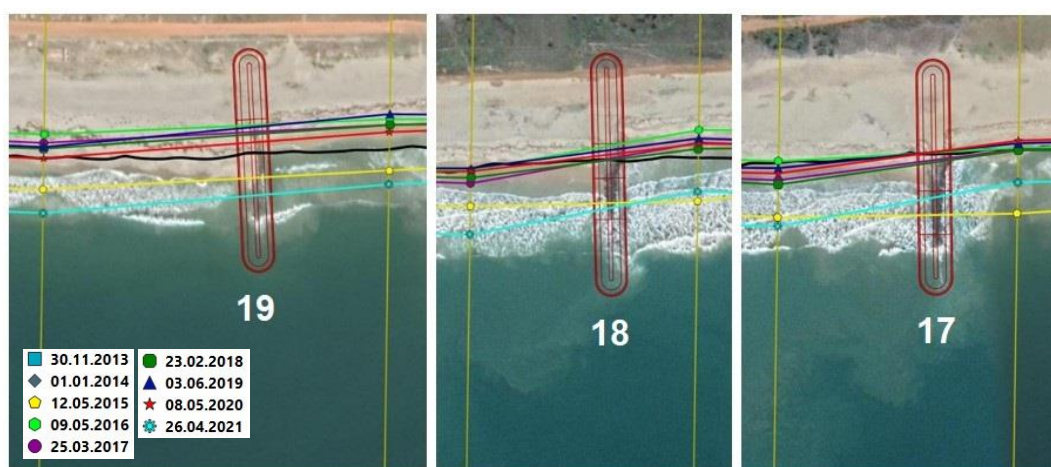


Figura 5.44 - Apresentação da planta dos esporões 17, 18 e 19 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

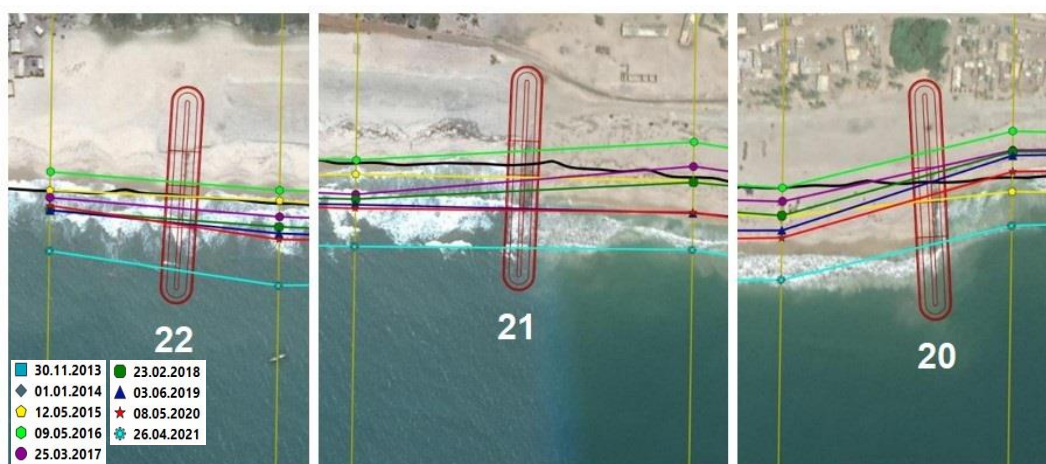


Figura 5.45 - Apresentação da planta dos esporões 20, 21 e 22 com as linhas de costa de referência (2013) e dos anos de estudo.

Na Tabela 5.8 são apresentados os comprimentos dos esporões, assim como os comprimentos úteis estimados para as 9 datas analisadas (2013 a 2021) e para a linha de referência (março de 2013).

Com os comprimentos totais dos esporões e com o comprimento útil estimado de cada esporão, foi possível determinar o rácio entre o comprimento útil e o comprimento total da estrutura para os 22 esporões presentes na área de estudo (Tabela 5.10).

De acordo com as Tabela 5.8 e Tabela 5.10, foi possível analisar o comprimento útil de cada esporão em comparação com o comprimento total das estruturas (rácio comprimento útil/comprimento total) para as 9 datas analisadas neste capítulo.

Em primeiro lugar, em termos de comprimento útil (Tabela 5.8 e Tabela 5.9) na maioria dos esporões (esporões 6 ao 20) verificou-se um aumento de comprimento útil até 2021, mas a partir deste ano este comprimento diminui de novo. Pelo contrário, os esporões 4, 5, 21 e 22 apresentam uma diminuição gradual, embora com algumas variações, do comprimento útil. Os restantes esporões (esporões 2 e 3) apresentam uma variação no comprimento útil ao longo do período em estudo até 2021, o ano que apresentou um valor relativamente melhor.

Tabela 5.8 - Comprimento total e comprimento útil dos esporões para as linhas de costa relativas às 9 datas analisadas e para a linha de referência (março de 2013).

ESPORÃO	COMPRIMENTO (M)	COMPRIMENTO ÚTIL (M)									
		L.R. (2013)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2	220	99	136	132	110	135	109	102	118	120	85
3	212	89	122	115	107	100	98	97	108	110	74
4	205	73	103	109	81	83	84	82	90	89	58
5	190	79	82	80	48	70	65	62	77	78	50
6	175	72	56	58	28	66	62	63	78	75	52
7	160	59	49	49	15	73	75	78	95	92	63
8	165	118	-	-	72	119	116	117	130	131	104
9	165	101	-	-	66	105	92	93	97	95	70

Tabela 5.9 - Comprimento total e comprimento útil dos esporões para as linhas de costa relativas às 9 datas analisadas e para a linha de referência (março de 2013).

ESPORÃO	COMPRIMENTO (M)	COMPRIMENTO ÚTIL (M)									
		L.R. (2013)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
10	195	124	-	-	87	116	110	106	117	120	86
11	195	107	-	-	82	113	110	108	114	115	87
12	195	110	-	-	75	106	101	99	107	102	72
13	185	106	-	-	68	114	112	100	112	113	82
14	155	98	-	-	55	100	97	94	101	100	71
15	155	98	-	-	45	85	80	76	85	84	51
16	155	104	-	-	51	95	91	86	90	94	55
17	170	103	-	-	53	105	98	96	104	104	67
18	186	106	-	-	68	116	106	105	113	109	63
19	170	90	-	-	69	114	109	106	113	100	54
20	185	106	-	-	90	133	118	112	106	95	52
21	175	99	-	-	88	110	84	75	59	59	24
22	165	82	-	-	81	92	69	60	57	56	17

Em termos do rácio comprimento útil/comprimento total (Tabela 5.10) é possível verificar um rácio superior ou igual a 0.5 na maioria dos esporões, no entanto em 2021 verifica-se uma diminuição dos rácios em quase todos os esporões, exceto nos esporões 8 e 14. Esta diminuição é positiva, porque quanto menor o comprimento útil e, consequentemente, menor o rácio, significa que está a haver um avanço da linha de costa em direção ao mar e, evidentemente, um aumento de sedimentos nos compartimentos.

Os esporões 5 e 6 foram as únicas estruturas que apresentaram um rácio abaixo dos 0.5, o que significa que, durante o período em estudo, estes esporões tiveram uma boa capacidade de retenção de sedimentos.

Finalmente, relativamente à linha de referência (março de 2013), verifica-se um comprimento útil elevado em grande parte dos esporões, à exceção dos esporões 3 a 7. Os esporões 2 a 5 já tinham sido construídos até ao mês de março, podendo esta diminuição do comprimento útil ser atribuída a este facto.

Na Tabela 5.11 e Tabela 5.12, são apresentadas as distâncias entre as linhas de costa, correspondentes aos anos 2015, 2016, 2020 e 2021, e a linha de referência (março de 2013), nas zonas imediatamente a barlamar e a sotamar dos esporões.

Ainda, para uma melhor compreensão dos dados apresentados na Tabela 5.11 e Tabela 5.12, foi feita uma classificação das distâncias entre estes dados e os limites estabelecidos para as distâncias (em m), apresentados na Tabela 5.5. Assim, na Tabela 5.13 e na Tabela 5.14 foram reunidas todas as classificações de acordo com a comparação realizada.

Tabela 5.10 - Comprimento total dos esporões e o rácio comprimento útil/comprimento total para todas as 9 datas analisadas.

ESPORÃO	COMPRIMENTO (m)	RÁCIO (COMPRIMENTO ÚTIL/COMPRIMENTO TOTAL)									
		L.R. (2013)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2	220	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
3	212	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
4	205	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
5	190	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3
6	175	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
7	160	0.4	0.3	0.3	0.1	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4
8	165	0.7	-	-	0.4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6
9	165	0.6	-	-	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4
10	195	0.6	-	-	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.4
11	195	0.5	-	-	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4
12	195	0.6	-	-	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
13	185	0.6	-	-	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.4
14	155	0.6	-	-	0.4	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5
15	155	0.6	-	-	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
16	155	0.7	-	-	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4
17	170	0.6	-	-	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4
18	186	0.6	-	-	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3
19	170	0.5	-	-	0.4	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.3
20	185	0.6	-	-	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.3
21	175	0.6	-	-	0.5	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.1
22	165	0.5	-	-	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1

Tabela 5.11 - Distâncias entre as linhas de costa (2015, 2016, 2020 e 2021) e a linha de referência (março de 2013), nas zonas a sotamar e a barlamar das estruturas.

ESPORÃO	DISTÂNCIAS (m)							
	BARLAMAR				SOTAMAR			
	2015	2016	2020	2021	2015	2016	2020	2021
2	-7	-35	-16	+22	+9	-12	-2	+31
3	-21	-3	-33	+1	-2	-3	+5	+43
4	+4	-1	-11	+19	+1	+3	+2	+34
5	+41	+15	+5	+31	+13	+3	-1	+31
6	+43	+4	-7	+13	+47	+13	+10	+37
7	+47	-16	-40	-16	+31	-24	-39	-6
8	+59	+20	+25	+56	+22	-34	-63	-40
9	+45	+13	+22	+47	+28	-19	-7	+19
10	+48	+22	+18	+54	+22	-9	-16	+18
11	+41	+15	+17	+41	+30	-6	-8	+22

Tabela 5.12 - Distâncias entre as linhas de costa (2015, 2016, 2020 e 2021) e a linha de referência (março de 2013), nas zonas a sotamar e a barlamar das estruturas.

ESPORÃO	DISTÂNCIAS (M)							
	BARLAMAR				SOTAMAR			
	2015	2016	2020	2021	2015	2016	2020	2021
12	+46	+21	+23	+56	+22	-12	-7	+23
13	+54	-2	+6	+33	+30	-4	-10	+23
14	+71	+27	+25	+53	+34	-11	-11	+19
15	+60	+22	+21	+57	+47	+3	+9	+37
16	+53	+20	+15	+53	+51	0	+8	+45
17	+46	-1	+9	+53	+53	-2	-7	+27
18	+33	+1	+2	+57	+38	-24	-12	+30
19	+26	-21	0	+47	+18	-26	-15	+30
20	+24	0	+43	+79	+12	-41	-5	+42
21	+10	-3	+40	+74	+3	-31	+31	+64
22	-1	-16	+13	+52	-2	-12	+31	+71

Tabela 5.13 - Classificação das distâncias (em m) para os anos 2015, 2016, 2020 e 2021.

ESPORÃO	CLASSIFICAÇÃO							
	BARLAMAR				SOTAMAR			
	2015	2016	2020	2021	2015	2016	2020	2021
2	Recuo ligeiro	Recuo significativo	Recuo moderado	Avanço moderado	Avanço ligeiro	Recuo moderado	(1)	Avanço significativo
3	Recuo moderado	(1)	Recuo significativo	(1)	(1)	(1)	(1)	Avanço significativo
4	(1)	(1)	Recuo moderado	Avanço moderado	(1)	(1)	(1)	Avanço significativo
5	Avanço significativo	Avanço moderado	(1)	Avanço significativo	Avanço moderado	(1)	(1)	Avanço significativo
6	Avanço significativo	(1)	Recuo ligeiro	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço ligeiro	Avanço significativo
7	Avanço significativo	Recuo moderado	Recuo significativo	Recuo moderado	Avanço significativo	Recuo moderado	Recuo significativo	Recuo ligeiro
8	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo significativo	Recuo significativo	Recuo significativo
9	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo moderado	Recuo ligeiro	Avanço moderado

(1) Negligenciável

Tabela 5.14 - Continuação da classificação das distâncias para os anos 2015, 2016, 2020 e 2021.

ESPORÃO	CLASSIFICAÇÃO							
	BARLAMAR				SOTAMAR			
	2015	2016	2020	2021	2015	2016	2020	2021
10	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo ligeiro	Recuo moderado	Avanço moderado
11	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço significativo	Recuo ligeiro	Recuo ligeiro	Avanço moderado
12	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo moderado	Recuo ligeiro	Avanço moderado
13	Avanço significativo	(1)	Avanço ligeiro	Avanço significativo	Avanço significativo	(1)	Recuo ligeiro	Avanço moderado
14	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço significativo	Recuo moderado	Recuo moderado	Avanço moderado
15	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço significativo	(1)	Avanço ligeiro	Avanço significativo
16	Avanço significativo	Avanço moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	Avanço significativo	(1)	Avanço ligeiro	Avanço significativo
17	Avanço significativo	(1)	Avanço ligeiro	Avanço significativo	Avanço significativo	(1)	Recuo ligeiro	Avanço moderado
18	Avanço significativo	(1)	(1)	Avanço significativo	Avanço significativo	Recuo moderado	Recuo moderado	Avanço significativo
19	Avanço moderado	Recuo moderado	(1)	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo moderado	Recuo moderado	Avanço significativo
20	Avanço moderado	(1)	Avanço significativo	Avanço significativo	Avanço moderado	Recuo significativo	(1)	Avanço significativo
21	Avanço ligeiro	(1)	Avanço significativo	Avanço significativo	(1)	Recuo significativo	Avanço significativo	Avanço significativo
22	(1)	Recuo moderado	Avanço moderado	Avanço significativo	(1)	Recuo moderado	Avanço significativo	Avanço significativo

(1) Negligenciável

De acordo com a classificação apresentada na Tabela 5.13 e na Tabela 5.14, foi possível verificar que, tanto nas zonas a barlar como nas zonas a sotamar, houve um avanço da linha de costa ao longo do período em estudo. Mais uma vez, é possível observar que os anos 2015 e 2021 mostraram uma tendência positiva, em relação aos outros dois anos (2016 e 2020), que apresentam uma evolução com variações significativas. No entanto, é possível reparar que as zonas imediatamente a sotamar das estruturas apresentaram uma tendência negativa na posição da linha de costa.

Conforme referido no Capítulo 3, outro fator crítico na conceção de campos de esporões é o rácio entre o comprimento da estrutura e o espaçamento entre esporões. Na Tabela 5.15 estão apresentados os espaçamentos entre esporões (em m) e o rácio comprimento da estrutura/espaçamento entre esporões.

Os resultados apresentados na Tabela 5.15 permitem concluir que a maior parte dos compartimentos apresenta um rácio de 1/3 e 1/4. Por outro lado, os maiores rácios (1/6 e 1/5) são observados nos compartimentos G e H, respetivamente. Relativamente às regras de dimensionamento de campos de esporões, estes últimos valores são muito baixos para permitir um bom desempenho das estruturas de defesa costeira.

Tabela 5.15 - Informação do espaçamento entre esporões (m) e do rácio entre o comprimento/espaçamento entre esporões.

COMPARTIMENTO	ESPAÇAMENTO ENTRE ESPORÕES (M)	RÁCIO (COMPRIMENTO DA ESTRUTURA/ESPAÇAMENTO ENTRE ESPORÕES)
A	657	$1/3$
B	672	$1/3$
C	668	$1/3$
D	673	$1/3$
E	671	$1/4$
F	673	$1/4$
G	1030	$1/6$
H	824	$1/5$
I	685	$1/3$
J	687	$1/3$
K	681	$1/3$
L	700	$1/4$
M	628	$1/4$
N	628	$1/4$
O	623	$1/4$
P	681	$1/4$
Q	683	$1/4$
R	715	$1/4$
S	830	$1/4$
T	656	$1/4$
U	608	$1/4$

5.2.2. ANÁLISE GLOBAL DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA

A análise global da linha de costa neste subcapítulo baseia-se em duas análises distintas: a análise das datas de *output* (30) compreendidas entre 2013 e 2021 (secção 5.2.2.1), e a análise de todas as datas de *output* (31) compreendidas entre 1984 e 2014 (secção 5.2.2.2).

5.2.2.1. Datas de *output* compreendidas entre 2013 e 2021

Para obter uma perspetiva global do comportamento da posição da linha de costa foram elaborados dois gráficos com todas as datas de *output* (30) ao longo do período 2014 – 2021, um que representa a evolução da linha de costa na época após a intervenção de alimentação artificial (Figura 5.46), e outro que representa a evolução global da posição da linha de costa (Figura 5.47).

Na Figura 5.46 está apresentada apenas a época depois às intervenções de alimentação artificial (verde). Assim, após estas intervenções (Figura 5.46), a partir de maio de 2015, verificou-se uma tendência positiva, em relação à linha de referência (março de 2013), na evolução da linha de costa, resultando num avanço da linha de costa de +0.9 m/ano (Tabela 5.16).

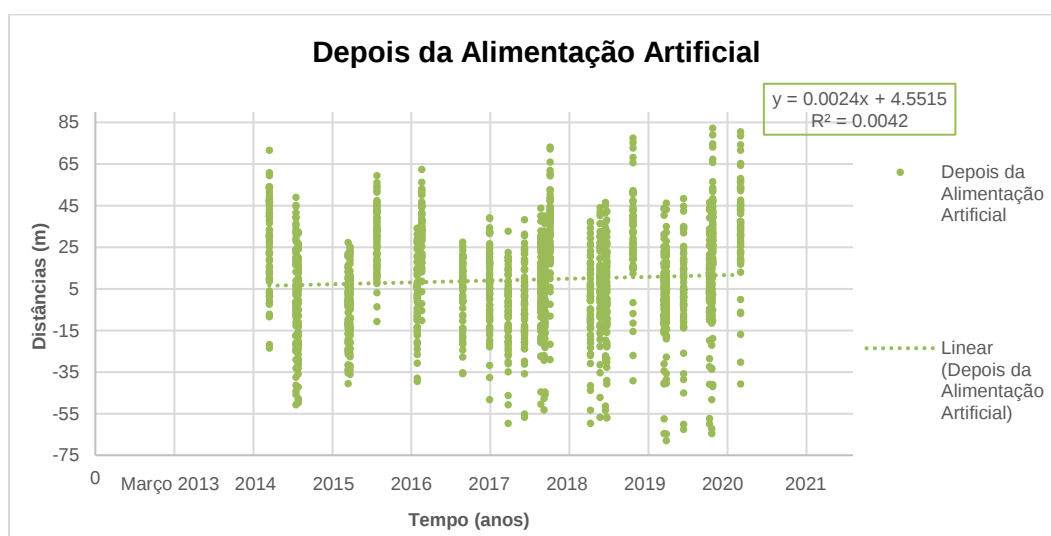


Figura 5.46 - Gráfico de todos os transectos das datas *output* na época depois da alimentação artificial, entre 2015 e 2021.

Tabela 5.16 - Tendência das linhas de costa depois da alimentação artificial, entre 2015 e 2021.

DEPOIS DA ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL
+0.0024 m/dia
+0.9 m/ano

Finalmente, na Figura 5.47 é apresentado um gráfico global de todos os transectos das datas *output* durante o período em estudo (8 anos). Foi possível fazer uma análise numa perspetiva mais geral da evolução da posição da linha de costa, onde se pode verificar que houve uma tendência positiva, resultando num avanço de +1.1 m/ano (Tabela 5.17), o que significa que, em média, a área de estudo apresenta um avanço de, aproximadamente, +9 m em relação à linha de referência (março de 2013).

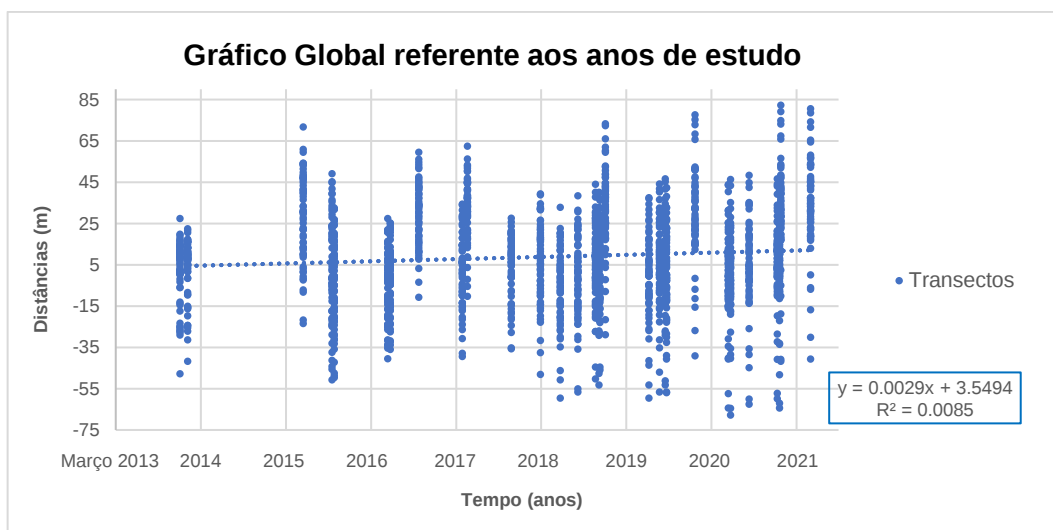


Figura 5.47 - Gráfico global que apresenta todos os transectos das datas de *output* durante o tempo de estudo (8 anos).

Tabela 5.17 - Tendência global das linhas de costa durante o tempo de estudo (8 anos).

TENDÊNCIA GLOBAL DAS LINHAS DE COSTA DURANTE 8 ANOS	
	+0.0029 m/dia
	+1.1 m/ano

5.2.2.2. Datas de *output* compreendidas entre 1984 e 2014

Para última análise, foram reunidos todos os dados de *output* obtidos em datas anteriores à intervenção de proteção costeira. Infelizmente, apenas foi possível detetar a linha de costa numa data anterior a 2013, o ano de 1984. Esta imagem foi adquirida pelo satélite *Landsat-5*. A limitação no número de imagens disponíveis antes de 2013, tem haver com a qualidade (por exemplo, a cobertura de nuvens e a luminosidade) das imagens de satélite adquiridas antes dessa data, sendo insuficiente para a deteção da linha de costa na área de estudo.

Na Figura 5.48 está apresentado um gráfico que inclui todos os transectos nas datas de *output*, desde 1984 até 2014. Ao fim de 30 anos (1984 – 2014), a linha de costa apresentou um recuo de, aproximadamente, -48 m em relação à linha de referência (março de 2013), correspondente a uma taxa de recuo moderada de -1.6 m/ano (Tabela 5.18).

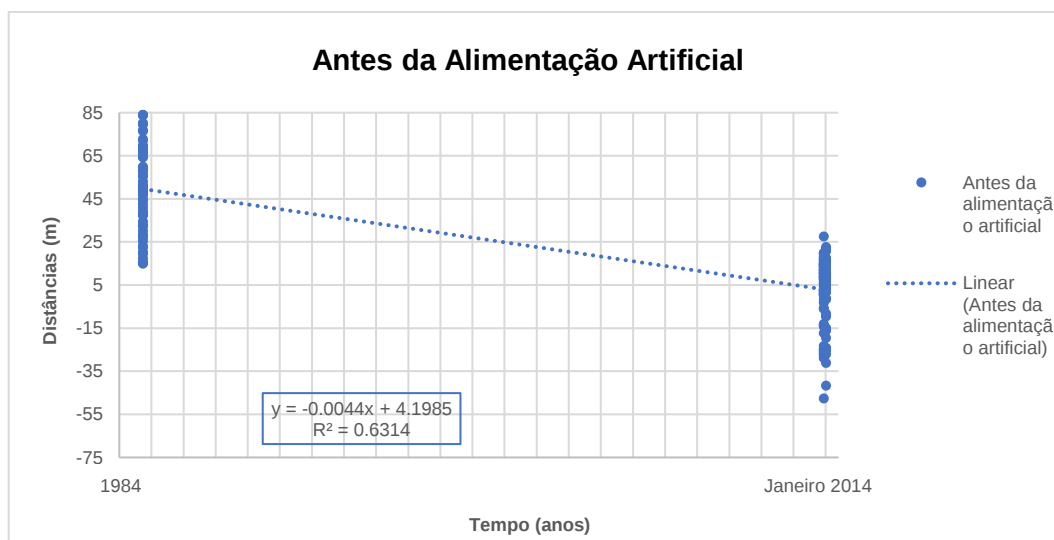


Figura 5.48 - Gráfico que apresenta todos os transectos de todas as datas de *output* desde 1984 até 2014.

Tabela 5.18 - Tendência global das linhas de costa, desde 1984 e 2021.

TENDÊNCIA GLOBAL DAS LINHAS DE COSTA
- 0.0044 m/dia
- 1.6 m/ano

5.3. DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos foi dividida em três fases de análise (subcapítulo 5.2): a primeira, que se baseou na análise da linha de costa, por compartimento, para 9 datas selecionadas durante 8 anos de estudo (2013 – 2021) (Tabela 5.6); a segunda, que se baseou na análise das zonas imediatamente a sotamar e a barlamar de todos os esporões para as 9 datas selecionadas (da Tabela 5.8 à Tabela 5.15); e a terceira, que se baseou numa análise mais global, em que foram usadas todas as datas de *output* (31) que permitiram estudar o período após a intervenção de alimentação artificial (2015 – 2021) (Figura 5.46 e Figura 5.47), e também estudar uma época em que a zona de estudo ainda não tinha sido sujeita a qualquer intervenção de alimentação artificial (1984 – 2014) (Figura 5.48).

A primeira análise, realizada de um modo individual para cada compartimento, relativamente à resposta da praia face às intervenções de defesa costeira, verificou-se uma evolução positiva em grande parte dos compartimentos, no entanto em alguns compartimentos verifica-se algumas zonas de recuo da linha de costa críticas. Embora tenha se verificado, de um ponto de vista geral, uma evolução positiva da linha de costa, houve dois compartimentos que apresentaram um cenário mais crítico, o compartimento G que, em relação à linha de costa de referência (março 2013), mostra um recuo acentuado da linha de costa, devendo-se ao elevado espaçamento entre esporões que existe neste compartimento, e o compartimento F que sofre recuo da linha de costa ao longo de todo o compartimento.

Grande parte dos compartimentos (H, I, K, L, N, Q, S e T) apresentam uma zona de avanço da linha de costa a barlamar e uma zona de recuo a sotamar da estrutura, expectável uma vez que os esporões nestes compartimentos são parcialmente impermeáveis e, portanto, limitam a transposição de sedimentos

através da estrutura (*through-passing*). Apesar destes compartimentos apresentarem estas zonas distintas ao longo do período em estudo até ao ano 2021, verifica-se uma estabilização da linha de costa que se atribui à transposição de sedimentos a partir da zona a barlar da estrutura e, portanto, é uma indicadora de que o transporte sedimentar natural foi retornado. Espera-se que, nestas condições, os esporões tenham atingido ou estejam a atingir a sua capacidade máxima de retenção de sedimentos. Nos compartimentos T e U apenas se verificou uma acumulação gradual de sedimentos em todo o comprimento destes compartimentos, ao longo do período em estudo.

Ao longo dos 8 anos em estudo e das 9 datas escolhidas, foi possível confirmar que, em 2015 e 2021, verificou-se as maiores taxas de avanço da linha de costa e, pelo contrário, em 2013, 2016 e 2020, as maiores taxas de recuo. O avanço que se verificou em 2015 é atribuído à segunda intervenção de alimentação artificial que decorreu entre janeiro e março de 2015, enquanto o recuo em 2016 atribui-se a um ajuste do perfil alimentado após a intervenção de alimentação artificial de areia.

A segunda análise (da Tabela 5.8 à Tabela 5.15), relativa à evolução da linha de costa nas zonas imediatamente a sotamar e a barlar dos esporões, entre os esporões da fase 1 e da fase 2 foi possível verificar algumas diferenças na posição da linha de costa. Isto é explicado pelo facto de os esporões da fase 1 serem estruturas sem núcleo e, portanto, são permeáveis. Esta característica faz com que não haja grandes diferenças na posição da linha de costa a sotamar e a barlar das estruturas. Por outro lado, os esporões da fase 2, embora muito semelhantes aos da fase 1, foram construídos com uma camada de filtro e, por isso são parcialmente impermeáveis. Por esta razão, foi possível observar diferenças entre as zonas a sotamar e a barlar das estruturas, no entanto, ao longo do período em estudo foi possível observar em alguns compartimentos que essa diferença tem vindo a ser atenuada, o que significa que os esporões já atingiram ou estão a atingir a sua capacidade máxima de retenção de sedimentos.

De acordo com o conjunto de regras do dimensionamento e conceção de um campo de esporões, apresentadas no Capítulo 3, ainda foram realizadas duas análises adicionais: uma relativa ao rácio comprimento útil/comprimento da estrutura, e outra relativa ao rácio comprimento da estrutura/espacamento entre esporões.

Conforme apresentado nas Tabela 5.8, foi possível analisar os comprimentos úteis dos esporões e os respetivos rácio comprimento útil/comprimento total, para as 9 datas analisadas ao longo da dissertação. Na primeira tabela, foi possível verificar que a maioria dos esporões (esporões 6 ao 20) apresentaram um aumento do comprimento útil, ao longo do período em estudo até ao ano 2021, quando começou a verificar-se uma diminuição do comprimento útil. Ao contrário destes, os esporões 4, 5, 21 e 22 mostraram uma diminuição gradual, apesar de algumas variações, do comprimento útil. Por último, os outros esporões (2 e 3) apresentaram uma variação no comprimento útil até 2021. No ano 2021, estes esporões apresentaram valores relativamente melhores. Na segunda tabela, foi possível observar rácios superiores ou iguais a 0.5 em quase todos os esporões, mas em 2021, é possível ver uma diminuição dos rácios na maioria dos esporões, exceto nos esporões 8 e 14. Por outro lado, os esporões 5 e 6 foram as únicas estruturas que apresentaram um rácio menor que 0.5, salientando a boa capacidade de retenção de sedimentos nestes compartimentos.

É de salientar que a diminuição do comprimento útil é expectável para esporões que estão a contribuir para o avanço da linha de costa em direção ao mar e, por isso, contribuem para um aumento de sedimentos nos compartimentos.

Relativamente à Tabela 5.15, é possível verificar que a maior parte dos compartimentos apresentam um rácio de $1/3$ e $1/4$, e que com a análise dos resultados obtidos feita neste subcapítulo (5.2), acredita-se ser suficiente para que haja retenção de areias. Por outro lado, os maiores rácios ($1/6$ e $1/5$) são observados nos compartimentos G e H, respetivamente.

De acordo as regras de dimensionamento de campos de esporões, esses rácios (1/6 e 1/5) são excessivos e insuficientes para o bom desempenho destas estruturas de defesa costeira. Embora o efeito deste rácio pareça mais importante no compartimento G do que no compartimento H, é importante salientar que, é muito provável que esse efeito seja atenuado pela alimentação artificial de areia proveniente do compartimento H. No caso do compartimento G, a razão para a grande distância entre esporões consecutivos, é atribuída aos condicionantes existentes na linha de costa, alheias ao projeto, que obrigaram à colocação do esporão 8 na posição em que se encontra. Espera-se que o efeito negativo observado, venha a ser atenuado progressivamente à medida que os compartimentos a barlar vão atingindo a sua capacidade máxima de retenção de sedimentos.

A terceira análise, relativa às secções 5.2.2.1 e 5.2.2.2, verificou-se após a intervenção, verificou-se um pequeno avanço da linha de costa. Este valor pode ser explicado pelas condições climáticas a que esta zona de estudo está sujeita, mas também pela baixa eficácia de alguns esporões. Embora tenha havido algumas zonas de recuo ao longo da costa, a tendência global mostra que, mesmo assim, houve uma evolução positiva na linha de costa (Figura 5.47).

Relativamente à Figura 5.48, foi possível concluir que antes da alimentação artificial, a linha de costa mostrou uma evolução negativa. De um ponto de vista global, foi possível verificar uma perda contínua de sedimentos na linha de costa entre 1984 e 2014. Esta evolução negativa é atribuída sobretudo ao decréscimo do volume de sedimentos transportados pela corrente de deriva litoral, nomeadamente, pela interrupção dessa corrente em diversas estruturas portuárias e de proteção costeira, bem como pela extração ilegal de sedimentos.

A utilização de imagens de satélite na deteção da linha de costa e na monitorização de intervenções de defesa costeira, particularmente em áreas em que outro tipo de monitorização não é frequente, como é o caso do Gana, é uma alternativa de monitorização com uma relação de custo-benefício elevada. O método utilizado permitiu perceber as grandes tendências de evolução ao longo dos últimos 8 anos e tirar conclusões importantes sobre esta intervenção de proteção costeira que, de outra forma, não seria possível. Embora existam limitações técnicas importantes que importa perceber.

Conforme apresentado na Tabela 5.3, os satélites usados têm a mesma resolução espacial de pixéis diferentes, o que influencia a precisão da deteção e a incerteza dos resultados obtidos. No caso do L5 e do L8, a resolução espacial é de 30 m, enquanto no caso do S2, é de 10 m. A influência da resolução espacial na qualidade dos resultados obtidos é inerente ao método, não havendo qualquer possibilidade de melhorar essa resolução.

Os resultados obtidos (Figura 5.46 à Figura 5.48) são também influenciados pelas condições climáticas e de iluminação no momento da passagem do satélite. Neste caso, é possível influenciar a qualidade dos resultados, descartando as imagens com baixa qualidade (por exemplo, imagens com muitas nuvens ou pouca iluminação).

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Atualmente, cerca de 70% das praias no mundo são sujeitas ao fenómeno de erosão costeira causada por fatores naturais e antropogénicos, como a ocorrência de tempestades e a construção de infraestruturas nas zonas costeiras, respetivamente. Na tentativa de reduzir, ou abrandar, este fenómeno recorre-se habitualmente à construção de obras de defesa costeira.

Nesta dissertação foi avaliado o desempenho de uma intervenção de proteção costeira construída na costa da cidade de Ada no Gana, com base na análise de imagens de satélite. Essa intervenção envolveu a construção de um sistema de proteção costeira híbrido que, normalmente, combina estruturas pesadas com uma intervenção *soft* (neste caso, a combinação de um campo de esporões com intervenções de alimentação artificial). O uso deste tipo de sistemas de proteção é cada vez mais comum na mitigação de efeitos negativos observados nas zonas costeiras.

A avaliação do desempenho das estruturas de defesa costeira compreendeu a análise do comportamento natural do sistema costeiro, antes da intervenção de alimentação artificial (1984 – 2014), e a análise do desempenho e da eficácia do sistema de proteção construído na linha de costa depois da intervenção (2015 – 2021).

Para proceder a esta avaliação, a análise dos resultados obtidos foi dividida em três fases: a primeira, que se baseou na análise da linha de costa, por compartimento, para 9 datas selecionadas durante 8 anos (2013 – 2021) (Tabela 5.6); a segunda, que se baseou na análise das zonas imediatamente a sotamar e a barlamar de todos os esporões para as 9 datas selecionadas (da Tabela 5.8 à Tabela 5.15); e a terceira, que se baseou numa análise mais global, em que foram usadas todas as datas de *output* existentes (31) e que permitiu estudar o período após a intervenção de alimentação artificial (2015 – 2021) (Figura 5.46 e Figura 5.47), e também estudar uma época em que a zona de estudo ainda não tinha sido sujeita a qualquer intervenção de alimentação artificial (1984 – 2014) (Figura 5.48).

Esta análise ajudou a perceber se, tanto os esporões como a alimentação artificial, têm tido um bom desempenho funcional e qual tem sido o impacto, positivo ou negativo, desta intervenção na evolução deste trecho costeiro, mas também se a tendência persistente de erosão observada antes da intervenção se mantém ou foi invertida.

De acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir que, em grande parte dos compartimentos, se verificou uma tendência positiva na evolução da linha de costa. No entanto, verifica-se uma tendência geralmente negativa num dos compartimentos, nomeadamente no compartimento G. Efetivamente, este

compartimento perdeu sedimentos ao longo do período em estudo. Esta tendência é justificada pela sua posição a sotamar do conjunto de esporões construídos na fase 2 e, também, pelo rácio comprimento dos esporões/espacamento entre esporões, considerado excessivo (1/6). Importa referir que, embora esta relação seja uma das regras mais importantes para o dimensionamento e para a conceção de campos de esporões e, por isso, deva ser sempre tida em consideração, existem, muitas vezes, condicionantes na zona interior adjacente à costa (por exemplo, vias de comunicação e zonas urbanizadas) que podem determinar o não cumprimento dessa recomendação. Contudo, espera-se que a tendência observada no compartimento G possa vir a ser progressivamente atenuada à medida que os compartimentos atinjam a sua capacidade máxima de retenção, como já se observa nos compartimentos situados mais a barlamar da zona de estudo.

Do presente estudo foi possível concluir que, para as épocas do ano e datas escolhidas, os anos 2015 e 2021 apresentaram um maior avanço da linha de costa ao longo do período em estudo, enquanto os anos 2013, 2016 e 2020 apresentaram um maior recuo da linha de costa. Tendo em conta que a primeira intervenção de alimentação artificial com areia ocorreu entre março e maio de 2014, e a segunda entre janeiro e março de 2015, e que a primeira fase de construção dos esporões ocorreu entre junho de 2012 e junho de 2013, e a segunda entre junho de 2014 e julho de 2015, a causa do maior recuo observado em 2016 é atribuída a um ajuste de perfil alimentado após a intervenção de alimentação artificial de areia. Este recuo é observado frequentemente após operações de alimentação e resulta do método construtivo, onde a praia imersa é construída com uma largura maior e um talude mais íngreme do que no projeto. Assim, imediatamente após a intervenção, a largura da praia começa a diminuir e o talude torna-se mais suave e extenso. Essa evolução tende para o talude de projeto, que tipicamente é próximo do perfil de equilíbrio.

De acordo com os resultados obtidos na segunda fase de análise foi possível verificar, entre os esporões da fase 1 e da fase 2, algumas diferenças na posição da linha de costa, imediatamente a sotamar e a barlamar dos esporões. O facto de os esporões da fase 1 terem sido construídos com características permeáveis justifica as ligeiras diferenças observadas entre as zonas a sotamar e a barlamar dos esporões e, pelo contrário, o facto de os esporões da fase 2 terem sido construídos com características impermeáveis justifica as maiores diferenças que se verificam entre as zonas a barlamar e a sotamar desses esporões. Espera-se que essas diferenças venham a ser atenuadas progressivamente à medida que os esporões atinjam a sua capacidade de retenção e o transporte de sedimentos seja retomado.

Tendo por base o conjunto de regras para o dimensionamento e para a conceção de um campo de esporões, apresentado no Capítulo 3, foram ainda analisados os seguintes rácios: comprimento útil/comprimento da estrutura e comprimento da estrutura/espacamento entre esporões.

De acordo com a Tabela 5.8 e Tabela 5.10 que apresentam os comprimentos totais e os comprimentos úteis dos esporões, e os rácios comprimento útil/comprimento total, respetivamente, foram analisados todos os 22 esporões presentes na costa de Ada.

Em relação aos comprimentos úteis verificou-se que a maioria dos esporões (esporões 6 ao 20) apresentaram um aumento do comprimento útil até ao ano 2021, que foi quando se começou a verificar uma diminuição do comprimento útil. No entanto, os esporões 4, 5, 21 e 22 mostraram uma diminuição gradual, apesar de algumas variações, do comprimento útil. Por último, os esporões 2 e 3 apresentaram uma variação no comprimento útil até 2021. Nesse ano, estes esporões apresentaram valores relativamente melhores.

Em relação aos rácios comprimentos úteis/comprimentos totais verificou-se que quase todos os esporões apresentaram rácios superiores ou iguais a 0.5, mas em 2021, houve uma diminuição dos rácios na maioria dos esporões, exceto nos esporões 8 e 14. Ainda, os esporões 5 e 6 foram as estruturas que

apresentaram um rácio menor que 0.5. A diminuição do comprimento útil é expectável para esporões que estão a contribuir para o avanço da linha de costa em direção ao mar e, por isso, contribuem para um aumento de sedimentos nos compartimentos.

De acordo com os resultados obtidos na terceira fase de análise, relativa à alimentação artificial, entre os anos 2013 e 2021, foi possível concluir que na época estudada (depois da alimentação artificial) se verificou uma evolução positiva da linha de costa ao longo do período em estudo. Importa ainda referir que na análise global também se verificou uma evolução positiva na linha de costa ao longo do período em estudo.

A tendência negativa de longo termo, definida com base no período entre 1984 e 2014, é atribuída sobretudo ao decréscimo do volume de sedimentos transportados pela corrente de deriva litoral, nomeadamente pela interrupção dessa corrente em diversas estruturas portuárias e de proteção costeira, bem como pela extração ilegal de sedimentos.

O método de análise utilizado permitiu compreender o comportamento da linha de costa em todos os compartimentos, antes e depois das intervenções de defesa costeira, em relação a uma linha de costa de referência (março de 2013), e se a linha de costa apresentava uma tendência positiva ou negativa na acumulação de sedimentos. Deste modo, apesar da tendência negativa na evolução da linha de costa que se verificou em dois dos 21 compartimentos analisados, das limitações e incertezas no método de análise, a linha de costa apresentou uma tendência globalmente positiva ao longo do período em estudo.

Finalmente, esta dissertação contribuiu para demonstrar que é possível monitorizar a evolução da linha de costa e avaliar o desempenho de uma intervenção de proteção costeira remotamente, através de imagens de satélite. Apesar das limitações inerentes ao método, essa monitorização apresenta uma relação de custo-benefício elevado, particularmente em zonas onde a recolha de dados é escassa e pouco frequente.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante a realização desta dissertação, foram encontradas limitações no método de análise, relativas à falta de informação do local de estudo e às ferramentas utilizadas, nomeadamente as missões de satélites usadas no *Coastsat* (L5, L8 e S2). Com o objetivo de melhorar a qualidade da análise e dos resultados obtidos devem ser consideradas as seguintes recomendações, que podem servir para desenvolvimentos futuros.

Em primeiro lugar, apesar de os satélites usados nesta dissertação (L5, L8 e S2) apresentarem imagens com boas resoluções espaciais, estas poderão não ser suficientes quando se pretende uma análise mais pormenorizada da área de estudo, nomeadamente na envolvente próxima das estruturas. De referir ainda que essas resoluções são substancialmente inferiores às que se conseguem obter com outros métodos de monitorização mais precisos, por exemplo a partir da técnica de LiDAR. Por esta razão, a utilização de satélites comerciais, como por exemplo os satélites do *Planet Scope Satellites*, é uma boa oportunidade para diminuir a incerteza dos resultados porque esses satélites têm uma maior resolução espacial do pixel (podendo chegar a 0.50 m). Além disso, apresentam resoluções temporais melhoradas (podendo chegar a uma imagem por dia ou até menos), ou seja, mais imagens estarão disponíveis para a análise. Consequentemente, é de esperar uma significativa melhoria da qualidade dos resultados.

Outro aspeto importante com impacto na qualidade dos resultados é a correção da maré no momento da captura das imagens de satélite. Essa correção pode ser melhorada com base em séries temporais registadas das condições hidrodinâmicas locais, assim como através de uma estimativa mais precisa do

perfil e do talude da praia ao longo da área em estudo. E ainda ter conhecimento dos regimes de agitação marítima locais referentes à época de estudo.

Finalmente, recomenda-se que a intervenção de defesa costeira em Ada continue a ser monitorizada continuamente no futuro. Os resultados do trabalho e as tendências de evolução observadas permitirão analisar qualitativamente e quantitativamente o grau de sucesso da intervenção, assim como determinar quando, ou se for, necessário realizar uma nova intervenção de reforço ou de melhoria. Pelas vantagens que apresenta, este tipo de monitorização deveria ser alargada a outras obras e intervenções costeiras de grande importância ou dimensão.

7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, H. (2019) *Erosão e Galgamentos na Costa Portuguesa*. Instituto Superior de Educação e Ciências - ISEC Lisboa.
- Andersen, T. e Frigaard, P. (2011) *Lecture Notes for the Course in Water Wave Mechanics*. Universidade de Aalborg.
- Anim, D. O., Nkrumah, P. N. e David, N. M. (2013) «A rapid overview of coastal erosion in Ghana», *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(2), pp. 1–7.
- Appeaning Addo, K., Walkden, M. e Mills, J. P. (2008) «Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana», *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63, pp. 543–558.
- Armah, A. K. (1991) «Coastal erosion in Ghana: causes, patterns, research needs and possible solutions», em ASCE (ed.) *Coastal Zone'91*. Legon, Gana, pp. 2463–2473.
- Averini Rodeia, L. (2014) *Impacto dos Esporões no Transporte Sedimentar - Formulações e Modelos*. Universidade de Aveiro.
- Baelus, L. et al. (2019) «Design of a Groyne Field to Counteract Beach Erosion at Wenduine, Belgium», em *Coastal Structures 2019*. Alemanha, pp. 347–355.
- Bergh, C. (2014) «Nature-Based Coastal Defenses in Southeast Florida», *The Nature Conservancy*.
- Bezerra, P. (2008) *Estudo de Soluções Mitigadoras de Erosões Localizadas em Estruturas de Defesa Costeira*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bezerra, U. A. et al. (2018) «Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI - Sentinel-2 em Região Semiárida», *UFRJ - Anuário do Instituto de Geociências*, 41, pp. 167–177.
- Bitan, M. e Zviely, D. (2020) «Sand Beach Nourishment: Experience from the Mediterranean Coast of Israel», *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Boateng, I. (2012) «An application of GIS and coastal geomorphology for large scale assessment of coastal erosion and management: a case study of Ghana», *Journal of Coastal Conservation*, 16, pp. 383–397.
- Bolle, A. et al. (2021) «A methodological framework of quantifying the cost of environmental degradation driven by coastal flooding and erosion: A case study in West Africa», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, p. 102022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.102022>.
- Bolle, A., Neves, L. das e Rooseleer, J. (2015) «Coastal protection for Ada, Ghana: a case study»,

Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering, 168(3), pp. 125–133. doi: 10.1680/jmaen.15.00013.

Bouma, J. J. *et al.* (2009) «Assessing socio-economic impacts of wave overtopping: An institutional perspective», *Coastal Engineering*, 56, pp. 203–209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.03.008>.

Broeck, N. Van Den (2017) *Coastal protection with respect to climate change. Practical application on the Belgian Coast*. Universidade Politécnica de Valência.

CEM (2002) «Shore Protection Projects», em *CEM - Coastal Engineering Manual*.

CIRIA (2007) «Chapter 5», em *Physical processes and design tools*. CIRIA - Construction Industry Research and Information Association.

Codjoe, S. N. A. *et al.* (2020) «Impact of extreme weather conditions on healthcare provision in urban Ghana», *Social Science & Medicine*, 258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113072>.

Costa, M., Silva, R. e Vitorino, J. (2001) «Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa (in Portuguese)», em.

Deltares (2014a) «Delft3D-Wave, Simulation of short-crested waves with SWAN». Países Baixos.

Deltares (2014b) «Delft3D - Functional Specifications». Países Baixos.

Deltares (2021) «Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments». Países Baixos.

DHI (2009) *LITPACK: An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics*.

Djido, A. *et al.* (2021) «To what extent do weather and climate information services drive the adoption of climate-smart agriculture practices in Ghana?», *Climate Risk Management*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100309>.

Doody, J. P. (2004) «“Coastal Squeeze”: An Historical Perspective», *Journal of Coastal Conservation*, 10, pp. 129–138. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25098445>.

Dzebre, D. E. K. e Adaramola, M. S. (2020) «A preliminary sensitivity study of Planetary Boundary Layer parameterisation schemes in the weather research and forecasting model to surface winds in coastal Ghana», *Renewable Energy*, 146, pp. 66–86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.133>.

Eede, S. Vanden (2013) *Impact of beach nourishment on coastal ecosystems with recommendations for coastal policy in Belgium*. Universidade de Ghent (UGent).

Fanini, L. *et al.* (2009) «Effects of beach nourishment and groynes building on population and community descriptors of mobile arthropodofauna», *Ecological Indicators*, 9, pp. 167–178. doi: 10.1016/j.ecolind.2008.03.004.

FDEP (2018) «Strategic beach management plan: Southeast Atlantic Coast Region», *Florida Department of Environmental Protection*, p. 64.

Ferreira, I. G. (2014) *A Problemática da Erosão Costeira: O Caso Específico da Praia do Pedrogão*. Universidade Nova de Lisboa.

Freitas, J. e Dias, J. (2011) «Figueira da Foz (Portugal): o compromisso (possível) entre o Homem e o Meio», *Formação e Ocupação de Litorais nas Margens do Atlântico - Brasil / Portugal*.

Freitas, J. e Dias, J. (2012) «Praia da Rocha (Algarve, Portugal): um paradigma da antropização do litoral», *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 12, pp. 32–41. doi: 10.5894/rgci317.

Garzon, J. *et al.* (2020) *Beach State Report: Quarteira, Praia de Faro and Costa da Caparica*.

Giordano, L., Marsella, E. e Vicinanza, D. (2006) «Beach nourishment design: An integrated approach», *Proceedings of the 16th International Conference ISOPE, San Francisco, California*.

- González, M. *et al.* (2007) «An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC», *Computers & Geosciences*, 33, pp. 916–931. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.005>.
- Haigh, I. D. (2017) «Tides and Water Levels», em *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–13. doi: 10.1002/9781118476406.emoe122.
- Hussain, S. *et al.* (2018) «Numerical Modeling for Engineering Analysis and Designing of Optimum Support Systems for Headrace Tunnel», *Advances in Civil Engineering*. Editado por G. C. Marano, p. 7159873. doi: 10.1155/2018/7159873.
- IMDC e PMI (sem data) *Ada Coastal Protection - Phase 1 and 2*.
- Jonah, F. E. (2015) «Managing coastal erosion hotspots along the Elmina, Cape Coast and Moree area of Ghana», *Ocean & Coastal Management*, 109, pp. 9–16.
- Kalpias, A. (2014) *Analysis of the influence of the cross-shore profile shape of the surfzone on the longshore sediment transport rates*. Faculdade de Engenharia Civil e Geociências, Universidade Técnica de Delft.
- Klein, Y. L. e Osleeb, J. (2010) «Determinants of Coastal Tourism: A Case Study of Florida Beach Counties», *Journal of Coastal Research*, 26, pp. 1149–1156. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-09-00152.1.
- Kraus, N., Hanson, H. e Blomgren, S. (1994) «Modern Functional Design of Groin Systems», em *Coastal Engineering Proceedings*. doi: 10.9753/icce.v24.%p.
- Lima, M. (2018) *Ferramenta numérica de análise do impacto de intervenções de defesa costeira na evolução da linha de costa: custos e benefícios*. Universidade de Aveiro.
- Linham, M. M., Nicholls, R. J. e Zhu, X. (2010) *Technologies for Climate Change Adaptation - Coastal Erosion and Flooding*. Universidade Técnica da Dinamarca, Laboratório Nacional de Energia Sustentável de Riso. TNA Guidebook Series.
- Lopes, M. de L. *et al.* (2016) «A Utilização de Sistemas de Confinamento de Areias em Material Geossintético para Proteção Costeira em Portugal», *Livro de Atas de Conferência Nacional*.
- Luijendijk, A. *et al.* (2018) «The State of the World's Beaches», *Scientific Reports*, 8, p. 6641. doi: 10.1038/s41598-018-24630-6.
- Ly, C. K. (1980) «The role of the Akosombo Dam on the Volta river in causing coastal erosion in central and eastern Ghana (West Africa)», *Marine Geology*, 37, pp. 323–332. doi: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(80\)90108-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(80)90108-5).
- Mangor, K. *et al.* (2017) *Shoreline Management Guidelines*. Dinamarca: DHI.
- Mendes, J. *et al.* (2021) «Modeling Dynamic Processes of Mondego Estuary and Óbidos Lagoon Using Delft3D», *Journal of Marine Science and Engineering*, 9. doi: 10.3390/jmse9010091.
- Montague, C. (2006) «Analysis of Beach Nourishment Data for Florida's Atlantic Coast during the Last Century, with Reference to Ecological Engineering of Sea Turtle Nesting Habitat».
- Morales Márquez, V. *et al.* (2018) «Numerical and remote techniques for operational beach management under storm group forcing», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, pp. 3211–3223. doi: 10.5194/nhess-18-3211-2018.
- Noujas, V. e Kankara, R. S. (2018) «Shoreline Prediction using a Numerical Model along Rathnagiri Coast, West Coast of India», em.
- Oliveira, F. (2011) «Coastal erosion management in Algarve (Portugal) – a beach nourishment case study», *Journal of Coastal Research*.
- Oliveira, J. N. C. *et al.* (2020) «Modeling Wave Overtopping on a Seawall with XBeach, IH2VOF and Mase Formulas», *Water* 12, 9.

Oliveira, J. N. C., Oliveira, F. S. B. F. e Trigo-Teixeira, A. A. (2020) «Modelling 2DH beach morphodynamics in XBeach: model versions and hydrodynamic modes performance», em *6.ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica*. Lisboa: Instituto Hidrográfico.

Oliveira, J. N., Oliveira, F. e Teixeira, A. (2018) «Modelling the beach morphodynamics in defence schemes of combined groyne fields and seawalls under storm conditions», em.

Oosting, A. *et al.* (2015) «Hydraulics of Repeling Groynes and Their Application to the Bow River After the June 2013 Flood», em.

Perdok, U. H. (2002) *Application of timber groynes in coastal engineering*. TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering.

Pikelj, K. *et al.* (2018) «Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia», *Ocean & Coastal Management*, 156, pp. 223–238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.019>.

Pinto, C. A., Silveira, T. M. e Teixeira, S. B. (2020) «Beach nourishment practice in mainland Portugal (1950–2017): Overview and retrospective», *Ocean & Coastal Management*, 192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105211>.

Pinto, C., Silveira, T. e Teixeira, S. (2018) *Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal Continental: Enquadramento e retrospectiva das intervenções realizadas (1950-2017)*.

Proença, B. e Oliveira, F. (2010) *Extracção de areias na plataforma continental portuguesa: Impactos e evolução morfodinâmica*. Lisboa.

RIKZ (2014) *A guide to coastal erosion management practices in Europe*. Países Baixos.

Roelvink, D. *et al.* (2015) *XBeach Manual*.

Roelvink, D. *et al.* (2020) «Efficient Modeling of Complex Sandy Coastal Evolution at Monthly to Century Time Scales», *Frontiers in Marine Science*, 7, p. 535. doi: 10.3389/fmars.2020.00535.

Roelvink, D. e Costas, S. (2019) «Coupling nearshore and aeolian processes: XBeach and duna process-based models», *Environmental Modelling & Software*, 115, pp. 98–112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.010>.

Ruas, J. (2017) *Modelling the Morphological Response of Beaches with Groynes*. Instituto Superior Técnico (IST).

van der Salm, G. L. S. (2013) *Coastline modelling with UNIBEST: Areas close to structures*. Universidade Técnica de Delft.

Santos, F. *et al.* (2014) *Gestão da Zona Costeira: O Desafio da Mudança*.

Santos Gil, J. P. (2014) *Application of the Delft3D System in the Modelling of Laboratory and Field Longshore Currents*. Instituto Superior Técnico (IST).

Silva, J. (2018) *Caracterização de Assimetrias das Ondas Incidentes na Praia de São Jacinto com Recurso a Sensores de Pressão*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Silva, R. M., Veloso-Gomes, F. e Pais-Barbosa, J. (2013) «Morphological Behaviour of Costa da Caparica Beaches Monitored during Nourishment Operations», *Journal of Coastal Research*, pp. 1862–1867.

Simm, J. *et al.* (2020) *Groynes in coastal engineering. Guide to design, monitoring and maintenance of narrow footprint groynes*. C793 ed. Londres, Reino Unido: CIRIA - Construction Industry Research and Information Association.

Smit, P. *et al.* (2010) «XBeach: Non-hydrostatic model: Validation, verification and model description».

Son, S. e Jung, T.-H. (2015) «2HD Analysis of Morphologic Responses to the Tsunami Impacts Using

Process-based Model», *Procedia Engineering*, 116, pp. 979–985. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.389>.

Soprani, M. A. (2010) *Estudo das Transformações das Ondas na Baía do Espírito Santo por Meio do Modelo REFDIF*. Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

Sousa, F. (2012) *Estudo de Soluções de Enraizamento de Esporões*. Universidade do Porto.

Stein, L. P. e Siegle, E. (2020) «Overtopping events on seawall-backed beaches: Santos Bay, SP, Brazil», *Regional Studies in Marine Science*, 40, p. 101492. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101492>.

Taal, M. D. *et al.* (2016) *Development of the Sand Motor. Concise report describing the first four years of the Monitoring and Evaluation Programme (MEP)*.

Taborda, R., Magalhães, F. e Ângelo, C. (2005) «Evaluation of Coastal Defence Strategies in Portugal», em, pp. 255–265. doi: 10.1007/1-4020-3301-X_17.

Tomasicchio, G. R. *et al.* (2020) «Prediction of Shoreline Evolution. Reliability of a General Model for the Mixed Beach Case», *Journal of Marine Science and Engineering*.

Van Tomme, J. *et al.* (2013) «Macrofaunal sediment selectivity considerations for beach nourishment programmes», *Marine environmental research*, 84. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.11.002.

Trouw, K. J. M. *et al.* (2012) «Numerical Modelling of Hydrodynamics and Sediment Transport in the Surf Zone: A Sensitivity Study with Different Types of Numerical Models», *Coastal Engineering Proceedings*, 1. doi: 10.9753/icce.v33.sediment.23.

USACE (2016) «Dade County, Florida: Beach Erosion Control and Hurricane Protection Project», *US Army Corps of Engineers*.

Veloso-Gomes, F. *et al.* (2006) «Estudo das intervenções na Costa da Caparica», *las Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP*.

Veloso-Gomes, F. *et al.* (2007) «As obras de defesa costeira na Costa da Caparica. Na crista das ondas do mar e da comunicação social.», *2.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*.

Veloso Gomes, F. *et al.* (2006a) «Case Study of Caparica», em *Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores*. Porto: Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, p. 317.

Veloso Gomes, F. *et al.* (2006b) «Case Study of Vale do Lobo Beach», em *Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores*. Porto: Instituto Hidrográfico e Recursos Hídricos, p. 317.

Vousdoukas, M. I. *et al.* (2018) «Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard», *Nature Communications*, 9, p. 2360. doi: 10.1038/s41467-018-04692-w.

Willekens, M. e Maes, F. (2008) *Case Study: The Belgian coast*. Bélgica.

Yuan, F. e Cox, R. (2013) «Modelling Coastal Process for Long-term Shoreline Change».

Lista de Websites:

[1] <https://regiao-sul.pt/2019/04/11/sociedade/praias-da-rocha-volta-a-vencer-titulo-de-praia-cinco-estrelas-regioes/464309>

[2] <https://www.zdnet.com/article/dutch-engineered-sand-engine-controls-floods-naturally/>

- [3] <https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-4-and-landsat-5/objectives>
- [4] https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- [5] <https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-8/description>
- [6] <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about>
- [7] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

8

ANEXOS

Anexo A

Tabela A.1 - Esquema das tarefas realizadas durante o processo de dimensionamento e concepção das obras de defesa costeira (esporões e alimentação artificial).

[illegible]

	Construção
	Obras temporárias

Anexo B

Tabela B.1 - Informação das coordenadas dos transectos.

TRANSECTOS				
TRANSECTOS	X _A	Y _A	X _B	Y _B
1	73971.9	643714.5	73712.5	641708.3
2	73772.6	643740.6	73513.2	641734.4
3	73573.3	643766.7	73313.9	641760.5
4	73274.4	643805.9	73015.0	641799.7
5	73075.1	643832.0	72815.7	641825.8
6	72875.8	643858.1	72616.4	641851.9
7	72576.9	643897.3	72317.5	641891.0
8	72377.6	643923.4	72118.2	641917.2
9	72178.3	643949.5	71918.9	641943.3
10	71879.3	643988.7	71619.9	641982.4
11	71680.0	644014.8	71420.6	642008.5
12	71480.7	644040.9	71221.3	642034.7
13	71281.4	644067.0	71022.1	642060.8
14	70982.5	644106.2	70723.1	642099.9
15	70783.2	644132.3	70523.8	642126.0
16	70583.9	644158.4	70324.5	642152.1
17	70284.9	644197.6	70025.6	642191.3
18	70085.6	644223.7	69826.3	642217.4
19	69786.6	644262.8	69527.3	642256.5
20	69487.7	644302.0	69228.4	642295.7
21	68987.9	644353.8	68781.9	642341.3
22	68787.9	644374.6	68582.0	642362.0
23	68488.1	644405.7	68282.1	642393.1
24	68188.2	644436.8	67982.3	642424.2
25	67888.3	644467.9	67682.4	642455.3
26	67688.3	644488.6	67482.4	642476.0
27	67488.4	644509.3	67282.5	642496.7
28	67188.5	644540.4	66982.6	642527.8
29	66988.6	644561.1	66782.7	642548.5
30	66688.7	644592.2	66482.8	642579.6
31	66488.8	644613.0	66282.9	642600.4
32	66288.8	644633.7	66083.0	642621.1
33	65988.9	644664.8	65783.1	642652.2
34	65789.0	644685.5	65583.2	642672.9
35	65589.1	644706.2	65383.2	642693.6
36	65289.2	644737.3	65083.4	642724.7
37	65089.3	644758.0	64883.4	642745.4
38	64889.3	644778.7	64683.5	642766.1

Tabela B.2 - Informação das coordenadas dos transectos.

TRANSECTOS				
TRANSECTOS	X _A	Y _A	X _B	Y _B
39	64589.4	644809.8	64383.6	642797.2
40	64389.5	644830.6	64183.7	642817.9
41	64189.6	644851.3	63983.7	642838.6
42	63989.6	644872.0	63783.8	642859.3
43	63789.7	644892.7	63583.9	642880.1
44	63589.8	644913.4	63384.0	642900.8
45	63289.9	644944.5	63084.1	642931.8
46	63089.9	644965.2	62884.1	642952.6
47	62890.0	644985.9	62684.2	642973.3
48	62590.1	645017.0	62384.3	643004.3
49	62390.1	645037.7	62184.4	643025.0
50	62090.2	645068.8	61884.5	643056.1
51	61890.3	645089.5	61684.6	643076.8
52	61690.4	645110.2	61484.6	643097.5
53	61390.5	645141.3	61184.7	643128.6
54	61190.5	645162.0	60984.8	643149.3
55	60890.6	645193.1	60684.9	643180.4
56	60590.7	645224.1	60385.0	643211.4
57	60290.8	645255.2	60085.1	643242.5
58	60090.9	645275.9	59885.2	643263.2
59	59890.9	645296.6	59685.2	643283.9
60	59691.0	645317.3	59485.3	643304.6
61	59391.1	645348.3	59185.4	643335.6
62	59191.1	645369.1	58985.5	643356.3
63	58991.2	645389.8	58785.5	643377.0
64	58791.2	645410.5	58585.6	643397.7

Tabela B.3 - Dados relativos ao cálculo de AB.

CÁLCULO DE AB		
X _B -X _A	Y _B -Y _A	AB (m)
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023
-259	-2006	2023

Tabela B.4 - Dados relativos ao cálculo de AB.

[illegible]

Tabela B.5 - Dados relativos ao cálculo de AB.

CÁLCULO DE AB		
$X_B - X_A$	$Y_B - Y_A$	AB (m)
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023
-206	-2013	2023

Tabela B.6 - Dados relativos ao cálculo do ângulo α .

CÁLCULO DO ÂNGULO		
SENO (RAD)	ASSENO (RAD)	ÂNGULO
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.128	0.129	7
0.102	0.102	6
0.102	0.102	6

Tabela B.7 - Dados relativos ao cálculo do ângulo α .

[illegible]

Tabela B.8 - Dados relativos ao cálculo do ângulo α .

CÁLCULO DO ÂNGULO		
SENO (RAD)	ASSENO (RAD)	ÂNGULO
0.102	0.102	6

Tabela B.9 - Coordenadas da linha de costa de referência (março de 2013).

COORDENADAS DA LINHA DE COSTA DE REFERÊNCIA (MARÇO DE 2013)		
TRANSECTOS	X	Y
1	73930.66	643395.2
2	73733.21	643435.6
3	73534.29	643464.7
4	73232.76	643483.9
5	73035.49	643525.7
6	72839.59	643578.1
7	72536.94	643588.6
8	72341.1	643641.4
9	72143.09	643677.5
10	71843.12	643708.8
11	71645.67	643749.2
12	71446.82	643778.8
13	71247.95	643808.3
14	70949.39	643850.4
15	70751.94	643890.8
16	70549.86	643895.4
17	70250.86	643934.2
18	70051.67	643961.2
19	69750.38	643982.3
20	69450.23	644012.2
21	68958.7	644068.8
22	68758.29	644084.7
23	68457.1	644103.1
24	68155.93	644121.7
25	67855.08	644143.4
26	67655.35	644166.1
27	67455.62	644188.7
28	67156.42	644226.6
29	66956.03	644242.7
30	66653.79	644251
31	66453.79	644271
32	66253.55	644288.7
33	65952.25	644306
34	65750.24	644306.3

Tabela B.10 - Coordenadas da linha de costa de referência (março de 2013).

COORDENADAS DA LINHA DE COSTA DE REFERÊNCIA (MARÇO DE 2013)		
TRANSECTOS	X	Y
35	65548.47	644309.1
36	65249.01	644344.5
37	65050.83	644382.4
38	64852.75	644421.1
39	64552.62	644449.9
40	64351.41	644458.1
41	64151.3	644477.1
42	63951.06	644494.9
43	63750.53	644509.8
44	63550.18	644526.4
45	63249.68	644551.6
46	63049.75	644572.3
47	62848.79	644583
48	62546.99	644595.6
49	62345.62	644602.2
50	62043.98	644616.3
51	61843.75	644634.1
52	61642.5	644642
53	61340.09	644648.5
54	61139.05	644658.4
55	60837.85	644676.9
56	60537.44	644702.9
57	60236.88	644727.7
58	60035.73	644736.4
59	59835.12	644750.6
60	59636.49	644784.1
61	59337.38	644823
62	59136.66	644836
63	58936.81	644857.7
64	58737.67	644886.1