LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE DE UM QUEBRA-MAR DESTACADO MULTIFUNCIONAL EM FRENTE À PRAIA DA VAGUEIRA

Relatório final síntese

RELATÓRIO CONJUNTO 126**/2022 – DHA/NEC**

Trabalho realizado com:

universidade de aveiro

LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE DE UM QUEBRA-MAR DESTACADO MULTIFUNCIONAL EM FRENTE À PRAIA DA VAGUEIRA

Relatório final síntese

Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.

Lisboa • abril 2022

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO CONJUNTO 126**/2022 – DHA/NEC**

Cofinanciado por:

Trabalho realizado por:

Título

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE DE UM QUEBRA-MAR DESTACADO MULTIFUNCIONAL EM FRENTE À PRAIA DA VAGUEIRA

Relatório final síntese

Autoria

LNEC – DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Francisco Sancho
Investigador Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Paula Freire
Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Maria Graça Neves
Investigadora Auxiliar com Agregação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira
Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Ana Mendonça
Investigadora Auxiliar, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Conceição Juana Fortes
Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

UAVEIRO – UNIVERSIDADE DE AVEIRO

Peter Cornelis Roebeling
Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento

Paulo Renato Baptista
Investigador Auxiliar, Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM)

Colaboração

LNEC – DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Fernando Aires Brito
Técnico Superior, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

UAVEIRO – UNIVERSIDADE DE AVEIRO

Carlos Coelho
Professor Auxiliar com Agregação, RISCO e Departamento de Engenharia Civil

IST – INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE DE LISBOA

Pedro Bicudo
Professor Associado, Departamento de Física

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 126/2022

Proc. 0604/1201/21221

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE DE UM QUEBRA-MAR DESTACADO MULTIFUNCIONAL EM FRENTE À PRAIA DA VAGUEIRA

Relatório final síntese

Resumo

Apresenta-se neste documento um texto integrador e conclusivo dos trabalhos executados no "Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira". Identificam-se, primeiramente, as alternativas e soluções para um quebra-mar destacado submerso e os principais condicionamentos morfo-sedimentares. Sintetizam-se os resultados da análise do desempenho das soluções relativamente à redução do galgamento costeiro, promoção do acréscimo da largura de praia e promoção de ondas de referência para o *surf*. Por fim, elencam-se os principais resultados da análise de viabilidade económica, discutem-se intervenções alternativas e/ou complementares e apresentam-se os resultados dos parâmetros de dimensionamento de soluções técnica e/ou economicamente viáveis, que melhor satisfazem os objetivos. Alerta-se também para algumas limitações, oportunidades e trabalhos adicionais para a eventual execução do projeto da obra.

Palavras-chave: Quebramar destacado submerso / Viabilidade técnica e económica / Galgamento / Proteção costeira / *Surf* / Alimentação artificial

CHARACTERIZATION AND FEASIBILITY STUDY OF A MULTIFUNCTIONAL DETACHED BREAKWATER IN FRONT OF VAGUEIRA BEACH

Final report

Abstract

This document contains an integrative and conclusive text of all tasks carried out within the "Characterization and feasibility study of a multifunctional detached breakwater in front of Vagueira beach". It is identified the alternatives and solutions for a submerged detached breakwater and the principal environmental, morpho-sedimentary, constraints. The main results on the performance of the various candidate solutions, concerning the reduction of coastal overtopping, stimulation of the growth of the beach (foreshore) and promotion of reference waves for surfing, are synthesised. Lastly, the main results of the cost-benefit analysis and the main characteristics of the best technical and viable solutions (with regard to satisfying the projects' objectives) are presented, and it is discussed alternative and/or complementary interventions. Lastly, we alert for some restraints, opportunities and additional studies/works to inform the, potential, breakwater design phase.

Keywords: Submerged detached breakwater / Technical and economic feasibility / Overtopping / Coastal protection / Surf / Beach nourishment

Sumário executivo

O Programa da Orla Costeira (POC) Ovar-Marinha Grande prevê a "…*criação de novas estruturas de defesa, com o desenvolvimento de zonas piloto, em áreas críticas, onde se possam testar soluções inovadoras, como quebra-mares destacados submersos*." Em 2017-06-21 a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA), lançou o "Concurso limitado por prévia qualificação" para a "Aquisição de serviços para realização do estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira". Em 2018-11-07, a APA celebrou com o Consórcio constituído pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), a Universidade de Aveiro (UA) e o Instituto Superior Técnico (IST) o contrato nº- 000065/2018-DFIN.DCP para a prestação de serviços correspondente à realização do referido estudo, que visa apresentar alternativas e soluções para um quebra-mar destacado, um esquema da solução preliminar e sua localização, a indicação dos principais condicionamentos, e informação sobre a eventual necessidade de obtenção de elementos adicionais para a execução do projeto da obra.

Os métodos e conceção do programa de trabalhos foram estabelecidos considerando como objetivos, por ordem decrescente de importância: i) a redução do risco de galgamento; ii) a eventual promoção do areal da praia emersa a sotamar do quebra-mar e, iii) a melhoria das condições locais, induzidas pela obra marítima, para a prática de *surf*. O presente relatório final contém um texto integrador de todos os principais resultados anteriormente obtidos e as conclusões finais do estudo sobre a viabilidade técnica e económica das melhores soluções de QMD submerso, elencando-se os principais parâmetros de dimensionamento e seus valores.

Conclui-se que é tecnicamente viável a implantação de um quebra-mar destacado submerso na Praia da Vagueira, mas existem várias restrições. Os quebra-mares destacados, como todas as obras fixas, não permitem resolver o problema de défice sedimentar responsável pelo processo erosivo neste trecho da costa Portuguesa, mas apenas proporcionariam uma proteção local onde ela possa ser mais necessária (neste caso, no núcleo urbano da Praia da Vagueira). Em perspetiva, nos últimos 3 anos (novembro de 2018 a abril de 2021), a zona central da Praia da Vagueira (em frente à defesa longitudinal aderente) tem evoluído no sentido de apresentar uma tendência de acreção e de ganho do volume da praia emersa, mais evidente no final de verão marítimo, a qual pode estar relacionada com as intervenções de alimentação artificial efetuadas a barlamar, na Costa Nova (volume depositado da ordem dos 3.4 Mm3 entre novembro de 2018 e abril de 2021).

A solução de quebra-mar destacado submerso paralelo à costa com comprimento igual a 300 m e distância à linha de costa de 400 m é a que, tecnicamente, melhor compatibiliza a redução do risco de erosão e de promoção do acréscimo de praia com o da redução do risco de galgamento. No entanto, esta solução é desadequada para a prática de *surf* e economicamente inviável no horizonte temporal de 20 anos. Existe ainda um potencial conflito entre a implantação do quebra-mar e a mobilidade natural, com elevado dinamismo, do sistema de barras submersas da praia submarina. A obra favoreceria a formação de correntes de circulação de elevada magnitude na sua zona adjacente, que teriam de ser acauteladas para não colocar em risco a segurança de banhistas.

Das configurações avaliadas, e excluindo o valor económico do *surf*, unicamente a solução com menores custos (comprimento e distância à linha de costa de 200 m) é que origina um VAL (Valor Atual Líquido) positivo ao fim de cerca de 10 anos, i.e., seria economicamente viável a partir desse horizonte temporal. Considerando uma configuração de quebra-mar submerso oblíquo à costa (com orientação próxima dos 45°), a mesma originaria uma melhoria das ondas para a prática do *surf* e o valor económico potencial adicional do *surf* reforçaria os resultados obtidos. Nesse caso, a obra com comprimento 300 m e distância à linha 400 m seria, provavelmente, também viável no horizonte temporal de 20 anos.

Assinala-se também a oportunidade de, a construir um quebra-mar destacado submerso, a estrutura poder conceber em sede de projeto outras funções, nomeadamente, a de promoção da biodiversidade ("*blue-green structure*").

Devido à diversidade de parâmetros intrínsecos à obra, à escolha dos materiais e métodos de construção, à disponibilidade ou indisponibilidade de materiais de pedreira em regiões próximas, à previsível dificuldade de execução de operações de manutenção e a outros fatores, nota-se que existe elevada incerteza nas estimativas dos custos de investimento (e de manutenção) do quebra-mar. Identifica-se a previsível elevada dificuldade e ónus com a execução de operações de manutenção, que teriam de ser efetuadas por via marítima.

Alerta-se para o previsível assentamento do quebra-mar destacado ao longo do período de vida útil da obra. Tal traduzir-se-á numa perda de eficácia no respeitante à promoção do acréscimo de praia, face à situação inicial. Assim, para o objetivo de promoção do acréscimo do areal na Praia da Vagueira e garantia da eficácia da obra por um período mais vasto, recomenda-se a execução de um quebra-mar submerso com a cota de coroamento inicial próxima da cota do nível de baixa-mar médio (+1,18 m ZH).

A construção do quebra-mar, além do efeito positivo de acréscimo do areal na Praia da Vagueira, terá como efeito negativo o aumento da erosão para sul do esporão da Vagueira, quando comparado com a que ocorreria se este não fosse construído. Este efeito poderá ser mitigado se se efetuarem operações de alimentação artificial em conjunto com a obra.

Recomenda-se, por fim, estudar em pormenor soluções de intervenção alternativas e comparar a viabilidade da construção de um quebra-mar destacado submerso (isoladamente ou em combinação com outras medidas) com a da realização de operações de alimentação artificial ou de alterações das estruturas existentes.

Índice

1 | Introdução 1
1.1 Âmbito e objetivos 1
1.2 Organização do relatório 3
2 | Resumo de alternativas selecionadas para o quebra-mar destacado 5
3 | Condicionantes locais 10
3.1 Generalidades 10
3.2 Variabilidade interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira 10
3.3 Variabilidade do perfil transversal de praia 11
3.4 Síntese 11
4 | Redução do risco de galgamentos costeiros 13
4.1 Objetivos e metodologia 13
4.2 Risco de galgamento 14
4.3 Síntese 17
5 | Promoção do acréscimo da praia e reforço da defesa contra a erosão costeira 18
5.1 Objetivos e metodologia 18
5.2 Redução do risco de erosão e promoção do acréscimo de praia 20
5.3 Síntese 21
6 | Promoção de ondas de *surf* de referência 23
6.1 Objetivos e metodologia 23
6.2 Promoção das ondas de *surf* 24
6.3 Síntese 26
7 | Análise custo-benefício 27
7.1 Objetivo 27
7.2 Análise custo-benefício do quebra-mar destacado 27
7.3 Valor potencial do *surf* do quebra-mar destacado 28
7.4 Síntese 29
8 | Discussão de intervenções alternativas ou complementares 30
8.1 Análise preliminar de intervenções alternativas 30
8.2 Limitações ao desempenho/funcionamento de um quebra-mar destacado 34
8.3 Oportunidades associadas à construção de um quebra-mar destacado 34
9 | Conclusões sobre a solução final de quebra-mar destacado 36
9.1 Viabilidade técnica e económica de construção de um quebra-mar destacado 36
9.2 Notas auxiliares para apoio à tomada de decisão 38
9.3 Trabalhos complementares 39
Referências bibliográficas 41
Anexos 45
ANEXO I Plano de trabalhos e informação adicional 47
ANEXO II Condicionantes locais: atualização da análise da evolução morfológica 53
ANEXO III Valor recreativo do *surf* na praia da Vagueira / Costa Nova / Barra 79
ANEXO IV Promoção de ondas de *surf* de referência: Aplicação do modelo numérico COULWAVE 83

Índice de figuras

Figura 1.1 – Localização da zona de estudo....2
Figura 1.2 – Esquema da organização do relatório 4
Figura 2.1 – Esquema ilustrativo das localizações e comprimentos de QMD, testados em modelo matemático....7
Figura 2.2 – Planta do modelo físico construído, com implementação da solução de QMD c300d400: a) paralelo à linha de costa; b) oblíquo à linha de costa 9
Figura 4.1 – Esquema da localização dos perfis para o cálculo de galgamento e opções de QMD.... 14
Figura 4.2 – Caudal médio galgado máximo para a situação atual e para cada configuração do QMD, com os perfis de fundo da praia adquiridos em 2018 e 2019.... 15
Figura 4.3 – Número de eventos de galgamento obtidos para a situação atual e para cada configuração do QMD, com os perfis de fundo da praia adquiridos em 2019 (cima) e 2018 (baixo) 15
Figura 4.4 – Ensaios: a) sem QMD; b) com QMD 45 ^{0}. Agitação irregular: Tp=16 s; Hs= 3,0 m. Aspeto do espraiamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente.... 16
Figura 6.1 – Ensaios físicos: variação da superfície livre e posição da linha de rebentação. a1) sem QMD; a2) QMD 0°; a3) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; Hs=2,0 m, NMM.... 25
Figura 6.2 – Resultados numéricos: a) variação da superfície livre, b) altura de onda significativa, c) direção de onda e posição da linha de rebentação: 1) sem QMD, 2) QMD 0°; 3) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; Hs=2,0 m, NMM 25
Figura 8.1 – Evolução da linha de costa entre 2018 e 2038. Resultados de simulação com o modelo LITMOD para diferentes soluções de intervenção 33
Figura I.1 – Plano de trabalhos 49
Figura II.1 – Áreas de comparação dos Modelos Digitais de Terreno dos levantamentos topo-hidrográficos (Imagem: ESRI Basemap) 56
Figura II.2 – Variabilidade morfológica dos fundos adjacentes à praia da Vagueira. Dados de base: Levantamentos topo-hidrográficos do Programa COSMO (Imagem: ESRI Basemap)..... 56
Figura II.3 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2021 para a zona de comparação C. (Imagem: ESRI Basemap) 59
Figura II.4 – Distribuição dos volumes na área de comparação por classe batimétrica (cotas em metros abaixo do ZH) 60
Figura II.5 – Taxa de evolução por classe batimétrica para a zona C (cotas em metros abaixo do ZH). Valores positivos correspondem a acumulação e negativos a erosão.... 60
Figura II.6 – Taxa anual de evolução dos fundos. Valores positivos correspondem a acumulação e negativos a erosão.... 60
Figura II.7 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2021 para a zona de comparação B. (Imagem: ESRI Basemap).... 61
Figura II.8 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2020 para a zona de comparação A. (Imagem: Ortofotos de 2018, DGT).... 62
Figura II.9 – Resultados das médias das posições da barra submersa para os período compreendido entre junho de 2019 e julho de 2020 62
Figura II.10 – Localização dos perfis transversais analisados do Programa COSMO: PC6 – perfil total; PE – perfis emersos (Imagem: Ortofotos das Zonas Costeiras de Portugal Continental de 2014-2015, DGT) 65
Figura II.11 – Evolução de perfil transversal da praia da Vagueira: (a) perfil completo; (b) detalhe acima de -10 m (ZH). A localização do perfil corresponde ao perfil total PT_PC6 do Programa COSMO.... 66
Figura II.12 – Aspetos da evolução do perfil transversal total (PC6) da praia da Vagueira 68
Figura II.13 – Evolução dos perfis da praia emersa. A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 e corresponde à do Programa COSMO 69

Figura II.14 – Evolução da largura da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 71
Figura II.15 – Evolução da elevação da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 72
Figura II.16 – Evolução do volume da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 73
Figura II.17 – Aspetos da evolução dos perfis transversais emersos na zona da praia da Vagueira .. 74
Figura II.18 – Aspetos da evolução dos perfis transversais emersos das praias do Labrego e da Duna Alta 75
Figura IV.1 – Domínio de cálculo e batimetria: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45° 86
Figura IV.2 – Índice de agitação. Comparação entre os resultados do modelo físico e do modelo numérico nos perfis P4 a P6: a) sem QMD, b) QMD 0°, e c) QMD 45°. Agitação regular, T=12 s; H=2.0 m, NMM 87
Figura IV.3 – Variação da superfície livre (em cima) e altura de onda significativa (em baixo). Agitação regular: T=12 s; H=2.0 m, NMM: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45° 88
Figura IV.4 – Posição dos perfis: a) sem QMD, b) QMD 0°, c) QMD 45° 89
Figura IV.5 – Resultados numéricos da variação da altura de onda significativa nos perfis P4 a P6, para os casos: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45°. Condição de agitação regular: T=12 s; H=2,0 m 89
Figura IV.6 – Batimetria, linha de rebentação (a preto) e direção da onda para: a) sem QMD, b) QMD 0°, e c) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; H=2.0 m, NMM 90

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Intervalos de valores pretendidos para os parâmetros característicos de dimensionamento do QMD da Praia da Vagueira 6
Quadro 2.2 – Nomenclatura das configurações modeladas (cXXX.dYYY), em que XXX= L_{qm} e YYY= L_d; e razão L_{qm}/L_d, entre parêntesis 7
Quadro 5.1 – Esquema da abordagem metodológica aplicada para análise da evolução morfológica com e sem QMD 18
Quadro I.1 – Relatórios intercalares publicados no âmbito do presente estudo 50
Quadro I.2 – Condições topo-batimétricas e sedimentológicas de teste aplicadas nas metodologias de modelação numérica e física (referidos no Capítulo 5) 51
Quadro I.3 – Condições de agitação e nível do mar à batimétrica -12 m (ZH) testadas no âmbito das metodologias de modelação numérica e física (referidos no Capítulo 5) 51
Quadro II.1 – Modelos digitais de terreno (MDT) dos fundos adjacentes à praia da Vagueira analisados, cuja zona de comparação se encontra assinalada na Figura II.1 55
Quadro II.2 – Volumes médios de evolução dos fundos na zona adjacente à praia da Vagueira para as diferentes áreas de comparação (x10^6 m^3). Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação 57
Quadro II.3 – Altura média (em metros) e taxa anual de evolução dos fundos na zona adjacente à praia da Vagueira para as diferentes áreas de comparação. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação 57
Quadro II.4 – Dados do perfil total e perfis da praia emersa analisados (cuja localização se encontra na Figura II.10) 64
Quadro II.5 – Geo-indicadores da praia emersa e submersa com base no perfil total PC6, localizado na Figura II.10 (sd – sem dados) 67
Quadro II.6 – Geo-indicadores da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 76
Quadro II.7 – Volume da praia emersa, por unidade de comprimento longitudinal (m^3/m), calculado nos perfis da Praia da Vagueira. A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 .. 77
Quadro III.1 – Modelo Poisson reduzido para a procura recreativa do *surf* na praia da Vagueira / Costa Nova / Barra 81
Quadro III.2 – Estimativas de bem-estar (excedente do consumidor; EC) ajustados aos custos de viagem 81
Quadro III.3 – Estimativa do número de surfistas na Praia da Vagueira 81
Quadro IV.1 – Resultados numéricos dos valores de: talude, altura de onda na rebentação (Hb), posição de rebentação, número de Iribarren, tipo de rebentação e ângulo de rebentação, para os casos sem QMD, QMD 0° e QMD 45° nos perfis P4 a P6. Condição de onda regular: H=2 m, T=12 s e NMM 91

1 | Introdução

1.1 Âmbito e objetivos

O Programa da Orla Costeira (POC) Ovar-Marinha Grande[1] prevê a "…*criação de novas estruturas de defesa, com o desenvolvimento de zonas piloto, em áreas críticas, onde se possam testar soluções inovadoras, como quebra-mares destacados submersos*." Em 2017-06-21 a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA), lançou o "Concurso limitado por prévia qualificação" para a "Aquisição de serviços para realização do estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira", cujas condições foram especificadas no "Caderno de Encargos", "Programa do Concurso" e "Convite à apresentação de propostas".

Posteriormente, em 2018-11-07, a APA celebrou com o Consórcio Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), Universidade de Aveiro (UA) e Instituto Superior Técnico (IST) o contrato nº-000065/2018 - DFIN.DCP para a prestação de serviços correspondente à realização do "Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira" (Concelho de Vagos, distrito de Aveiro), cujos trabalhos se encontram descritos nas Cláusulas Técnicas do referido Caderno de Encargos e na proposta do Consórcio.

O estudo tem como **objetivo a caracterização e definição de parâmetros de dimensionamento e localização de um quebra-mar destacado, em frente à Praia da Vagueira** (Município de Vagos, distrito de Aveiro). Este estudo visa apresentar à APA as alternativas e soluções para um quebra-mar destacado, um esquema da solução preliminar e sua localização, a indicação dos principais condicionamentos, um conjunto de peças escritas e desenhadas sobre os trabalhos realizados, e informação sobre a eventual necessidade de obtenção de elementos adicionais para a execução do Projeto da obra.

De acordo com o estabelecido no Caderno de Encargos do Concurso, pretende-se que este quebra-mar destacado (QMD) seja multifuncional, cumprindo os seguintes objetivos por ordem de prioridades:

- Reduzir o risco de galgamentos costeiros no aglomerado urbano da Praia da Vagueira;
- Promover o eventual acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente, reforçando a defesa natural contra a erosão e inundação costeira e fomentando o seu maior usufruto pela população e segurança balnear;
- Criar condições físicas para promover ondas de *surf* de referência, potenciando a economia associada a esta atividade.

[1] Vide texto do "Relatório do Programa", de setembro de 2016, em https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DLPC/POC/POC_OMG/v_final/3_POCOMG_Relatorio.pdf

Os trabalhos efetuados, em particular, os métodos e conceção dos estudos em modelo matemático e em modelo físico, foram estabelecidos considerando esta ordem de prioridades.

Os trabalhos realizados incidem na área costeira da Praia da Vagueira (Figura 1.1). Nesta figura identificam-se uma defesa frontal aderente de enrocamento, com cerca de 620 m de comprimento e cuja construção se iniciou em 1978, e um esporão (localizado a cerca de 9 km para sul do molhe sul da Barra de Aveiro). Existe, para sul deste, um segundo esporão (não visível na Figura), distanciado cerca de 1200 m.

Figura 1.1 – Localização da zona de estudo

A tipologia dos trabalhos realizados é a que decorre dos seguintes grupos de tarefas, T0 a T4, que incluem as atividades também discriminadas:

- T0 – Revisão do estado de arte;
- T1 – Estudos em modelo matemático;

- T1.a) Efeito do quebra-mar na redução dos galgamentos e diminuição do risco para a população;
- T1.b) Efeito do quebra-mar na promoção de um acréscimo da praia e na dinâmica sedimentar em geral;
- T1.c) Efeito do quebra-mar nas correntes litorais;
- T1.d) Hidrodinâmica das ondas em torno do quebra-mar para os deportos de deslize;

- T2 – Estudos em modelo físico reduzido;
  - T2.a) Efeito do quebra-mar na dinâmica sedimentar próxima;
  - T2.b) Otimização da solução de quebra-mar com vista à geração de ondas para o *surf*;
- T3 – Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo;
  - T3.a) Monitorização contínua através de sistema de vídeo-monitorização;
  - T3.b) Monitorização topo-hidrográfica;
  - T3.c) Campanhas de campo;
- T4 – Análise custo-benefício da melhor solução técnica e/ou conjunto de soluções alternativas
  - T4.a) Quantificação dos custos associados à erosão e inundação costeira evitadas;
  - T4.b) Compilação de custos de investimento e de manutenção;
  - T4.c) Cálculo de custos e benefícios e realização da análise custo-benefício;
  - T4.d) Quantificação dos benefícios esperados com a atividade do *surf*.

Estas tarefas foram articuladas de acordo com o Plano de trabalhos apresentado no Anexo I (Figura I.1). Note-se que este plano foi posteriormente alterado no decurso do trabalho, em virtude de várias suspensões parciais da execução do mesmo, em particular da Tarefa 2, devido ao Estado de Emergência declarado em 18 de março de 2020.

O presente relatório final contém um texto integrador dos restantes relatórios, elaborado em função de toda a informação recolhida, análises efetuadas e conclusões parciais obtidas. A lista dos relatórios intercalares elaborados no âmbito deste estudo é apresentada no Anexo I (Quadro I.1). Este relatório inclui ainda novos resultados, em particular, da análise de dados mais recentes da monitorização *in-situ* (sub-tarefa T3.b) e de modelação matemática (sub-tarefas T1.b e T1.d).

1.2 Organização do relatório

O presente “Relatório final síntese” está organizado em 9 capítulos e 4 anexos (vide Figura 1.2). No primeiro capítulo elencam-se os objetivos do estudo, as tarefas que o mesmo compreende e a explicação do propósito e conteúdos do relatório. O capítulo 2 contém um resumo das alternativas

anteriormente selecionadas (em fases do estudo anteriores à presente) para as fases de modelação matemática e física. O 3.º capítulo foca-se sobre as condicionantes morfológicas da praia imersa e emersa, no local da Praia da Vagueira, que poderão afetar a implantação de um QMD submerso. Os capítulos 4, 5 e 6 encerram os principais resultados relativos ao cumprimento dos objetivos do estudo por parte das melhores soluções de QMD. Assim, eles contêm por ordem sequencial, os resultados da: redução do risco de galgamento; promoção do acréscimo da praia e redução do risco de erosão; promoção de ondas de referência para o *surf*. No capítulo 7 apresenta-se os principais resultados da análise custo-benefício, efetuada para 4 configurações de QMD, e inclui-se uma nova secção sobre o valor económico potencial do *surf*, que poderia advir da implantação de um QMD submerso. No capítulo 8 apresentam-se e discutem-se algumas soluções de intervenção alternativas ou complementares às de construção de um QMD submerso. Este capítulo inclui ainda um conjunto de preocupações e oportunidades relativas à construção e desempenho de um QMD. Por último, o capítulo 9 conclui sobre a viabilidade técnica e económica das melhores soluções de QMD submerso, elencando-se os principais parâmetros de dimensionamento e seus valores.

O Anexo I contém o plano de trabalho e outra informação adicional, dispersa, referida ao longo do texto. No Anexo II apresenta-se uma reanálise da evolução morfológica da área de estudo e de perfis transversais para o conjunto de dados disponíveis mais recente, atualizando a informação anteriormente publicada no Relatório 7 (Freire *et al*., 2020). Os dados que suportam a análise do valor económico do *surf* na Praia da Vagueira são resumidos no Anexo III. O Anexo IV contém a análise da adequabilidade do QMD à promoção de ondas para a prática do *surf*, decorrente de novos resultados da modelação numérica, de suporte ao capítulo 6.

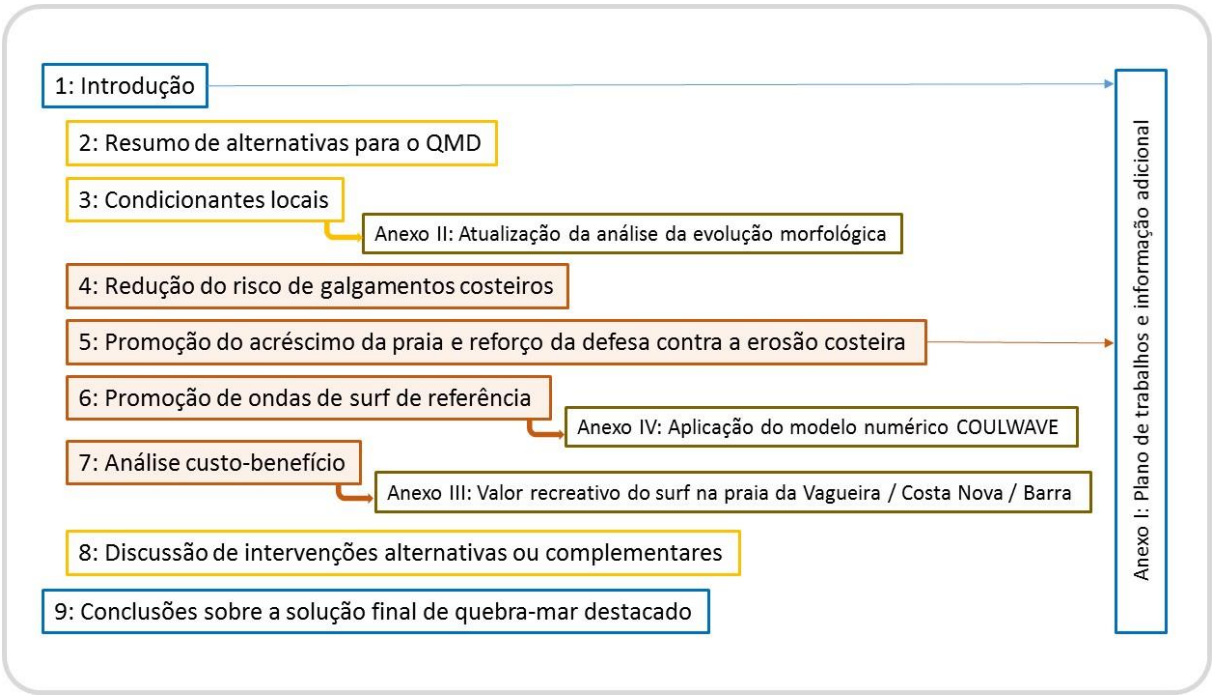


Figura 1.2 – Esquema da organização do relatório

2 | Resumo de alternativas selecionadas para o quebra-mar destacado

No Relatório 2 (Sancho *et al*., 2019a) do presente estudo apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre as características, parâmetros, funcionalidades, pontos fortes e fracos, e questões relacionadas com a construção de quebra-mares destacados (QMD) submersos, que serve de base à caracterização e análise de viabilidade técnica de construção de uma destas estruturas para a Praia da Vagueira.

Mostrou-se que a principal dificuldade teórica relativa ao pré-dimensionamento dos parâmetros físicos de um quebra-mar destacado submerso (e/ou recife artificial multifuncional) prende-se com a compatibilização entre as funções de obra de defesa costeira (reduzindo os galgamentos e promovendo o acréscimo da praia adjacente) e de geração de ondas de qualidade para a prática do *surf*, como consta do caderno de encargos. Acresce o quase nulo número de projetos com sucesso de QMD ou de recifes artificiais para a prática do *surf*, mesmo nos casos em que foi esse o objetivo único ou primordial (Mortensen *et al*., 2015).

A pesquisa bibliográfica, as experiências mundiais existentes, a identificação dos casos de sucesso e de insucesso e os condicionantes impostos pelo litoral da Vagueira, permitiram identificar um conjunto de valores preliminares para os parâmetros mais relevantes relativos à configuração do QMD da Praia da Vagueira (Relatório 2, Sancho *et al*., 2019a). Adicionalmente, especificaram-se os critérios de projeto relativamente à proteção contra galgamentos e redução da erosão costeira no Relatório 4 (Sancho *et al*., 2019b), dando origem a uma pormenorização dos referidos intervalos para os parâmetros de pré-dimensionamento que se apresentam no Quadro 2.1. Destes, **destacam-se a distância à linha de costa, o comprimento do quebra-mar e o nível de submersão (ou a cota do coroamento)**. Note-se que, de acordo com o preconizado no POC Ovar – Marinha Grande, a solução procurada ao longo do estudo excluiu, inicialmente, qualquer solução de quebra-mar destacado emerso, **procurando-se assim satisfazer os requisitos com uma estrutura submersa[2]**.

Tendo em consideração as gamas de valores obtidos, selecionaram-se dez configurações com diferentes posições e comprimentos de um QMD de forma linear (Figura 2.1 e Quadro 2.2), cujo desempenho foi analisado através de modelação matemática. Na Figura 2.1, esquemática, a linha de preia-mar de águas vivas (PMAV) foi marcada a 35 m do sopé da atual defesa frontal aderente e a linha de nível médio do mar (NMM) está marcada a 25 m de distância da linha PMAV.

[2] Somente se uma solução deste género não fosse encontrada se consideraria um QMD emerso, o que não aconteceu.

Quadro 2.1 – Intervalos de valores pretendidos para os parâmetros característicos de dimensionamento do QMD da Praia da Vagueira

Parâmetro	***Variável***	**Intervalo de valores**
Comprimento do quebra-mar	L_{qm}	200, 250, 300, 350 m
Distância à linha de costa	L_d	200, 300, 400, 500, 580 m (à cota +2,17 m ZH)
	L_{qm}/L_d	0,6 a 1,0 (esta condição limita algumas das combinações possíveis de L_{qm} e L_d)
Distância do nível de coroamento à superfície livre ou bordo livre (Rc<0 corresponde a QMD submerso)	R_c	-0,5 m, para o nível de baixa-mar de águas vivas média (+0,84 m ZH); testar-se-ão outras submersões caso não se obtenham os resultados desejáveis com esta
Cota de coroamento	h_c	+0,34 m (ZH), a alterar caso se modifique R_c
Coeficiente de transmissão	K_t	0,4 a 0,7
Largura de coroamento	B	10 m
Cota de implantação	h_p	-3 a -7 m (ZH), dependendo do perfil transversal característico e de L_d
Orientação do eixo longitudinal relativamente à linha de costa	ϕ	-10°, 0°, +10°
Distância do eixo transversal ao alinhamento do esporão da Vagueira	L_g	460 m
Inclinação dos taludes	β_b, β_s	Barlamar: 1:10, 1:15 Sotamar: 1:2, 1:3
Forma		Linear oblíqua ou delta assimétrico
Material		Enrocamento
Altura significativa de onda	H_s	*Surf*: 1,5 a 3,0 m
Período de pico	T_p	*Surf*: 8 a 12 s
Peel angle	α	$30 < \alpha < 60°$ durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
Número de Iribarren (tipo de rebentação)	ξ_b	*Surf*: $0,4 < \xi_b < 2,0$ durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
Comprimento da linha de rebentação		$\geq$ 55 m, durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
Níveis de maré		BMAV (+0,84 m ZH); NMM (+2,17 m ZH); PMAV (+3,55 m ZH)
Largura mínima de praia	$W_{b,min}$	35 m, numa extensão igual à distância do extremo norte do QMD ao esporão da Vagueira, à cota de PMAV, em qualquer período do ano
Erosão máxima no troço Vagueira - Areão		A taxa de erosão máxima admitida é -4,44 m/ano. Este critério aplicar-se-á pelo período necessário até à recuperação do transporte litoral para valores que ocorreriam sem o QMD

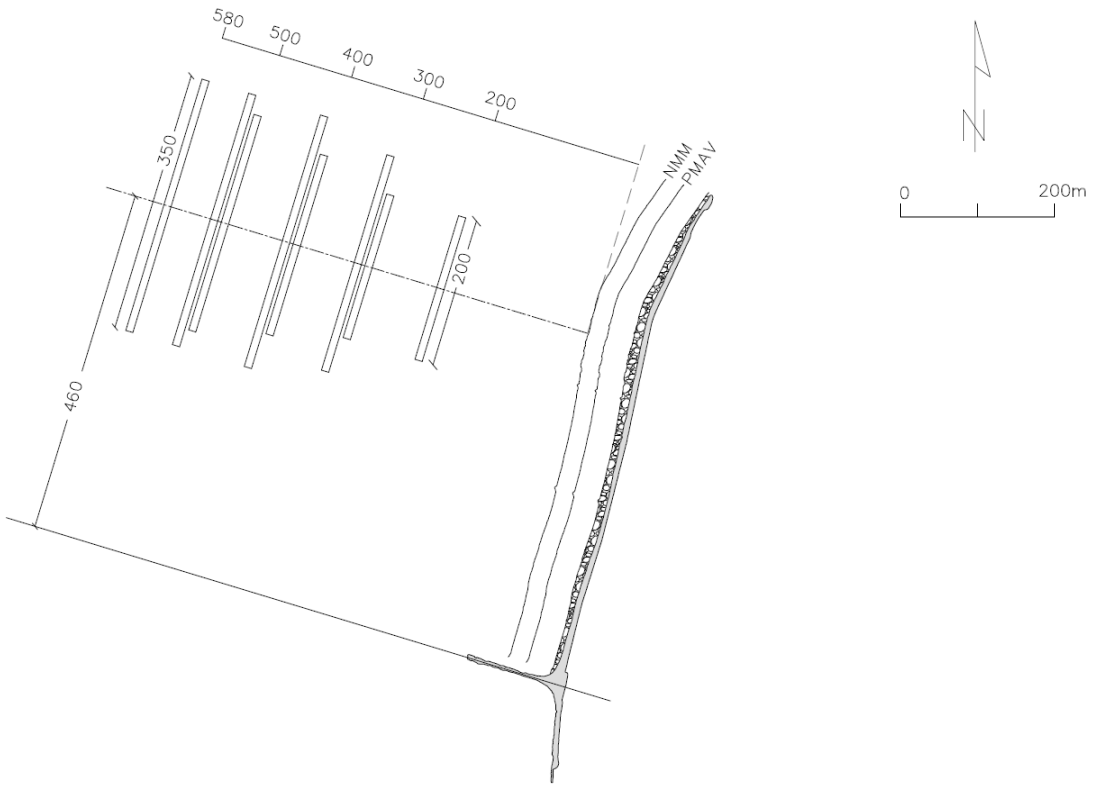


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo das localizações e comprimentos de QMD, testados em modelo matemático

Quadro 2.2 – Nomenclatura das configurações modeladas (cXXX.dYYY), em que XXX= L_{qm} e YYY= L_d; e razão L_{qm}/L_d, entre parêntesis

		L_{qm} (m)			
		200	250	300	350
L_d (m)	200	c200d200 (1,00)			
	300	c200d300 (0,67)	c250d300 (0,83)	c300d300 (1,00)	
	400		c250d400 (0,63)	c300d400 (0,75)	c350d400 (0,88)
	500			c300d400 (0,60)	c350d500 (0,70)
	580				c350d580 (0,60)

Em função dos objetivos e sua ordem de prioridades, foram definidas três fases (Relatório 8, Oliveira *et al*., 2020) para a sequência de trabalhos de modelação matemática:

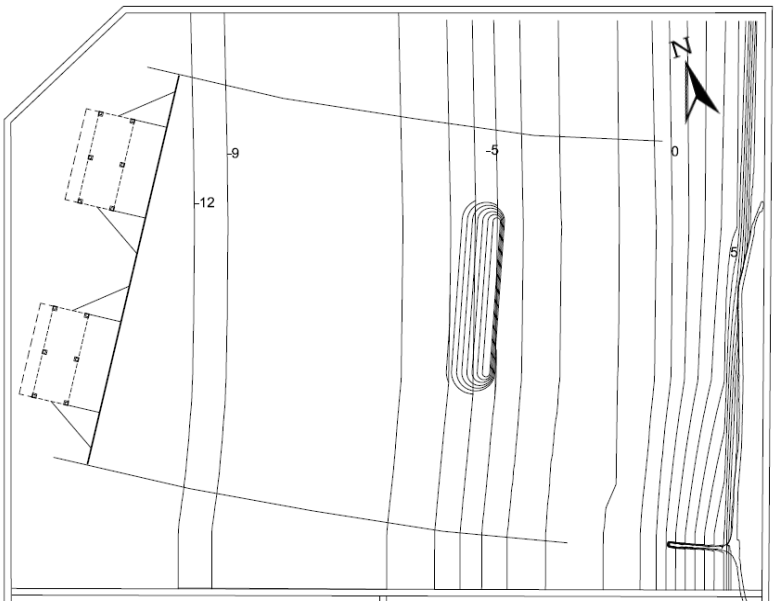
- Fase A: análise da redução do galgamento e identificação das soluções mais favoráveis que satisfaçam os critérios estabelecidos para este objetivo;

- Fase B: análise do efeito do QMD no acréscimo da praia, para as soluções satisfatórias da fase A, identificando as soluções mais favoráveis que satisfaçam os critérios quanto à redução da erosão costeira;
- Fase C: análise do desempenho do QMD, que sequencialmente constituiu a solução mais favorável das fases A e B, para as condições do *surf*.

Para a prossecução das fases A e B, o bordo livre do QMD, R_c, foi primeiramente estabelecido 0,5 m abaixo do nível de baixa-mar de águas vivas média (BMAV=+0,84 m ZH), isto é, à cota h_c=+0,34 m (ZH).

Posteriormente à realização das fases A e B de modelação matemática, executou-se a fase C em simultâneo com a modelação física em modelo reduzido. Esta última tarefa permitiu estudar com maior pormenor a dinâmica sedimentar associada ao QMD paralelo à costa que obteve melhor desempenho na fase B – nomeadamente, a solução c300d400 – e aferir os resultados da anterior modelação matemática. A realização de ensaios em modelo físico permitiu ainda analisar o desempenho de um QMD 45° oblíquo à costa, de dimensões análogas à solução c300d400, de forma a otimizar a solução de QMD com vista à geração de ondas para o *surf* (complementando a fase C da modelação matemática). As configurações ensaiadas em modelo reduzido são ilustradas na Figura 2.2.

a)



b)

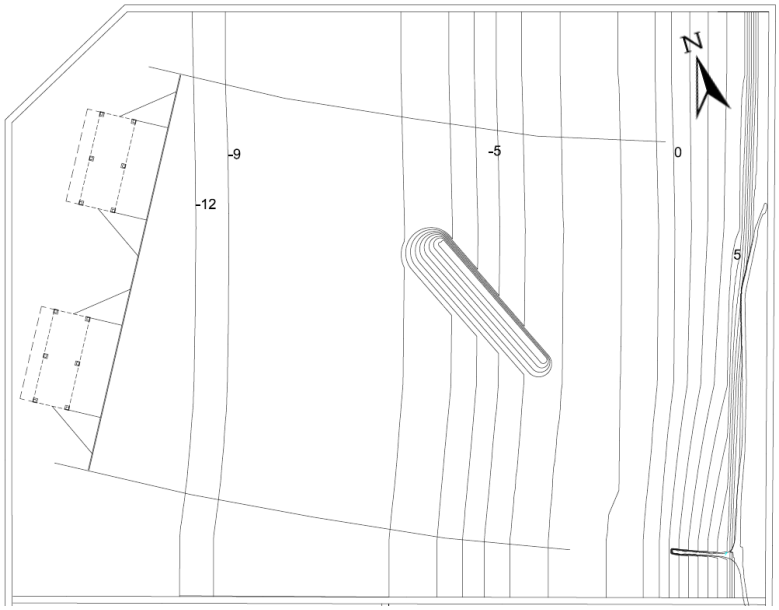


Figura 2.2 – Planta do modelo físico construído, com implementação da solução de QMD c300d400: a) paralelo à linha de costa; b) oblíquo à linha de costa

3 | Condicionantes locais

3.1 Generalidades

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões relativamente à evolução morfológica da zona de estudo que podem ser condicionadoras da viabilidade e funcionalidade do quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira.

Essas conclusões são essencialmente suportadas pela análise efetuada no Relatório 7 (capítulos 2 e 4; Freire *et al*., 2020). De referir que o estudo da variabilidade interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira e o estudo da variabilidade sazonal do perfil transversal de praia (secções 4.2 e 4.4 do Relatório 7) apenas contém a análise dos dados disponíveis até 2020. Uma vez que, entretanto, foram adquiridos novos dados no âmbito do Programa COSMO da Agência Portuguesa do Ambiente[3], o presente capítulo reflete essa nova informação assim como elementos adicionais relacionados com os impactes, no setor costeiro Costa Nova – Vagueira, da alimentação artificial realizada em 2020 com injeção de aproximadamente 2,4 milhões de metros cúbicos na frente urbana da Costa Nova. No Anexo II apresentam-se os dados e a sua análise em detalhe. A metodologia seguida é a já descrita no Relatório 7.

Integram-se aqui ainda os resultados obtidos pela estação de vídeo-monitorização costeira instalada na frente urbana da praia da Vagueira, que permitiram caracterizar a variabilidade sazonal da barra submersa (secção 4.2 do Relatório 9; Santos et *al*., 2020).

3.2 Variabilidade interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira

A morfologia dos fundos adjacentes à praia da Vagueira é caracterizada por uma acentuada variabilidade morfológica resultado da presença de um sistema de barras submersas com maior desenvolvimento, sobretudo a cotas acima de -4 m (ZH), em resultado da dinâmica transversal e longitudinal à linha de costa do sistema de barras.

Para o período entre julho de 2018 e março de 2021 verifica-se uma tendência evolutiva interanual no sentido da erosão, embora pouco expressiva e com tendência decrescente. Naquele período a taxa de erosão foi de 90×10^3 m^3/ano, correspondente a uma variação média da cota do fundo de 0,04 m/ano. Esta evolução, a cotas menos profundas (acima de -4 m ZH), resulta da migração das barras submersas nos sentidos transversal e longitudinal à linha de costa. Abaixo dessa cota a taxa de evolução dos fundos apresenta tendência erosiva entre 2018 e 2020, mais acentuada entre as cotas -6 m e -8 m (ZH), passando a tendência de acreção entre junho 2020 e março 2021.

[3] https://cosmo.apambiente.pt/

3.3 Variabilidade do perfil transversal de praia

Nos últimos 8 anos (entre julho 2013 e março 2021) a praia da Vagueira mostra acentuada variabilidade morfológica ao longo do perfil transversal, até profundidades de cerca de -8 m (ZH) (que corresponde à distância da linha de costa de aproximadamente 700 m), valor compatível com a profundidade de fecho. Recorde-se que com base em dados anteriores já se tinha inferido para a profundidade de fecho nesta zona o valor de -9 m (ZH) (Relatório 8, Oliveira *et al*., 2020).

No domínio submerso, destaca-se a elevada dinâmica, quer horizontal, quer vertical, do sistema de barras que se desenvolve no perfil transversal principalmente entre as cotas -1 e -6 m (ZH). Este sistema pode incluir até duas barras em simultâneo, interna e externa, localizadas a cerca de 180-300 m e 300-550 m da linha de costa (aqui definida como a base da duna ou da defesa aderente). Verifica-se uma tendência de sazonalidade na mobilidade vertical do sistema de barras, em que a sua elevação máxima e mínima ocorrem, geralmente, em situações de inverno e verão marítimo, respetivamente.

Em termos evolutivos sazonais, a praia da Vagueira apresenta relativa estabilidade morfológica no período analisado, com capacidade de recuperação do perfil durante a situação de verão marítimo. O perfil limitado pela estrutura de proteção aderente apresenta valores inferiores e maior variabilidade dos geoindicadores largura, elevação e volume médios que o perfil limitado superiormente por duna. **No entanto, neste setor, a praia mostra uma tendência evolutiva contínua de acréscimo da sua largura e elevação médias em situação de final de verão marítimo, o que favorece o seu valor para uso balnear.**

De referir ainda os programas regulares de alimentação artificial realizados na Costa Nova (entre o 3.º e 5.º esporão) no âmbito das intervenções realizadas pela Administração do Porto de Aveiro e a alimentação de saturação da deriva litoral realizada em 2020 pela Administração do Porto de Aveiro, S.A., e Agência Portuguesa do Ambiente no mesmo local (aprox. 2.4 Mm^3). Na sequência desta última intervenção foi observado um deslocamento da isobatimétrica dos -10 m (ZH) para o largo, na frente urbana da Vagueira em cerca de 40 m (junho de 2020 - setembro de 2020) e de 60 m (setembro de 2020 - janeiro de 2021) (Mendes *et al*., 2021). Este resultado sugere que esteja em curso um processo de redefinição do perfil ativo da praia submersa em sequência a esta intervenção, no sentido de promoção de acreção sedimentar, a qual pode beneficiar, em volume, o sistema de barras submersas.

3.4 Síntese

- Do conjunto dos dados e períodos analisados, destaca-se que o setor em estudo tem uma elevada dinâmica sedimentar, pela variabilidade interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira e pela variabilidade longitudinal das taxas de evolução da linha de costa, dependente dos forçamentos oceanográficos (eventos extremos) e das fontes sedimentares

(intervenções de alimentação artificial). Estas dependências são também observadas na localização e dinamismo (transversal, longitudinal e vertical) das barras submersas, o que deverá ser tido em consideração na construção de um quebra-mar destacado na Vagueira;

- Embora a linha de costa tenha sido fixada artificialmente na frente urbana da praia da Vagueira há várias décadas, é fundamental a manutenção dos elementos morfológicos que delimitam o contacto com a praia, a norte e a sul da referida frente urbana, em concreto, o cordão dunar/dique arenoso, para que a largura da barreira no futuro não faça perigar a sua continuidade longitudinal. Para essa manutenção é expectável que programas regulares de reforço do cordão dunar, além de intervenções de saturação da deriva (por intermédio de alimentações artificiais a realizar na praia submersa a sul dos molhes do porto de Aveiro), sejam realizados com o objetivo de evitar reduções de largura da barreira que coloquem em perigo a sua continuidade longitudinal;
- Qualquer obra que venha a ser realizada, como um quebra-mar destacado, deve ter em conta os elevados volumes de transporte sólido necessários para a manutenção da deriva litoral, não só a barlamar como a sotamar da Vagueira, e expectáveis alterações à dinâmica sazonal e interanual dos fundos;
- Uma das soluções analisadas consiste num QMD a uma distância de 400 m da posição referente ao nível médio do mar (+2,17 m ZH), com cota de coroamento a +0,34 m (ZH). **Assim, a localização deste QMD** (e de outras soluções alternativas, vide Capítulo 2) **estará claramente na zona de desenvolvimento das barras submersas**, sendo que a cota de coroamento inicialmente preconizada é superior à cota máxima registada para a barra interna (-0,33 m ZH). **Este facto aponta para um potencial conflito entre a implantação do QMD e a mobilidade natural do sistema de barras submersas que podem ter uma elevada expressão vertical e beneficiar de intervenções de saturação da deriva a norte.**

4 | Redução do risco de galgamentos costeiros

4.1 Objetivos e metodologia

No que se refere à redução do risco de galgamento, o objetivo do estudo foi verificar qual ou quais das alternativas de QMD conduziam a uma redução do nível de galgamento sobre a estrutura de defesa frontal aderente e, consequentemente, a uma redução do risco de galgamentos costeiros no aglomerado urbano da Praia da Vagueira.

Para tal, avaliou-se o efeito na redução de galgamentos na estrutura de defesa longitudinal aderente das diferentes soluções de QMD propostas (Figura 2.1 e Quadro 2.2). Essa avaliação foi feita através do cálculo de séries temporais do caudal médio galgado, para a situação atual e para as várias configurações de QMD. Com base nestas séries e tendo em conta as características da estrutura galgada, da zona abrigada por esta (edifícios, equipamento, etc.) e da natureza das atividades aí desenvolvidas, avaliou-se o risco de galgamento. A comparação dos resultados permitiu avaliar a(s) configuração(ões) de QMD com melhor desempenho na redução do risco de galgamento e comparar com a situação atual. Adicionalmente, avaliou-se, de forma expedita, em modelo físico, o galgamento para algumas condições de agitação e níveis de maré gravosas, de forma a confirmar os resultados obtidos.

As séries temporais de caudal médio galgado foram obtidas para as condições de agitação marítima de 1979 a 2018 na batimétrica -12 m (ZH) e correspondente nível de mar, em perfis transversais afastados entre si de, no máximo, 100 m, cobrindo os 620 m entre o esporão a sul da Praia da Vagueira e o limite norte da estrutura de defesa aderente que protege esta zona, podendo esse afastamento variar consoante a geometria do QMD em estudo (Figura 4.1).

Em cada perfil, foram feitos cálculos para duas configurações de fundo provenientes dos levantamentos efetuados no âmbito do Programa COSMO em julho/2018 e junho/2019. O caudal médio galgado foi calculado com base na formulação de Mase *et al*. (2013) e Masatoshi *et al*. (2019) para a situação atual e para as várias configurações do QMD em estudo e calculou-se o valor máximo do caudal médio galgado e o número de eventos com galgamentos superiores aos limites admissíveis para a circulação de pessoas, circulação de veículos, na zona protegida pela defesa aderente (edifícios, equipamento, etc.) e na estrutura de defesa aderente. De referir que as fórmulas utilizadas não têm em conta a direção da agitação marítima e os perfis de fundo utilizados não têm em conta as alterações que irão sofrer pela presença do QMD, qualquer que seja a configuração considerada.

A avaliação do grau de risco de galgamento foi efetuada considerando o risco como o produto do grau de probabilidade de ocorrência de um galgamento médio superior a um determinado valor-limite, considerado admissível, e o grau de consequências associadas à transposição desse valor-limite. O estabelecimento dos caudais médios críticos de galgamento tem em conta as características da zona abrigada e a natureza das atividades aí desenvolvidas. Estes limiares são estabelecidos com base em

informação sobre o local de estudo e nas recomendações de EurOtop de 2007 e 2018 (Relatório 8, Oliveira *et al*., 2020).

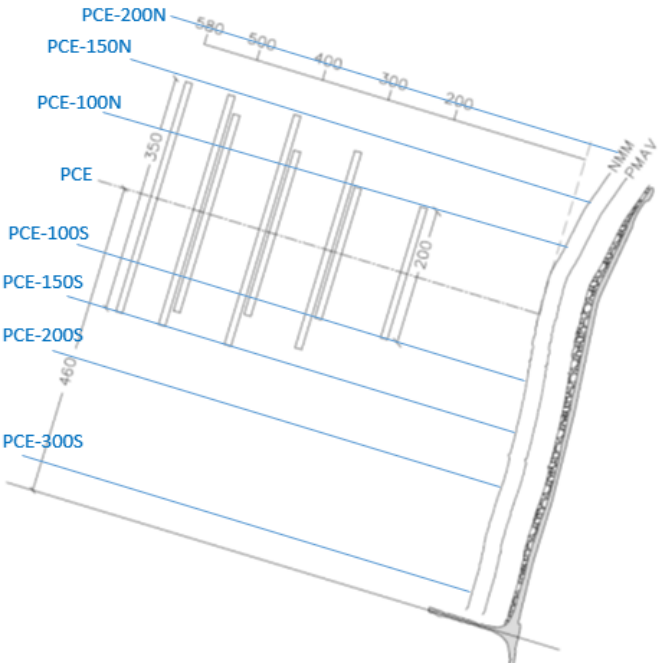


Figura 4.1 – Esquema da localização dos perfis para o cálculo de galgamento e opções de QMD

4.2 Risco de galgamento

Para a **situação atual obteve-se um risco insignificante para todos os perfis (i.e., não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco)**, exceto para o perfil 100N e para caudais médios galgados críticos superiores a 0,1 l/s/m (e inferiores a 1 l/s/m), com perfil de fundo da praia de 2018, onde o risco é reduzido, i.e., o risco pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo. Nos perfis a S de PCE não se obtiveram galgamentos e o caudal máximo obtido foi de 4,7 l/s/m no perfil 100N. Este resultado está de acordo com os dados fornecidos pela Câmara de Vagos que referem que, após as intervenções de 2015, apenas se verificam galgamentos nas situações de conjugação de níveis de maré elevados com condições de agitação especialmente energéticas e associadas a vento (Relatório 7, Freire *et al*., 2020). A análise dos resultados mostrou que o perfil de fundo influencia fortemente o galgamento.

Para as diferentes soluções de QMD verificou-se que qualquer uma delas conduz a uma redução significativa do caudal médio galgado máximo, Figura 4.2, e do número de eventos obtidos para cada limiar de caudal médio considerado, Figura 4.3. Tal como na situação atual, não se obtiveram galgamentos nos perfis a sul do PCE.

A configuração que conduziu conjuntamente a um menor número de eventos de galgamento para os vários limites de caudal médio galgado e menor valor do máximo do caudal médio galgado foi a c300d300.

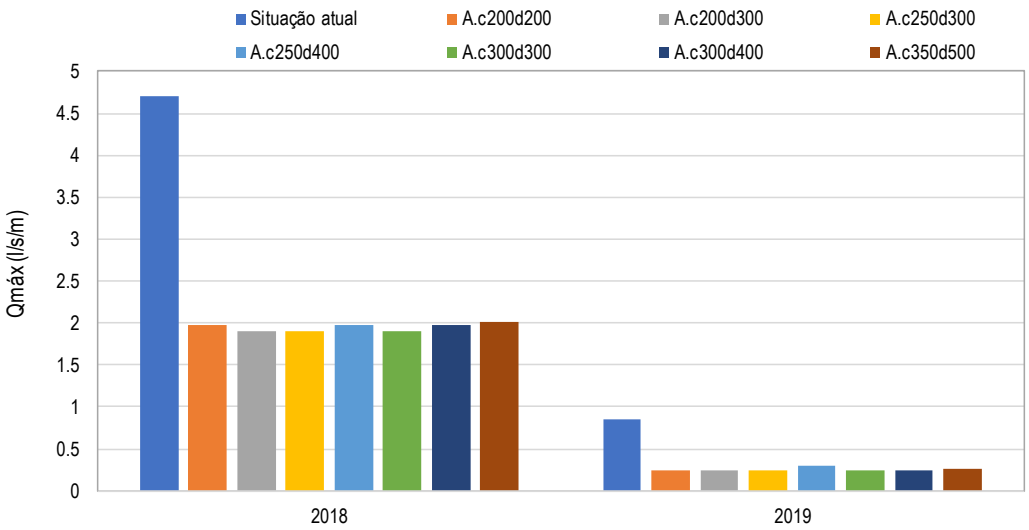


Figura 4.2 – Caudal médio galgado máximo para a situação atual e para cada configuração do QMD, com os perfis de fundo da praia adquiridos em 2018 e 2019

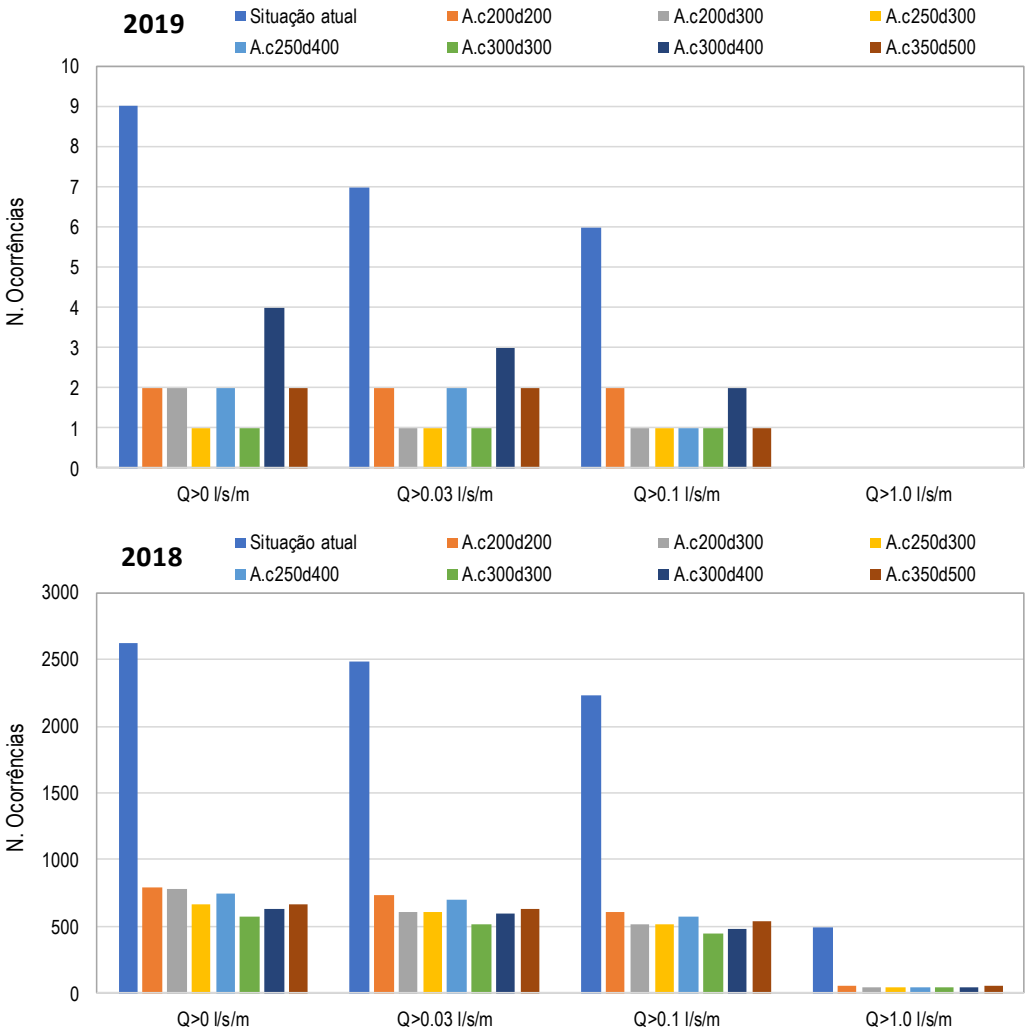


Figura 4.3 – Número de eventos de galgamento obtidos para a situação atual e para cada configuração do QMD, com os perfis de fundo da praia adquiridos em 2019 (cima) e 2018 (baixo)

As configurações que conduzem a um menor número de eventos de caudais médios galgados superiores a 0,1 l/s/m e 1 l/s/m, cuja consequência é de grau 2, e a um valor menor do caudal médio galgado máximo são as configurações com uma distância à linha de costa de 300 m e com comprimento entre 200 m e 300 m.

O risco obtido manteve-se ou reduziu-se face à situação atual, com as diferentes configurações do QMD a apresentarem risco insignificante em todos os perfis, não sendo preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.

Também nos ensaios em modelo físico realizados no LNEC, à escala 1:65 (Relatório 13, Mendonça *et al*., 2022), se obtiveram, para as condições de agitação ensaiadas, galgamentos nulos na estrutura de defesa longitudinal aderente, quer nos ensaios para a situação atual, quer com QMD. Estes ensaios foram realizados para um QMD com comprimento, L_{qm}, igual a 300 m, distância à linha de costa, L_d, igual a 400 m, e cota de coroamento, h_c, igual a +0,34 m (ZH) e estudaram-se duas soluções: com QMD paralelo à costa e rodado a 45^0 (QMD 45^0). Foram ensaiados níveis de maré de PM e PM com sobrelevação, para uma gama de períodos de pico entre 12 s e 18 s, simulando-se a maior altura de onda significativa possível. Note-se que, devido ao facto de a escala ter sido definida tendo em conta as condições a simular nos ensaios de morfodinâmica e de *surf*, as condições de agitação ensaiadas para o caso do galgamento nem sempre correspondem às condições mais gravosas que podem ocorrer no local, e consequentemente, às condições associadas aos galgamentos.

a)

b)

Figura 4.4 – Ensaios: a) sem QMD; b) com QMD 45 ^{0}. Agitação irregular: Tp=16 s; Hs= 3,0 m. Aspeto do espraiamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente

4.3 Síntese

- **Para a situação atual obteve-se um risco de galgamento insignificante ao longo de toda a defesa longitudinal aderente (i.e., não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco)**, exceto na zona coincidente com a curvatura daquela estrutura, onde se obteve risco reduzido (i.e., o risco pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo);
- Para as diferentes soluções de QMD, verificou-se que qualquer uma delas conduz a uma redução significativa do caudal médio galgado máximo e do número de eventos de galgamento. O risco mantém-se ou reduz-se face à situação atual, não sendo preciso levar a cabo medidas de controlo de risco;
- As configurações de QMD que conduzem a menor frequência e menor caudal de galgamento são aquelas com uma distância à linha de costa de 300 m e com comprimento entre 200 m e 300 m;
- A solução de QMD c300d400 também apresenta valores reduzidos do caudal médio galgado e do número de eventos de galgamento, com risco de galgamento insignificante em toda a defesa aderente.

5 | Promoção do acréscimo da praia e reforço da defesa contra a erosão costeira

5.1 Objetivos e metodologia

Neste capítulo apresenta-se uma síntese da análise efetuada para a caracterização e definição de parâmetros de dimensionamento e localização de um QMD em frente à praia da Vagueira com o objetivo de promover um eventual acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente, reforçando a defesa natural contra a erosão e inundação costeira e fomentando o seu maior usufruto pela população e segurança balnear. Especificamente, tem-se como critério de referência a largura mínima ($W_{b,min}$) da praia acima da cota de PMAV (+3,55 m ZH) ser igual a 35 m, numa extensão igual à distância do extremo norte do QMD ao esporão da Vagueira.

Para execução desta análise recorreu-se a duas metodologias complementares, modelação numérica e modelação física. No âmbito da modelação numérica, simulou-se o efeito i) de um conjunto de diferentes configurações de QMD na evolução morfológica da linha de costa à escala espaço/temporal da ordem de dezenas de quilómetros/décadas, doravante designada por longo prazo, e ii) de um QMD na evolução morfológica à escala espaço/temporal da ordem de centenas/dezenas de metros/dias-semanas, doravante designada por curto-médio prazo. No âmbito da modelação física, simulou-se o efeito de duas configurações de QMD na evolução morfológica à escala espaço/temporal da ordem de centenas/dezenas de metros/dias-semanas, também curto-médio prazo.

A modelação numérica foi efetuada com recurso aos modelos numéricos que constam no Quadro 5.1 (descrição detalhada nos Relatórios 8 e 10, Oliveira *et al*., 2020 e Oliveira, 2021) e a modelação física com recurso ao tanque de ondas experimental T07 do DHA-LNEC (descrição detalhada nos Relatórios 12 e 13, Sancho *et al*., 2021 e Mendonça *et al*., 2022). O efeito das soluções de QMD foi caracterizado através da comparação de testes de evolução morfológica com QMD e sem QMD, situação de referência, para cada metodologia.

Quadro 5.1 – Esquema da abordagem metodológica aplicada para análise da evolução morfológica com e sem QMD

Metodologia	Escala espaço/temporal	Modelo
Modelação numérica	longo prazo	LITMOD
		LTC
	curto-médio prazo	Delft3D
Modelação física	curto-médio prazo	Tanque de ondas

No âmbito da modelação numérica a longo prazo (horizonte temporal de 20 anos) efetuou-se:

a) Avaliação do efeito de dez configurações de QMD (Figura 2.1 e Quadro 2.2) na evolução da linha de costa com recurso a dois modelos numéricos, o LITMOD e o LTC, que utilizam

diferentes simplificações dos processos costeiros determinantes nos fluxos longilitorais e diferentes métodos de seleção das séries de agitação marítima representativa;

b) Análise de sensibilidade dos resultados à formulação de cálculo do coeficiente de transmissão da agitação marítima sobre o QMD;

c) Definição de dez indicadores de eficiência do desempenho do QMD, baseados nos resultados da posição das linhas de costa ao fim de 20 anos e caudais sedimentares anuais médios, para o conjunto dos 2 modelos numéricos;

d) Escolha da melhor solução de configuração do QMD (c300d400), genericamente, do ponto de vista de maior acréscimo de areal na praia da Vagueira e de menor erosão a sotamar (para sul).

No âmbito da modelação numérica a curto-médio prazo (horizonte temporal de 1 mês ou menor, conforme o caso) efetuou-se:

e) Validação: e.1) do transporte longitudinal para condições de hidrodinâmica médias; e e.2) das condições de hidrodinâmica observadas no período de dois ciclos de maré no âmbito da campanha de campo efetuada em 14-15/outubro/2019 (Relatórios 5 e 6, Silva *et al*., 2019, 2020);

f) Avaliação do impacte do QMD de referência (correspondente à melhor solução da modelação a longo prazo e de redução do risco de galgamento – c300d400) na morfologia do fundo adjacente em condições médias de hidrodinâmica;

g) Estimativa da sensibilidade da resposta morfológica aos parâmetros altura e direção de onda;

h) Avaliação do efeito da elevada variabilidade morfológica observada na zona de estudo na evolução induzida pelo QMD de referência na zona envolvente sob ação de condições médias de hidrodinâmica;

i) Simulação do caso com o QMD de referência sobre a configuração de fundo da modelação física à escala do protótipo para análise da concordância entre resultados numéricos e experimentais e robustecimento das conclusões.

No âmbito da modelação física a curto-médio prazo (horizonte temporal de ~7-18 dias) efetuou-se:

j) Avaliação do impacte do QMD de referência (c300d400) e de um QMD análogo, mas oblíquo 45° relativamente à linha de costa, na morfologia do fundo adjacente e da praia, em condições de onda geradoras de transporte litoral médio;

k) Quantificação das dimensões do saliente formado devido à presença dos QMD de referência e oblíquo;

l) Quantificação do valor médio do coeficiente de transmissão de agitação marítima, para o QMD de referência.

No âmbito das metodologias complementares aplicadas foram consideradas as condições de fundo e sedimentológicas sintetizadas no Quadro I.2 (Anexo I). No âmbito das metodologias complementares foram testadas as condições de agitação marítima e nível do mar sintetizadas no Quadro I.3 (Anexo I).

5.2 Redução do risco de erosão e promoção do acréscimo de praia

Da análise efetuada com recurso à **modelação numérica de longo prazo (horizonte de 20 anos)** faz-se a seguinte síntese dos resultados principais e conclusões:

- Todas as 10 configurações de QMD ensaiadas (Quadro 2.2) induzem o crescimento de um saliente, cuja largura máxima varia, aproximadamente, entre 10 e 60 m, dependendo das características geométricas do QMD e do coeficiente de transmissão;
- Menores valores do coeficiente de transmissão, K_t, (dependendo, essencialmente, da altura de bordo livre) são favoráveis ao crescimento de maiores salientes, com consequente aumento da erosão a sul do esporão da Vagueira;
- São os cenários de maior comprimento da estrutura, L_{qm}, e maior distância à linha de costa, L_d, que representam o melhor balanço entre área perdida e ganha;
- O critério de pré-dimensionamento relacionado com a largura mínima de praia ($W_{b,min}$>35 m, vide Quadro 2.1) não é cumprido na maioria dos cenários simulados com o modelo LITMOD, mas é cumprido nas simulações com o modelo LTC num comprimento de praia com somente cerca de 70 m de extensão, i.e., com uma ordem de grandeza inferior à requisitada;
- O critério de erosão máxima no troço Vagueira-Areão (aplicável pelo período necessário à recuperação do transporte litoral para valores que ocorreriam sem o QMD) é cumprido, não sendo expectáveis recuos superiores à taxa máxima admitida (-4,44 m/ano);
- As configurações de QMD c300d400, c300d500, c350d500 e c350d400 são as mais equilibradas no respeitante aos resultados globais dos dois modelos;
- A solução c300d400 é a que melhor compatibiliza os resultados da redução do risco de erosão e de promoção do acréscimo de praia com o da redução do risco de galgamento.

Da análise efetuada com recurso à **modelação numérica de curto-médio prazo** (horizonte de 1 mês) faz-se a seguinte síntese dos resultados principais e conclusões:

- O QMD de referência, c300d400, promove a formação de um saliente para os cinco estados de onda estacionária testados, que incluem condições de hidrodinâmica médias e ondas com ±30° de obliquidade relativamente à normal à linha de costa, na profundidade de fecho. Contudo, a localização e dimensão do saliente variam em resposta às características da onda incidente (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 do Relatório 8).

- O QMD de referência favorece a formação de correntes de circulação divergentes e o aumento de gradientes de fundo, com potencial formação de canais em ambas as direções, transversal e longitudinal, na zona adjacente. O aumento da altura de onda aprofunda estes canais. Sob ação da onda mediana e fundo representativo de condições médias locais, o QMD gera correntes transversais sobre si e junto à linha de costa que podem alcançar valores da ordem de 0,9 m/s, e aumenta as correntes longitudinais em redor de si mesmo para valores máximos da ordem de 0,5 m/s. Note-se que nestas condições, sob o ponto de vista de atividade balnear, a magnitude das correntes é elevada, podendo pôr em causa a segurança de banhistas.
- A elevada dinâmica sedimentar na zona de estudo e forte variabilidade morfológica acima da cota -8 m (ZH), não só dificulta a previsibilidade do impacte do QMD na morfologia adjacente, como também favorece a mobilidade dos canais devidos às correntes divergentes geradas pelo QMD, constringindo, assim, a estabilidade do saliente e da permanência do aumento da largura da praia (Figura 2.18 do Relatório 10).

Da análise efetuada com recurso à **modelação física de curto-médio prazo** (horizonte temporal de 7-18 dias) faz-se a seguinte síntese dos resultados principais e conclusões:

- O QMD de referência, c300d400, induz a formação de um saliente, incipiente, simétrico relativamente ao eixo de simetria do QMD. Este saliente tem uma largura máxima, ao nível médio de água, da ordem de 8 m, à escala do protótipo;
- O QMD oblíquo 45° à praia conduz à formação de dois salientes incipientes na zona protegida. Estes salientes têm larguras transversais máximas da ordem de 10 m, à escala do protótipo;
- O coeficiente de transmissão médio (correspondendo ao índice de agitação médio na zona de sombra do QMD) para o QMD referência é igual a 0,77. Este valor baixa para 0,74 para o QMD oblíquo;
- Considerando os efeitos de escala do modelo reduzido e em particular a distorção de escalas vertical-horizontal, o saliente correspondente em protótipo ao obtido experimentalmente teria um declive mais suave e maior largura transversal (com valores da ordem de 15 a 20 m).

5.3 Síntese

- Todas as configurações de QMD ensaiadas numericamente induzem o crescimento de um saliente, cuja largura máxima varia, aproximadamente, entre 10 e 60 m, dependendo das características geométricas do QMD, do coeficiente de transmissão, K_t, e das características da agitação marítima incidente;
- A solução de QMD c300d400, paralelo à costa, é a que melhor compatibiliza os resultados numéricos da redução do risco de erosão e promoção do acréscimo de praia com o da

redução do risco de galgamento (apesar de, atualmente, insignificante, vide Capítulo 4), tendo sido explorada em modelo físico;

- **O desenvolvimento do saliente na linha de costa depende fortemente do coeficiente de transmissão, K_t, sobre o QMD. Os resultados em modelo reduzido indicam $K_t \approx 0,77$, para uma estrutura com a cota de coroamento, h_c, igual a +0,34 m (ZH). Este valor do coeficiente de transmissão é mais elevado que o desejável** (vide Quadro 2.1). **Nestas condições, estima-se o desenvolvimento de um saliente, para o QMD de referência c300d400, da ordem de 10 a 20 m** (considerando os resultados numéricos e de modelação física, e as incertezas que lhes estão associadas);
- O QMD c300d400 oblíquo 45° à praia conduz à formação de dois salientes na zona protegida, de dimensões semelhantes ao saliente único formado com a solução de QMD paralelo à praia;
- **O QMD de referência pode favorecer a formação de correntes de circulação de elevada magnitude na zona adjacente, que poderão pôr em causa a segurança de banhistas**;
- A forte variabilidade morfológica à profundidade de implantação do QMD c300d400 (-7<z<-4 m ZH) altera o impacte do QMD na morfologia adjacente e favorece a mobilidade dos canais formados pelas correntes geradas pelo QMD, limitando, assim, o crescimento e estabilidade do saliente.

6 | Promoção de ondas de *surf* de referência

6.1 Objetivos e metodologia

Nesta secção analisa-se a capacidade do QMD em melhorar as condições para a prática do *surf* na zona em frente à praia da Vagueira. De uma forma genérica, pretende-se que esta estrutura induza ou melhore o tipo de rebentação, favoreça o aumento da altura de onda, provocando a rebentação num dado local, e garanta que esta persista de forma gradual ao longo da crista da onda, num comprimento suficientemente longo.

Para a execução desta análise recorreu-se a duas metodologias complementares, modelação física e modelação numérica.

Os ensaios em modelo físico foram realizados nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, no tanque de ondas irregulares, a uma escala geométrica de 1:65 (Relatório 13, Mendonça *et al*., 2021). Foram realizados ensaios para três casos: situação atual (sem QMD), com o QMD paralelo à praia (QMD 0°) e rodado 45° relativamente à linha de costa (QMD 45°). Foram realizados ensaios com agitação irregular e regular para o nível médio de água, NMM (+2,17 m ZH), e rumo na batimétrica de aproximação igual a 296° N.

Adicionalmente, utilizou-se o modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2004) na simulação da propagação de ondas e sua adequabilidade para a prática de *surf* em frente à praia da Vagueira, para os três casos simulados em modelo físico: sem QMD, QMD 0° e QMD 45° (Relatório 13 e Anexo IV do presente relatório). Este modelo foi aplicado para as mesmas condições de agitação e nível de maré ensaiadas em modelo físico, mas à escala do protótipo, e foi comparado com os resultados dos ensaios, obtendo-se boa concordância de resultados (Figura IV.2).

Para analisar a capacidade do QMD melhorar as condições para a prática do *surf* recorreu-se ao cálculo de parâmetros de surfabilidade, que permitem verificar o tipo de rebentação e as suas características e, com base neles, inferir da adequabilidade para a prática de *surf*, assim como identificar o tipo de surfistas a que se destina (principiantes, standards ou profissionais). Os ensaios de modelo físico permitem inferir alguns desses parâmetros de surfabilidade, nomeadamente: a localização, comprimento e tipo de rebentação. Com o modelo numérico é possível quantificar outros parâmetros de surfabilidade, como o número de Iribarren e o ângulo de rebentação, que possibilitam, respetivamente, a identificação do tipo de rebentação (mergulhante, progressiva ou de fundo), e se é adequada à prática do *surf*, e o nível de dificuldade, exigido aos surfistas, na execução de manobras. Consideram-se como boas condições para o *surf*: i) rebentação mergulhante, que se traduz num valor do número de Iribarren entre 0.4 e 2.0; ii) linha de rebentação com uma extensão superior a 100 m e; iii) ângulo de rebentação entre 30º e 50º, adequado para surfistas experientes.

6.2 Promoção das ondas de *surf*

Nesta secção resumem-se os principais resultados obtidos no que se refere à análise da promoção de ondas adequadas à prática de *surf* com a construção de um QMD, com recurso à modelação física e numérica.

Para a situação atual, **sem QMD**, a rebentação dá-se junto à linha de costa, afastando-se desta, mas mantendo sensivelmente o mesmo comprimento, com o aumento da altura de onda (Figura 6.1-a1 e Figura 6.2-c1). A rebentação é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática de *surf*. A direção de onda, paralela à linha de costa, e a rebentação do tipo progressivo, originam ângulos de rebentação próximos de 0°. Como a rebentação do tipo progressivo ocorre ao longo de uma distância suficientemente longa (Figura IV.5a), existem condições para a prática do *surf* adequadas para surfistas iniciantes (Figura 6.1-a1).

O QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD.

Para o caso com **QMD 0°**, verifica-se que a rebentação de onda se localiza ao longo da estrutura e tanto mais a barlamar desta quanto maior a altura de onda. A rebentação é do tipo mergulhante; no entanto, ocorre simultaneamente ao longo de toda a estrutura, não sendo adequada para a prática de *surf* (Figura 6.1-a2, Figura 6.2-c2).

Para o caso com **QMD 45°**, a rebentação dá-se sobre a estrutura, com um comprimento da linha de rebentação inferior ao do caso QMD 0°, mas com rebentação do tipo mergulhante e que ocorre de forma gradual, sendo adequada para a prática de *surf*. O ângulo de rebentação varia entre 40°-50°, adequado à prática de *surf* por surfistas experientes e profissionais. A rebentação inicia-se sobre a extremidade norte do QMD, ocorrendo mais a barlamar deste, com o aumento da altura de onda. A linha de rebentação ocorre em cerca de metade da estrutura, com um comprimento de aproximadamente 150 m (Figura 6.1-a3, Figura 6.2-c3).

No que se refere à linha de rebentação junto à costa, quer no caso do QMD 0° como no caso QMD 45°, verifica-se que o seu comprimento é inferior ao caso sem QMD, passando a ocorrer sobretudo fora da zona de sombra da estrutura (Figura 6.2-a2, b2, a3 e b3). Tal pode indiciar que com QMD 0° ou QMD 45° as condições para a prática de *surf* junto à costa vão piorar.

Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, para os casos ensaiados, obtiveram-se condições de rebentação adequadas à prática de *surf* quer no caso sem QMD (surfistas iniciantes) quer no caso QMD 45° (surfistas experientes e profissionais).

Figura 6.1 – Ensaios físicos: variação da superfície livre e posição da linha de rebentação. a1) sem QMD; a2) QMD 0°; a3) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; Hs=2,0 m, NMM

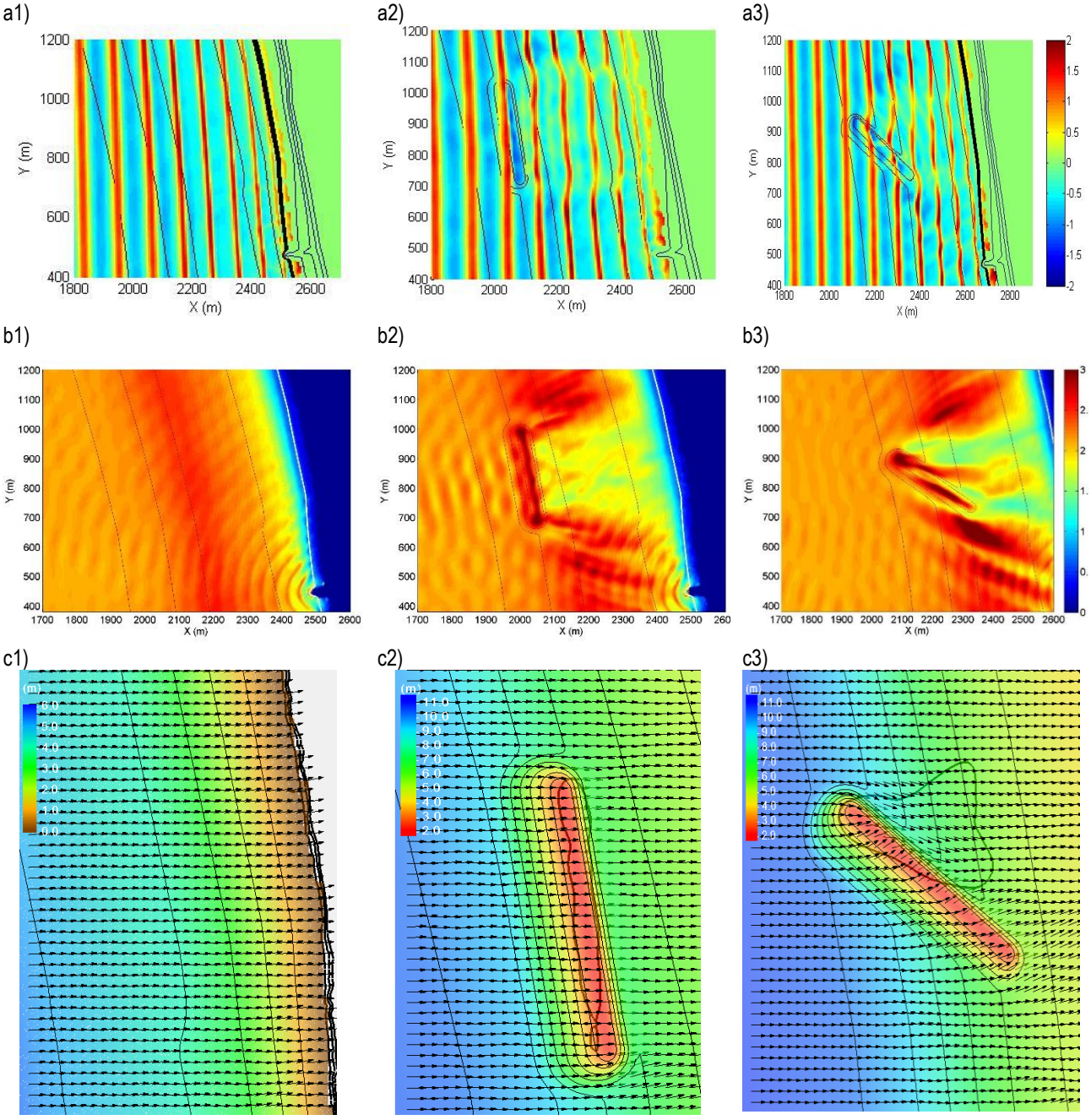


Figura 6.2 – Resultados numéricos: a) variação da superfície livre, b) altura de onda significativa, c) direção de onda e posição da linha de rebentação: 1) sem QMD, 2) QMD 0°; 3) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; Hs=2,0 m, NMM

6.3 Síntese

- Para a situação atual, sem QMD, a rebentação dá-se junto à linha de costa e é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática de *surf*. Ângulos de rebentação próximos de 0° e uma rebentação do tipo progressivo, que ocorre ao longo de uma distância suficientemente longa, proporcionam condições de *surf* adequadas para surfistas iniciantes;
- Para o caso com QMD 0°, verifica-se que a rebentação se localiza ao longo da estrutura e é do tipo mergulhante. Os ângulos de rebentação são próximos de 0°, não sendo adequados para a prática de *surf*. Junto à costa as condições de *surf* poderão piorar na zona de sombra do QMD;
- Para o caso com QMD 45°, a rebentação dá-se sobre cerca de metade da estrutura e é do tipo mergulhante. Os ângulos de rebentação variam entre 40°-50°, sendo adequados à prática de *surf* por surfistas experientes e profissionais. No entanto, as condições de *surf* junto à costa poderão piorar na zona de sombra do QMD.

7 | Análise custo-benefício

7.1 Objetivo

Neste capítulo apresenta-se uma síntese da análise custo-benefício de 4 alternativas para a construção de um QMD na praia da Vagueira (secção 7.2), sem inclusão das componentes relativas à prática de *surf.* Adicionalmente, apresenta-se uma síntese da análise do valor recreativo do *surf* associado a um QMD naquele local, que provoque melhoria na qualidade de ondas surfáveis (secção 7.3). Na secção 7.4 os resultados dos respetivos estudos são conciliados.

7.2 Análise custo-benefício do quebra-mar destacado

Para avaliar a viabilidade económica de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira, foi realizada uma análise custo-benefício de 4 alternativas para a construção de QMD na praia da Vagueira (ver Relatório 11, Pombo *et al*., 2022). Para comparar e avaliar os cenários, o valor atual líquido (*VAL*) foi calculado com base nos custos e benefícios atualizados ao longo de 20 anos de projeção; a robustez da viabilidade económica esperada foi avaliada com base numa análise de sensibilidade em relação aos componentes de custos e benefícios. Os custos incluem os custos de investimento inicial e os custos periódicos de manutenção; os benefícios incluem os benefícios decorrentes da mitigação dos fenómenos de erosão e inundação (avaliados com base nos resultados dos modelos LITMOD e LTC). As opções selecionadas variam no comprimento da estrutura (c) e na distância à linha de costa (d), numa combinação de 4 cenários designados c200d200, c300d400, c350d400 e c350d580.

Os resultados mostram que a construção do QMD poderá vir a constituir um impacto positivo na zona urbana da praia da Vagueira, com relevantes benefícios económicos face à situação de não intervir. Os benefícios decorrentes da mitigação dos fenómenos de erosão e inundação representam, respetivamente, 2/3 e 1/3 dos benefícios totais. Demonstra-se também que, para todas as configurações estudadas, os maiores benefícios concentram-se na praia da Vagueira, enquanto as áreas vizinhas sofrem de défice sedimentar. Refira-se a elevada incerteza na estimativa do custo de investimento inicial e dos custos periódicos de manutenção do QMD, na ausência do projeto da obra.

Conclui-se que a intervenção alternativa c200d200 parece apresentar uma solução viável relativamente pouco dispendiosa, mas também com benefícios relativamente baixos. A solução c300d400 apresenta uma solução alternativa potencialmente viável, com maiores custos, mas também com benefícios mais acentuados. No entanto, a viabilidade do QMD deveria ser comparada com e/ou em combinação com outras medidas, nomeadamente operações de alimentação artificial de sedimentos. Eventualmente, também se poderiam ainda considerar outras configurações (*i.e.*, distância, comprimento e orientação) do QMD.

7.3 Valor potencial do *surf* do quebra-mar destacado

Para estimar os potenciais benefícios com a atividade do *surf*, foi realizado um estudo sobre o valor do *surf* na praia da Vagueira, particularmente focado na componente recreativa (Coppola, 2020). Neste trabalho foi estimado o benefício que a criação de ondas para o *surf*, por efeito do QMD submerso, poderá representar no usufruto pela população surfista da Vagueira. O estudo foi construído com base no Método de Custo de Viagem (MCV) combinado com dados de Comportamento Contingente (CC) para estimar a procura por recreação de *surf* na Praia da Vagueira, como resultado de uma mudança na qualidade da onda. O estudo foi apoiado pela realização de 124 inquéritos, dos quais 49 presenciais (40%) e 75 *on-line* (60%), em novembro de 2019, que apresentaram dados concretos sobre o projeto e alguns resultados esperados do QMD submerso de forma que os inquiridos - surfistas daquela zona costeira (Vagueira / Costa Nova / Barra) - determinassem o *Willingness-to-pay* (WTP)[4] em função da melhoria das ondas para o *surf*. Neste estudo, a mudança é uma melhoria na qualidade da onda, uma vez que um QMD submerso bem posicionado e orientado poderia proporcionar benefícios adicionais de recreação. Dados de Preferência Revelada (PR) e Preferência Declarada (PD) foram combinados para estimar as mudanças no Excedente do Consumidor (EC) derivadas da melhoria na qualidade da onda.

Nesta metodologia de valoração proposta por Coppola (2020), as ondas atuais na praia da Vagueira apresentam um valor de 3 664 €/surfista/ano – dado um valor de 50€/visita e 73 visitas por surfista por ano (ver Anexo III). Estimando-se para aquela praia um fluxo médio anual de 497 surfistas, as ondas atuais representam um valor de 1 802 737 €/ano. Se a construção do QMD submerso resultasse em ondas ideais para a prática do *surf*, as ondas futuras na praia da Vagueira apresentariam um valor de 6 388 €/surfista/ano – devido a uma maior valoração da onda (de 50€ para 83€/visita) e um maior número de visitas por surfista por ano (de 73 para 77 dias por ano). As ondas futuras representariam, portanto, um valor de 3 143 101 €/ano (+1 340 364 €/ano; +75%).

Os benefícios esperados pela criação de ondas para o *surf* por efeito do QMD submerso devem ser vistos em perspetiva. Primeiro, o valor por visita depende da qualidade da onda gerada pelo QMD submerso; no inquérito foi apresentado um cenário com ondas ideais para a prática do *surf* cuja qualidade, na prática, não pode ser obtida pelo QMD submerso. Segundo, o número de visitas por ano depende do número de vezes que esta onda ideal para o *surf* será criada pelo QMD submerso; o inquérito partiu do princípio de que a onda ideal para o *surf* seria sempre criada, ainda que, na prática, esta qualidade nem sempre possa ser obtida pelo QMD submerso. Terceiro, o número de surfistas na praia da Vagueira depende das condições locais; o inquérito partiu do princípio de que todos os surfistas visitariam sempre a praia da Vagueira, ainda que os surfistas daquela zona costeira frequentem as praias da Vagueira, Costa Nova e Barra. Finalmente, a capacidade do QMD submerso para a atividade do *surf* deve ser tomada em consideração: com ~75 visitas por surfista por ano, 497 surfistas e 365

[4] Disposição de uma pessoa para pagar (geralmente, por um produto ou serviço) no sentido de evitar uma perda ou melhorar determinada circunstância. Neste caso, evitar a perda ou melhorar as ondas para o surf na praia da Vagueira.

dias (surfáveis) por ano, o número de surfistas por dia no QMD submerso seria 102. **Portanto, os benefícios esperados pela criação de ondas para o *surf* por efeito do QMD submerso, aqui apresentados, podem ser considerados valores-limite superiores**.

7.4 Síntese

- Excluindo o valor potencial do *surf*, o cenário c200d200 parece apresentar uma solução viável relativamente pouco dispendiosa, mas também com benefícios relativamente baixos.
- **O cenário c300d400 aparentou ser uma solução alternativa potencialmente viável atendendo às previsões do modelo de linha de costa LITMOD, mas não segundo as previsões do modelo LTC. Considerando que no primeiro caso se utilizaram coeficientes de transmissão otimistas (vide secção 5.3), pode-se agora concluir que este cenário não deverá ser economicamente viável (excluindo o valor do *surf*)**;
- Os cenários considerados na análise custo-benefício não englobavam uma configuração que resultasse em ondas ideais para a prática do *surf*;
- Caso se considere uma configuração de QMD submerso que resulte em ondas propícias para a prática do *surf* e igualmente eficaz sobre os restantes pontos de vista, i.e., uma configuração próxima da c300d400 oblíqua 45° à costa, a mesma terá um custo de semelhante ordem de grandeza e o valor potencial adicional do *surf* reforçaria os resultados obtidos. Nesse caso, o cenário c200d200 seria uma solução viável e o cenário c300d400 poderia também vir a ser viável;
- **A análise efetuada acarreta elevada incerteza na estimativa do custo de investimento inicial e dos custos de manutenção periódica do QMD, os quais só poderão ser melhor estimados em fase de projeto da obra**. Para contornar esta dificuldade, procedeu-se a uma análise de sensibilidade com 4 modelos de custos/benefícios mínimos e máximos para compreender o impacto da estimativa dos custos e benefícios sobre a determinação da viabilidade económica do QMD (detalhado no Relatório 11);
- **A viabilidade de construção do QMD deveria ser comparada com outras medidas, isoladas ou combinadas, nomeadamente, operações de alimentação artificial de sedimentos e alterações das estruturas existentes**.

8 | Discussão de intervenções alternativas ou complementares

8.1 Análise preliminar de intervenções alternativas

No capítulo anterior, que sintetiza a análise custo-benefício, é sugerido que a viabilidade de construção do QMD deveria ser comparada com outras medidas, isoladas ou combinadas, i.e., operações de alimentação artificial de sedimentos e/ou alterações das estruturas existentes. Contudo, ultrapassa o âmbito do presente estudo alargar a análise de viabilidade económica a outras medidas de intervenção, não preconizadas no caderno de encargos.

Por outro lado, relativamente ao risco associado ao galgamento costeiro, concluiu-se que a situação atual tem um risco de galgamento insignificante ao longo de quase toda a defesa longitudinal aderente, com exceção do setor norte da defesa longitudinal aderente, onde o risco é reduzido e pode ser aceite caso se adotem medidas de controlo. Mais ainda, qualquer das intervenções de quebra-mar destacado analisadas conduziam a uma redução do risco de galgamento. Em nenhuma das simulações efetuadas se considerou a contribuição que um aumento da largura de praia teria na redução do risco. Porém, é de antecipar que qualquer intervenção que conduza ao cumprimento do critério de largura mínima de praia ($W_{b,min}$=35 m, vide Quadro 2.1), ou ao aumento da largura de praia para valores próximos dos preconizados neste critério, irá também reduzir o atual, limitado, risco de galgamento.

Na discussão dos resultados e síntese do Capítulo 5 alertou-se para o elevado coeficiente de transmissão ($K_t \approx$0,77) de um quebra-mar destacado submerso com coroamento à cota +0,34 m (ZH). Todas as simulações efetuadas no âmbito deste estudo, quer em modelo numérico quer em modelo físico (vide Relatórios 8, 10, 12 e 13), foram conduzidas para um quebra-mar com essa cota de coroamento. Importa assim analisar, preliminar e qualitativamente, o efeito da elevação da cota de coroamento do QMD.

Adicionalmente, indicam-se, também, algumas alternativas de intervenção e ilustra-se o seu efeito no acréscimo da largura da praia da Vagueira e impacte na linha de costa nos trechos vizinhos que, como se deduz do acima exposto e em capítulos anteriores, é o objetivo técnico com maior dificuldade de cumprimento através da construção de um quebra-mar destacado isoladamente, sem medidas adicionais.

Efetuaram-se assim, neste capítulo, algumas simulações adicionais com o modelo numérico LITMOD, anteriormente usado para estimativa da evolução da linha de costa a longo prazo (secção 5.1, e Relatório 8, Oliveira *et al*., 2020). Nas presentes simulações utilizou-se a mesma configuração do modelo, dados de entrada e condições de fronteira que as utilizadas nas simulações das dez soluções alternativas de quebra-mar destacado já analisadas. Recorde-se que nessas simulações se introduziram, no trecho a sul da Barra de Aveiro, alimentações artificiais anuais da ordem de 200x10^3 m^3, correspondentes à deposição de dragados de manutenção da Barra do Porto de Aveiro,

num total em 20 anos de $4{,}15 \times 10^6$ m^3. Em alguns dos cenários adiante considerados, admitir-se-á outras operações de alimentação artificial, além desta, de manutenção.

Importa referir que os presentes resultados devem ser comparados entre si e não interpretados como resultados exatos de evolução da linha de costa, para determinada configuração e/ou intervenção.

Neste exercício consideram-se as nove alternativas de intervenção seguintes:

i. Sem intervenção[5];

ii. Sem intervenção estrutural, mas com 4 intervenções de alimentação artificial (AA) ao longo de 500 m (10500<x<11000 m) na Praia da Vagueira, em 20 anos, totalizando um volume depositado de 1,2 milhões de metros cúbicos (4 x 300.000 m^3);

iii. Construção do QMD c300d400, com h_c=+0,34 m (ZH) (K_t=0,76)[6];

iv. Construção do QMD c300d400, com h_c=+0,34 m (ZH) (K_t=0,76), conjugado com AA igual à intervenção ii;

v. Construção do QMD c300d400, com h_c=+0,84 m (ZH) (K_t=0,66)[7];

vi. Construção do QMD c300d400, com h_c=+0,84 m (ZH) (K_t=0,66), conjugado com AA igual à intervenção ii;

vii. Construção do QMD c300d400, com h_c=+0,84 m (ZH) (K_t=0,66), com L_g=150 m (i.e., a extremidade sul do QMD fica alinhada com o esporão), conjugado com AA igual à intervenção ii;

viii. Construção do QMD c300d400, com h_c=+1,34 m (ZH) (K_t=0,56)[8], com L_g=150 m (i.e., a extremidade sul do QMD fica alinhada com o esporão), conjugado com AA igual à intervenção ii;

ix. Extensão do atual esporão da Praia da Vagueira em 37 m, conjugado com AA igual à intervenção ii[9].

Na Figura 8.1 apresenta-se a linha de costa (instantânea) resultante ao fim de 20 anos para cada cenário de intervenção. Indica-se também a linha de costa inicial (configuração de 2018).

Na zona a norte do esporão da Praia da Vagueira (situado em x=10250 m) a situação mais desfavorável corresponde à não intervenção, enquanto as mais favoráveis são a extensão do esporão

[5] Corresponde ao cenário referido ao longo deste estudo como solução "Sem QMD", já apresentado no Relatório 8.

[6] Corresponde à configuração já apresentada no Relatório 8.

[7] Usando a formulação empírica de Seabrook e Hall, apurou-se que a elevação de 0,5 m na cota de coroamento conduziria a uma redução de K_t em 0,1 unidades.

[8] Usando a formulação empírica de Seabrook e Hall, apurou-se que a elevação de 1,0 m na cota de coroamento conduziria a uma redução de K_t em 0,2 unidades.

[9] A extensão do esporão sem ser complementada com alimentação artificial mostrou provocar enorme erosão para sul e não potenciar grande aumento da largura do areal na praia da Vagueira, sendo, por isso, desconsiderada de apresentação neste ensaio comparativo.

complementada com alimentação artificial (AA), construção do QMD c300d400 (com K_t=0,56) com L_g=150 m complementada com AA, e construção do QMD c300d400 (com K_t=0,66) complementada com AA. **Qualquer das soluções que incluem a alimentação artificial mostram vantagens sobre as soluções que não a incluem**. Qualquer das soluções com intervenção estrutural promovem o crescimento de um saliente (ou do "triângulo" de acumulação, no caso do esporão), de maior ou menor robustez. A intervenção de AA sem complemento estrutural não beneficia diretamente muito a Praia da Vagueira, mas é aquela com maior impacte positivo para sul.

Os ganhos máximos em largura da Praia da Vagueira rondam os 30 m de avanço da linha de costa, valor esse que se atenua para norte para ganhos da ordem de 10 a 15 m. Aliás, observa-se que, nos casos mais favoráveis, a extensão de praia com significativa acreção pode ir até cerca de 2 a 3 km a norte do esporão da Vagueira.

Na praia do Labrego (entre o esporão de seu nome e o esporão da Vagueira, 9150<x<10250 m), a melhor solução corresponde à de AA sem intervenções estruturais e a pior é a de construção de um QMD c300d400 (K_t=0,76 ou K_t=0,66) sem complemento de AA. Na praia do Labrego, a erosão ao fim de 20 anos nos piores cenários é de cerca de 20 m, relativamente à situação inicial. Genericamente, todas as intervenções com complemento de AA beneficiam ou igualam a situação de evolução sem qualquer intervenção.

Para sul da praia do Labrego (x<9150 m) verifica-se que qualquer dos cenários conduz a erosão relativamente à situação inicial. A diferença entre o melhor e o pior cenário são cerca de 25 m de erosão. Genericamente, à exceção das duas intervenções com QMD sem AA, todas as restantes soluções que conduzem a maior acumulação na Praia da Vagueira têm pior desempenho neste setor. A sul da Praia do Areão (x<6000 m) qualquer das intervenções deixa de ter influência na evolução da linha de costa.

Note-se que outras alternativas ou características de intervenção poderiam ser estudados, ou até otimizadas (por ex., seria mais benéfica uma operação de AA diretamente na praia do Labrego?), mas tal excede o âmbito deste estudo, que procurou definir e verificar a viabilidade de uma solução de quebra-mar destacado.

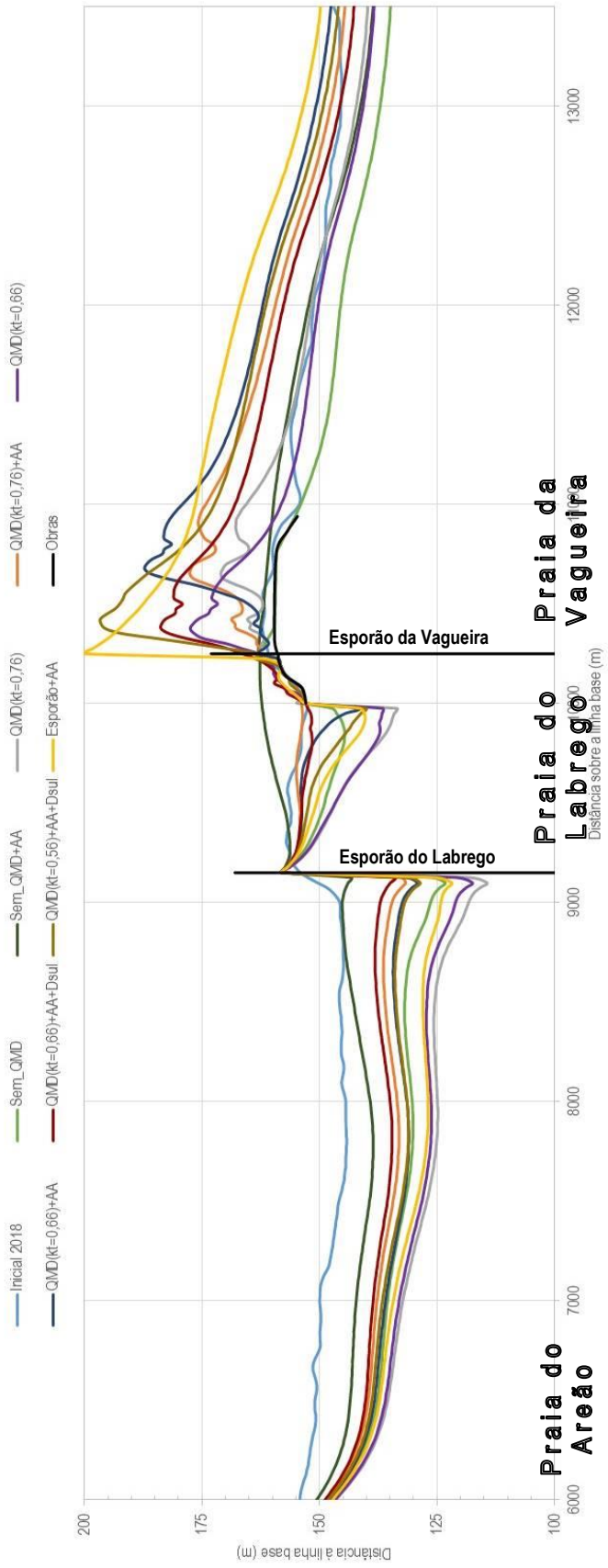


Figura 8.1 – Evolução da linha de costa entre 2018 e 2038. Resultados de simulação com o modelo LITMOD para diferentes soluções de intervenção

8.2 Limitações ao desempenho/funcionamento de um quebra-mar destacado

Relativamente a uma solução de quebra-mar destacado importa ainda tecer algumas considerações e/ou limitações que poderão afetar o seu desempenho:

- A influência da cota de coroamento de um quebra-mar destacado submerso é primordial no seu desempenho na promoção de um saliente. É expectável que uma estrutura marítima deste tipo, por exemplo de construção convencional com núcleo TOT, camadas de filtro e camada de proteção (em enrocamento ou blocos artificiais), sofra assentamentos quer pela interação com o fundo móvel de areia, quer por rebaixamento das camadas superiores pelas sucessivas ações de temporais marítimos. Isto suscita a preocupação da manutenção da eficácia da estrutura ao longo do seu tempo de vida. Seria assim recomendável a eventual construção de um QMD com maior cota de coroamento que a inicialmente projetada, de forma a garantir maior eficácia no seu tempo de vida;
- Outra preocupação associada à construção de um QMD é a dificuldade previsível da execução de operações de manutenção. Qualquer estrutura marítima exige manutenção de forma a manter a sua eficácia para o cumprimento dos objetivos para que foi projetada. No caso de um QMD desenraizado da costa, prevê-se que as operações de manutenção tenham de ser efetuadas por via marítima, o que dadas as condições locais teria vários entraves (por ex., a "janela temporal" para execução da obra) e elevados custos;
- Foi em parte devido ao ponto anterior que, nas alternativas ilustradas na Figura 8.1, se considerou um QMD com a extremidade alinhada com o eixo do esporão da Vagueira, na perspetiva de que este esporão poderia vir a ser temporariamente aumentado, de forma a permitir o acesso por terra à construção do QMD.

8.3 Oportunidades associadas à construção de um quebra-mar destacado

Por fim, realce-se que existe uma tendência atual de construção de obras marítimas multifuncionais, com características de otimização de diferentes funções, em particular, na promoção de habitats para espécies marinhas (e.g., Hindle, 2018; O'Shaughnessy *et al*., 2020). Estas soluções designam-se genericamente como "blue-*green structures*", tendo também outras designações como "*living breakwaters*", podendo eventualmente ser enquadráveis como soluções de "*building with nature*". Encontram-se ainda tendências para o uso de estrutura híbridas, que combinam estruturas mais clássicas com ecossistemas naturais (e.g., Firth *et al*., 2013; Sutton-Grier *et al*., 2015).

Na origem das premissas do QMD a estudar, já se incluíam três funções: proteção contra galgamento; diminuição do risco de erosão costeira e promoção de acreção da praia; e crescimento da atividade

desportiva de *surf*, em ondas geradas pela estrutura. Alguns quebra-mares atualmente projetados[10] possuem uma configuração geométrica e elementos construtivos (blocos artificiais) (e.g., MacArthur *et al*., 2020) desenhados para promoverem a biodiversidade em redor da estrutura. Além da atividade de *surf*, a promoção de outros desportos marítimos (ou náuticos) poderia ser considerada, tais como a prática de canoagem ou "*stand up paddle*" (SUP) na zona abrigada pelo QMD. Assim, a eventual construção de um QMD poderia constituir uma oportunidade para construção de uma "*blue-green structure*" e para o estudo e demonstração do seu desempenho, em múltiplas vertentes (incluindo, como referido, o aumento de biodiversidade).

[10] Por exemplo: https://stormrecovery.ny.gov/living-breakwaters-project-background-and-design

9 | Conclusões sobre a solução final de quebra-mar destacado

9.1 Viabilidade técnica e económica de construção de um quebra-mar destacado

Tendo em consideração os objetivos gerais deste estudo – **caracterização e definição de parâmetros de dimensionamento e localização de um quebra-mar destacado (QMD) submerso em frente à Praia da Vagueira** – e as conclusões e sínteses apresentadas nos capítulos anteriores, conclui-se:

9.1.1. **É tecnicamente viável a implantação de um quebra-mar destacado submerso na Praia da Vagueira, mas existem várias restrições**;

9.1.2. A análise custo-benefício foi conduzida para as configurações de quebra-mar paralelo à costa com melhor desempenho no cumprimento dos objetivos do projeto, c300d400 e c350d400, e as de menor/maior comprimento e distância à linha de costa, c200d200 e c350d580, respetivamente. Nesta análise excluiu-se, numa primeira fase, o valor económico associado ao *surf*. Das configurações avaliadas, **unicamente a solução com menores custos (que variam proporcionalmente com L_{qm} e L_d) – c200d200 – é que origina um VAL (Valor Atual Líquido) positivo ao fim de cerca de 10 anos, i.e., é economicamente viável a partir desse horizonte temporal**;

9.1.3. Caso se considere uma configuração de QMD submerso que resulte em ondas propícias para a prática do *surf* e igualmente eficaz sob os restantes pontos de vista, i.e., uma configuração próxima da c300d400 oblíqua 45° à costa, a mesma não terá custos adicionais e o valor potencial adicional do *surf* reforçaria os resultados obtidos. Nesse caso, o cenário c200d200 apresentaria uma solução viável e o cenário c300d400 seria, provavelmente, viável no horizonte temporal de 20 anos;

9.1.4. As soluções de QMD submerso, paralelo à costa, com melhor desempenho na redução do galgamento da atual defesa longitudinal aderente têm uma distância à linha de costa, L_d, da ordem de 300 m e comprimento, L_{qm}, entre 200 e 300 m;

9.1.5. A solução de QMD submerso paralelo à costa c300d400 (i,e., com comprimento, L_{qm}, igual a 300 m e distância à linha de costa, L_d, igual a 400 m) é a que, tecnicamente, melhor compatibiliza a redução do risco de erosão e de promoção do acréscimo de praia com o da redução do risco de galgamento. Esta solução é desadequada para a prática de *surf*;

9.1.6. As soluções de QMD que obtêm bom desempenho na redução do galgamento têm uma largura de coroamento, B, igual a 10 m, inclinação dos taludes a barlamar de 1:10 e a

sotamar de 1:2, e distância do seu eixo transversal ao esporão da Praia da Vagueira (para Norte), L_g, igual a 460 m;

9.1.7. Do ponto de vista de dinâmica sedimentar, as soluções de QMD submerso analisadas favorecem o crescimento de um saliente, assimétrico em relação ao seu eixo transversal, com ápex a norte do eixo da estrutura. A redução da distância L_g terá um efeito positivo no aumento da largura média do areal da Praia da Vagueira e negativo no aumento do risco de galgamento no extremo norte da defesa aderente. É, por isso, desaconselhável alterar muito o posicionamento longitudinal do eixo transversal do QMD (L_g=460 m);

9.1.8. Um QMD submerso com coroamento, h_c, à cota +0,34 m (ZH) tem associado um coeficiente de transmissão médio de energia das ondas (considerando a variabilidade da agitação marítima e do nível de água) mais elevado que o desejável (obteve-se $K_t \approx 0{,}77$ e os valores desejados seriam $0{,}4<K_t<0{,}7$), o que origina o desenvolvimento de um saliente na linha de costa, na zona protegida pelo QMD, de pequena largura transversal (no máximo, entre 10 a 20 m);

9.1.9. Alerta-se para o previsível assentamento do quebra-mar destacado ao longo do período de vida útil da obra. Tal traduzir-se-á numa perda de eficácia no respeitante à promoção do acréscimo de praia, face à situação inicial;

9.1.10. Face às duas conclusões anteriores, para o objetivo de promoção do acréscimo do areal na Praia da Vagueira e garantia da eficácia da obra por um período mais vasto, recomenda-se a execução de um QMD submerso com a cota de coroamento inicial próxima da cota do nível de baixa-mar médio (+1,18 m ZH). Esta cota de coroamento também favorecerá a redução do risco de galgamento (apesar de, atualmente, ser insignificante na quase totalidade da extensão da defesa aderente). No entanto, **se não houver nenhuma intervenção de reforço aluvionar, o acréscimo do areal na Praia da Vagueira resultante da construção do QMD implicará uma maior erosão a sul do esporão da Vagueira que aquela que ocorreria se não fosse construído nenhum QMD**;

9.1.11. **A promoção do acréscimo de areal na Praia da Vagueira e a redução da erosão a sotamar (sul) que resultem da solução de QMD c300d400 poderão ser amplificados se se efetuarem operações de alimentação artificial em conjunto com a obra**;

9.1.12. A solução de QMD oblíquo 45° à praia c300d400) induz a formação de ondas adequadas para a prática de *surf* por surfistas experientes e profissionais. Morfologicamente, esta configuração de QMD conduz à formação de dois salientes na zona protegida, de dimensões semelhantes ao saliente único formado com a solução de QMD paralelo à praia c300d400. Esta solução não foi alvo de estudo aprofundado no respeitante à proteção ao galgamento nem da hidrodinâmica em redor do QMD;

9.1.13. O QMD c300d400 paralelo à praia pode favorecer a formação de correntes de circulação de elevada magnitude na zona adjacente, que poderão pôr em causa a segurança de banhistas.

9.2 Notas auxiliares para apoio à tomada de decisão

Apresentam-se de seguida um conjunto de notas complementares que devem ser consideradas na tomada de decisão sobre a execução, ou não, de uma solução de quebra-mar destacado na Praia da Vagueira. A maioria das observações alerta para problemas relacionados com os QMD e, em particular, com a sua eventual construção neste local.

9.2.1. Os QMD, como todas as obras fixas, ao mesmo tempo que podem promover o alargamento de um trecho de praia abrigada, também provocam erosão num trecho a sotamar (se não for executada nenhuma operação de alimentação artificial). Portanto será recomendável, caso se opte pela execução de um QMD, conjugar com alimentações artificiais;

9.2.2. Os QMD, como todas as obras fixas, não permitem resolver o problema de défice sedimentar responsável pelo processo erosivo num determinado trecho (e neste, em particular), mas apenas proporcionam uma proteção local onde ela possa ser mais necessitada (e.g., num núcleo urbano);

9.2.3. Numa perspetiva de multifuncionalidade, os exemplos de projetos de QMD ou de recifes artificiais para o *surf* bem-sucedidos são escassos ou inexistentes;

9.2.4. Em perspetiva, nos últimos 3 anos (novembro de 2018 a abril de 2021), a zona central da Praia da Vagueira (em frente à defesa longitudinal aderente) tem evoluído no sentido de acreção e de ganho de volume da praia emersa. Contrariamente, a zona situada a cerca de 1000 m a norte do esporão da Vagueira, mostrou decréscimo do volume respetivo (vide Anexo II);

9.2.5. O setor em estudo tem uma elevada dinâmica sedimentar, também traduzida pela movimentação (transversal, longitudinal e vertical) das barras submersas. A localização do QMD c300d400 está claramente na zona de desenvolvimento daqueles elementos morfológicos. Este facto aponta para um potencial conflito entre a implantação do QMD e a mobilidade natural do sistema de barras submersas que podem ter uma elevada expressão vertical;

9.2.6. Alerta-se para a previsível dificuldade de execução de operações de manutenção do QMD. Prevê-se que as operações de manutenção teriam de ser efetuadas por via marítima, o que dadas as condições locais teria vários entraves e elevados custos;

9.2.7. Devido à diversidade de parâmetros intrínsecos à obra, à escolha dos materiais e métodos de construção, à disponibilidade de materiais de pedreira em regiões próximas, à previsível dificuldade de execução de operações de manutenção e a outros fatores, considera-se que existe elevada incerteza nas estimativas dos custos de investimento (e de manutenção) do QMD, usados na análise custo-benefício efetuada neste estudo;

9.2.8. Alerta-se para a oportunidade de, a construir um quebra-mar destacado submerso, a estrutura poder conceber em sede de projeto outras funções, nomeadamente, as de promoção da biodiversidade ("*blue-green structure*") e de proporcionar condições favoráveis à prática de outros desportos náuticos (além do *surf*, já contemplado).

9.3 Trabalhos complementares

Sugerem-se os seguintes trabalhos complementares para a obtenção de elementos adicionais, para apoio ao Projeto da obra, caso se opte pela mesma, ou para apoio à realização de outra intervenção:

9.3.1. Comparar a viabilidade da construção de um QMD (isoladamente ou em combinação com outras medidas) com a realização de operações de alimentação artificial ou alterações das estruturas existentes;

9.3.2. Estudar em maior pormenor soluções de intervenção alternativas, incluindo operações de alimentação artificial, entre outras;

9.3.3. Caso se opte pela construção de um QMD que favoreça o *surf*, nomeadamente oblíquo à costa, averiguar o desempenho da solução final na redução do galgamento e dinâmica litoral próxima, com recurso à modelação matemática;

9.3.4. Realizar um estudo de otimização da cota de coroamento da obra, em modelo reduzido 3D e com nível de água variável, de forma a garantir o bom desempenho da solução de projeto em termos de coeficiente de transmissão e do desenvolvimento do saliente na praia.

Lisboa, LNEC, abril de 2022

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Luís Ivens Portela

A Diretora do Departamento de Hidráulica e Ambiente

Helena Alegre

AUTORIA

Francisco Sancho
Investigador Auxiliar, LNEC

Paula Freire
Investigadora Auxiliar, LNEC

Maria da Graça Neves
Investigadora Auxiliar com Agregação, LNEC

Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira
Investigadora Auxiliar, LNEC

Ana Mendonça
Investigadora Auxiliar, LNEC

Peter Cornelis Roebeling
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Paulo Renato Baptista
Investigador Auxiliar, CESAM

Conceição Juana Fortes
Investigadora Principal, LNEC
Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Referências bibliográficas

COPPOLA, T., 2020 – **Artificial surfing reefs: the right solution for Vagueira Beach?** Tese de Mestrado em Economia, Universidade de Torino, Itália, 100pp.

FIRTH, L.B., *et al*., 2013 – **Between a rock and a hard place: Environmental and engineering considerations when designing coastal defence structures**. Coastal Engineering, http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.015.

FREIRE, P.; BAPTISTA, P.R.; CAPITÃO, R.; SANCHO, F.; FORTES, C.J; NEVES, M.G.; PINHEIRO, L., 2020 – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T1) Caracterização da hidrodinâmica e da variabilidade morfo-sedimentar. Relatório 7.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 161/2020 – DHA/NEC.

HINDLE, R., 2018 – **The Hard Habitats of Coastal Armoring**. Sustainable Coastal Design and Planning, edited by E. Mossop, CRC Press; ISBN: 9781498774543, https://escholarship.org/uc/item/1hs0d1hv.

LYNETT, P.; LIU, P.L.-F., 2004 – **Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations**. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.

MASATOSHI, Y.; NAOYA, O.; MASE, H.; KIM, S.; UMEDA, S.; ALTOMARE, C., 2019 – **Applicability enhancement of integrated formula of wave overtopping and runup modelling**. Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Ser. B2 (Coastal Engineering), Vol. 75, pp. I_739-I_744. doi.org/10.2208/kaigan.75.I_739.

MASE, H.; TAMADA, T.; YASUDA, T.; HEDGES, T. S.; REIS, M.T., 2013 – **Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water**. Journal of Waterway Port, Coastal, and Ocean Engineering, 139, 346–357.

MACARTHUR, M.; NAYLOR, L.A.; HANSOM, J.D.; BURROWS, M.T., 2020 – **Ecological enhancement of coastal engineering structures: Passive enhancement techniques**. Science of The Total Environment, Volume 740, 139981. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139981.

MENDES, D.; PAIS-BARBOSA, J.; BAPTISTA, P.; SILVA, P.A.; BERNARDES, C.; PINTO, C., 2021 – **Beach Response to a Shoreface Nourishment (Aveiro, Portugal)**. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 1112. https://doi.org/10.3390/ jmse9101112.

MENDONÇA, A.; SANCHO, F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; FREIRE, P., 2022 – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T2) Estudos em modelo físico reduzido: Resultados do modelo – Relatório 13**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 94/2022 – DHA/NEC.

MORTENSEN, S.B.; HIBBERD, W.J.; KAERGAARD, K.; KRISTENSEN, S.E.; DEIGAARD, R.; HUNT, S., 2015 – **Concept design of a multipurpose SCS for Palm Beach, Gold Coast.**

Australasian Coasts & Ports Conference 2015, 15 -18 September 2015, Auckland, New Zealand.

O'SHAUGHNESSY, *et al*., 2020 – **Design catalogue for eco-engineering of coastal artificial structures: a multifunctional approach for stakeholders and end-users**. Urban Ecosyst. 23, 431–443. https://doi.org/10.1007/s11252-019-00924-z.

OLIVEIRA, F.S.B.F., 2020 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo matemático: Efeito do quebra-mar destacado nas correntes e morfologia adjacentes.– Relatório 10**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 215/2021 – DHA/NEC.

OLIVEIRA, F.S.B.F.; SANCHO, F.; NEVES, M.G.; COELHO, C.; PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.; TEIXEIRA, S.; POMBO, R.; REIS, T., 2020 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T1) Estudos em Modelo Matemático: Alternativas de Quebra-mar Destacado para Proteção Contra Galgamentos e Erosão Costeira – Relatório 8**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 231/2020 – DHA/NEC.

POMBO, R; ROEBELING, P.C.; COELHO, C.D.; SANCHO, F., 2022 – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira. (T4) Análise custo-benefício da melhor solução técnica e conjunto de soluções alternativas – Relatório 11**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 345/2021 – DHA/NEC, versão revista, fevereiro 2022.

SANCHO, F.; OLIVEIRA, F.S.B.F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; COELHO, C.; ROEBELING, P.; BICUDO, P., 2019a – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira: (T0) Revisão do estado de arte – Relatório 2**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 248/2019 – DHA/NEC.

SANCHO, F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; CAPITÃO, R., 2019b – **Estudo de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo matemático: Memória descritiva – Relatório 4**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2019 – DHA/NEC.

SANCHO, F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; OLIVEIRA, F.S.B.F.; SILVA, L.G., 2021 – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T2) Estudos em modelo físico reduzido: Estabelecimento do modelo físico – Relatório 12**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2021 – DHA/NEC.

SANTOS, F.; BAPTISTA, P.R.; SANCHO, F., 2020 – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira.** (**T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Relatório final dos dados de vídeo-monitorização – Relatório 9.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 343/2020 – DHA/NEC.

SILVA, P.A.; BAPTISTA, P.R.; SANTOS, F.A.C.; ANDRIOLO, U.; SANCHO, F.; FREIRE, P., 2019 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional**

em Frente à Praia da Vagueira. (T3) Monitorização, Aquisição de Dados e Trabalho de Campo: Descrição da Campanha – Relatório 5. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 450/2019 – DHA/NEC.

SILVA, P.A.; BAPTISTA, P.R.; SANTOS, F.A.C.; SANCHO, F.; FREIRE, P., 2019 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T3) Monitorização, Aquisição de Dados e Trabalho de Campo: Resultados da Campanha – Relatório 6**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 124/2020 – DHA/NEC

SUTTON-GRIER, A.E.; WOWK, K.; BAMFORD, H., 2015 – **Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems**. Environmental Science & Policy, Volume 51, Pages 137-148, https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006.

Anexos

ANEXO I
Plano de trabalhos e informação adicional

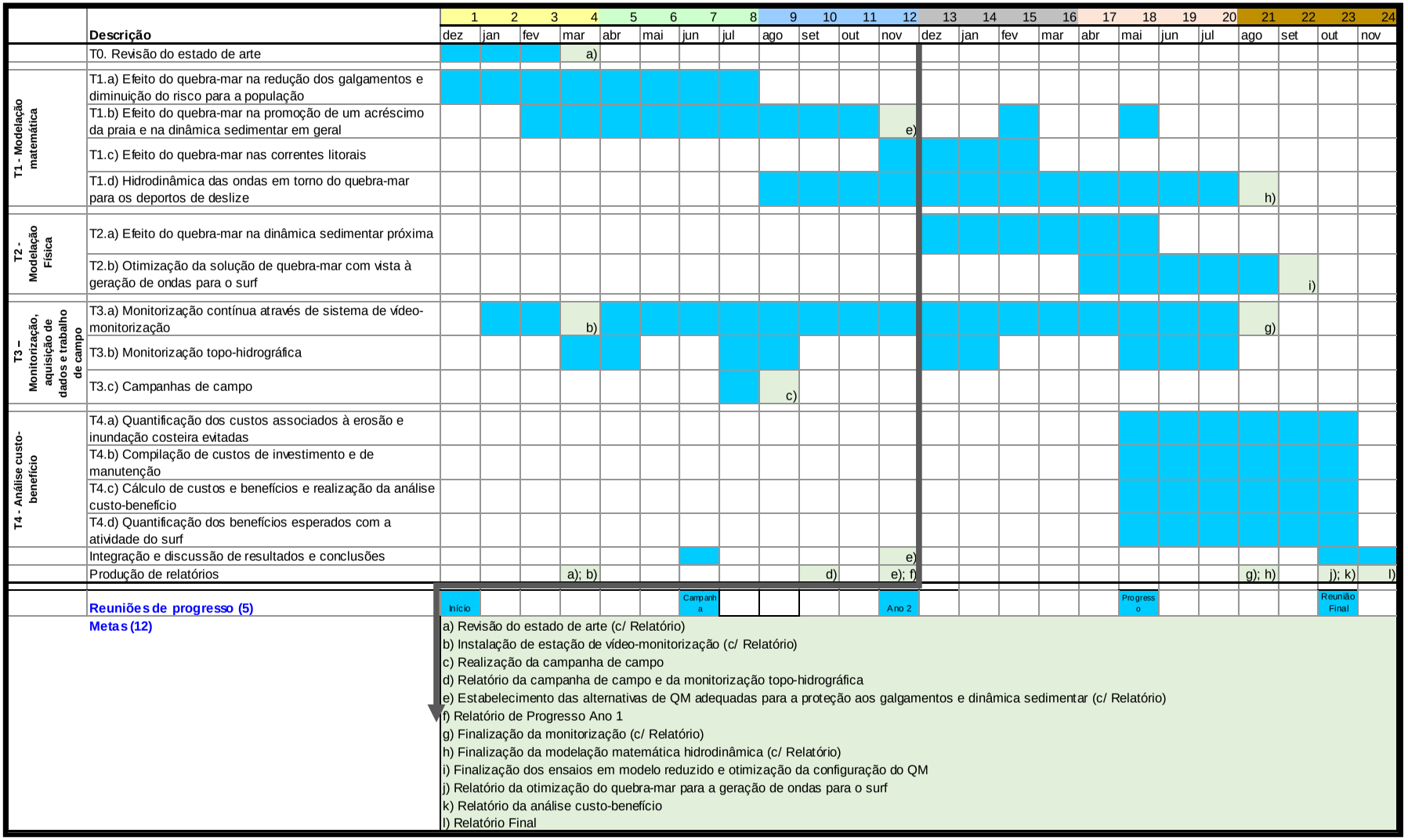


Figura I.1 – Plano de trabalhos

Quadro I.1 – Relatórios intercalares publicados no âmbito do presente estudo

Número	Tarefa	Sub-Título	Autores	Publicação
1	T3	(T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Sistema de vídeo-monitorização – Relatório 1	Baptista, P.R.; Barbosa, J.P.; Silva, P.A.; Andriolo, U.; Santos, F.; Carvalheiro, L.; Sancho, F.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 423/2018 – DHA/NEC.
2	T0	(T0) Revisão do estado de arte – Relatório 2.	Sancho, F.; Oliveira, F.S.B.F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.; Coelho, C.; Roebeling, P.; Bicudo, P.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 248/2019 – DHA/NEC. Versão revista, agosto 2019.
3	T3	(T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Instalação da estação de vídeo-monitorização – Relatório 3	Baptista, P.R.; Barbosa, J.P.; Silva, P.A.; Andriolo, U.; Santos, F.; Carvalheiro, L.; Sancho, F.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 240/2019 – DHA/NEC. Versão revista, agosto 2019.
4	T1	(T1) Estudos em modelo matemático: Memória descritiva – Relatório 4.	Sancho, F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.; Capitão, R.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2019 – DHA/NEC.
5	T3	(T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Descrição da campanha – Relatório 5	Silva, P.A.; Baptista, P.R.; Santos, F.; Andriolo, U.; Sancho, F.; Freire, P.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 450/2019 – DHA/NEC.
6	T3	(T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Resultados da campanha – Relatório 6	Silva, P.A.; Baptista, P.R.; Santos, F.; Sancho, F.; Freire, P.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 124/2020 – DHA/NEC.
7	T1	(T1) Caracterização da hidrodinâmica e da variabilidade morfo sedimentar. Relatório 7.	Freire, P.; Baptista, P.R.; Capitão, R.; Sancho, F.; Fortes, C.J; Neves, M.G.; Pinheiro, L.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 161/2020 – DHA/NEC.
8	T1	(T1) Estudos em Modelo Matemático: Alternativas de Quebra-mar Destacado para Proteção Contra Galgamentos e Erosão Costeira – Relatório 8	Oliveira, F.S.B.F.; Sancho, F.; Neves, M.G.; Coelho, C.; Pinheiro, L.; Fortes, C.J.; Teixeira, S.; Pombo, R.; Reis, T.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 231/2020 – DHA/NEC.
9	T3	(T3) Monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo: Relatório final dos dados de vídeo-monitorização – Relatório 9	Santos, F.; Baptista, P.R.; Sancho, F.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 343/2020 – DHA/NEC.
10	T1	(T1) Estudos em modelo matemático: Efeito do quebra-mar destacado nas correntes e morfologia adjacentes – Relatório 10	Oliveira, F.S.B.F.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 215/2021 – DHA/NEC.
11	T4	(T4) Análise custo-benefício da melhor solução técnica e conjunto de soluções alternativas – Relatório 11	Pombo, R.N.; Roebeling, P.C.; Coelho, C.; Sancho, F.	LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 345/2021 – DHA/NEC, Versão revista fevereiro 2022.
12	T2	(T2) Estudos em modelo físico reduzido: Estabelecimento do modelo físico – Relatório 12.	Sancho, F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.; Oliveira, F.S.B.F.; Silva, L.G.	LNEC – Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2021 - DHA/NEC.
13	T2	(T2) Estudos em modelo físico reduzido: Resultados do modelo – Relatório 13.	Mendonça, A.; Sancho, F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.; Freire, P.	LNEC – Proc. 0604/121/21221. Relatório 94/2022 - DHA/NEC

Quadro I.2 – Condições topo-batimétricas e sedimentológicas de teste aplicadas nas metodologias de modelação numérica e física (referidos no Capítulo 5)

	Modelação numérica longo prazo	Modelação numérica curto-médio prazo	Modelação física curto-médio prazo
Topo-batimetria	- Linha de costa considerada como a linha da última preia-mar (nível médio de preia-mar, NMPM, igual a +3,05 m (ZH) visível nos ortofotomapas de 01/08/1995, 18/03/2005, 24/10/2008, 27/08/2014 e 31/08/2018; - Perfil transversal: Modelo Litmod: até ao ZH, perfil de Dean ajustado ao perfil PC6 do programa COSMO, em datas distintas 14/11/2018 e 13/05/2019; entre 0 e +4 m (ZH), declive médio observado na secção PVG2, indicada no Relatório 7 deste estudo, nos levantamentos COSMO de 2018 e 2019; Modelo LTC: perfil de Dean ajustado a valores considerados de referência para a costa noroeste portuguesa; perfil emerso com inclinação constante, de 3%.	- Levantamentos topo-batimétricos COSMO de julho de 2018 e junho de 2019; - Fundo representativo de condições médias locais, baseado nos levantamentos topo-batimétricos COSMO de julho de 2018, junho de 2019 e junho de 2020.	- Fundo representativo de condições médias locais, baseado nos levantamentos topo-batimétricos COSMO de julho de 2018, junho de 2019 e junho de 2020.
Sedimentologia	Sedimentos do fundo com diâmetro mediano, D_{50}, igual a 0,37 mm e 0,3 mm, no caso do modelo Litmod e LTC, respetivamente.	Sedimentos do fundo com diâmetro mediano, D_{50}, igual a 0,2 mm e peso específico igual a 2,65 kg/m^3.	Sedimentos do fundo com diâmetro mediano, D_{50}, igual a 0,5 mm e peso específico igual a 2,7 kg/m^3 no protótipo (D_{50}=0,285 mm e peso específico igual a 2,65 kg/m^3 no modelo reduzido).

Quadro I.3 – Condições de agitação e nível do mar à batimétrica -12 m (ZH) testadas no âmbito das metodologias de modelação numérica e física (referidos no Capítulo 5)

Metodologia	Agitação marítima	Nível do mar
Modelação numérica longo prazo	Séries de 1 de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2018 (40 anos completos) ao longo de 18 locais distribuídos ao longo da batimétrica -12 m (ZH) do trecho costeiro entre a Praia de São Jacinto e a Praia de Mira.	NMPM, +3.05 m (ZH).
Modelação numérica curto-médio prazo	Ação espetral das ondas média e mediana durante 1 mês; Ação espetral das ondas com Hs e Tp médios e direção oblíqua ($\pm$30°) relativamente à normal à linha de costa à profundidade de fecho; Ondas medidas durante dois ciclos de maré na campanha 14-15/outubro/2019.	Nível médio do mar, +2,17 m (ZH); Nível do mar medido durante dois ciclos de maré na campanha 14-15/outubro/2019.
Modelação física curto-médio prazo	Onda com parâmetros Hs=1,26 m, Tp=10,9 s e Dirm=296°, obliquidade 13° relativamente à normal à linha de costa, na batimétrica -12 m (ZH) (de que resulta um transporte longilitoral igual a 637000 m^3/ano); Série A2: sequência de 52 ensaios com Hs variável entre 1,26 e 2,0 m, com predominância de Hs=1,5 m, e Tp variável entre 8 e 11s, com NMM; Série B: sequência de 52 ensaios como na série A2, mais 16 ensaios com idênticas condições de agitação, mas em BMAV; Série C: : sequência de 71 ensaios com Hs variável entre 1,5 e 3,0 m, e Tp variável entre 10 e 12s, com NMM.	NMM; PM=NMM+1,13 m; Nível de Baixa-mar de Águas-vivas (BMAV), +0.84 m (ZH).

ANEXO II
Condicionantes locais: atualização da análise da evolução morfológica

II.1 Variabilidade interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira

Apresenta-se seguidamente a análise da variabilidade morfológica interanual dos fundos adjacentes à praia da Vagueira, com base na comparação de levantamentos de diferentes datas apresentados no Quadro II.1 e na Figura II.1. Esta análise atualiza a apresentada no Relatório 7.

A morfologia dos fundos adjacentes à praia da Vagueira apresenta acentuada variabilidade morfológica, resultado da presença de um sistema de barras submersas com maior desenvolvimento entre as cotas -1 e -4 m (ZH) (Figura II.2). Entre julho de 2018 e março de 2021 a evolução dos fundos adjacentes à praia da Vagueira (zona C na Figura II.1) mostra uma tendência erosiva generalizada, embora pouco expressiva em termos de taxas evolutivas. Neste período, o balanço volumétrico é de -0,24x10^6 m^3 para a totalidade da área de análise (2,4 km^2) no sentido do rebaixamento dos fundos (erosão). A este valor corresponde uma variação volumétrica e taxa de evolução de, respetivamente, 0,09x10^6 m^3/ano e -0,04 m/ano (Quadro II.2 e Quadro II.3). Entre junho 2020 e março de 2021 o balanço erosivo é ligeiramente inferior ao ocorrido entre julho de 2018 e junho de 2020.

Quadro II.1 – Modelos digitais de terreno (MDT) dos fundos adjacentes à praia da Vagueira analisados, cuja zona de comparação se encontra assinalada na Figura II.1

Zona de comparação	Área de comparação Variação de cotas na área de comparação	Data	Fonte
A	4 443 444 m^2 Entre 0 e -10 m (ZH)	07/2013	Universidade de Aveiro
		07/2018	Programa COSMO
		06/2019	
		06/2020	
B	11 841 760 m^2 Entre 2 e -10 m (ZH)	07/2018	Programa COSMO
		06/2020	
		03/2021	
C	2 412 955 m^2 Entre 2 e -10 m (ZH)	07/2018	Programa COSMO
		06/2020	
		03/2021	

Figura II.1 – Áreas de comparação dos Modelos Digitais de Terreno dos levantamentos topo-hidrográficos (Imagem: ESRI Basemap)

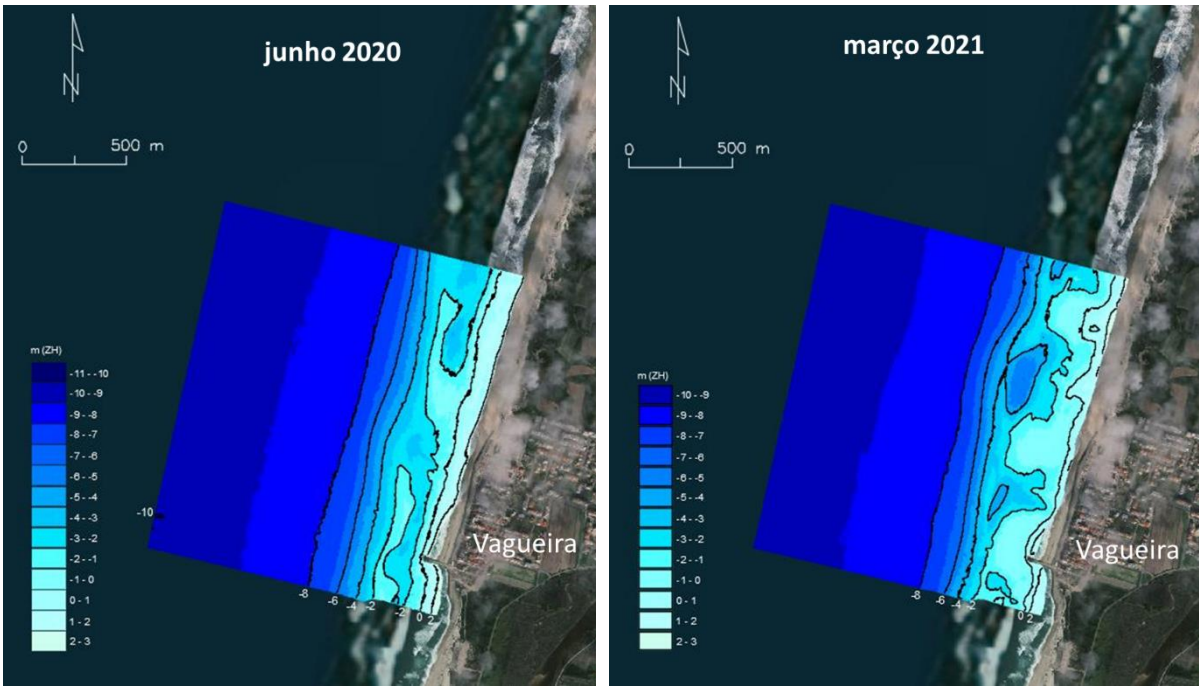


Figura II.2 – Variabilidade morfológica dos fundos adjacentes à praia da Vagueira. Dados de base: Levantamentos topo-hidrográficos do Programa COSMO (Imagem: ESRI Basemap)

Quadro II.2 – Volumes médios de evolução dos fundos na zona adjacente à praia da Vagueira para as diferentes áreas de comparação (x10^6 m^3). Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação

A				
	2013-2018	**2018-2019**	**2019-2020**	**2013-2020**
Erosão	-2,73	-1,13	-0,64	-2,97
Assoreamento	0,57	0,93	0,56	0,53
Balanço	**-2,16**	**-0,20**	**-0,08**	**-2,44**
Taxa anual	**-0,43**	**-0,20**	**-0,08**	**-0,35**
B				
	2018-2020	**2020-2021**	**2018-2021**	
Erosão	-3,76	-2,54	-3,74	
Assoreamento	2,56	4,81	4,80	
Balanço	**-1,21**	**2,27**	**1,07**	
Taxa anual	**-0,63**	**3,03**	**0,40**	
C				
	2018-2020	**2020-2021**	**2018-2021**	
Erosão	-0,62	-0,48	-0,81	
Assoreamento	0,46	0,39	0,57	
Balanço	**-0,15**	**-0,09**	**-0,24**	
Taxa anual	**-0,08**	**-0,11**	**-0,09**	

Quadro II.3 – Altura média (em metros) e taxa anual de evolução dos fundos na zona adjacente à praia da Vagueira para as diferentes áreas de comparação. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação

A				
	2013-2018	**2018-2019**	**2019-2020**	**2013-2020**
Erosão	-0,62	-0,25	-0,14	-0,67
Assoreamento	0,13	0,21	0,13	0,12
Balanço	**-0,49**	**-0,05**	**-0,02**	**-0,55**
Taxa anual	**-0,10**	**-0,05**	**-0,02**	**-0,08**
B				
	2018-2020	**2020-2021**	**2018-2021**	
Erosão	-0,32	-0,21	-0,32	
Assoreamento	0,22	0,41	0,41	
Balanço	**-0,10**	**0,19**	**0,09**	
Taxa anual	**-0,05**	**0,26**	**0,03**	
C				
	2018-2020	**2020-2021**	**2018-2021**	
Erosão	-0,26	-0,20	-0,34	
Assoreamento	0,19	0,16	0,24	
Balanço	**-0,06**	**-0,04**	**-0,10**	
Taxa anual	**-0,03**	**-0,05**	**-0,04**	

A distribuição espacial das áreas de erosão e acumulação entre julho de 2018 e março de 2021 mostra a formação de duas áreas de acumulação mais intensa, a norte do esporão da Vagueira, e várias zonas mais profundas (Figura II.3). Entre 2018 e 2020 a zona de acumulação apresenta maior desenvolvimento longitudinal, sendo acompanhada a oeste por uma área de erosão mais expressiva.

A distribuição volumétrica por classes de batimetria mostra alguma estabilidade no período analisado (Figura II.4). Abaixo da cota -4 m (ZH) a tendência é erosiva entre julho 2018 e as duas datas subsequentes que apresentam volumes muito idênticos. Entre as cotas -2 e -4 m (ZH) a tendência evolutiva é de acumulação. Entre junho 2020 e março 2021 as diferenças volumétricas ocorreram sobretudo nas classes acima da cota -4 m (ZH). A taxa de evolução volumétrica mais elevada ocorre entre essas datas ($-0{,}11 \times 10^6$ m^3/ano) e resulta da erosão da classe entre as cotas 2 e 0 m (ZH), com transferência de material para zonas mais profundas (Figura II.5). Esta evolução é expectável tendo em conta que os levantamentos analisados espelham a passagem de condições de verão marítimo (junho) para final de inverno marítimo (março).

Entre as classes com cotas superiores a -4 m (ZH), que correspondem à zona de maior desenvolvimento das barras submersas, há a existência clara de trocas sedimentares. Abaixo dessa cota a taxa de evolução dos fundos apresenta tendência erosiva, sendo mais acentuada entre as cotas -6 m e -8 m (ZH) onde o valor máximo, de $0{,}09 \times 10^6$ m^3/ano, ocorre entre 2018 e 2020. Entre junho 2020 e março 2021, a tendência evolutiva é no sentido da acumulação abaixo entre as cotas -6m e -10 m (ZH) embora com valores pouco expressivos (máximo de $0{,}01 \times 10^6$ m^3/ano) (Figura II.6).

Estendendo a área de análise para Norte em cerca de 6 km (zona B na Figura II.1), verifica-se que no mesmo período (2018 a 2021) a tendência global de evolução dos fundos é contrária ao verificado para a zona C, sendo no sentido da acumulação com uma taxa de +0,03 m/ano (Figura II.6). Esta diferença deve-se à clara inversão do sentido de evolução na zona B, de erosão entre julho de 2018 e junho de 2020 (taxa de -0.05 m/ano), para acumulação entre junho de 2020 e março de 2021 (taxa de +0,26 m/ano). Esta alteração da tendência evolutiva é bem expressa no padrão de distribuição espacial das áreas de erosão e acumulação (Figura II.7). Entre junho de 2020 e março de 2021 há a formação de várias áreas de acumulação intensa com desenvolvimento longitudinal mais expressivo (cerca de 3 km) em frente das praias das Costa Nova. Esta acumulação resulta da distribuição natural dos sedimentos depositados neste troço costeiro quando da empreitada de alimentação artificial de elevada magnitude ("*shot*") que ocorreu em 2020.

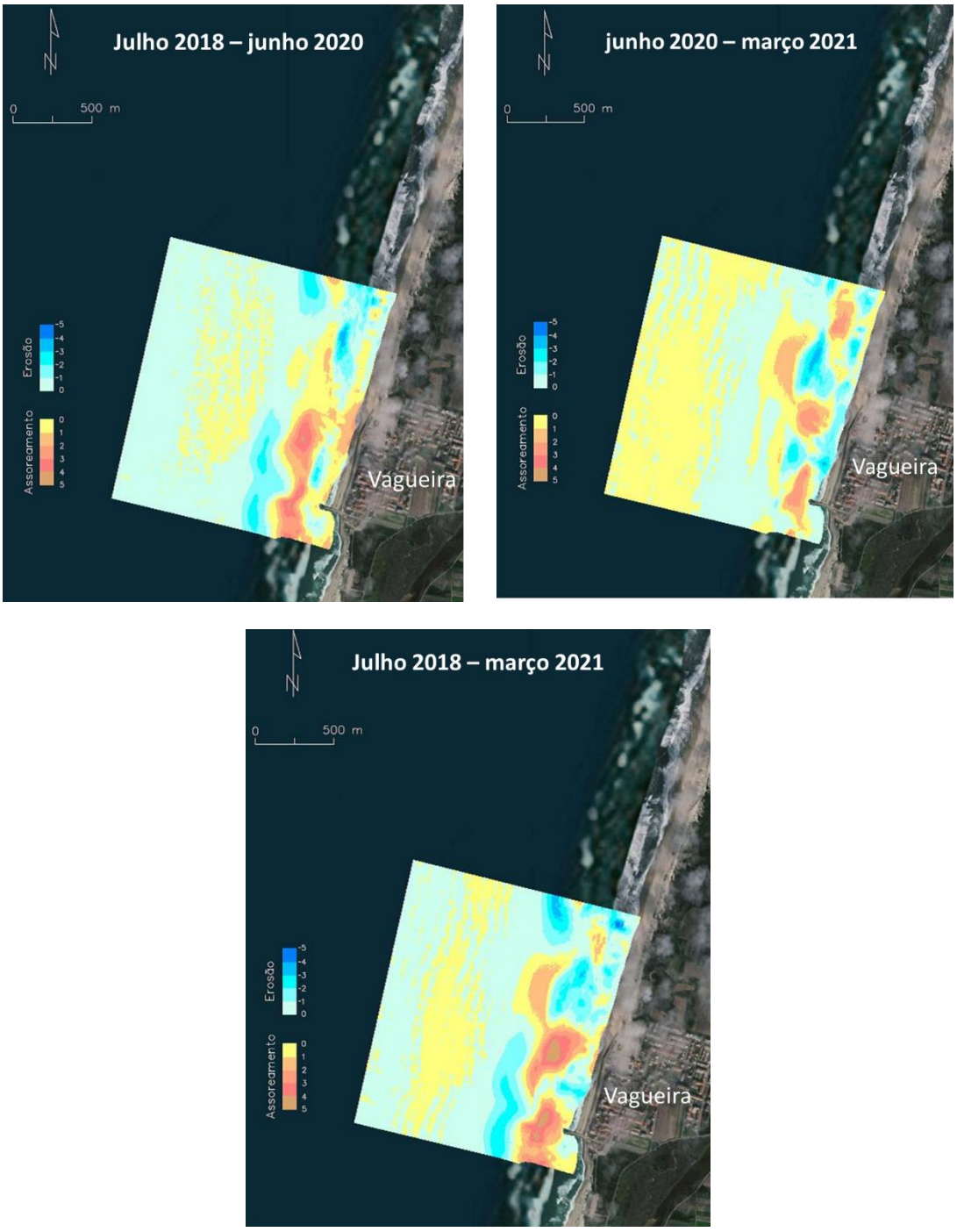


Figura II.3 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2021 para a zona de comparação C. (Imagem: ESRI Basemap)

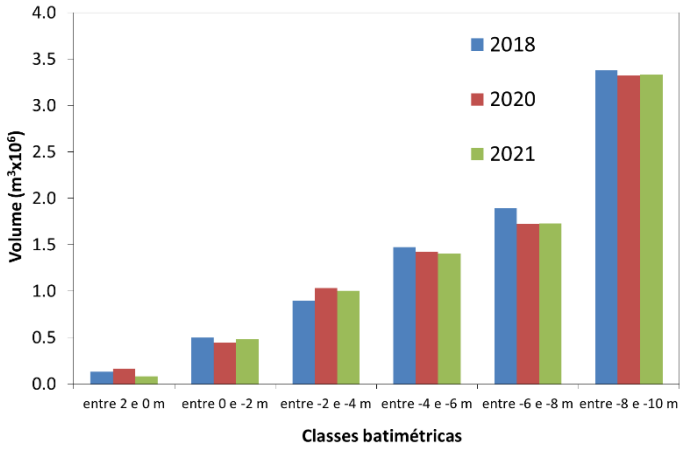


Figura II.4 – Distribuição dos volumes na área de comparação por classe batimétrica (cotas em metros abaixo do ZH)

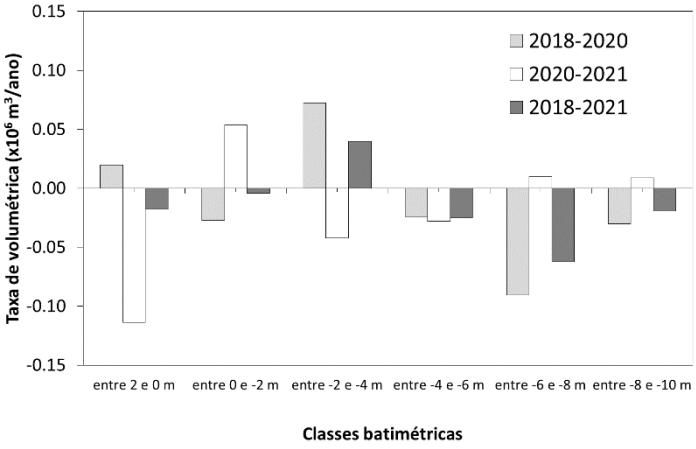


Figura II.5 – Taxa de evolução por classe batimétrica para a zona C (cotas em metros abaixo do ZH). Valores positivos correspondem a acumulação e negativos a erosão

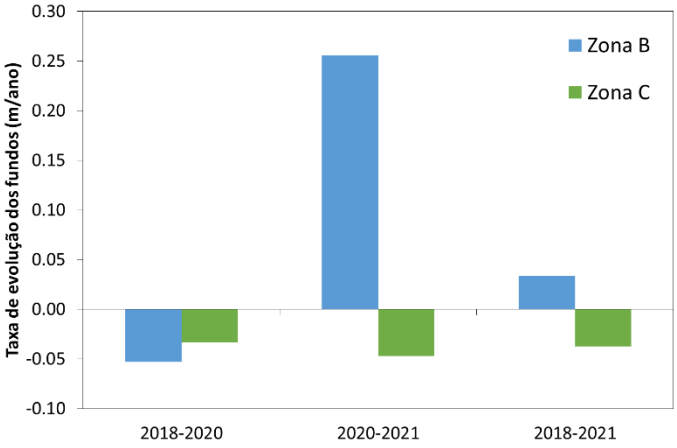


Figura II.6 – Taxa anual de evolução dos fundos. Valores positivos correspondem a acumulação e negativos a erosão

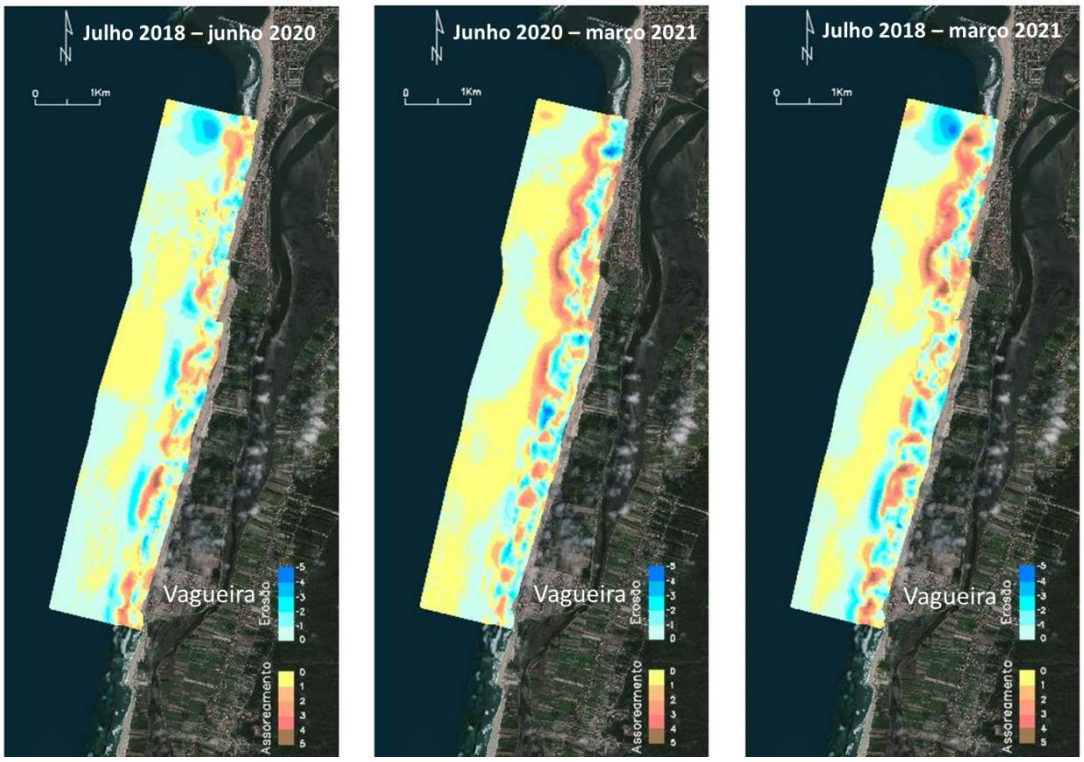


Figura II.7 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2021 para a zona de comparação B. (Imagem: ESRI Basemap)

A análise que tinha sido apresentada no Relatório 7, para a zona A (localizada na Figura II.1), foi atualizada com o levantamento de junho 2020. De referir que na análise presente o levantamento do Programa COSMO de março de 2021 não foi considerado porque não abrange a totalidade desta zona. De igual modo, o levantamento de 2013 também não foi tido em conta devido à resolução muito inferior quando comparado com os levantamentos do Programa COSMO. Os resultados mostram a tendência de diminuição da taxa erosiva de 0,05 m/ano, entre julho de 2018 e junho de 2019, para 0,02 m/ano entre junho 2019 e 2020 (Quadro II.2 e Quadro II.3). Este decréscimo reflete-se na formação de áreas de acumulação entre 2019 e 2020, onde no período anterior existiam zonas mais profundas designadamente em frente à praia da Vagueira e a sul do esporão do Labrego (Figura II.8).

Apresenta-se, complementarmente, a Figura II.9 que evidencia a dinâmica sazonal da Barra submersa com base nos resultados obtidos a partir da estação de vídeo-monitorização (vide Relatório 9). Os resultados permitem verificar que no período de inverno marítimo a barra submersa se encontra mais afastada da defesa aderente (cerca de 336 m) do que durante o período do verão marítimo (236 m) (considerando a zona mais a sul da praia). Para a zona mais a norte da praia o afastamento da barra submersa é de cerca de 370 m (inverno marítimo) e 256 m (verão marítimo).

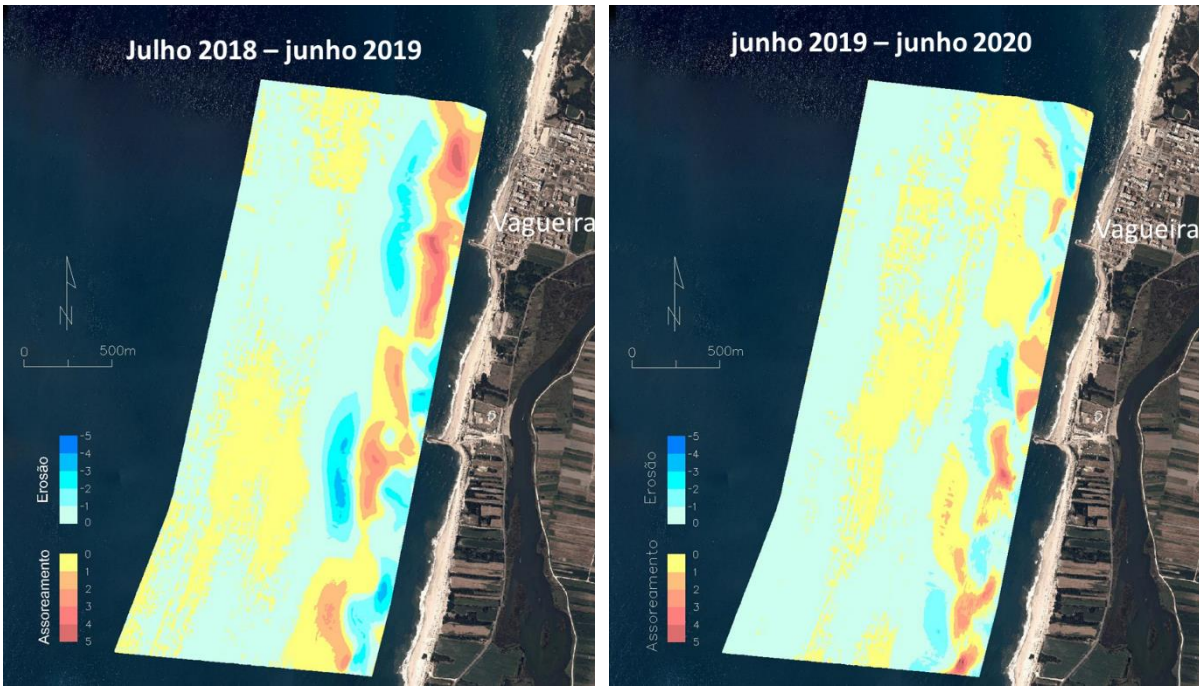


Figura II.8 – Distribuição das áreas de erosão e acumulação entre 2018 e 2020 para a zona de comparação A. (Imagem: Ortofotos de 2018, DGT)

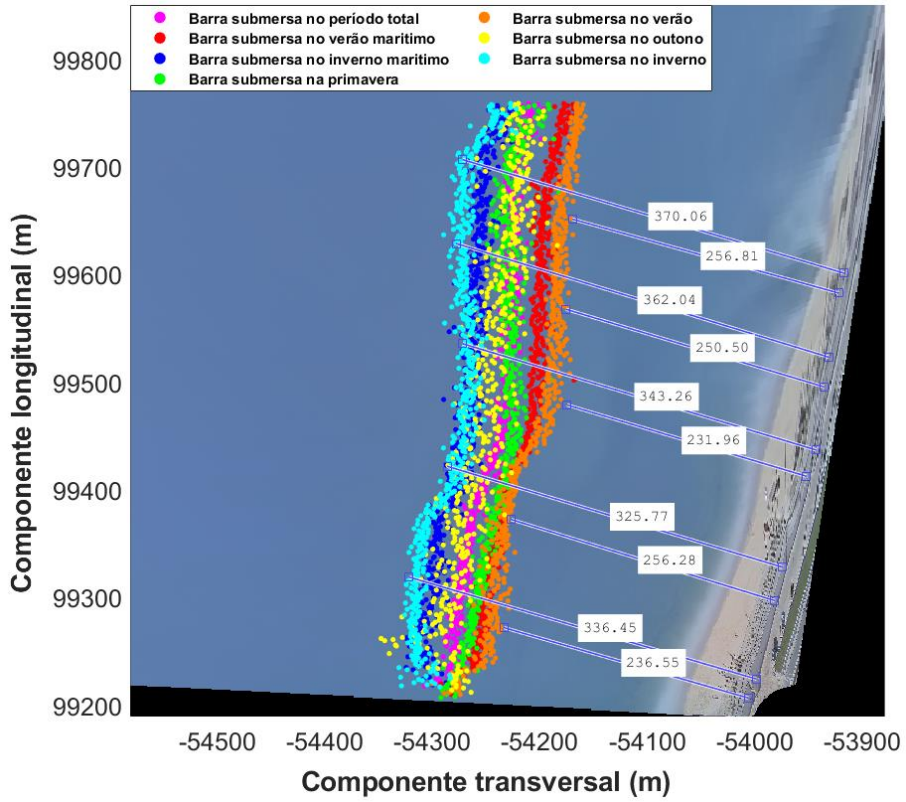


Figura II.9 – Resultados das médias das posições da barra submersa para os período compreendido entre junho de 2019 e julho de 2020

Em síntese, os fundos adjacentes à praia da Vagueira mostram uma variabilidade morfológica interanual acentuada, sobretudo a cotas acima de -4 m (ZH), em resultado da dinâmica transversal e longitudinal à linha de costa do sistema de barras. A tendência evolutiva global dos fundos entre junho de 2018 e março de 2021 é de erosão, mostrando, no entanto, valores decrescentes da taxa anual de evolução. No setor costeiro a norte da praia da Vagueira a tendência de evolução é de acreção, resultado da alimentação artificial de elevada magnitude que ocorreu em frente das praias das Costa Nova em 2020.

II.2 Variabilidade do perfil transversal de praia

Apresenta-se a análise da variabilidade sazonal de perfis transversais na zona da praia da Vagueira, com base nos levantamentos de diferentes datas apresentados no Quadro II.4 e Figura II.10. Esta análise atualiza a apresentada no Relatório 7.

Entre julho 2013 e março 2021 verifica-se acentuada variabilidade morfológica ao longo do perfil transversal da praia da Vagueira, até profundidades de cerca de -8 m (ZH) (que corresponde à distância da linha de costa de aproximadamente 700 m (ZH), cota a partir da qual não apresenta alterações assinaláveis (Figura II.11). Destaca-se a elevada dinâmica, quer horizontal, quer vertical, do sistema de barras que se desenvolve no perfil transversal principalmente entre as cotas -1 e -6 m (ZH). Este sistema pode incluir até duas barras em simultâneo, interna e externa, localizadas a cerca de 180-300 m e 300-550 m da linha de costa (aqui definida como a base da duna ou da defesa aderente) (Quadro II.5).

Quadro II.4 – Dados do perfil total e perfis da praia emersa analisados (cuja localização se encontra na Figura II.10)

Perfil Total	Data	Fonte
PC6 (praia da Vagueira)	07/2013	Universidade de Aveiro
	07/2018*	Programa COSMO
	14/11/2018	
	13/05/2019	
	06/2019*	
	05/02/2020	
	01/04/2020	
	23/11/2020	
	22/03/2021	
Perfis praia emersa		
PVG1 e PVG2 (Praia da Vagueira) PLB1 (Praia do Labrego) PDA1 (Praia Duna Alta)	07/08/2018	Programa COSMO
	14/11/2018	
	22/02/2019	
	24/05/2019	
	29/07/2019	
	28/10/2019	
	10/02/2020	
	20/04/2020	
	26/07/2020	
	21/10/2020	
	31/01/2021	
	15/04/2021	

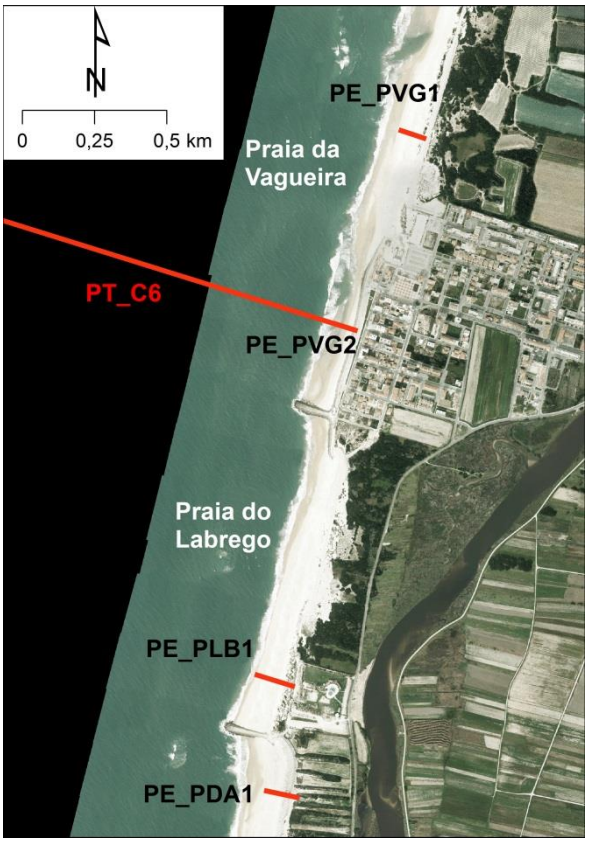


Figura II.10 – Localização dos perfis transversais analisados do Programa COSMO: PC6 – perfil total; PE – perfis emersos (Imagem: Ortofotos das Zonas Costeiras de Portugal Continental de 2014-2015, DGT)

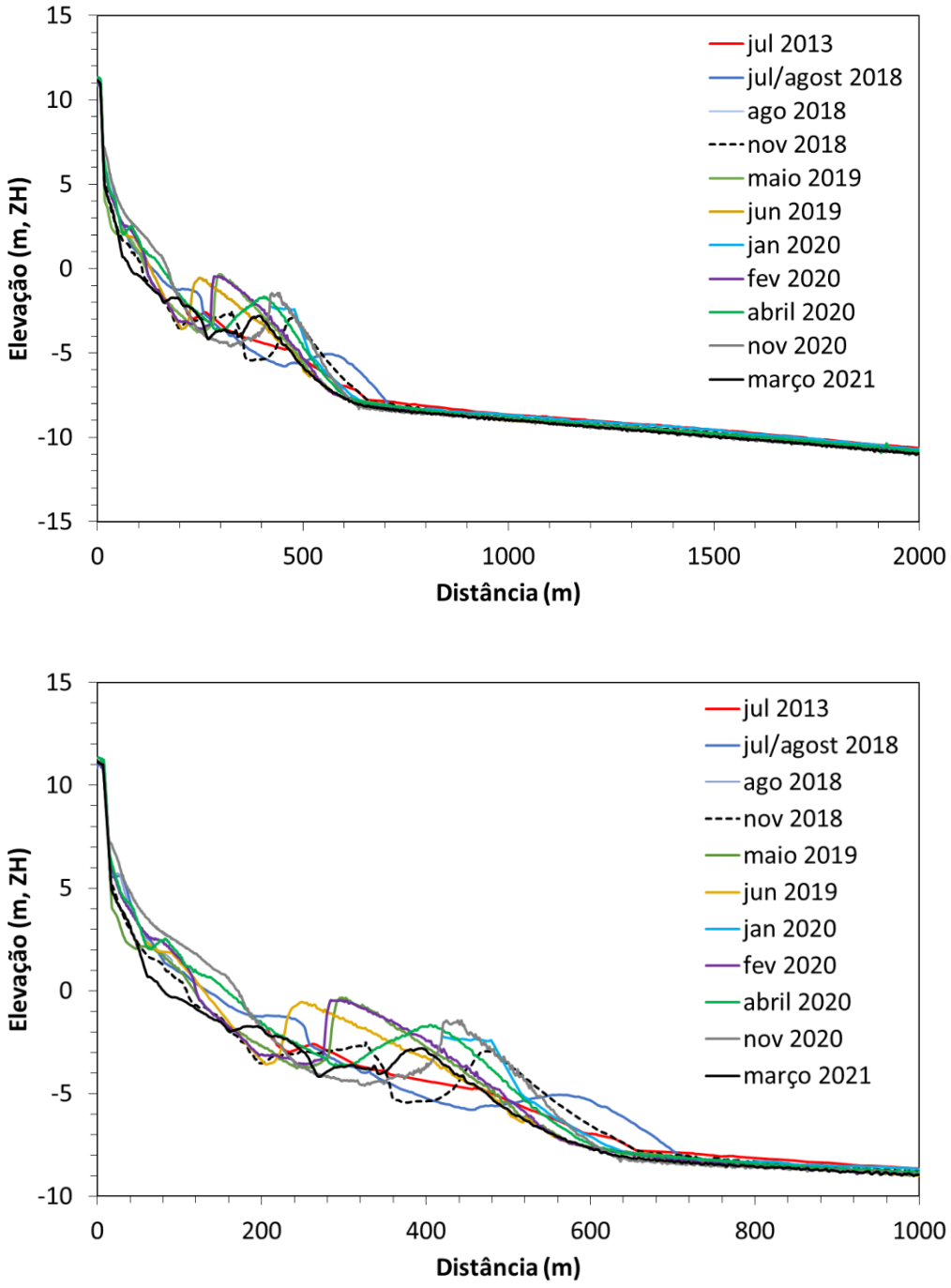


Figura II.11 – Evolução de perfil transversal da praia da Vagueira: (a) perfil completo; (b) detalhe acima de -10 m (ZH). A localização do perfil corresponde ao perfil total PT_PC6 do Programa COSMO

Quadro II.5 – Geo-indicadores da praia emersa e submersa com base no perfil total PC6, localizado na Figura II.10 (sd – sem dados)

	Indicador		Jul. 2013	Jul./ agosto 2018	Nov. 2018	Maio 2019	Jun. 2019	Jan. 2020	Fev. 2020	Abril 2020	Novembro 2020	Março 2021
Praia emersa	largura (m)		sd	35,71	23,04	10,94	sd	sd	30,61	37,81	58,54	23,19
	elevação (m ZH)		sd	4,69	4,09	3,62	sd	sd	4,70	4,74	4,80	3,95
Praia submersa	Barra interna	distância à linha de costa (m)	sd	188,00	310,63	280,38	sd	sd	268,80	-	-	177.38
		distância à linha de praia (m)	sd	152,29	287,59	269,44	sd	sd	238,19	-	-	153.92
		elevação (m ZH)	-1,93	-1,20	-2,52	-0,33	-0,54	sd	-0,45	-	-	-1.72
	Barra externa	distância à linha de costa (m)	-	547,00	457,14	-	-	sd	-	390,54	424,45	377.44
		distância à linha de praia (m)	-	511,29	434,10	-	-	sd	-	352,73	365,91	353.98
		elevação (m ZH)	-	-5,07	-2,94	-	-	-2,40	-	-1,66	-1,44	-2.80

A análise comparativa interanual, de situações semelhantes do ponto de vista de condições de agitação marítima, mostra que há tendência genérica para o enchimento do perfil. Comparando as situações de final de verão marítimo de 2018 e de 2020 (novembro) há enchimento claro do perfil acima da cota -5 m (ZH) (Figura II.12a). Esta tendência é traduzida na zona submersa pelo crescimento em altura da barra externa, em 1,5 m (Quadro II.5). Na zona emersa há o aumento de 36 m da largura média da praia, não havendo alteração significativa na elevação média (Figura II.12c). Comparando duas situações de final de inverno marítimo (maio 2019 e abril 2020) a tendência evolutiva é igualmente no sentido de enchimento do perfil a cotas superiores a -4 m (ZH), com aumento de largura da praia de 27 m e elevação de 1,0 m (Figura II.12b e c, Quadro II.5).

O perfil mais recente disponível, de março 2021, mostra geoindicadores semelhantes ao perfil de fevereiro 2020 quanto à praia emersa (Quadro II.5). Na zona submersa encontra-se uma barra externa bem desenvolvida, aproximadamente na mesma zona da barra existente em abril 2020 (a 380 m da linha de costa), embora com menor elevação. Há ainda a salientar a presença de uma barra interna insipiente, a cerca de 180 m da linha de costa.

Analisando com maior detalhe a evolução morfológica do domínio emerso da praia na zona da Vagueira, entre agosto 2018 e abril 2021 (que engloba 2 ciclos completos de inverno-verão marítimos), verifica-se a expectável evolução morfológica sazonal entre perfis do tipo dissipativo, típicos de inverno marítimo, e do tipo refletivo, com uma berma mais ou menos extensa, típicos de verão marítimo (Figura II.13). Note-se que a evolução transversal dos perfis analisados pode também ser condicionada pela

natureza do limite em terra da alta-praia e pelo contexto longitudinal de proximidade a estruturas de defesa transversais, uma vez que os perfis analisados apresentam diferenças nessas características.

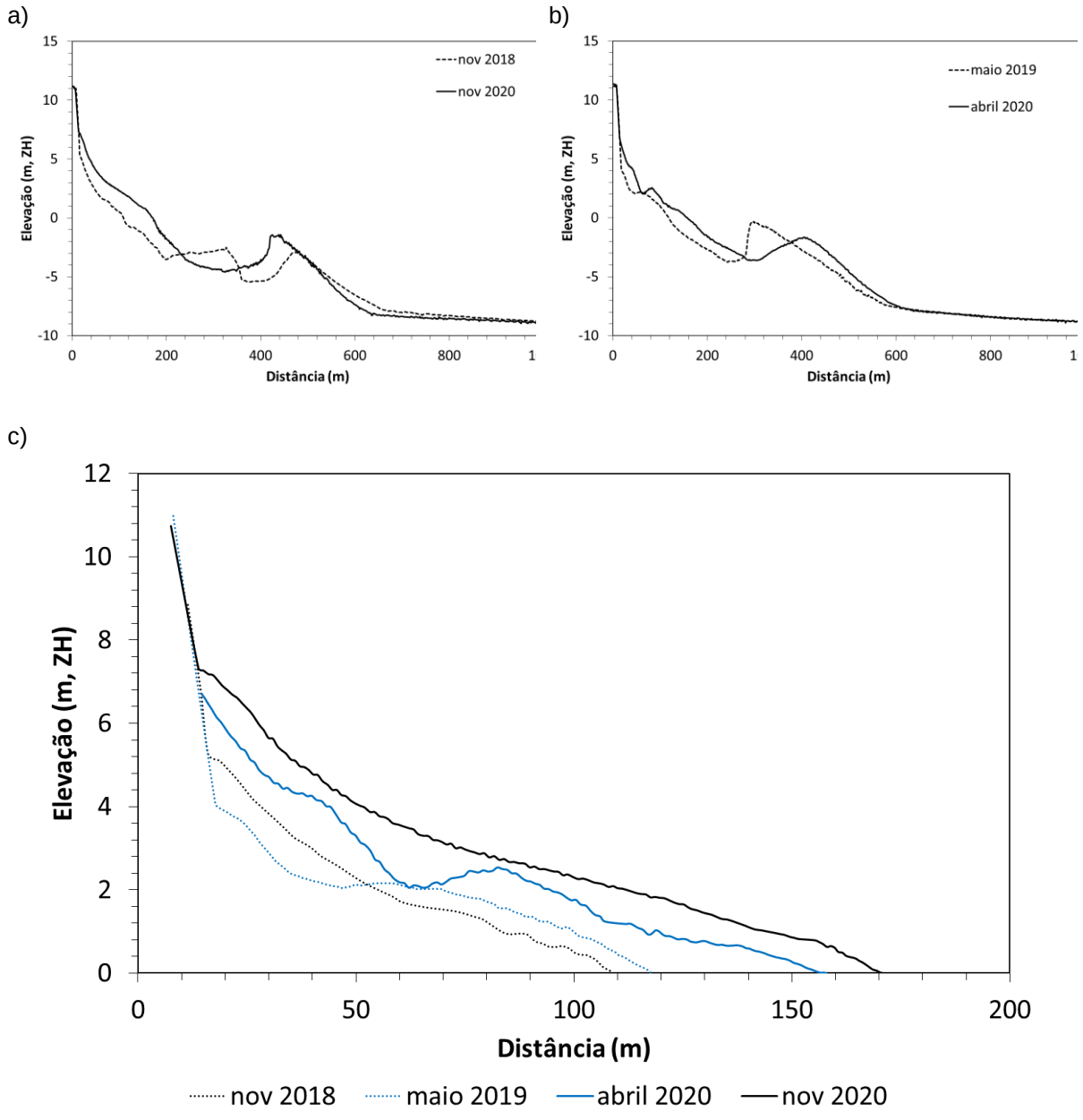


Figura II.12 – Aspetos da evolução do perfil transversal total (PC6) da praia da Vagueira

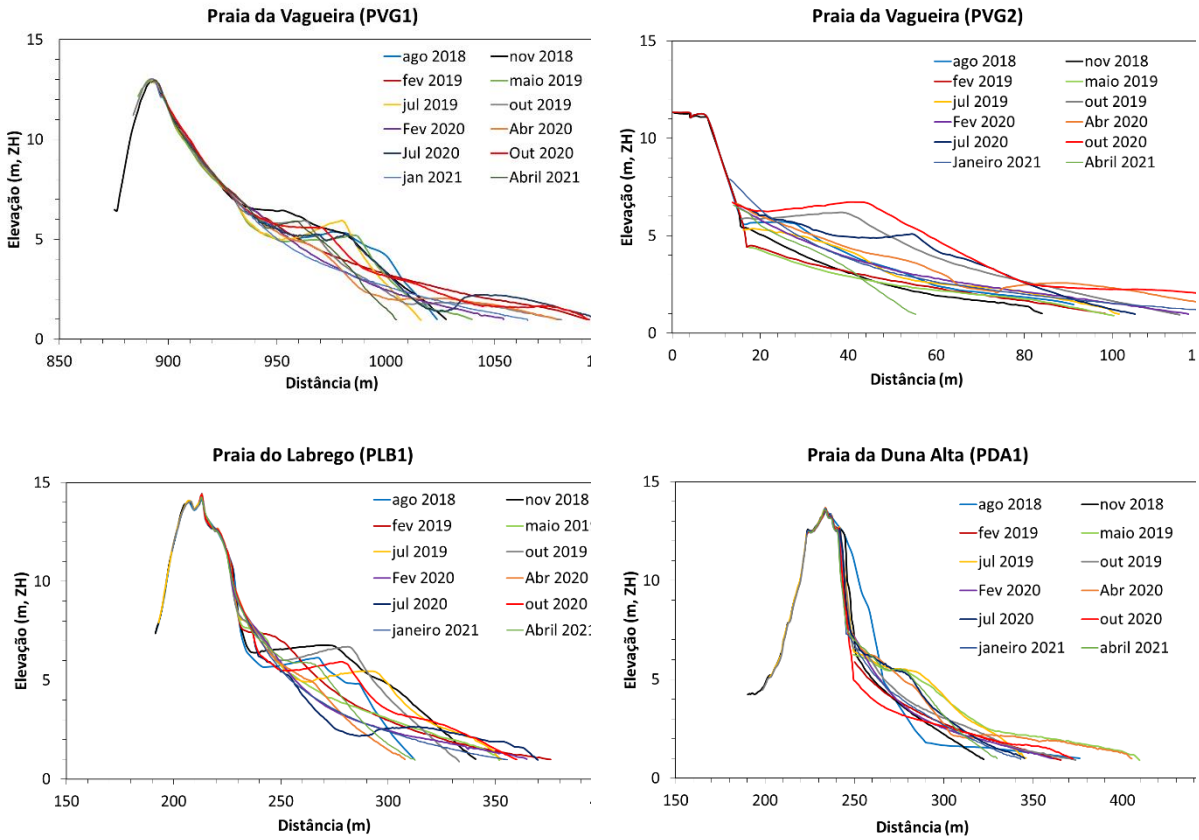


Figura II.13 – Evolução dos perfis da praia emersa. A localização dos perfis está indicada na Figura II.10 e corresponde à do Programa COSMO

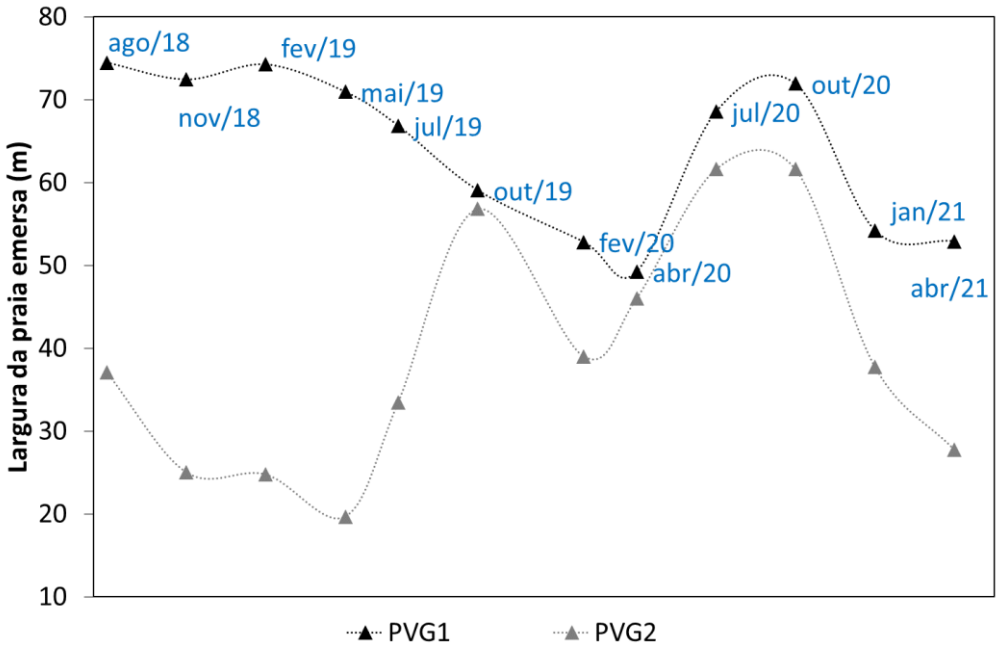
Na praia da Vagueira, a evolução morfológica do perfil PVG2, que encosta à defesa aderente da frente urbana (com o mesmo alinhamento do perfil total PC6, analisado acima) e se encontra a cerca de 300 m a norte do esporão da Vagueira, mostra uma variação sazonal expectável em resposta ao regime de agitação marítima: apresenta os valores mínimos de largura e de elevação da praia emersa na situação de final de inverno marítimo, e os valores máximos no final do verão marítimo (Figura II.14 e Figura II.15, Quadro II.6). Quanto à evolução interanual deste perfil, a comparação das situações de final de verão marítimo (de novembro 2018 e outubro 2020) mostra uma tendência evolutiva clara no sentido de enchimento do perfil (Figura II.17c). Este representa um acréscimo de 37 m na largura e de 1,5 m de elevação médias da praia emersa (Quadro II.6). Em termos volumétricos há um acréscimo superior a duas vezes e meia (Figura II.16, Quadro II.7). A comparação das situações de final de inverno marítimo (entre maio 2019 e abril 2021) evidencia um acréscimo da cota do topo da praia junto à estrutura (Figura II.17d), e um aumento de 8 m da largura média. Há um acréscimo de volume da praia de cerca de 60%.

A evolução do perfil PVG1, limitado superiormente por uma duna frontal e situado a cerca de 1000 m a norte do esporão da Vagueira, é distinta do anterior (Figura II.13a). Embora o valor da elevação média da praia mostre uma tendência de variação sazonal, com valores máximos no final do verão e mínimos no final de inverno (Figura II.15, Quadro II.6), a evolução da largura apresenta decréscimo contínuo

atingindo o mínimo em abril 2020 (Figura II.14). Após esta data há recuperação do perfil, bem evidenciada na variação volumétrica (Figura II.16, Quadro II.7). Quanto à evolução interanual, tanto a largura como a elevação média do perfil mantêm-se estáveis entre as situações de final de verão (novembro 2018 e outubro 2020) (Figura II.17a), o que se reflete numa relativa estabilidade volumétrica. A comparação das situações no final do inverno (maio 2019 e abril 2021) mostra um ligeiro decréscimo em largura, mas estabilidade quanto à elevação (Figura II.17b).

A evolução transversal do setor a sul da praia da Vagueira, representado pelos perfis das praias do Labrego (PLB1) e da Duna Alta (PDA1) ambos limitados superiormente pela duna frontal, não mostra uma resposta sazonal evidente (Figura II.13). Por exemplo, os valores mínimos de largura da praia ocorrem em julho e outubro 2020 (nos perfis PLB1 e PDA1, respetivamente) (Figura II.14, Quadro II.6). Quanto à evolução interanual, a comparação das situações de final de verão marítimo de novembro 2018 e outubro 2020 revelam um decréscimo em largura média (Figura II.18), sendo de 2 m na praia da Duna Alta mas atingindo 14 m na praia do Labrego (Quadro II.6). Em ambos os casos a diminuição da elevação média da praia é pouco significativa (Figura II.15). Quanto são comparadas as situações de final de inverno marítimo, observa-se uma diminuição da largura média em ambas as praias, entre 2019 e 2020, mostrando alguma recuperação em 2021 (Figura II.18, Quadro II.6). Nessas datas a elevação média da praia também não mostra alterações significativas.

a)



b)

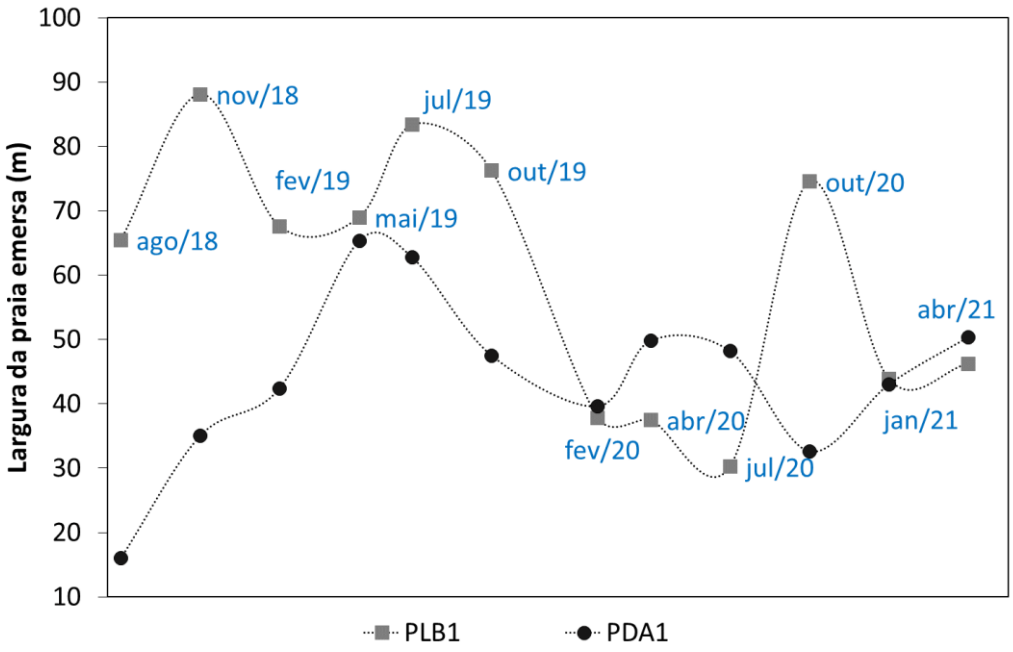
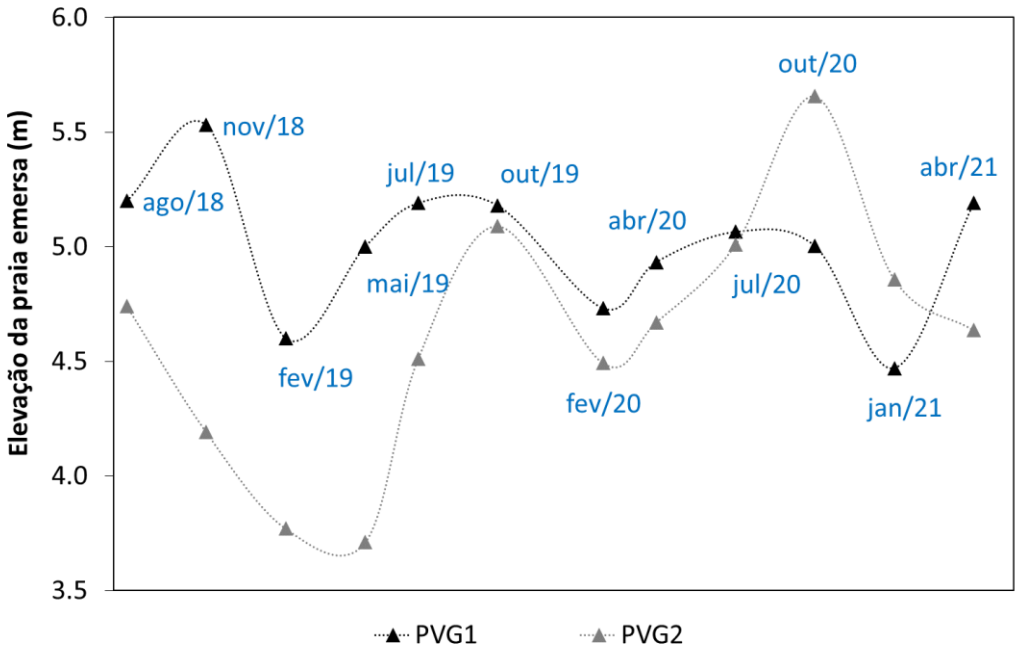


Figura II.14 – Evolução da largura da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10

a)



b)

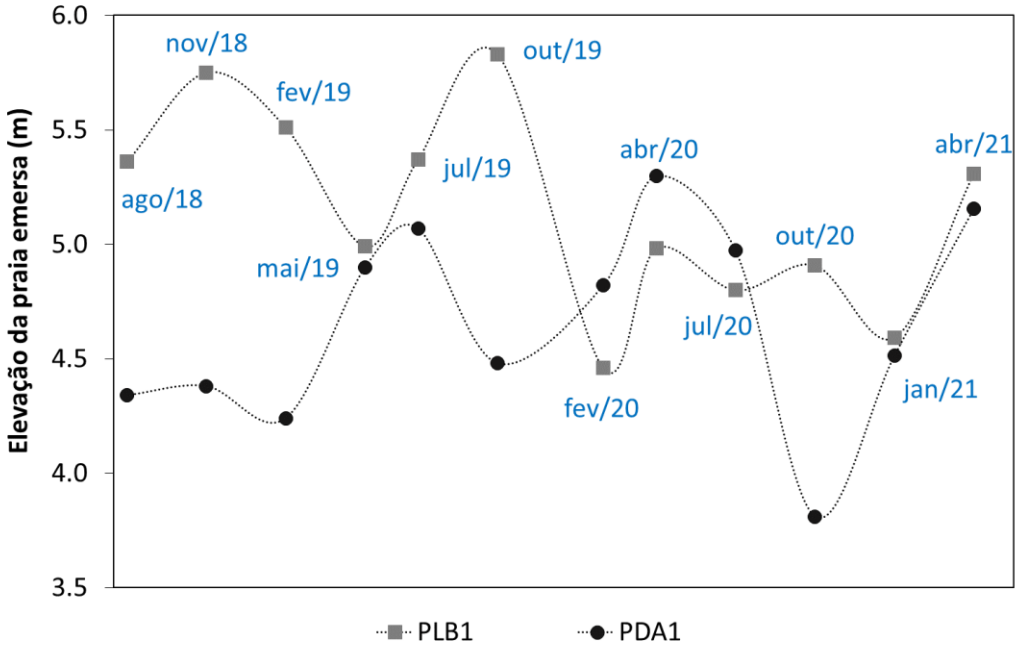


Figura II.15 – Evolução da elevação da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10

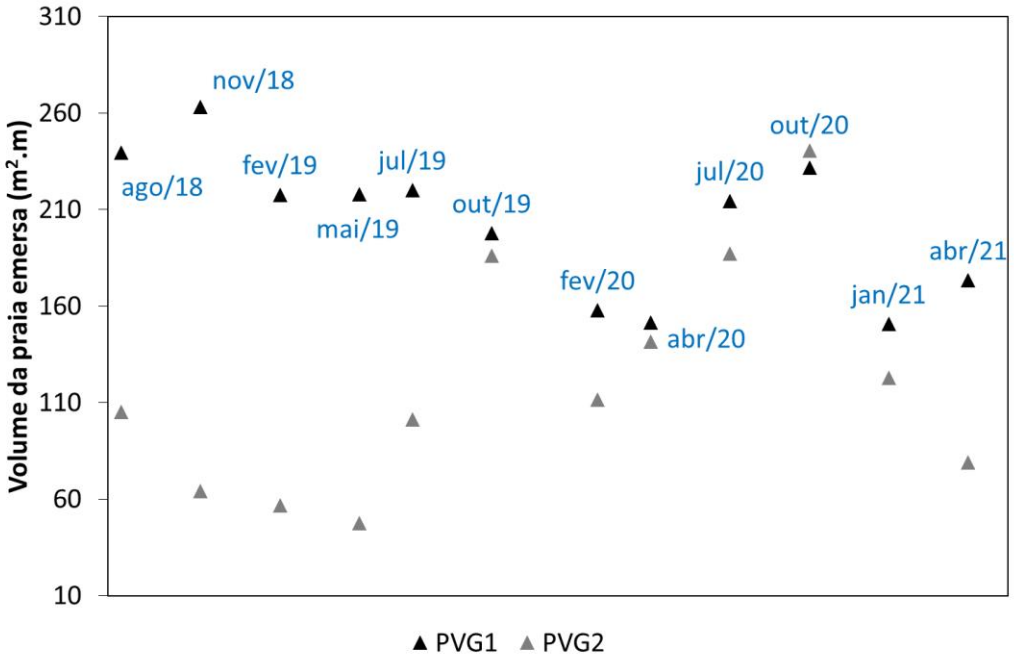


Figura II.16 – Evolução do volume da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10

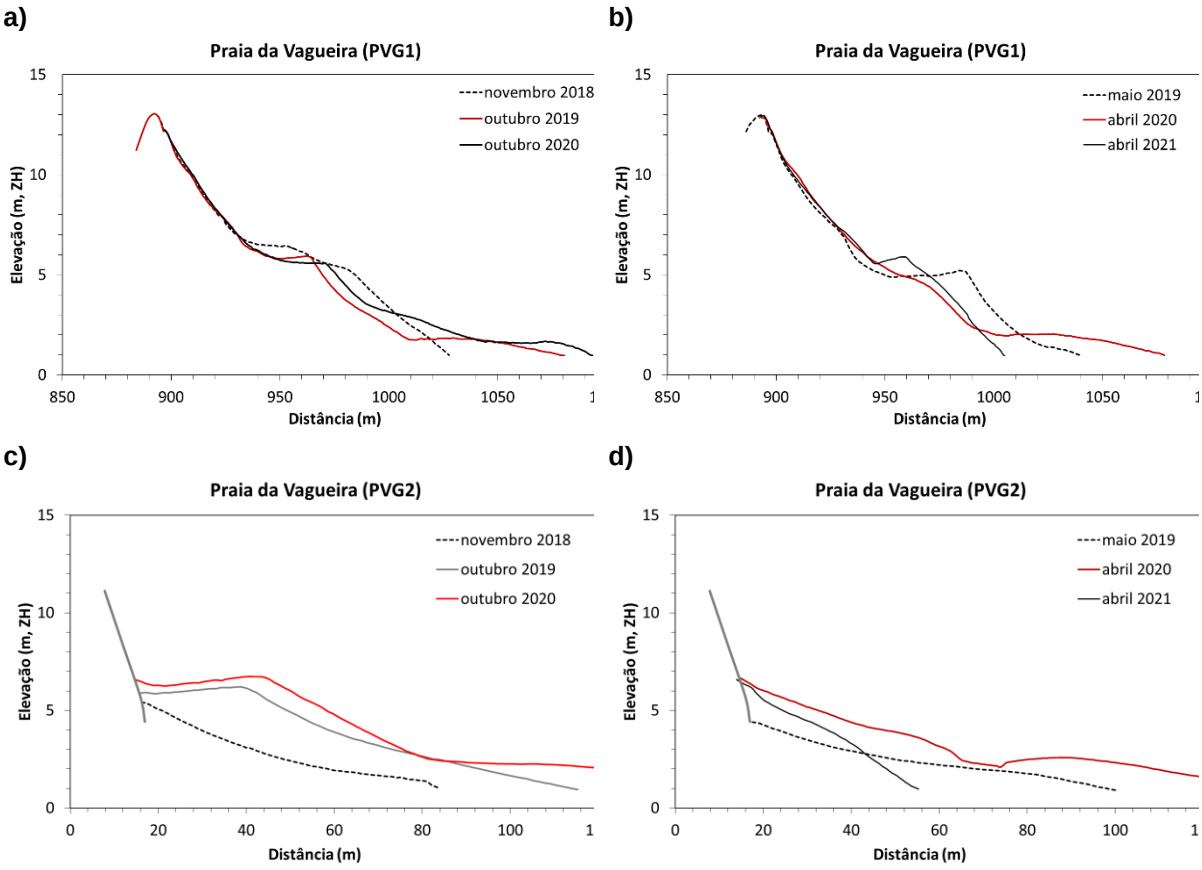


Figura II.17 – Aspetos da evolução dos perfis transversais emersos na zona da praia da Vagueira

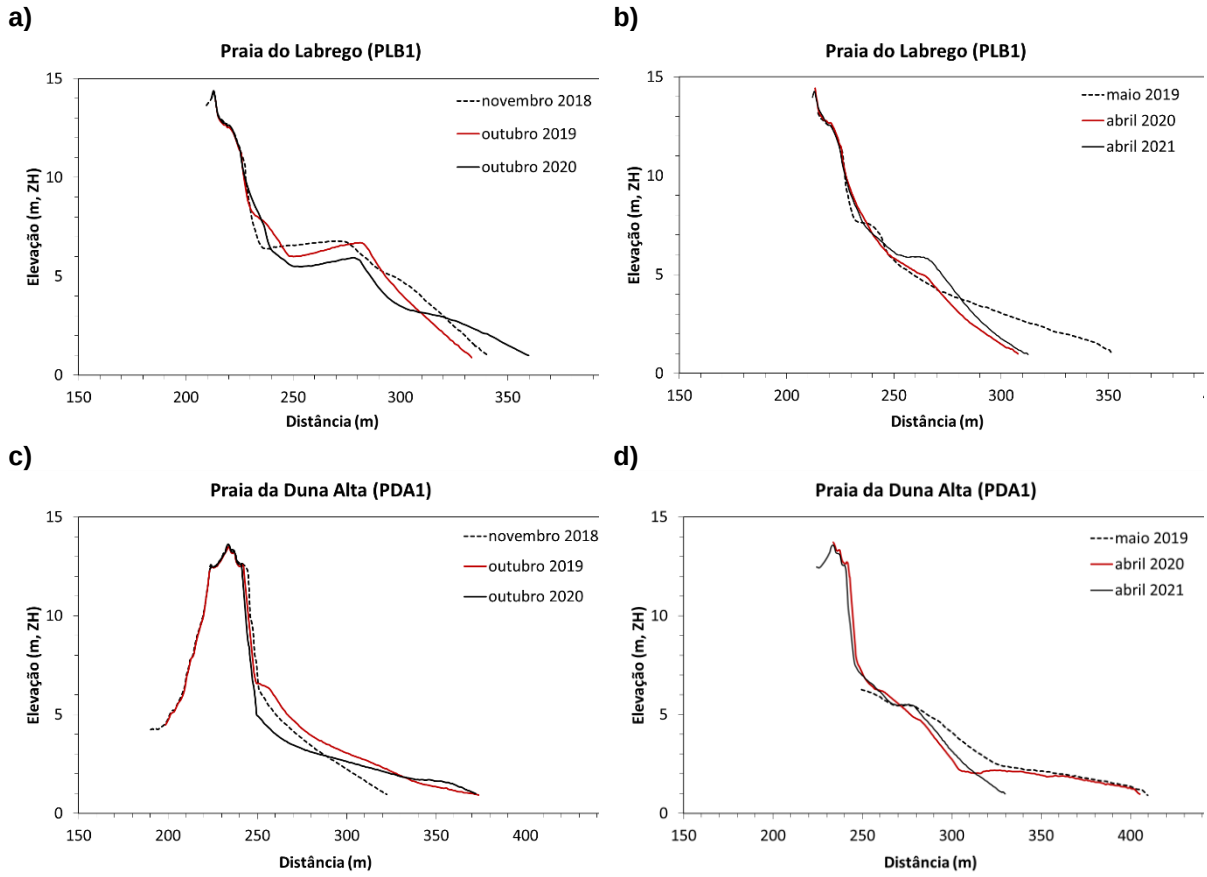


Figura II.18 – Aspetos da evolução dos perfis transversais emersos das praias do Labrego e da Duna Alta

Quadro II.6 – Geo-indicadores da praia emersa: Praia da Vagueira (PVG1 e PVG2), Praia do Labrego (PLB1) e Praia da Duna Alta (PDA1). A localização dos perfis está indicada na Figura II.10

	PVG1	PVG2	PLB1	PDA1
Largura da praia emersa (m)				
ago-18	74,45	37,06	65,46	16,00
nov-18	72,42	24,99	88,11	35,03
fev-19	74,24	24,74	67,54	42,42
mai-19	70,93	19,65	68,98	65,32
jul-19	66,84	33,46	83,39	62,72
out-19	59,05	56,81	76,24	47,47
fev-20	52,81	39,01	37,84	39,58
abr-20	49,20	46,00	37,50	49,76
jul-20	68,53	61,60	30,23	48,16
out-20	71,91	61,62	74,53	32,60
jan-21	54,21	37,73	43,85	42,98
abr-21	52,89	27,72	46,21	50,35
Média	63,96	39,20	59,99	44,37
Valor máx.	74,45	61,62	88,11	65,32
Valor min.	49,20	19,65	30,23	16,00
Desvio padrão	9,59	14,54	19,80	13,22
Elevação da praia emersa (m ZH)				
ago-18	5,20	4,74	5,36	4,34
nov-18	5,53	4,19	5,75	4,38
fev-19	4,60	3,77	5,51	4,24
mai-19	5,00	3,71	4,99	4,90
jul-19	5,19	4,51	5,37	5,07
out-19	5,18	5,09	5,83	4,48
fev-20	4,73	4,49	4,46	4,82
abr-20	4,93	4,67	4,98	5,30
jul-20	5,06	5,01	4,80	4,97
out-20	5,00	5,66	4,91	3,81
jan-21	4,47	4,86	4,59	4,51
abr-21	5,19	4,64	5,31	5,16
Média	5,01	4,61	5,15	4,66
Valor máx.	5,53	5,66	5,83	5,30
Valor min.	4,47	3,71	4,46	3,81
Desvio padrão	0,29	0,55	0,44	0,44

Quadro II.7 – Volume da praia emersa, por unidade de comprimento longitudinal (m^3/m), calculado nos perfis da Praia da Vagueira. A localização dos perfis está indicada na Figura II.10

	PVG1	PVG2
ago-18	239,5	105,0
nov-18	263,1	64,0
fev-19	217,6	56,8
mai-19	217,7	47,6
jul-19	220,0	101,2
out-19	197,6	186,1
fev-20	157,79	111,67
abr-20	151,28	141,60
jul-20	214,37	187,17
out-20	231,80	240,47
jan-21	150.59	122.84
abr-21	173.27	79.08
Média	202.9	120.3
Valor máx.	263.1	240.5
Valor mín.	150.6	47.6
Desvio padrão	36.9	59.2

ANEXO III
Valor recreativo do *surf* na praia da Vagueira / Costa Nova / Barra

Quadro III.1 – Modelo Poisson reduzido para a procura recreativa do *surf* na praia da Vagueira / Costa Nova / Barra

	Expected number of visits without artificial surfing reef (ASR)	*Expected number of visits with artificial surfing reef (ASR)*
Constant	3.056***	2.372***
Price travel (€)	-0.020***	-0.012*
Dummy_Origin (0=local)	1.461***	0.860*
Dummy_Gender (0=female)	0.760***	0.557***
Prob > chi^2	0.000	0.000
Pseudo R^2	0.049	0.043
Log likelihood	-844.36	-889.57
LR statistic	91.21	83.13

Significância: *** = 5%, ** = 10% e * = 15%.

Quadro III.2 – Estimativas de bem-estar (excedente do consumidor; EC) ajustados aos custos de viagem

	Sem QMD submerso	*Com QMD submerso*
Número de visitas média por surfista por ano	73,282	76,661
EC por surfista por visita (€)	$-\frac{1}{-0{,}020} = 50{,}0$	$-\frac{1}{-0{,}012} = 83{,}3$
EC por surfista por ano (€)	3664,1	6388,4

Quadro III.3 – Estimativa do número de surfistas na Praia da Vagueira

Residentes da Praia da Vagueira[1]	736
Turistas na Praia da Vagueira[2]	24 517
Total de pessoas na Praia da Vagueira	25 253
% da população que é surfista[3]	1.95%
Número de surfistas	492

Notas: [1] INE, 2011. Statistical data – Main Indicators. Instituto Nacional de Estatistica (INE), Lisbon, Portugal. URL: http://www.ine.pt/, accessed 27 January 2015.

[2] CMV, 2010. Plano Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios do Concelho de Vagos: Caderno I – Informação de Base. Gabinete Técnico Florestal de Vagos, Câmara Municipal de Vagos (CMV), Vagos, Portugal. 57p.

[3] Sufer Today, 2022. How many surfers are there in the world? URL: https://www.surfertoday.com/surfing/how-many-surfers-are-there-in-the-world; accessed 14-02-2022.

ANEXO IV
Promoção de ondas de *surf* de referência: Aplicação do modelo numérico COULWAVE

Neste Anexo apresenta-se com maior detalhe a aplicação do modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), utilizado na simulação da propagação de ondas em frente à praia da Vagueira, para os três casos simulados em modelo físico: sem QMD, QMD 0º e QMD 45º.

Seguidamente, é descrito o modelo COULWAVE e as suas condições de aplicação. Apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos em termos de variação da superfície livre e altura de onda significativa bem como os valores dos parâmetros de surfabilidade: índice de agitação, posição e comprimento da linha de rebentação, número de Iribarren e ângulo de rebentação.

Efetua-se a comparação dos resultados numéricos e experimentais em termos dos valores de índices de agitação.

IV.1 Descrição geral do modelo

O código COULWAVE, Lynett e Liu (2004), é uma implementação do modelo de propagação de ondas baseado nas equações de Boussinesq expandidas, deduzidas por Wei *et al*. (1995).

As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e quantidade de movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas. Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades. Com estes perfis de velocidade, que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzido um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas intermédias e apresentar características lineares até um número de onda de kh~8, e um comportamento não linear de 2ª ordem até kh~6.

Lynett e Liu (2002) introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade, dependentes do tempo, para ter em conta variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo. O modelo é assim aplicável desde águas intermédias até à rebentação. Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser corretamente simuladas pelo modelo. A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby (1995) utilizando um esquema previsor-corrector de Adams-Bashforth. A formulação de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo previsor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corretor. Para as derivadas espaciais, são utilizadas diferenças finitas centradas com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são calculadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby (1995) refere-se à natureza de alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores são aplicados dois tipos de condições: de reflexão total e de radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de Wei e Kirby (1995), enquanto para a condição de radiação ou condição de fronteira aberta é usado um esquema de fronteira absorvente, de acordo com Kirby *et al*. (1998). Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu (2002)

e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre, velocidades horizontais e zonas de rebentação.

IV.2 Condições de aplicação do modelo numérico

Condições de agitação

As condições de agitação simuladas numericamente foram definidas com base nas condições de agitação ensaiadas em modelo físico (Mendonça *et al*., 2022). Apresentam-se as simulações numéricas com o nível médio de maré, de +2.17 m (Z.H.) e com ondas regulares com direção de agitação incidente de 296º, período de onda de 12s e altura de onda de 2.0 m.

Domínio computacional

As simulações foram realizadas para as situações sem QMD, com QMD 0° e com QMD 45°, de modo a analisar a influência da estrutura na zona. A batimetria, simplificada, foi baseada no levantamento batimétrico realizado no âmbito do programa COSMO (COSMO, 2019).

O domínio de cálculo, com cerca de 2600x1600 m^2, foi discretizado por uma malha regular de espaçamento constante $\Delta x=\Delta y=4.4$ m (Figura IV.1). Foi adicionado ao domínio uma zona de profundidade constante na qual se efetua a geração da onda através do método da função fonte, Wei *et al*. (1999). Foram usadas, nas extremidades laterais (barlamar e sotamar) do domínio de cálculo, condições fronteiras de absorção com o objetivo de absorver a energia das ondas que atingem estas regiões. Nas restantes fronteiras consideraram-se condições de fronteira de reflexão total.

O número de Courant admitido foi igual a 0,1 e o passo temporal é cerca de 1 s. A função-fonte foi colocada na posição x = 250 m e foram impostas as condições de agitação de ondas regulares sinusoidais. O tempo de simulação foi cerca de 700 s. Os resultados numéricos foram obtidos para todos os nós da malha de cálculo em termos de elevação da superfície livre, componentes da velocidade horizontal em x e y e zonas de rebentação.

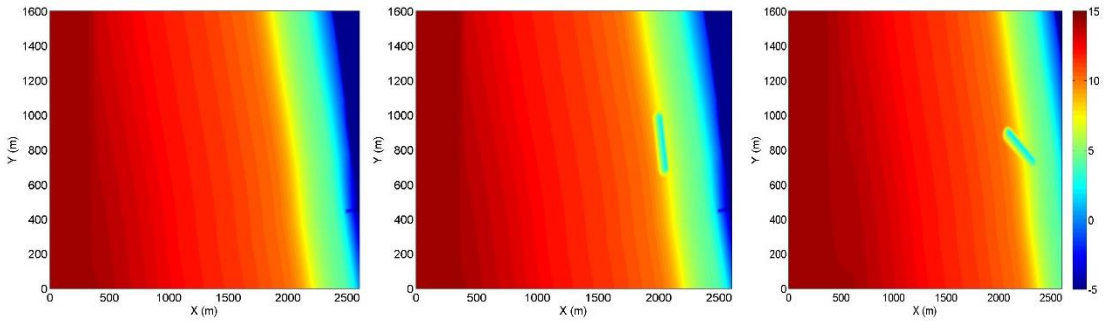


Figura IV.1 – Domínio de cálculo e batimetria: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45°

IV.1.3 Resultados numéricos

Nesta secção descrevem-se as simulações numéricas da propagação de ondas, sem QMD, com QMD 0° e com QMD 45°, efetuadas com o código COULWAVE, para a condição de agitação, T=12s, H=2.0 m e NMM (+2.17 m ZH). Apresenta-se a comparação dos valores dos índices de agitação obtidos com base nos resultados do modelo numérico e nas medições do modelo físico, os resultados numéricos da variação da superfície livre e altura de onda significativa bem como os valores dos parâmetros de surfabilidade: índice de agitação, posição e comprimento da linha de rebentação, número de Iribarren e ângulo de rebentação.

Na Figura IV.2 apresenta-se a comparação dos valores dos índices de agitação obtidos com base nos resultados do modelo numérico e nas medições do modelo físico, para os casos sem QMD, QMD 0° e QMD 45°, nos perfis P4 a P6.

O modelo COULWAVE consegue reproduzir, para todos os casos, a tendência da variação dos índices de agitação ao longo dos perfis, a posição de rebentação e a reformulação da onda nos casos com QMD, na zona a sotamar do QMD. Verifica-se, de um modo geral, uma maior amplificação da onda na simulação do modelo numérico. Esta diferença pode ser explicada pelo facto de a onda gerada no batedor ter uma diferença de +- 5% da onda que foi imposta no modelo numérico.

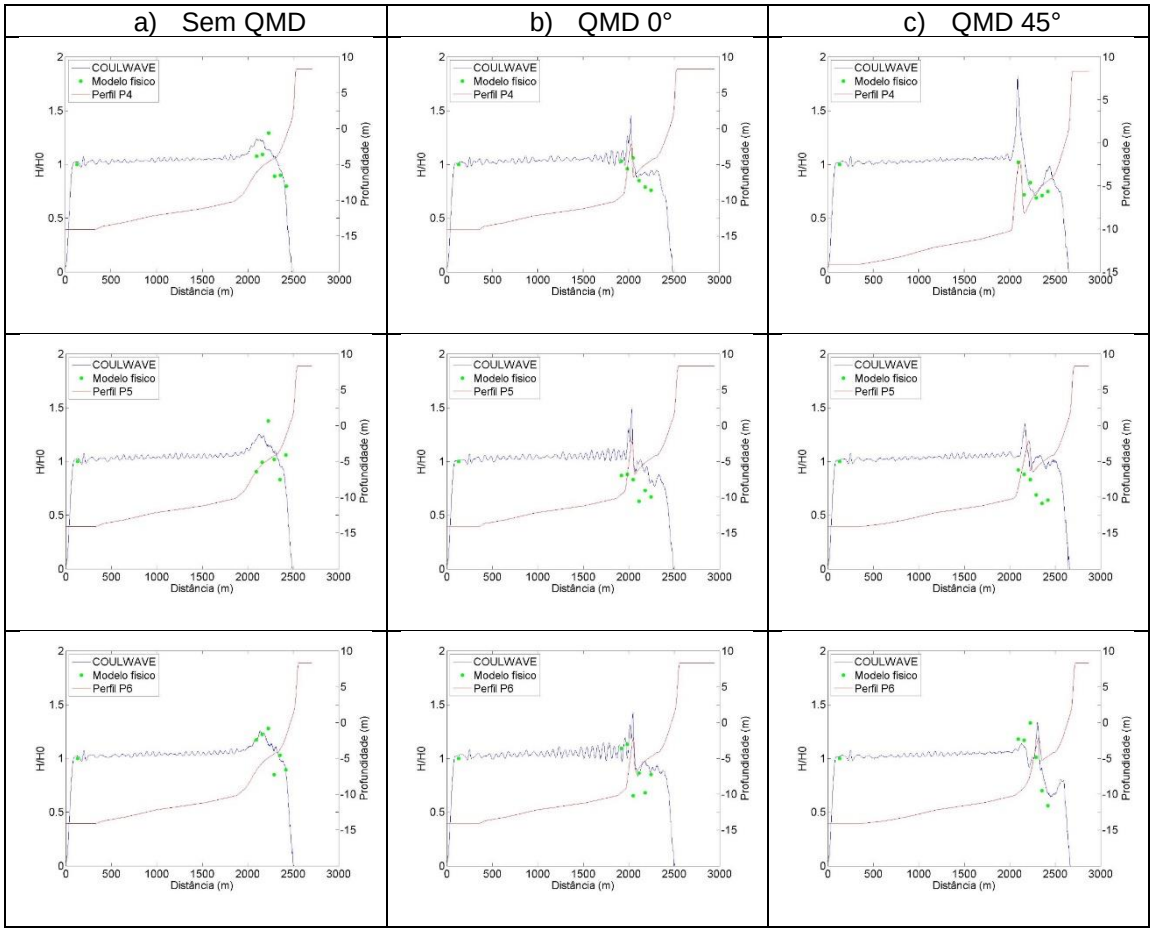


Figura IV.2 – Índice de agitação. Comparação entre os resultados do modelo físico e do modelo numérico nos perfis P4 a P6: a) sem QMD, b) QMD 0°, e c) QMD 45°. Agitação regular, T=12 s; H=2.0 m, NMM

Na Figura IV.3 apresenta-se a variação da superfície livre e altura de onda significativa no domínio de cálculo, para os casos sem QMD, com QMD 0° e com QMD 45°. A presença do QMD altera significativamente as alturas de onda devido aos efeitos de refração e difração, como seria de esperar. Verifica-se um aumento da altura de onda ao longo do QMD como consequência da diminuição da profundidade. A altura de onda diminui significativamente na área de sombra do QMD 0°. Esta redução não é tão significativa para o QMD 45°, pois o ângulo da estrutura induz, na extremidade mais largo, a formação de um ponto de concentração de energia, com a rebentação da onda a ocorrer nesse ponto estendendo-se à zona de barlamar do QMD, Figura IV.3c.

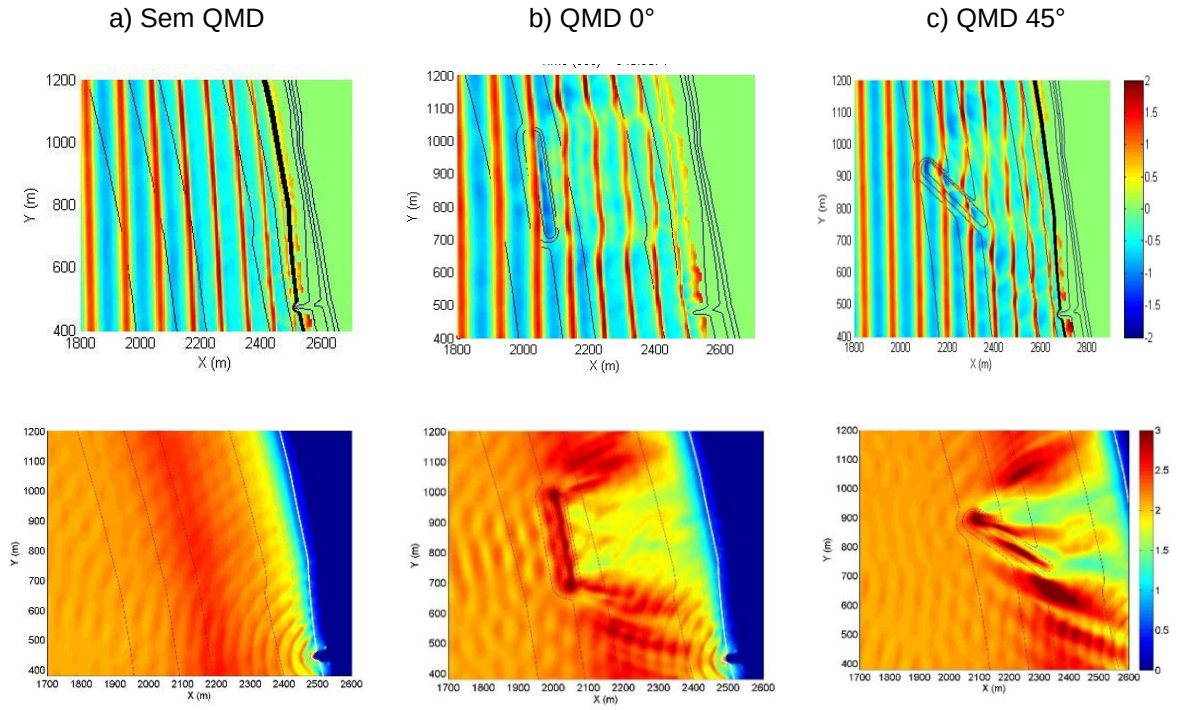


Figura IV.3 – Variação da superfície livre (em cima) e altura de onda significativa (em baixo). Agitação regular: T=12 s; H=2.0 m, NMM: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45°

A variação da altura de onda significativa ao longo dos perfis P4, P5 e P6 (Figura IV.4) pode ser observada na Figura IV.5a, b e c, para os casos sem QMD, com QMD 0° e com QMD 45°, respetivamente. A altura significativa de onda, para o caso sem QMD, diminui gradualmente ao longo dos perfis P4 a P6, Figura IV.5a, e a rebentação ocorre junto à linha de costa.

Para o caso QMD 0°, o início da rebentação ocorre no coroamento e dá-se simultaneamente ao longo da estrutura. Este comportamento observa-se na Figura IV.5b, verificando-se que a onda rebenta na mesma posição nos três perfis, P4 a P6.

O QMD 45° induz uma variação de altura de onda ao longo da estrutura, ou seja: na extremidade mais a sotamar (correspondente ao perfil P4), ocorre rebentação no QMD; a meio do QMD (perfil P5), ocorre

a rebentação no talude de sotamar e no talude de barlamar, e; na extremidade da estrutura mais próxima da costa (perfil P6), a onda rebenta no talude de sotamar e na estrutura, Figura IV.5c.

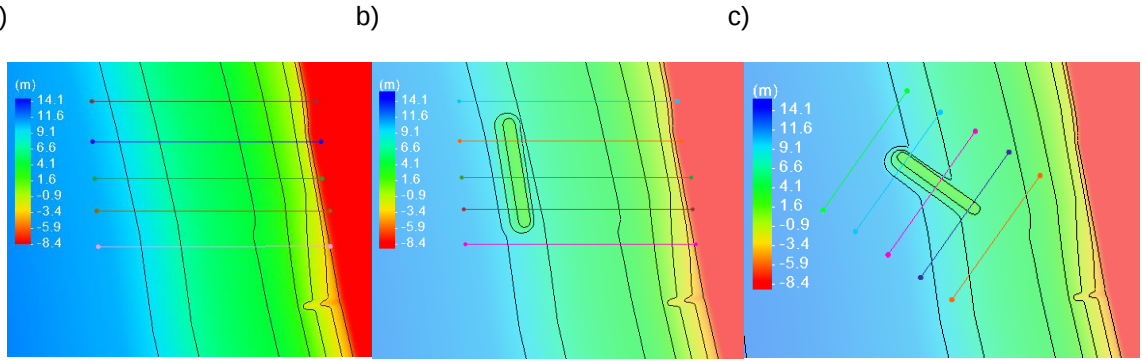


Figura IV.4 – Posição dos perfis: a) sem QMD, b) QMD 0°, c) QMD 45°

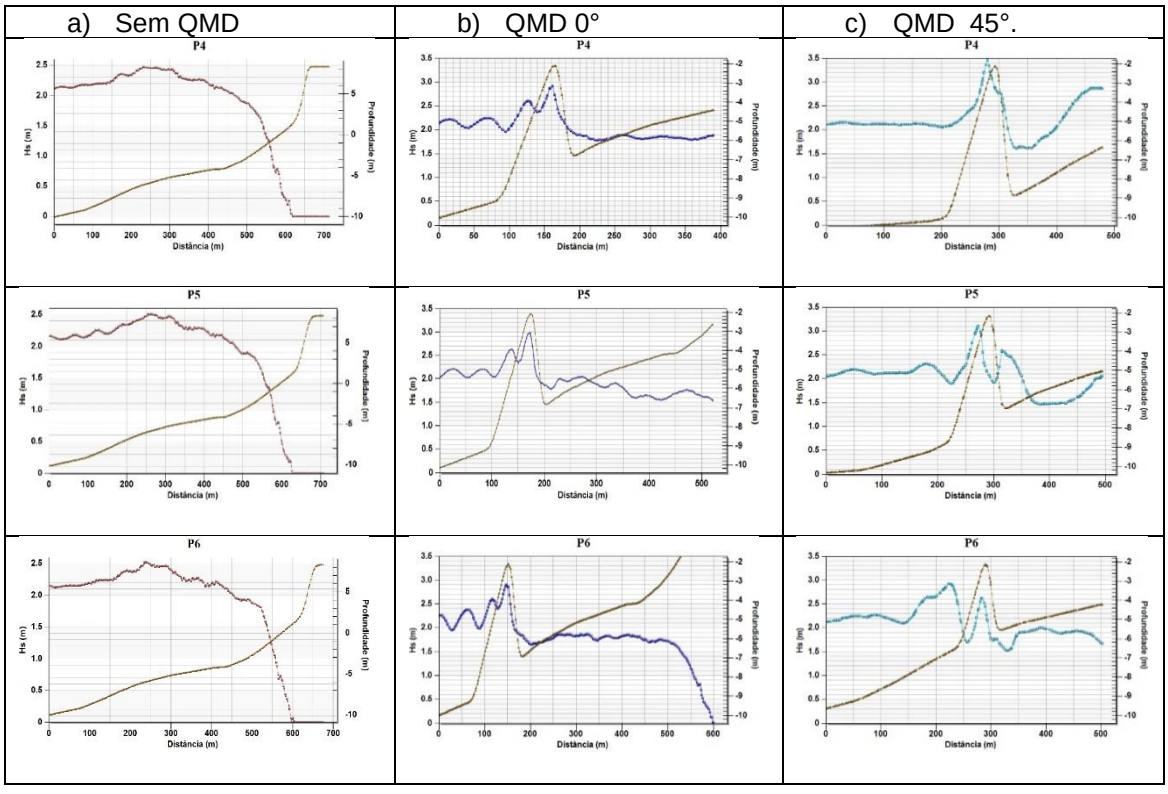


Figura IV.5 – Resultados numéricos da variação da altura de onda significativa nos perfis P4 a P6, para os casos: a) sem QMD, b) QMD 0° e c) QMD 45°. Condição de agitação regular: T=12 s; H=2,0 m

A posição e o comprimento da linha de rebentação e a direção da onda estão representadas na Figura IV.6a, b e c, para os casos sem QMD, QMD 0° e QMD 45°, respetivamente. Na ausência de estrutura, a rebentação ocorre junto à linha de costa e a direção da onda é perpendicular à costa (Figura IV.6a).

Para o caso QMD 0°, a direção da onda é maioritariamente perpendicular à estrutura, observando-se a difração da onda nas extremidades do QMD bem como o desenvolvimento da linha de rebentação ao longo dos 300 m de comprimento da estrutura, Figura IV.6b.

Para o caso QMD 45°, observa-se a rotação da direção da onda, ao longo da estrutura (a onda torna-se quase perpendicular no coroamento de sotamar da estrutura). Na extremidade norte do QMD, na zona de barlamar, a direção da onda é paralela à estrutura e acompanhada de rebentação da onda, Figura IV.6c. A linha de rebentação ocorre em cerca de metade da estrutura, com um comprimento de aproximadamente 150 m.

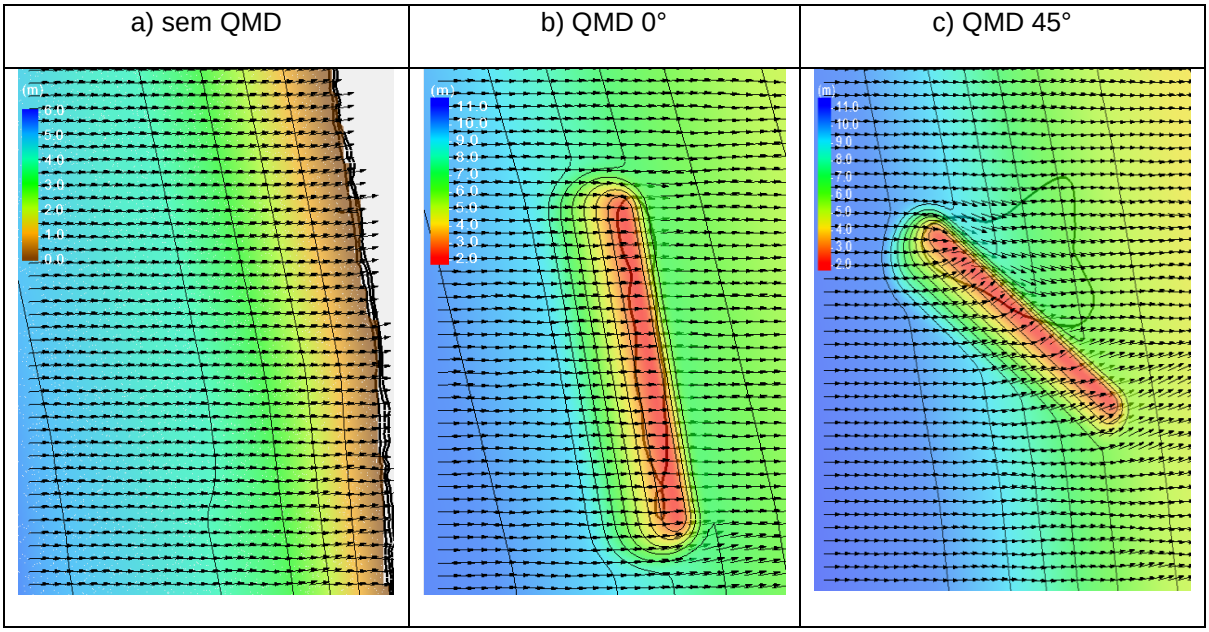


Figura IV.6 – Batimetria, linha de rebentação (a preto) e direção da onda para: a) sem QMD, b) QMD 0°, e c) QMD 45°. Agitação regular: T=12 s; H=2.0 m, NMM

A caracterização do tipo de rebentação da onda, junto à linha de costa e na presença do QMD, baseia-se nos valores do número de Iribarren. Recorrendo aos perfis P4 a P6, foram identificadas as posições de início de rebentação e respetivas alturas de onda (Quadro IV.1):

i) para o caso sem estrutura, o número de Iribarren varia entre 0,18 e 0,25, correspondendo a uma rebentação progressiva;

ii) para os casos QMD 0° e QMD 45°, o número de Iribarren é cerca de 0,65, correspondendo a uma rebentação mergulhante.

O ângulo entre a linha de rebentação e a frente de onda é o ângulo de rebentação, que está relacionado com o nível de dificuldade na execução de manobras pelo surfista.

A onda rebenta paralelamente à linha de costa, para o caso sem estrutura, e a linha de rebentação é paralela à costa, obtendo-se ângulos de rebentação próximos de 0°, que, por si só, indicaria condições desfavoráveis à pratica de *surf*. No entanto, como a rebentação do tipo progressivo ocorre ao longo de uma distância suficientemente longa (cerca de 200 m, Figura IV.5a), verificam-se condições de *surf* adequadas para surfistas iniciantes.

Quadro IV.1 – Resultados numéricos dos valores de: talude, altura de onda na rebentação (Hb), posição de rebentação, número de Iribarren, tipo de rebentação e ângulo de rebentação, para os casos sem QMD, QMD 0° e QMD 45° nos perfis P4 a P6. Condição de onda regular: H=2 m, T=12 s e NMM

L_0=132 m	Parâmetros	P4	P5	P6
Sem QMD		0.0225	0.0211	0.0289
QMD 0º	**declive**	0.0962	0.0973	0.0973
QMD 45º		0.1024	0.1026	0.0974
Sem QMD		1.87	1.90	1.81
QMD 0º	**Hb (m)**	2.91	2.989	2.90
QMD 45º		3.46	3.10	2.61
Sem QMD	**Posição de**	504	511	521
QMD 0º	**rebentação**	161	173	147
QMD 45º	**(m)**	280	272	282
Sem QMD		0.19	0.18	0.25
QMD 0º	**Número de Iribarren**	0.647	0.646	0.656
QMD 45º		0.632	0.669	0.692
Sem QMD			Progressiva	
QMD 0º	**Tipo de rebentação da onda**		Mergulhante	
QMD 45º			Mergulhante	
Sem QMD			90º	
QMD 0º	**Ângulo de rebentação (º)**		< 30 º	
QMD 45º			40 º -50 º	

No caso QMD 0°, apesar da rebentação ocorrer ao longo da estrutura e ser do tipo mergulhante, o ângulo de rebentação é inferior a 30º (próximo de 0º), uma vez que a rebentação ocorre simultaneamente ao longo de toda a estrutura, não sendo adequada para a prática de *surf*.

No caso QMD 45°, o ângulo de rebentação varia entre 40°-50°, adequado à prática de *surf* por surfistas experientes e profissionais.

Referências do Anexo IV

KIRBY, J.T.; WEI, G.; CHEN, Q.; KENNEDY, A. B.; DALRYMPLE, R. A., 1998 **– FUNWAVE 1.0 - Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual**. Research Report No. CACR-98-06. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

LYNETT, P.; LIU, P. L.-F., 2002 – **Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth Integrated, Dispersive Wave Equations. COULWAVE Code Manual Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package**.

LYNETT, P.; LIU, P.L.-F., 2004 – **Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package**.

WEI, G.; KIRBY, J. T.; GRILLI, S. T.; AND SUBRAMANYA, R., 1995 – **A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves**. Journal of Fluid Mechanics 294, 1995, pp.71 - 92.

WEI, G.; KIRBY, J.T., 1995 – **A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations.** Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 120, 1995, pp. 251 – 261.

WEI, G.; KIRBY, J. T.; SINHA, A., 1999 – **Generation of waves in Boussinesq models using a source function method**. Coastal Engineering, 36, 271–299.

www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt **www.lnec.pt**