



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

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**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

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**

Estudo realizado para a
Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.

Lisboa • abril 2022

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 94/2022 – **DHA/NEC**

Cofinanciado por:



Trabalho realizado por:



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



universidade de aveiro



TÉCNICO
LISBOA

Título

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

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Ana Mendonça

Investigador Auxiliar, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Francisco Sancho

Investigador Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Maria Graça Neves

Investigadora Auxiliar Com Agregação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Conceição Juana Fortes

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Paula Freire

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras Colaboração

Colaboração

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Luís Simões Pedro

Técnico Superior, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Fernando Aires Brito

Técnico Superior, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

César Costa

Bolseiro de Investigação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Rui Reis

Técnico Superior, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Joana Simão

Técnica Superior, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Jan André Hilário

Técnico Superior

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Pedro Bicudo

Professor Associado, Instituto Superior Técnico

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 94/2022

Proc. 0604/1201/21221, 0603/1201/2122101

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

Resumo

Apresenta-se neste relatório os principais resultados dos ensaios em modelo físico reduzido referentes ao “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira”.

Os ensaios, realizados à escala 1:65 com fundo móvel, permitiram analisar o efeito do quebra-mar destacado (QMD) na dinâmica sedimentar próxima e na geração de ondas para o surf. No que se refere à dinâmica sedimentar, verificou-se a reprodução de fenómenos de evolução morfológica no modelo físico, com predominância de movimentos sedimentares transversais na ausência do QMD e quase inexistência de transporte longilitoral. A implantação de um QMD paralelo à praia induziu a formação de células de circulação na zona abrigada que conduziram à formação de um saliente de pequenas dimensões, centrado com o eixo transversal do QMD. A implantação de um QMD 45° oblíquo à costa provocou a formação de dois salientes, de dimensões semelhantes aos da configuração anterior.

No que se refere à geração de ondas para surf comparam-se os resultados obtidos sem QMD, com QMD paralelo e com QMD oblíquo à costa. Analisam-se os índices de agitação, localização, comprimento e tipo de rebentação para cada situação.

Para todas as condições de agitação ensaiadas, a rebentação na situação atual (sem QMD) ocorre a sotamar da posição de implantação prevista para o QMD, próxima da linha de costa. O QMD provoca alteração das condições de rebentação, levando a que esta ocorra na zona próxima ou sobre o QMD.

Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, dos casos ensaiados, no caso sem QMD e no caso com QMD oblíquo se obtiveram condições de rebentação adequadas à prática de surf.

Apresenta-se a calibração realizada com o modelo numérico COULWAVE para o caso do QMD oblíquo, para uma condição de agitação regular. O modelo numérico permite calcular alguns parâmetros importantes para a verificação das condições de rebentação e da sua adequabilidade para a prática do surf, tais como o comprimento da linha de rebentação, a direção da onda no ponto de rebentação, o ângulo de rebentação e o número de Iribarren. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que o QMD oblíquo gera uma onda de boa qualidade para o surf, já que se obtém uma rebentação mergulhante e um ângulo de rebentação adequado para surfistas standard/profissionais.

Realizaram-se ensaios de galgamento e, para as condições de agitação ensaiadas, não se verificou galgamento da estrutura de defesa longitudinal aderente nem no caso dos ensaios sem QMD nem com QMD, quer paralelo à costa quer oblíquo.

Palavras-chave: Ensaios em modelo físico / Surf / Fundo móvel / Dinâmica sedimentar

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

(T2) Physical modelling studies: Physical model results – Report 13

Abstract

This report contains the main results obtained on the small-scale physical model tests concerning the characterization and feasibility study for a multifunctional detached breakwater in front of Vagueira beach.

The tests, carried out on a scale of 1:65 with mobile bed, allowed to analyse the effect of the detached breakwater (DB) on the sediment dynamics and on the generation of surfing waves. With regard to sediment dynamics, the laboratory-scale model tests reproduced some beach morphological evolution phenomena, with predominance of the cross-shore transport and nearly absence of alongshore transport in the present beach configuration (no DB). The shore-parallel DB configuration induced the formation of circulation cells in the lee-region of the DB, which caused the growth of a small beach salient, centred with the DB transversal axis. The oblique DB configuration caused the formation of a double salient morphology, of dimensions similar to the one of the shore-parallel DB test.

With regard to wave generation for surfing, the results obtained without the DB are compared with the solutions DB parallel to the coast and DB 45° oblique to the coast. The agitation indices, location, length and type of breaking are determined for each situation.

From the experimental results related to the agitation indices and from the visual analysis of the tests, for all the agitation conditions tested, breaking in the current situation (without DB) occurs shoreward of the predicted position for the DB, close to the coastline and the DB influences the breaking conditions, causing them to occur in the vicinity or over the DB.

From the observation of the position and length of the surf line, as well as the type and form of breaking, it can be concluded that, within the set of tested conditions, in the cases without DB and the oblique DB, breaking conditions were suitable for surfing.

The calibration performed with the numerical model COULWAVE is presented for the case of the oblique DB, for a condition of monochromatic waves. The numerical model allows the calculation of some important parameters for checking the breaking conditions and their suitability for surfing, such as the length of the surf line, the wave direction at the surf point, the surf angle and the Iribarren number. Based on the results obtained, it is possible to conclude that the oblique DB allows, for this wave condition, a good quality surfing wave, since it generates a plunging breaker and a suitable surf angle for standard/professional surfers.

Overtopping tests were carried out for some wave conditions, and no overtopping occurred at the beach seawall for all DB configurations and in the absence of it.

Keywords: Physical model tests / Surf / Mobile bed / Sediment dynamics

Índice

1	Introdução	1
1.1	Âmbito e objetivos.....	1
1.2	Tarefas previstas e organização do relatório.....	1
2	Modelo físico, condições de ensaio e metodologia	3
2.1	Programa de trabalhos	3
2.2	Caracterização do modelo físico.....	3
2.3	Equipamento experimental	7
2.4	Ensaio de morfodinâmica.....	10
2.4.1	Condições de ensaio	10
2.4.2	Metodologia	13
2.5	Ensaio de surf	19
2.5.1	Condições de ensaio	19
2.5.2	Metodologia	20
2.6	Ensaio de galgamento	21
2.6.1	Condições de ensaio	21
2.6.2	Metodologia	21
3	Resultados dos ensaios de morfodinâmica	23
3.1	Organização dos resultados	23
3.2	Observação descritiva	23
3.3	Evolução morfológica da área de estudo	27
3.4	Evolução morfológica de perfis transversais	34
3.5	Evolução da linha de água.....	36
3.6	Síntese e discussão.....	38
4	Resultados dos ensaios de surf	40
4.1	Organização dos resultados	40
4.2	Índices de agitação	40
4.3	Localização, comprimento e tipo de rebentação	48
4.4	Comparação dos resultados do modelo numérico com os dados dos ensaios físicos	56
5	Resultados dos ensaios de galgamento	65
6	Conclusões.....	68
	Referências bibliográficas	72

Índice de figuras

Figura 2.1 – Aspeto do tanque de ondas onde foi construído o modelo físico construído, com indicação da orientação aproximada da direção longitudinal relativamente ao norte (em protótipo)	4
Figura 2.2 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD paralelo à linha de costa.....	5
Figura 2.3 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD rodada a 45°	5
Figura 2.4 – Aspeto da construção do modelo físico, com a construção do QMD paralelo à linha de costa.....	7
Figura 2.5 – Aspeto da construção do modelo físico, com o QMD rodado de 45° em relação à sua posição inicial.....	7
Figura 2.6 – Posicionamento das sondas ao longo do tanque	8
Figura 2.7 – Esquema da localização do equipamento de medição da agitação marítima na proximidade do QMD	9
Figura 2.8 – Máquinas fotográficas e de filmar utilizadas no decorrer dos ensaios	10
Figura 2.9 – Utilização de flutuadores para estimação de correntes	10
Figura 2.10 – Imagens do fundo com o tanque drenado, identificando-se na fotografia superior o passadiço rolante	14
Figura 2.11 – Reconstituição do fundo com o tanque drenado, com identificação dos pontos de tomada de fotografias	15
Figura 2.12 – Exemplo de MDT obtido por fotogrametria. Posição dos geradores de onda, grelha de pontos de controle e origem dos eixos coordenados horizontais (x, y) locais. Referência das várias sub-áreas de comparação: área total (laranja); ZA (vermelho); ZB (verde); ZC (cinzento); ZD (violeta).....	17
Figura 2.13 – Imagem oblíqua da linha de água (à esquerda) e imagem retificada (à direita), pós ensaio EM101, com referência à posição do esporão da Vagueira	18
Figura 2.14 – Imagem retificada pós ensaio EM101, com identificação da linha base, dos transectos e da linha de água	19
Figura 3.1 – Imagens de uma mancha de traçador (sedimento colorido) antes (à esquerda) e após (à direita) a execução da série A1	24
Figura 3.2 – Imagens do saliente após a execução da: a) série B(NM); b) série B(BM).....	25
Figura 3.3 – Padrão de circulação horizontal observado nas séries B(NM) e B(BM) (a laranja), relativamente ao eixo transversal de simetria do QMD (a azul). As setas a tracejado indicam a circulação sobre o QMD	25
Figura 3.4 – Imagem do campo de ondas no decurso do ensaio EM212, série B(BM)	26
Figura 3.5 – Imagens dos salientes após a execução da série C.....	27
Figura 3.6 – Diferença entre MDT inicial e final para a área total das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)	28
Figura 3.7 – Diferença entre MDT inicial e final para a área total das: a) inicial da série A1 (EM00) e inicial da série B (EM100); b) inicial da série A2 (EM400) e inicial da série B (EM100). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)	29
Figura 3.8 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZA das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m).....	30
Figura 3.9 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZB das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)	31

Figura 3.10 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZC da série B(NM) (EM152 menos EM100). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro).....	32
Figura 3.11 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZD da série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro).....	33
Figura 3.12 – Diferença entre MDT final da série B (EM152) e final da série A2 (EM452): a) área total; b) ZA; c) ZB. (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro).....	34
Figura 3.13 – Posição dos perfis M1 a M6 no modelo físico	35
Figura 3.14 – Variação longitudinal do perfil transversal de praia (M1 a M6) para 6 condições de ensaio: a) início da série A2 (EM300); b) final da série A2 (EM371); c) início da série B(NM) (EM100); d) final da série B(NM) (EM152); e) início da série C (EM400); f) final da série C (EM452).....	36
Figura 3.15 – Linhas de água obtidas durante as: a) série A1; b) série B(NM); c) série B(BM). (Eixo transversal do QMD a tracejado negro).....	37
Figura 4.1 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=1,5 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	41
Figura 4.2 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=2,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	42
Figura 4.3 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	43
Figura 4.4 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=1,5 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	44
Figura 4.5 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	45
Figura 4.6 – Ensaio sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=3,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8	46
Figura 4.7 – Valores dos índices de agitação na zona de sombra do QMD 0°, para cada condição de agitação.....	47
Figura 4.8 – Valores dos índices de agitação na zona de sombra do QMD 45°, para cada condição de agitação.....	47
Figura 4.9 – Ensaio sem QMD, com QMD 0° e QMD 45°. Agitação regular: T=10 s; H=1,5 m. Linha de rebentação	50
Figura 4.10 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=2,0 m. Linha de rebentação	51
Figura 4.11 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m. Linhas de rebentação	52
Figura 4.12 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=1,5 m. Linha de rebentação	53
Figura 4.13 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m. Linha de rebentação	54
Figura 4.14 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=3,0 m. Linha de rebentação	55
Figura 4.15 – Exemplos de rebentação tubular	56
Figura 4.16. Ilustração da velocidade de propagação da onda, c , ângulo de rebentação, α , velocidade do surfista, V_s e a velocidade de rebentação, V_p , (velocidade ao longo da crista da onda, com que se dá a rebentação)	57
Figura 4.17 – Resultados da elevação da superfície livre obtida com (a) o modelo numérico e (b) o ensaio em modelo físico para T=10 s; H=3,0 m.....	59
Figura 4.18 – a) Zonas de rebentação da onda obtidas com o COULWAVE; b) Zonas de início de rebentação (círculos vermelhos) obtidas no ensaio em modelo físico para T=10 s; H=3,0 m	60
Figura 4.19 – Batimetria e localização das secções P3, P4, P5, P6 e P7 no modelo numérico	61

Figura 4.20 – Variação dos índices de agitação ao longo das secções P3 a P7: comparação entre resultados do COULWAVE e modelo físico. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m	62
Figura 4.21 – Perfis P3 a P9	63
Figura 4.22 – Variação da altura significativa, Hs, ao longo dos perfis P3 a P7. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m.....	63
Figura 4.23 – Variação da altura significativa: a) no domínio de cálculo; b) pormenor na zona do QMD.....	64
Figura 4.24 – Linha de rebentação (a branco) e direção da onda. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m	64
Figura 5.1 – Ensaios sem QMD. Agitação irregular: Tp=12 s; Hs= 5,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	65
Figura 5.2 – Ensaios sem QMD. Agitação irregular: Tp=14 s; Hs= 4,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	65
Figura 5.3 – Ensaios sem QMD. Agitação irregular: Tp=16 s; Hs= 3,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	66
Figura 5.4 – Ensaios sem QMD. Agitação irregular: Tp=18 s; Hs= 3,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	66
Figura 5.5 – Ensaios com QMD 45°. Agitação irregular: Tp=12 s; Hs= 5,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	67
Figura 5.6 – Ensaios com QMD 45°. Agitação irregular: Tp=16 s; Hs= 3,0 m. Aspeto do espraçamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente	67

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Escalas no modelo físico.....	4
Quadro 2.2 – Condições de ensaio da série A1 (valores à escala do protótipo).....	12
Quadro 2.3 – Condições de ensaio da série A2 (valores à escala do protótipo).....	12
Quadro 2.4 – Condições de ensaio da série B (valores à escala do protótipo).....	12
Quadro 2.5 – Condições de ensaio da série C (valores à escala do protótipo).....	13
Quadro 2.6 – Média dos erros médios quadráticos e desvios padrão resultantes de sete levantamentos fotogramétricos, estimados com o software <i>Metashape</i>	15
Quadro 2.7 – Condições de agitação dos ensaios de surf (à escala do protótipo)	20
Quadro 2.8 – Condições de agitação para os ensaios de galgamento (à escala do protótipo)	21
Quadro 2.9 – Critério de classificação de galgamentos em ensaios com agitação irregular	22
Quadro 3.1 – Nomenclatura de ensaios realizados	23
Quadro 3.2 – Distância média e distância média quadrática entre linhas de água final e inicial para as séries A1, B(NM) e B(BM)	38
Quadro 4.1 – Tipo de rebentação em função do número de Iribarren.....	57
Quadro 4.2 – Ângulo de rebentação em função do nível de dificuldade da manobra	58
Quadro 4.3 – Resultados do modelo numérico para QMD 45°, H=3 m, T=10 s e nível médio de maré	64

1 | Introdução

1.1 Âmbito e objetivos

A Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA) contratou o Consórcio LNEC, UAVEIRO e IST 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 Caderno de Encargos e respetiva proposta do Consórcio.

O estudo tem como objetivo a caracterização e definição de parâmetros de dimensionamento e localização de um quebra-mar destacado (designado doravante, abreviadamente, por QMD), em frente à Praia da Vagueira (Município de Vagos, distrito de Aveiro). Este estudo visa apresentar à APA as alternativas e soluções para um QMD, 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 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.

1.2 Tarefas previstas e organização do relatório

Os trabalhos propostos refletem a ordem de prioridades acima definida, em particular os métodos e conceção dos estudos em modelo matemático e em modelo físico. Para tal, foram definidos os seguintes grupos de tarefas, T0 a T4, que incluem as atividades também discriminadas:

- a) T0 – Revisão do estado de arte;
- b) 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 desportos de deslize;
- c) 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;
- d) 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;
- e) T4 – Análise custo-benefício da melhor solução técnica e/ou conjunto de soluções alternativas;
 - T4.a) Quantificação dos custos associados à erosão e inundações costeiras 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.

O presente relatório diz respeito à Tarefa T2, relativa aos estudos em modelo físico do efeito do quebra-mar na dinâmica sedimentar da praia e do estudo da geração de ondas do surf.

Neste relatório apresentam-se, primeiramente, as características do modelo físico, o equipamento experimental utilizado e as condições de agitação marítima e níveis a simular em modelo reduzido, que resultam dos trabalhos efetuados nas tarefas 1 e 3. Posteriormente, apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios realizados em modelo físico dividindo-se entre resultados sobre: i) efeito do quebra-mar destacado na dinâmica sedimentar próxima; ii) geração de ondas para o surf; e iii) ocorrência de galgamentos. No que se refere à geração de ondas para surf, apresenta-se ainda a comparação dos resultados do modelo físico e do modelo numérico COULWAVE, dado que este permite complementar a informação obtida no modelo físico relativa a este aspeto.

2 | Modelo físico, condições de ensaio e metodologia

2.1 Programa de trabalhos

Os principais objetivos do modelo físico foram o estudo do efeito do QMD quer na dinâmica sedimentar próxima quer na geração de ondas para o surf. Secundariamente, analisaram-se as condições de galgamento marítimo. Assim, para a realização do estudo, as principais tarefas foram:

- Construção dos fundos;
- Instalação do equipamento necessário à aquisição de dados;
- Realização de séries de ensaios com vista à calibração da agitação marítima incidente;
- Realização de séries de ensaios com vista à análise da dinâmica sedimentar próxima sem QMD;
- Realização de séries de ensaios com vista à análise da geração de ondas para o surf sem QMD;
- Implantação do QMD com a forma, localização e orientação (paralelo à praia) definida em Sancho *et al.* (2021);
- Realização de séries de ensaios com vista à análise do efeito do QMD paralelo na dinâmica sedimentar próxima;
- Realização de séries de ensaios com vista à análise do efeito do QMD paralelo na geração de ondas para o surf;
- Alteração da configuração do QMD para uma posição oblíqua à praia (rotação de 45° em relação ao centro da estrutura);
- Realização de séries de ensaios com vista à análise do efeito do QMD oblíquo na geração de ondas para o surf e na dinâmica sedimentar próxima;
- Realização de série de ensaios expeditos para análise de galgamento na estrutura de defesa aderente.

2.2 Caracterização do modelo físico

O modelo físico foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, no tanque de ondas irregulares com aproximadamente 23,0 m de comprimento por 20,0 m de largura. A geração de ondas foi feita com recurso a dois geradores de ondas irregulares cujas pás têm 6,0 m de largura e 0,8 m de altura (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Aspeto do tanque de ondas onde foi construído o modelo físico construído, com indicação da orientação aproximada da direção longitudinal relativamente ao norte (em protótipo)

O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1/65. Esta escala geométrica do modelo, tal como apresentado em Sancho *et al.* (2021), resultou do compromisso entre as dimensões do tanque de ondas, as dimensões da zona de estudo e das obras a implantar, as características e capacidades dos batedores de ondas e as condições de agitação marítima, tendo ainda em consideração a dimensão do sedimento a utilizar no fundo móvel.

A reprodução de ondas a esta escala garante a boa simulação da propagação da agitação marítima nos seus aspetos de refração, difração, rebentação e movimentação geral da massa líquida.

No Quadro 2.1 apresentam-se os valores das escalas de diversas grandezas físicas, $[X]=X_m/X_p$, em que se entende por **escala** o **quociente entre o valor da grandeza no modelo (X_m) e no protótipo (X_p)** (sendo X uma determinada grandeza).

Quadro 2.1 – Escalas no modelo físico

Variável	Designação	Escala
Profundidade	$[h]=\mu$	1/65
Altura de onda	[H]	1/65
Período da onda	[T]	$1/(65)^{0.5} = 1/8,06$
Velocidade do fluido	[v]	$1/(65)^{0.5} = 1/8,06$
Área	[A]	$1/65^2 = 1/4225$
Volume	[V]	$1/65^3 = 1/ 274625$
Tempo morfodinâmico	[te]	1/18,4

O modelo foi implantado sobre fundo móvel que reproduz as condições do protótipo desde uma batimétrica da ordem de -12 m (ZH) até junto à costa. A Figura 2.2 mostra a planta do modelo físico executado, a posição das linhas batimétricas do fundo e dos geradores de ondas. É também indicada a posição do QMD na primeira fase dos ensaios. A posição do QMD na segunda fase dos ensaios é apresentada na Figura 2.3.

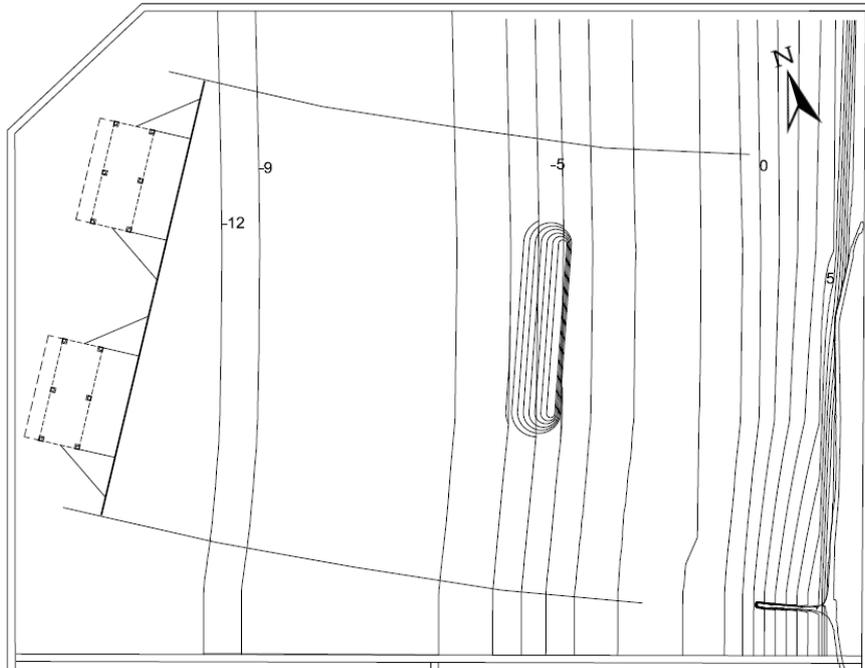


Figura 2.2 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD paralelo à linha de costa

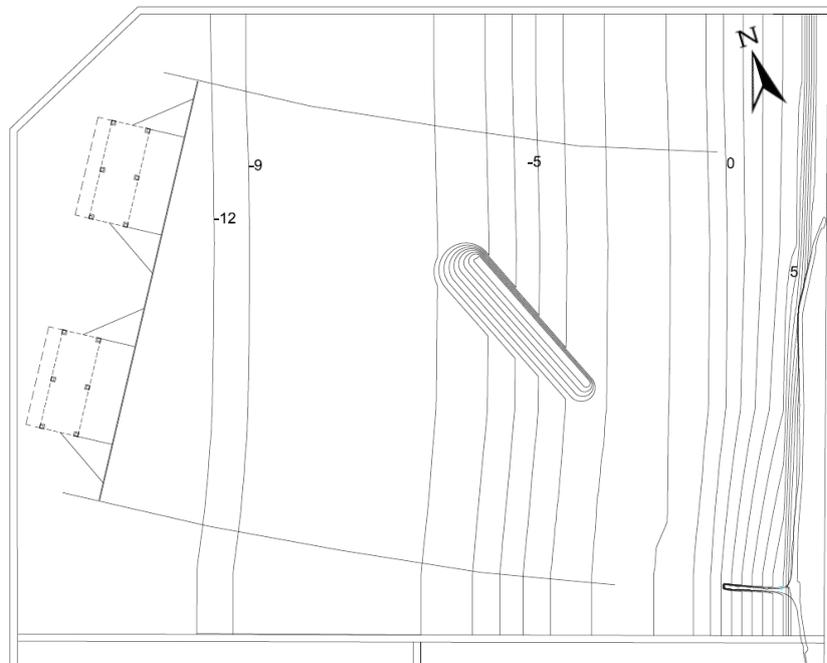


Figura 2.3 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD rodada a 45°

A fase inicial da construção do modelo consistiu na construção dos fundos (e o seu preenchimento com sedimento) e das estruturas de proteção costeira existentes, nomeadamente do esporão e da estrutura de defesa aderente. Foi ainda colocada uma grelha regular com distanciamento entre pontos de 2x2 m, que é usada na georreferenciação das imagens.

Após a construção dos fundos, efetuou-se a instalação do equipamento necessário à aquisição de dados (ver secção 2.3). Dado que as características nominais da agitação marítima correspondem às registadas junto ao gerador de ondas irregulares, foram colocadas duas sondas em frente aos geradores, aproximadamente centradas. Realizaram-se então as séries de ensaios com vista à calibração da agitação marítima incidente.

O estudo compreende a realização de ensaios na situação atual e com a configuração preliminar do QMD. Assim, após a realização dos ensaios sem QMD, procedeu-se à construção do QMD e à sua implantação no modelo, conforme indicado em Figura 2.2.

O QMD tem 300 m de comprimento e está colocado paralelo à linha de costa e distando desta 400 m. A linha de costa é definida ao nível médio do mar, $NMM=+2,17$ m (ZH) (vide Relatório 4, Sancho *et al.*, 2019). Este QMD foi construído à escala reduzida em módulos de betão com uma rugosidade exterior o mais aproximada possível da de um manto de enrocamento. A Figura 2.4 ilustra o QMD com a implantação apresentada na Figura 2.2 e que corresponde à primeira fase de ensaios.

Após a realização da primeira fase de ensaios procedeu-se à rotação do QMD em 45° no sentido anti-horário (visto de cima), e posicionado de tal forma que a vertical do seu centro geométrico se encontrava na mesma posição que a correspondente vertical do QMD paralelo à linha de costa (usado na segunda fase).

A Figura 2.5 ilustra o modelo com o QMD já rodado. Esta configuração resultou da observação de que o QMD paralelo proporcionava desadequadas condições de rebentação de onda para a prática do surf e, de acordo com a pesquisa bibliográfica (Sancho *et al.*, 2019a), uma rotação de 45° perspectivava a franca melhoria de condições de agitação favoráveis ao surf. Ademais, a escolha do sentido anti-horário, visto em planta, de rotação do QMD relativamente à posição paralela à costa resultou de procurar tentar manter protegido o aglomerado da Vagueira a galgamentos costeiros derivados de condições de agitação marítima mais energéticas, associadas a direções (na batimétrica dos -12 m (ZH)) compreendidas entre 240° e 300° (Sancho *et al.*, 2021). Recorde-se que a linha de costa é sensivelmente perpendicular ao rumo 283° . Em contrapartida, uma rotação de 45° no sentido horário iria desproteger mais o aglomerado da agitação proveniente desses rumos. A rotação efetuada confere, assim, ao QMD o alinhamento do seu eixo longitudinal com o rumo 238° .



Figura 2.4 – Aspecto da construção do modelo físico, com a construção do QMD paralelo à linha de costa



Figura 2.5 – Aspecto da construção do modelo físico, com o QMD rodado de 45° em relação à sua posição inicial

2.3 Equipamento experimental

Para a geração da agitação marítima nos ensaios utilizaram-se dois geradores de ondas irregulares com 6 m de comprimento e 0,8 m de altura perfazendo uma frente de onda de 12 m, Figura 2.5. Lateralmente à zona de propagação da agitação marítima, foram colocadas guias com um desenvolvimento o mais próximo possível do andamento das ortogonais das ondas, tendo em conta os fundos, os períodos de pico do espectro e o nível de maré a reproduzir.

Atendendo ao objetivo do estudo, procedeu-se à medição de parâmetros característicos da agitação marítima em vários pontos do modelo e à filmagem dos ensaios de forma a observar as condições de rebentação.

Com vista ao registo da elevação da superfície livre foram colocadas sondas resistivas em diversos pontos do modelo. Para além das duas sondas de controlo colocadas junto aos geradores de ondas, foi colocado um conjunto de sondas resistivas numa grelha de pontos no modelo físico de forma a

avaliar as condições de rebentação na zona onde será implantado o QMD. Assim, foram colocadas 6 sondas (S3 a S8) ao longo de uma perpendicular à praia e distanciadas entre si de 1 m, colocadas em suportes fixos num carro móvel de forma a poderem mudar de posição na direção paralela à direção de propagação das ondas (Figura 2.6 e Figura 2.7). A sonda S6 estava alinhada com o coroamento do QMD, as sondas S3 a S5 estavam localizadas entre o QMD e a linha de costa e as sondas S7 e S8 entre o QMD e a zona de geração.

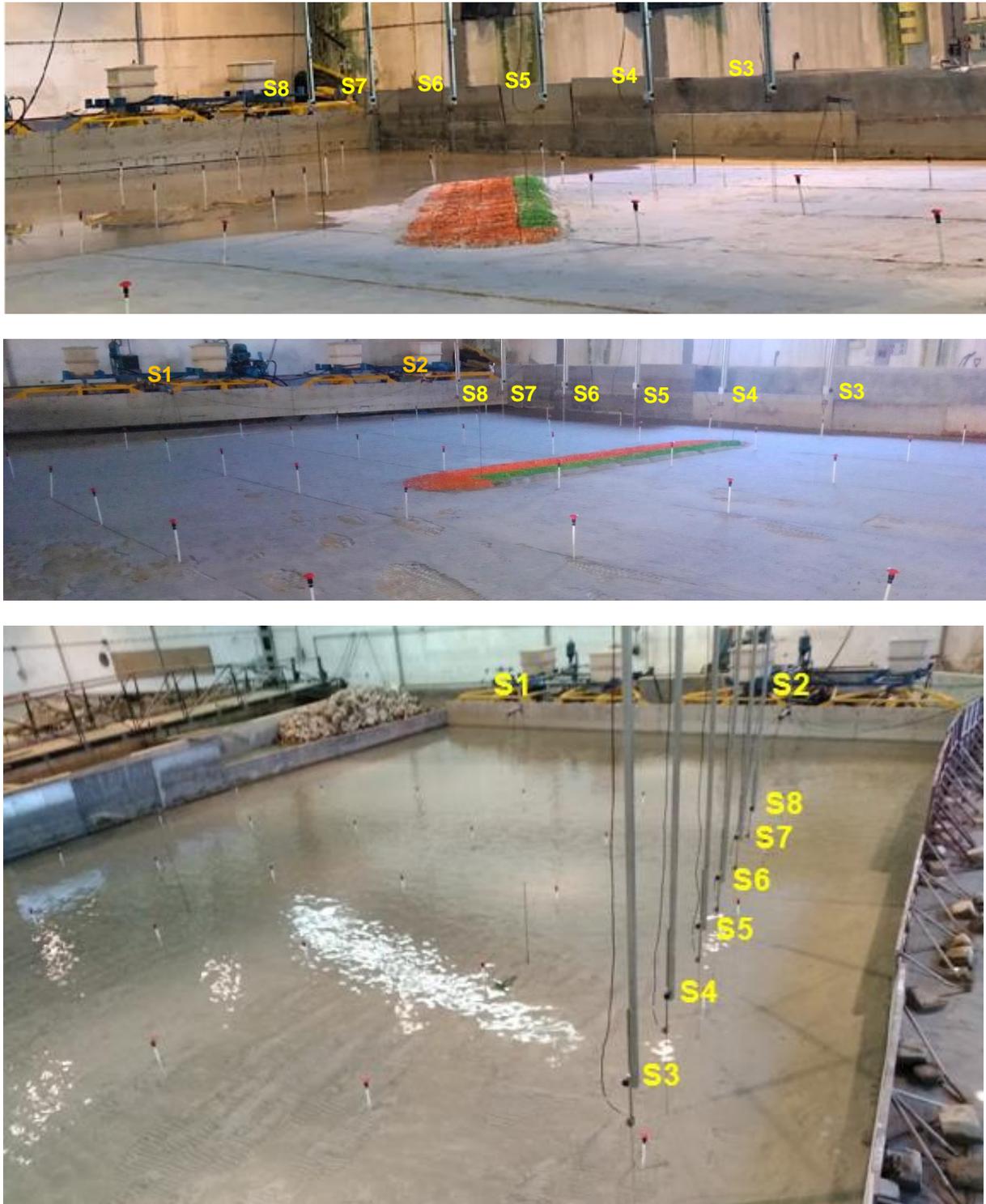


Figura 2.6 – Posicionamento das sondas ao longo do tanque

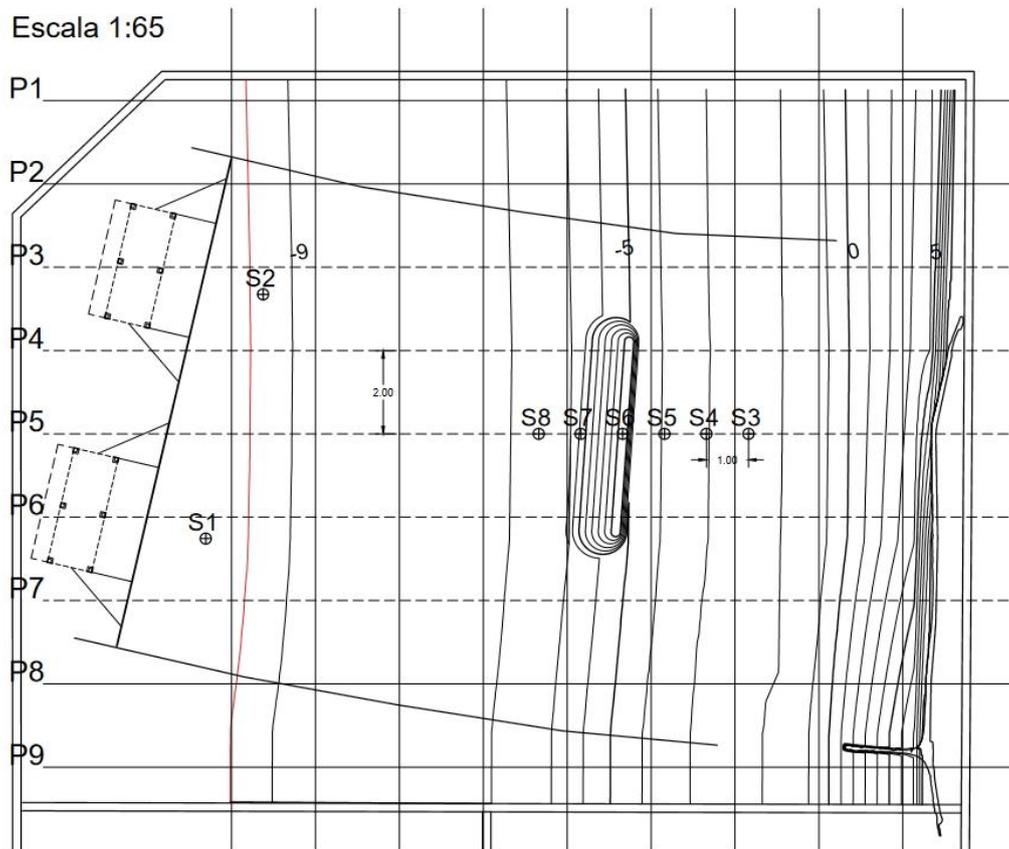


Figura 2.7 – Esquema da localização do equipamento de medição da agitação marítima na proximidade do QMD

Foram feitas medições com aquisição simultânea nas seis sondas (S3 a S8) em 5 posições diferentes, uma coincidente com o eixo transversal do QMD e as restantes distando deste 2 m para cada um dos seus lados e coincidindo com a grelha existente no modelo para georreferenciação das imagens, perfazendo um total de 30 posições de medição na proximidade do QMD.

Os registos fotográficos e em filme foram feitos com recurso a máquinas fotográficas de utilização corrente. Nos ensaios para a avaliação do surf, foram instaladas 2 câmaras de filmar para análise da localização, comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD e na costa, para cada condição de agitação marítima incidente (Figura 2.8).

Nos ensaios de morfodinâmica, as imagens fotográficas foram utilizadas para o levantamento topo-hidrográfico recorrendo a técnica fotogramétrica, antes e após cada conjunto de ensaios.

Os dados fotográficos e em vídeo permitiram também identificar eventuais condições de galgamento sobre a defesa longitudinal para as condições de agitação simuladas (não necessariamente as mais gravosas sobre este ponto de vista) e para as condições dos ensaios do galgamento.

Nos ensaios de morfodinâmica foram ainda utilizados flutuadores (Figura 2.9) para se estimar qualitativamente as correntes transversais e longitudinais em pontos selecionados.



Figura 2.8 – Máquinas fotográficas e de filmar utilizadas no decorrer dos ensaios



Figura 2.9 – Utilização de flutuadores para estimação de correntes

2.4 Ensaios de morfodinâmica

2.4.1 Condições de ensaio

Os ensaios de morfodinâmica tiveram como objetivo analisar a evolução morfológica do trecho costeiro em frente à Praia da Vagueira, com cerca de 810 m de comprimento em protótipo (12,5 m em modelo), limitado a sul pelo esporão da Vagueira (Figura 2.2). A análise centrou-se na evolução da linha de costa e da batimetria da zona costeira próxima, compreendida entre o QMD e a berma da praia.

Foram realizadas 3 séries de ensaios, nomeadamente: A) sem QMD; B) com QMD paralelo à linha de costa e colocado na posição indicada na Figura 2.2; e C) com QMD oblíquo à linha de costa e colocado na posição mostrada na Figura 2.5.

Nos ensaios de morfodinâmica, cada conjunto de ensaios partiu da configuração inicial projetada para a batimetria (Sancho *et al.*, 2021) e foi conduzido durante determinado tempo, até se observar relativa estabilidade morfológica do modelo, i.e., sem alterações significativas na topo-batimetria final.

Cada ensaio de morfodinâmica tem uma duração de, aproximadamente, 20 minutos, valor este variável com o período de pico da condição de onda do ensaio¹. De acordo com a escala do modelo (Quadro 2.1), esta duração corresponde a 6,1 horas no protótipo de tempo morfodinâmico².

2.4.1.1 *Série A*

A série de ensaios A, sem QMD, é, por sua vez, composta por duas fases designadas por série A1 e série A2. Numa primeira fase, a série A1 serviu para o estabelecimento das condições de ensaio morfodinâmicas e observação geral dos processos morfológicos ocorridos no modelo físico. A segunda série, A2, consistiu na repetição exata da sequência de ensaios da série B (com QMD), realizados com nível médio de água (NMM).

Apresentam-se no Quadro 2.2 e Quadro 2.3 a síntese das condições de agitação marítima e sua sequência simuladas nas séries A1 e A2, respetivamente, permitindo constatar que ambas são muito distintas. A série A1 incluiu 7 ensaios com a condição de onda morfológica M1 (descrita em Sancho *et al.*, 2021), a qual acabou por ter menor capacidade de transporte sólido que o previsto (e desejado), sendo depois substituída por condições de agitação mais energéticas ($H_s=1,5, 2,0$ e 3 m) e de diferente declividade (alteração de T_p). Esta série considerou ainda ensaios ao nível de preia-mar, para observar interações da onda com a berma da praia. Realizaram-se 26 ensaios no total da série A1 (ensaios EM01 a EM26), correspondentes a ~8,7 horas no modelo e a 6,6 dias (159 horas) no protótipo.

A série A2 consistiu na execução de 52 ensaios com nível médio de água (NMM) e alturas de onda significativa variáveis entre 1,26 e 2,0 m, com predominância de $H_s=1,5$ m. Esta sequência teve uma duração duas vezes superior à da série A1, nomeadamente, de ~17,3 h no modelo, correspondendo 13,2 dias à escala do protótipo.

2.4.1.2 *Série B*

A série de ensaios B (Quadro 2.4) abrangeu 52 ensaios ao nível médio de água (ensaios EM101 a EM152), 14 ensaios em nível de baixa-mar de águas-vivas (BMAV) (EM201 a EM214), e mais 2 ensaios ao nível médio (EM214 e EM215). A maioria dos ensaios foi com condições de onda já ensaiadas na série A1.

¹ Em concreto, cada ensaio consiste na reprodução de uma série de agitação marítima irregular, com duração de 1000 ondas individuais. Logo, ensaios com maior T_p (e período médio) terão maior duração, e vice-versa.

² . Note-se que a escala de tempo morfodinâmico é diferente da escala de tempo associada à duração do ensaio, que é igual à escala do período de onda (Quadro 2.1).

Quadro 2.2 – Condições de ensaio da série A1 (valores à escala do protótipo)

Ensaio	Nível de água (m)	Hs (m)	Tp (s)	Comentário
EM01-EM07	NMM	1,26	11	
EM08	NMM	1,50	11	Aumento de Hs
EM09	NMM	1,50	8	
EM10	NMM	2,00	8	Ajuste das guias
EM11	NMM	1,50	8	
EM12-EM13	NMM+1.3	1,50	8	Preia-mar
EM14-EM16	NMM+1.3	3,00	8	Aumento de Hs
EM17-EM20	NMM	1,50	8	
EM21	NMM	1,50	8	Nova alteração da guia a Norte, com deposição de areia na fronteira interior do modelo
EM22-EM26	NMM	2,00	8	

Quadro 2.3 – Condições de ensaio da série A2 (valores à escala do protótipo)

Ensaio	Nível de água (m)	Hs (m)	Tp (s)	Comentário
EM401	NMM	1,26	11	
EM402-409	NMM	1,50	11	Aumento de Hs
EM410-414	NMM	2,00	11	Aumento de Hs
EM415-427	NMM	1,50	11	Diminuição de Hs
EM428-431	NMM	1,50	8	Alteração de Tp
EM432-452	NMM	1,50	11	Alteração de Tp

Quadro 2.4 – Condições de ensaio da série B (valores à escala do protótipo)

Ensaio	Nível de água (m)	Hs (m)	Tp (s)	Comentário
EM101	NMM	1,26	11	
EM102-109	NMM	1,50	11	Aumento de Hs
EM110-114	NMM	2,00	11	Aumento de Hs
EM115-127	NMM	1,50	11	Diminuição de Hs
EM128-131	NMM	1,50	8	Alteração de Tp
EM132-152	NMM	1,50	11	Pequeno ajuste do NMM.
EM201	NMM-1.33	1,50	11	Nível de Baixa-mar de Águas-vivas (BMAV), +0.84 mZH
EM202-210	NMM-1.33	2,00	11	
EM211	NMM-1.33	2,50	11	
EM212	NMM-1.33	3,00	11	
EM213	NMM-1.33	2,50	8	
EM214	NMM-1.33	3,00	11	
EM215-216	NMM	3,00	11	NMM

A duração total dos ensaios em nível médio foi de 17,3 horas à escala do modelo e de 13,2 dias à escala do protótipo. Os ensaios EM201 a EM214, em nível de BMAV, totalizaram ~4,7 h no modelo (3,6 dias no protótipo).

2.4.1.3 Série C

A série de ensaios C (Quadro 2.5) foi realizada tendo como finalidade a otimização da configuração do QMD para gerar condições de onda propícias ao surf, não tendo, por isso, sido concebida para o estudo morfodinâmico. Contudo, aproveitou-se a realização desses ensaios para estudar a resposta morfológica do trecho costeiro com o QMD oblíquo à costa.

Realizaram-se 70 ensaios no decurso da série C, correspondendo à duração total de 23,3 horas à escala do modelo e de ~18 dias à escala do protótipo.

Quadro 2.5 – Condições de ensaio da série C (valores à escala do protótipo)

Ensaio	Nível de água (m)	Hs (m)	Tp (s)	Comentário
EM301-312	NMM	3,00	12	
EM313-322	NMM	2,00	12	Diminuição de Hs
EM323-333	NMM	1,50	12	Diminuição de Hs
EM334-344	NMM	3,00	10	Aumento de Hs e diminuição de Tp
EM345-357	NMM	2,00	10	Diminuição de Hs
EM358-371	NMM	1,50	10	Diminuição de Hs

2.4.2 Metodologia

Nos ensaios de morfodinâmica recorreram-se a métodos fotogramétricos para a identificação da linha de água (também, neste contexto, designada por linha de costa) e execução de levantamentos topo-hidrográficos, a seguir pormenorizados. Em todas as fotografias foi utilizada sempre a mesma máquina fotográfica e lente (Canon EOS 250D, de 6000x4000 pixéis, e lente Canon EF 35 mm 1:2).

Para auxílio aos métodos fotográficos, foi colocada uma grelha de pontos fixos no modelo, distanciados de 2 m, que foram referenciados recorrendo a uma estação total. Estes pontos de controle (“cones” vermelhos) foram colocados no topo de varas fixadas no fundo rígido do modelo físico, a distâncias entre 30 a 50 cm acima do fundo de areia (vide Figura 2.1).

A partir destes dados, foram determinados e analisados os seguintes aspetos: identificação de zonas de erosão e de acumulação de sedimentos; configuração da linha de costa; eficácia do quebra-mar sob o ponto de vista de acréscimo do areal da praia.

2.4.2.1 Levantamentos topo-batimétricos

Os levantamentos topo-batimétricos foram realizados com o tanque drenado por completo. Cada conjunto fotográfico foi obtido a partir de posições superiores sobre o tanque, tiradas de um passadiço

rolante sobre o modelo (Figura 2.10). Na mesma figura apresenta-se também uma fotografia geral do modelo, tirada com lente grande-angular, estando o fotógrafo no passadiço.

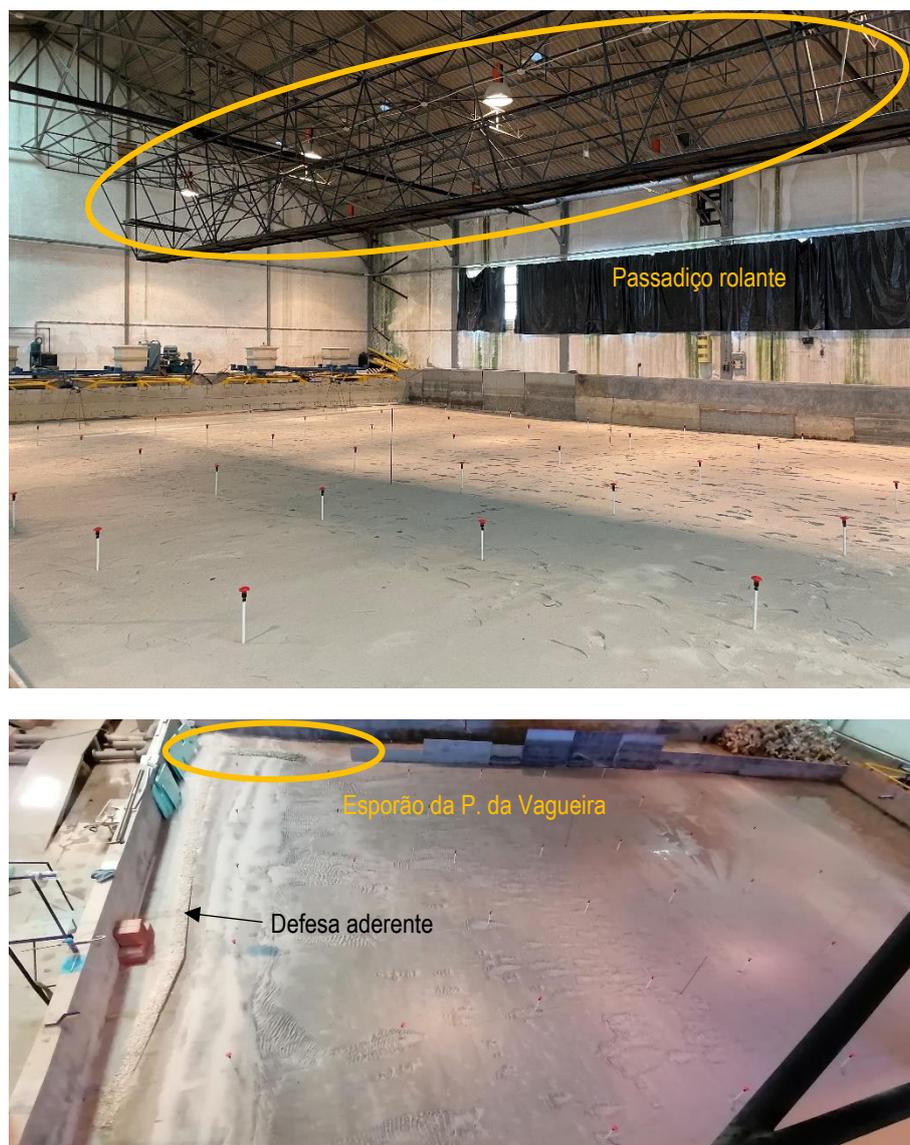


Figura 2.10 – Imagens do fundo com o tanque drenado, identificando-se na fotografia superior o passadiço rolante

Cada levantamento fotogramétrico consistiu na tomada de centenas (entre 400 a 700) de fotografias em diversas posições sobre o modelo, cobrindo toda (ou quase toda) a área de fundo móvel. Ilustra-se na Figura 2.11 a reconstituição fotogramétrica de um fundo, e a identificação de todos os pontos de tomada da fotografia.

Posteriormente, cada conjunto fotográfico foi importado para o software *Agisoft Metashape Professional*, com o qual se efetuou o processamento de modo a obter, por fim, o modelo digital de terreno correspondente. Muito sumariamente, este processamento envolveu os seguintes passos:

- i. Importação das fotografias e alinhamento das mesmas: o processo de alinhamento é automático e consiste na identificação de pontos comuns entre fotografias, construindo um mosaico final resultante da união destas;
- ii. Correção e eliminação de pontos espúrios;
- iii. Importação do conjunto de pontos de controle cotados e marcação em cada fotografia daqueles que são visíveis; este passo permite obter uma estimativa do erro do modelo fotogramétrico e transformação do mesmo para as coordenadas locais;
- iv. Construção de uma nuvem densa de pontos (tamanho do pixel da ordem de 0,1 mm);
- v. Geração do modelo digital de terreno (MDT) a partir da nuvem densa e exportação daquele;
- vi. Geração de um ortofotomapa ou ortomosaico, se desejado.

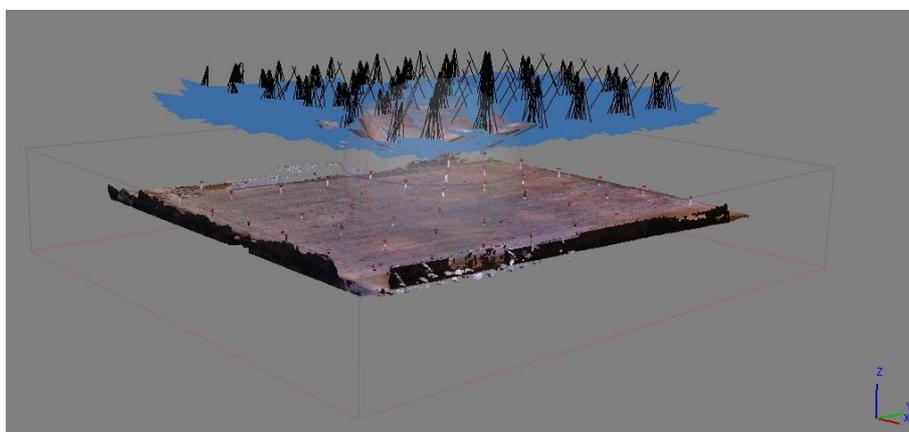


Figura 2.11 – Reconstituição do fundo com o tanque drenado, com identificação dos pontos de tomada de fotografias

Quadro 2.6 – Média dos erros médios quadráticos e desvios padrão resultantes de sete levantamentos fotogramétricos, estimados com o software *Metashape*

		x (m)	y (m)	z (m)
Pontos de controle	Erro médio quadrático	0,0116	0,0105	0,0060
	Desvio padrão	0,0019	0,0021	0,0008
Pontos de verificação	Erro médio quadrático	0,0086	0,0107	0,0049
	Desvio padrão	0,0028	0,0017	0,0013

No Quadro 2.6 apresentam-se as médias dos erros médios quadráticos e desvios padrão resultantes de sete levantamentos fotogramétricos, efetuados em diferentes momentos, correspondentes a

diferentes configurações do fundo. Os valores obtidos mostram que a precisão no plano horizontal (x,y) é da ordem de 1 cm, e no plano vertical (z) da ordem de 0,5 cm. O quadro está dividido em informação referente a “pontos de controle” e “pontos de verificação”, em que da grelha inicial de pontos cotados, os primeiros foram usados para o ajuste do modelo fotogramétrico às coordenadas locais do modelo e os segundos (em menor número) foram usados para verificação desse ajuste. Obtiveram-se resultados idênticos para ambos os conjuntos, embora quase sempre com menores erros médios para o conjunto “pontos de verificação”. Os desvios padrão são de ordem de 1-3 mm, significando que houve pequena dispersão entre levantamentos dos erros médios quadráticos respetivos.

Estes resultados permitem concluir sobre a precisão dos MDT obtidos, com imprecisões horizontais de ordem de 1 cm e verticais de 0,5 cm à escala do modelo, correspondendo a valores de ~65 cm e ~35 cm à escala do protótipo, respetivamente.

Para posterior comparação dos levantamentos obtidos foram seleccionadas as 5 áreas retangulares a seguir designadas (também identificadas na Figura 2.12) e limitadas pelas coordenadas indicadas:

- Área total: $3 < x < 17$; $1 < y < 12$ m
- ZA: $3 < x < 7$; $2 < y < 4$ m
- ZB: $7 < x < 14$; $1,5 < y < 3,5$ m
- ZC: $7 < x < 14$; $7 < y < 10$ m
- ZD: $7 < x < 14$; $5 < y < 12$ m

Os MDT utilizados na inter-comparação foram interpolados sobre uma malha de espaçamento quadrangular com 5 cm ou 1 cm de lado. As malhas mais grosseiras foram utilizadas para comparação da área total, enquanto as mais finas foram usadas nas comparações das zonas ZA a ZD. Estes MDT foram manipulados com o software *Autocad*®.

Mostra-se na Figura 2.12 o MDT obtido em determinado ensaio, com indicação da origem do sistema coordenado horizontal ($x=0$, $y=0$) e da grelha de pontos cotados. A origem do eixo vertical ($z=0$) é o fundo plano horizontal do modelo em frente ao gerador de ondas³, orientado positivamente para cima.

2.4.2.2 Identificação da linha de água

Foram tiradas fotografias da linha de água, antes e após determinado ensaio ou conjunto de ensaios. Estas fotografias foram tiradas sempre pelo mesmo fotógrafo, aproximadamente, da mesma posição. Significa isso que, não recorrendo a um suporte fixo (e.g., tripé), a posição da câmara foi variável, estimando-se um desvio de ± 20 cm no posicionamento horizontal da câmara e de ± 10 cm no seu posicionamento vertical.

Cada fotografia foi tomada no final de determinado ensaio, com nível de água em repouso. Posteriormente, cada fotografia foi retificada para o sistema de coordenadas ortogonal local, usado na

³ Que corresponde à cota -12 m (ZH) em protótipo.

referenciação dos pontos de controle, recorrendo ao software “*Rectify Extreme Tool*” (Silva e Taborda, 2011). Previamente à retificação foi efetuada a correção da distorção da lente, com o mesmo software. O processo de retificação envolve a identificação dos pontos de controle visíveis em cada fotografia, que permitem o cálculo da posição da câmara e sua orientação relativamente ao sistema coordenado local. Na Figura 2.13 apresenta-se um exemplo de uma fotografia oblíqua da linha de água e pontos de controle, e da respetiva imagem retificada após a aplicação do método exposto. Note-se a presença do esporão da praia da Vagueira na parte superior da fotografia original e à direita na imagem retificada.

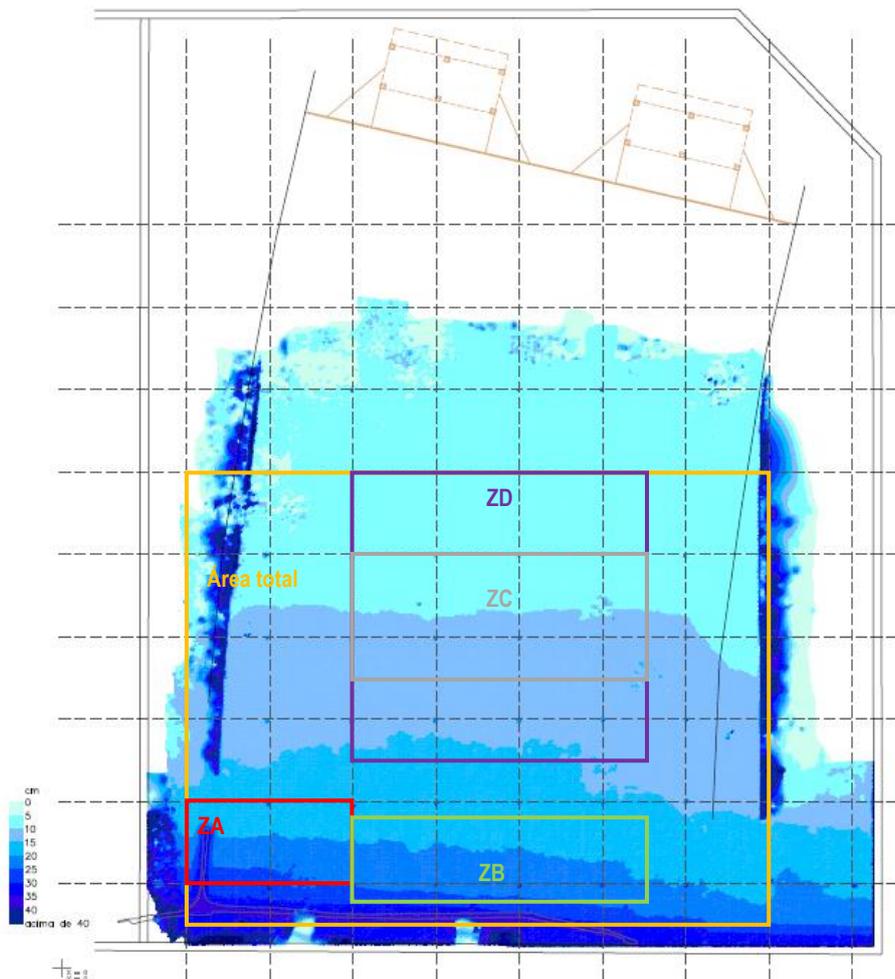


Figura 2.12 – Exemplo de MDT obtido por fotogrametria. Posição dos geradores de onda, grelha de pontos de controle e origem dos eixos coordenados horizontais (x, y) locais. Referência das várias sub-áreas de comparação: área total (laranja); ZA (vermelho); ZB (verde); ZC (cinzento); ZD (violeta)



Figura 2.13 – Imagem oblíqua da linha de água (à esquerda) e imagem retificada (à direita), pós ensaio EM101, com referência à posição do esporão da Vagueira

Posteriormente à retificação das imagens, digitalizou-se manualmente a linha de água em cada imagem retificada. Obteve-se assim a linha de água nas coordenadas locais do modelo físico. Efetuou-se este procedimento para todas as fotografias seleccionadas. A evolução da posição das linhas de água foi analisada através do software DSAS (*Digital Shoreline Analysis System, version 5.0*, Himmelstoss *et al.*, 2018) para o cálculo de recuos e avanços da linha de água. Para tal, foi marcada a linha base perto da estrutura de defesa longitudinal e determinadas as posições da linha de água em transectos distanciados de 10 cm entre si. Esta linha base tem origem em $x=3,8$ m (no sistema de eixo coordenado local). Apresenta-se na Figura 2.14 um exemplo da imagem retificada com sobreposição da linha base, dos transectos e da linha de água identificada.

Tendo em consideração o modo de aquisição e processo de retificação de imagens (e erro inerente), o método visual/manual de identificação da linha de costa (em algumas imagens ocorreu maior incerteza devido à existência de reflexos ou de difícil interpretação entre a areia molhada pelo espraio e o início da zona submersa) e análise no software DSAS, **estima-se que o erro total na estimativa da posição de cada linha de água seja da ordem de ± 10 cm (à escala do modelo)**, no sentido transversal⁴. Destas fontes de imprecisão, a maior resulta da identificação da linha de água, porquanto o processo de retificação tem um erro associado da ordem de ± 2 cm.

⁴ Neste contexto, a incerteza no posicionamento longitudinal deverá ser da mesma ordem de grandeza, mas será menos relevante dada a natureza da linha de água (que se desenvolve longitudinalmente).



Legenda

- Transectos
- EM101_EM152_01012021
- Linha de base

Figura 2.14 – Imagem retificada pós ensaio EM101, com identificação da linha base, dos transectos e da linha de água

2.5 Ensaios de surf

2.5.1 Condições de ensaio

Os ensaios de surf tiveram como objetivo analisar a promoção de ondas de surf de referência em frente à Praia da Vagueira, na zona de implementação do QMD. A análise centrou-se na identificação da localização, comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD, de forma a verificar a sua adequabilidade para a prática de surf.

As condições de agitação incidente simuladas no tanque foram definidas com base no regime de agitação marítima obtida na batimétrica dos -12 m (ZH), que é a batimétrica até à qual se reproduzirão os fundos no modelo físico, vide Sancho *et al.* (2021). Todos os ensaios foram realizados com o nível médio de água, NMM (+2,17 m ZH), e rumo de 296 °N.

Foram realizados ensaios de agitação irregular com valores de alturas significativas, H_s , e período de pico, T_p , com elevada probabilidade de ocorrência. Foram ainda realizados ensaios de agitação regular, para poder analisar em *pormenor* as características de rebentação da onda, com altura, H , e período, T , iguais a H_s e T_p dos ensaios de agitação irregular e mesmo nível de água. A duração de ensaios de agitação irregular foi de cerca de 20 minutos no modelo reduzido (dependendo do período de pico) o que corresponderá a, aproximadamente, 2,7 h no protótipo e de 5 minutos no caso de ensaios de agitação regular, 40 minutos no protótipo. As condições de agitação marítima irregular foram simuladas de acordo com uma configuração espectral empírica do tipo JONSWAP (com fator de pico $\gamma=3.3$), o que permite a reprodução de grupos de ondas.

No Quadro 2.7 são apresentadas as condições de agitação utilizadas nos ensaios. Foram realizados 60 ensaios, dos quais 30 (6 condições de agitação x 5 ensaios por condição de agitação correspondentes a cada posição do conjunto de 6 sondas) com agitação regular incidente e 30 com agitação irregular.

Quadro 2.7 – Condições de agitação dos ensaios de surf (à escala do protótipo)

<i>Hs, H (m)</i>	<i>Tp, T (s)</i>	Nível de água (m ZH)
1,5, 2 e 3	10 e 12	2,17

2.5.2 Metodologia

Os ensaios foram realizados em 3 fases:

- A. Sem obra, para avaliação das condições de rebentação quer na zona onde será implantado o QMD quer junto à costa;
- B. Com o QMD, para avaliação das condições de rebentação adequadas para o surf na zona do QMD e junto à costa;
- C. Com o QMD rodado a 45° graus relativamente à sua posição inicial, para avaliação das condições de rebentação adequadas para o surf na zona do QMD e junto à costa.

Nas três fases foram medidas as séries temporais das elevações da superfície livre em 30 pontos (cinco ensaios, um para cada uma das posições do grupo de 6 sondas), na zona próxima do QMD e em dois pontos à saída dos geradores, Figura 2.6 e Figura 2.7, para cada condição de agitação incidente. Os dados provenientes das sondas foram adquiridos com uma frequência de 128 Hz. O fundo do modelo não foi refeito entre ensaios e o perfil inicial foi o perfil final dos ensaios de morfodinâmica, isto é, o perfil de estabilidade morfológica do modelo.

Foi efetuada uma análise espectral dos sinais medidos em cada sonda, para obtenção da altura de onda significativa e período de pico respetivos. Com base nesses valores, foram calculados índices de agitação (IA) através da relação entre a altura de onda significativa medida em cada um dos pontos referidos anteriormente e a média das alturas de onda significativas registadas nas duas sondas colocadas à saída do gerador, situados na batimétrica -12.0 m (ZH), para cada ensaio. A comparação de resultados sem e com o QMD nas duas posições permite avaliar o desempenho do QMD em termos de potenciar condições de surf na praia da Vagueira.

Em cada ensaio foram efetuadas filmagens com as câmaras colocadas lateralmente, Figura 2.8 e numa posição no passadiço rolante superior, Figura 2.10. A identificação da posição da linha de rebentação foi baseada na observação visual e nas filmagens efetuadas durante os ensaios, que permitiram ainda a análise do comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD.

Para cada condição de agitação, foram obtidos:

- Valores dos índices de agitação em cada ponto de medição, dados pela razão H/H_0 ou H_s/H_{s0} , sendo os valores do denominador os correspondentes aos valores medidos junto ao gerador;
- Localização, comprimento e tipo de rebentação.

2.6 Ensaios de galgamento

2.6.1 Condições de ensaio

Os ensaios de galgamento tiveram como objetivo analisar o galgamento sobre a defesa longitudinal aderente de forma expedita e comparar a sua ocorrência antes e após a construção do quebra-mar, para um conjunto reduzido de condições de agitação marítima gravosas.

Como referido, a escala do modelo (1:65) foi escolhida tendo em conta as condições a simular nos ensaios de morfodinâmica e do surf (ver Quadro 2.7), as quais não contemplam alturas de onda significativa e períodos de pico muito elevados, como as que normalmente se verificam associadas aos eventos de galgamento. Assim, as condições mais gravosas de agitação marítima que podem ser reproduzidas no modelo não correspondem às mais gravosas que podem ocorrer no local e, conseqüentemente, às condições associadas aos galgamentos.

Para tentar ultrapassar esta limitação, optou-se por efetuar os ensaios de galgamento para uma gama de períodos de pico entre 12 s e 18 s, simulando-se a maior altura de onda significativa possível de acontecer. Quando a rebentação das maiores ondas do registo ocorreu antes de atingirem a costa, simulou-se ainda uma altura de onda menor. Fizeram-se ensaios com o nível de preia-mar de águas-vivas, + 3,55 m (ZH), e com o nível de mar mais elevado obtido entre maio de 1979 e fevereiro de 1982, + 4,0 m (ZH), Freire *et al.* (2020). No Quadro 2.8 resumem-se as condições de agitação simuladas.

Quadro 2.8 – Condições de agitação para os ensaios de galgamento (à escala do protótipo)

<i>H_s</i> (m)	<i>T_p</i> (s)	Nível de maré (m ZH)
4,5, 5,0	12	
3,5, 4,0	14	3,55 e 4,00
2,5, 3,0	16	
3,0	18	

2.6.2 Metodologia

Os ensaios de galgamento seguiram também as 3 fases referidas em 2.5.2: sem obra; com o QMD e com o QMD rodado a 45° graus relativamente à sua posição inicial.

Para cada condição de ensaio de cada fase foi realizada a caracterização dos galgamentos observados ao longo da estrutura de proteção longitudinal aderente de modo qualitativo, segundo o critério de classificação do grau de galgamento do LNEC, Quadro 2.9.

Quadro 2.9 – Critério de classificação de galgamentos em ensaios com agitação irregular

Grau	Designação	Descrição
0	Inexistentes	Não há galgamento
1	Início	As ondas de maior altura proporcionam galgamentos constituídos por “salpicos”
2	Ligeiros	Galgamentos frequentes constituídos por “salpicos”
3	Moderados	As ondas de maior altura provocam inundação ou passagem de lâminas de água
4	Importantes	Há frequentes galgamentos ou inundações constituídos por uma lâmina de água
5	Sérios	Ocorrem galgamentos constituídos por grandes massas de água

3 | Resultados dos ensaios de morfodinâmica

3.1 Organização dos resultados

Tendo em consideração as condições de ensaio descritas e pormenorizadas na secção 2.4.1, apresenta-se nesta secção a descrição de observações e impressões recolhidas durante os ensaios. Para tal, compila-se no Quadro 3.1 as nomenclaturas das séries e ensaios realizados. Note-se que a série B completa foi aqui repartida em duas sub-séries – B(NM) e B(BM) – de forma a distinguir os ensaios em nível médio e os em baixa-mar.

Quadro 3.1 – Nomenclatura de ensaios realizados

Série	Ensaio	Nível de água (m)	Comentário
A1	EM01 a EM26	NMM	Sem QMD
A2	EM401 a EM452	NMM	Sem QMD
B(NM)	EM101 a EM152	NMM	Com QMD c300.d400 paralelo à costa
B(BM)	EM201 a EM214	BMAV	Com QMD c300.d400 paralelo à costa
C	EM301 a EM371	NMM	Com QMD c300.d400 oblíquo à costa

3.2 Observação descritiva

Série A1

No decorrer da série A1 realizaram-se alguns ajustes das guias laterais de orientação da agitação marítima e da condição fronteira a norte do modelo, que introduziram algumas modificações sedimentares locais e artificiais, principalmente junto à fronteira norte, mas que não alteraram o padrão geral de circulação. Não foi observado transporte sedimentar longitudinal, concluindo-se assim haver um equilíbrio entre a topo-batimetria base e a agitação quanto à dinâmica longitudinal. Este facto foi comprovado por flutuadores hidrodinâmicos que não mostraram deslocações longitudinais notórias. Quanto à dinâmica transversal, ilustra-se na Figura 3.1 a evolução morfológica de uma mancha de traçador sedimentar (retângulo a azul) antes e após a execução da série A, tendo-se observado dispersão sedimentar somente no sentido transversal à praia.

Nos ensaios com o nível de preia-mar e ondas mais intensas (Quadro 2.2, condições EM14-EM16), observou-se o galgamento da berma anteriormente formada, com alisamento da sua crista e suavização do seu declive. Formaram-se ainda alguns canais de refluxo do espraio, que interromperam a uniformidade longitudinal da anterior berma. Estas morfologias prevaleceram até ao final da série.

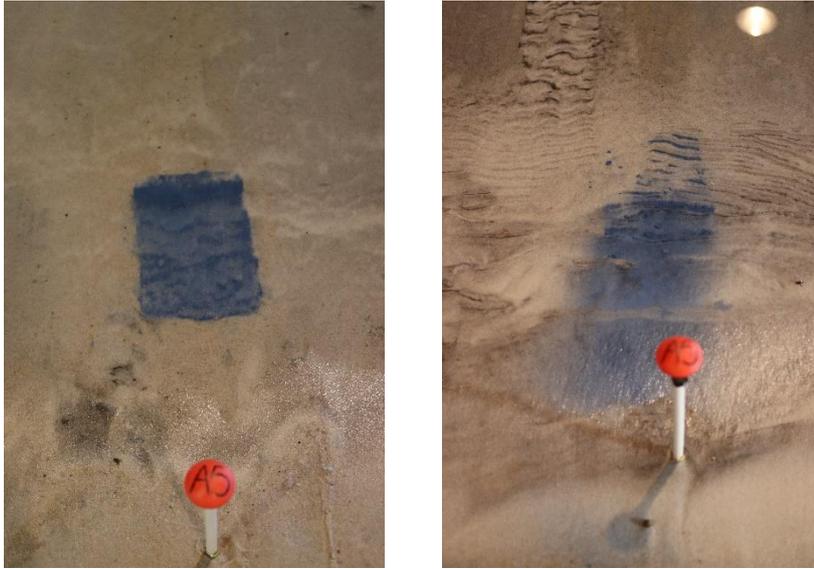


Figura 3.1 – Imagens de uma mancha de traçador (sedimento colorido) antes (à esquerda) e após (à direita) a execução da série A1

Série A2

Na série A2, tal como na série A1 e como previsto, predominou o transporte sedimentar transversal na face da praia, com a construção de uma berma mais inclinada e escavação no limite inferior da berma. Esta série teve sensivelmente o dobro da duração da série A1 e igual duração à da série B(NM). Observou-se a formação de uma berma, longitudinalmente contínua.

Os ensaios desta série não mostraram grande influência das condições fronteira, ao contrário dos resultados da série anterior, na qual se interveio (durante os ensaios) na fronteira norte com a reposição das guias e a adição de sedimentos.

Série B(NM)

Nestes ensaios, a implantação do QMD paralelo à costa conforme representado na Figura 2.2 conduziu a uma alteração visível do padrão de circulação observado nas séries A1 e A2. Além do transporte sedimentar transversal, observou-se o crescimento de um saliente muito incipiente (Figura 3.2a) na zona abrigada pelo QMD e padrões de circulação longitudinais e transversais.

Na Figura 3.3 apresenta-se um esquema do padrão de circulação horizontal observado no decurso desta série, recorrendo a traçadores Lagrangeanos de superfície. As velocidades sobre o QMD e imediatamente após o mesmo são dominadas pela deriva de Stokes, i.e., resultam diretamente da ação não linear da onda e são na sua direção de propagação. A sotamar do QMD, formam-se duas células de circulação sensivelmente simétricas, com confluência para um agueiro central, o qual colide mais à frente com a circulação de Stokes sobre o QMD. As velocidades máximas associadas à deriva de Stokes foram da ordem de 3 cm/s (0,25 m/s à escala do protótipo). As velocidades nas células de circulação foram menos intensas.

a)



b)



Figura 3.2 – Imagens do saliente após a execução da: a) série B(NM); b) série B(BM)

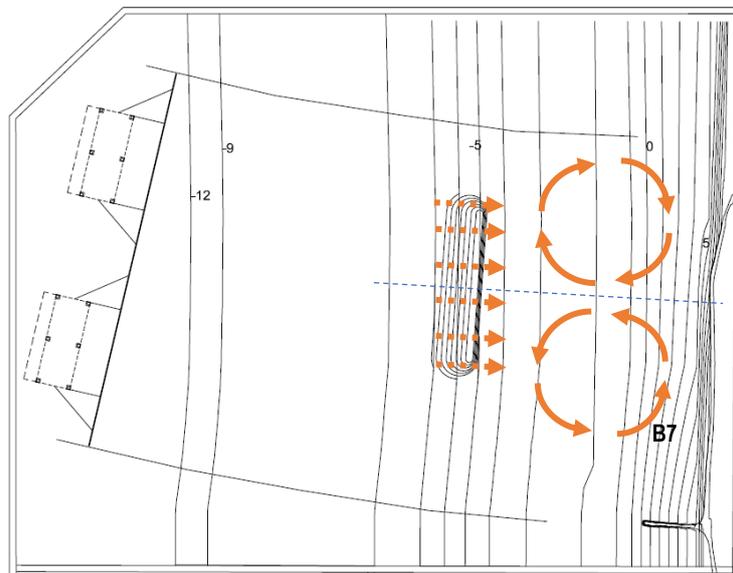


Figura 3.3 – Padrão de circulação horizontal observado nas séries B(NM) e B(BM) (a laranja), relativamente ao eixo transversal de simetria do QMD (a azul). As setas a tracejado indicam a circulação sobre o QMD

Série B(BM)

Esta série permitiu visualizar claramente a expressão do saliente formado ao longo de todos os ensaios da série B. Ou seja, o saliente visível na Figura 3.2b é resultado da ação da agitação em nível médio (série BNM) e em nível de baixa mar (série BBM).

O padrão de circulação observado foi idêntico ao da série B(NM) (Figura 3.3), mas com maior intensidade. As velocidades medidas através da posição dos traçadores permitiram estimar uma velocidade longitudinal no local B7 (indicado na figura) da ordem de 5 cm/s, o que corresponde a uma velocidade no protótipo da ordem de 0,4 m/s.

A Figura 3.4 permite ainda observar o cruzamento do campo de ondas difratadas e convergentes junto à costa, sobre o eixo transversal do QMD. É este padrão de agitação marítima que dá origem às células de circulação observadas.



Figura 3.4 – Imagem do campo de ondas no decurso do ensaio EM212, série B(BM)

Série C

A série C deu origem à formação de um duplo saliente (Figura 3.5). O primeiro, encontrava-se localizado segundo o eixo transversal do QMD, tal como tinha acontecido na série B. O segundo, cerca de 2 m (130 m em protótipo) mais a sul, encontrava-se alinhado com a cabeça sul do QMD. Note-se que nesta posição oblíqua, o comprimento útil, paralelo à costa, da crista do QMD é aproximadamente 212 m, ou seja, a distância entre salientes será da ordem de metade do comprimento longitudinal do QMD (contando com o comprimento das extremidades submersas). Este duplo saliente resulta de um padrão de agitação marítima difratada assimetricamente sobre o QMD.

Em conclusão preliminar, as séries B e C mostraram a ocorrência de transporte sedimentar longilitoral, com tendência para o crescimento de um (ou mais) saliente(s) na linha de água protegida pelo QMD. O saliente identificado é pouco expressivo, atribuindo-se tal a três fatores: i) duração limitada dos ensaios e das condições de agitação marítima atuante; ii) efeitos de escala que impedem a não rigorosa representação da realidade em modelo físico; e iii) elevada razão L_{qm}/L_d (comprimento do quebramar / distância à costa), insuficiente para favorecer a formação de um maior saliente.



Figura 3.5 – Imagens dos salientes após a execução da série C

3.3 Evolução morfológica da área de estudo

Apresenta-se seguidamente as diferenças entre os levantamentos final e inicial dos levantamentos topo-batimétricos das várias séries, agrupados por áreas de estudo (conforme identificadas na secção 2.4.2.1 e Figura 2.12).

Em todas as imagens, valores positivos indicam zonas de acumulação e valores negativos zonas de erosão. Atendendo à escala de cores e ordem de imprecisão vertical (Quadro 2.2), as áreas de cores mais ténues em redor do zero, i.e., entre $-1 < \Delta z < 1$ cm, devem ser interpretadas como quase não havendo diferenças morfológicas.

Os resultados que se apresentam não incluem os da série B(BM), pois estes não acrescentam informação relevante aos resultados da série B(NM).

Área total

Apresenta-se na Figura 3.6 as diferenças entre MDT na área total para as séries A1, A2, B e C. Em primeiro lugar, nota-se uma diferença muito acentuada nos padrões de erosão/acreção entre as séries A1 e A2 (Figura 3.6a), que resulta em grande parte da abordagem metodológica seguida na execução da série A1, que teve um carácter essencialmente experimental, tal como referido em 2.4.1.1.

Em primeiro lugar, nota-se uma enorme diferença de padrões de erosão/acreção entre as séries A1 e A2, mostrando que, efetivamente, ocorreram erros metodológicos na execução da série A1, que conduziram a resposta do sistema ilustrada na Figura 3.6a. Assim, os resultados da série A1 devem ser interpretados com muita cautela, no respeitante a comparações com as restantes séries.

A evolução morfológica associada à série A2 (Figura 3.6b) mostra essencialmente a formação de uma berma longitudinalmente uniforme, com erosão no sopé da face de praia. Este resultado é compatível com predominância do transporte transversal e (aparente) ausência de transporte longitudinal.

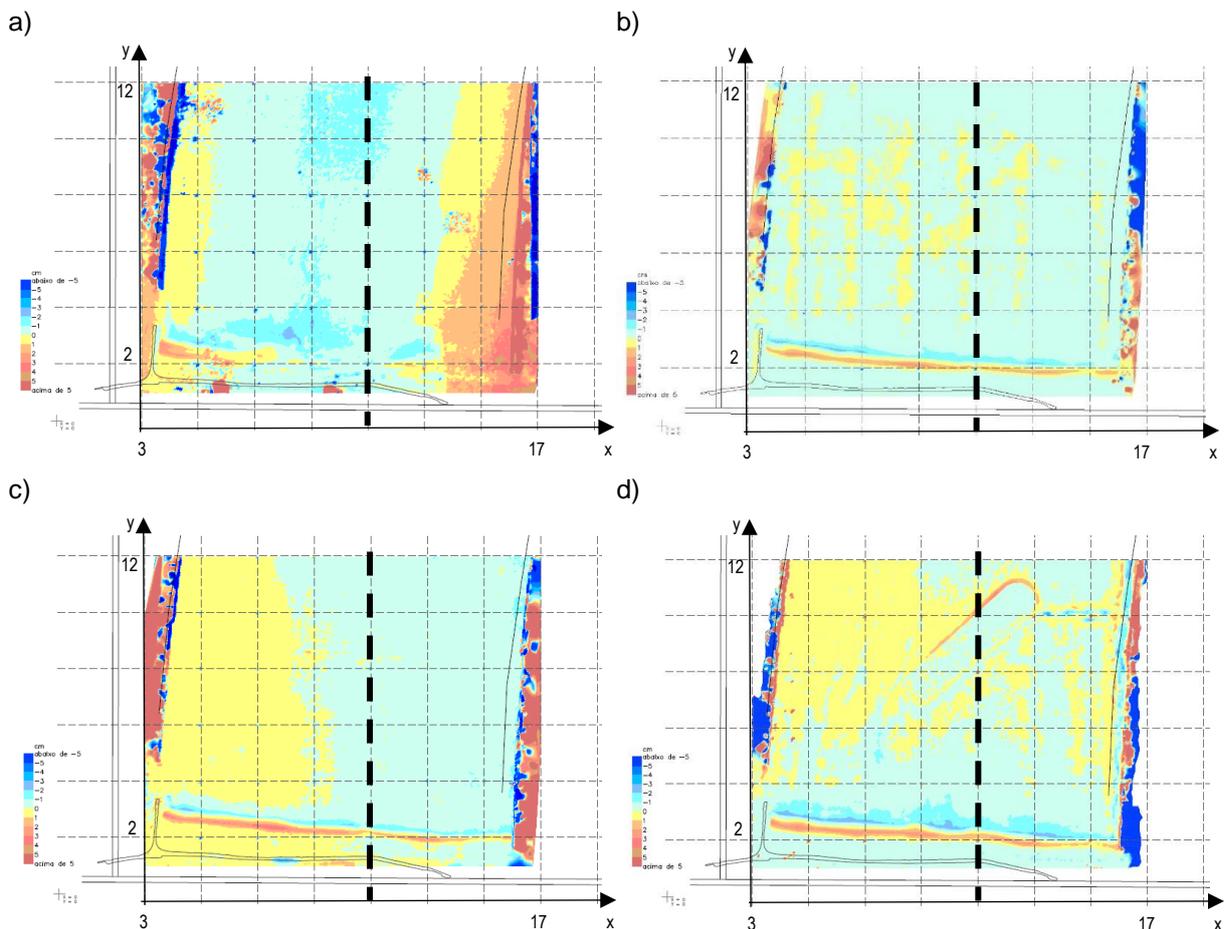


Figura 3.6 – Diferença entre MDT inicial e final para a área total das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

Os resultados das séries B e C mostram a construção de uma berma, não totalmente longilínea, devido à formação de salientes incipientes. Em resultado, e principalmente na série B, a construção da berma não foi uniforme, com menor expressão desta no alinhamento com o eixo transversal do QMD.

Em qualquer das séries, a acreção na berma foi conseguida à custa de erosão no limite inferior, submerso, do espraio. Esta erosão é mais notória na série C, em resultado de um programa de ensaios com condições de agitação em média mais severos que os das restantes séries. Na série A1 não foi detetada de forma notória essa dicotomia erosão-acreção na face da praia, devido às razões já apontadas de esta série ter tido um carácter mais experimental e ter também incluído ensaios em nível de preia-mar (não repetidos em nenhuma outra série).

Apresenta-se na Figura 3.7a a comparação entre os levantamentos iniciais da série A1 e B, permitindo observar claramente a localização do QMD, bem como a mancha sedimentar introduzida artificialmente perto da fronteira norte do modelo, no decurso da série A1 (cujo fundo, após regularizado, serviu de base à condição inicial da série B). Na restante área, os resultados comprovam genericamente a boa reprodução da condição batimétrica inicial e a imprecisão estimada dos levantamentos (Quadro 2.6). Na Figura 3.7b mostram-se as diferenças batimétricas entre o fundo do ensaio EM400 (início série A2) e o do ensaio EM100 (início série B), permitindo concluir que a reposição do fundo para a série A2 originou maiores diferenças da condição de base que na reposição anterior (ver manchas laranja entre $3 < x < 11$ e $1 < y < 4$), embora cumprindo, no essencial, a geometria prevista.

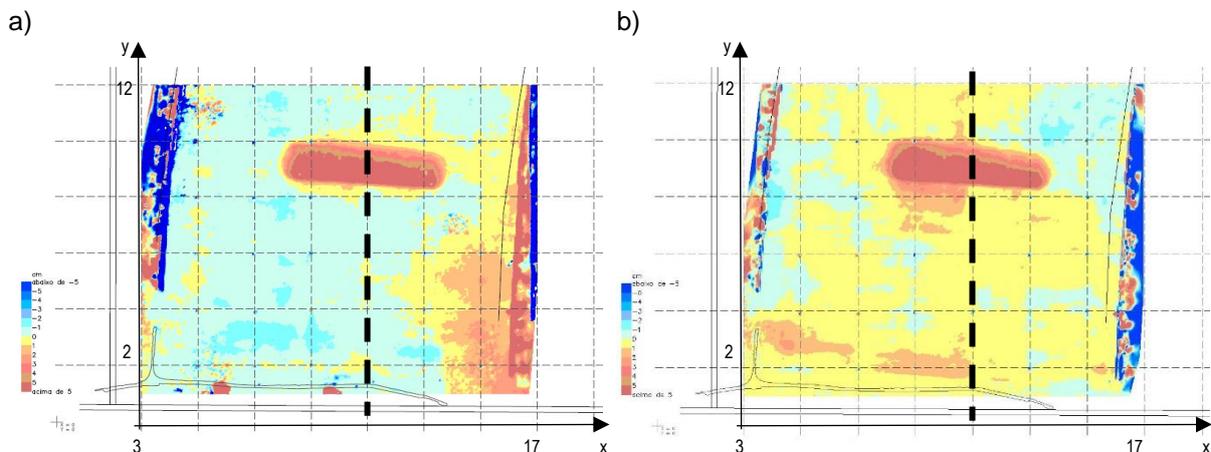


Figura 3.7 – Diferença entre MDT inicial e final para a área total das: a) inicial da série A1 (EM00) e inicial da série B (EM100); b) inicial da série A2 (EM400) e inicial da série B (EM100). (Quadricula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

Área ZA

Apresenta-se na Figura 3.8 as diferenças entre MDT na zona ZA para as séries A1, A2, B e C. Esta área engloba a região imediatamente a norte do esporão da Praia da Vagueira e permite identificar se ocorreu (ou não) acumulação a norte do esporão, devido ao antecipado transporte longilitoral associado à obliquidade da onda incidente.

Em primeiro lugar, em qualquer dos resultados, observa-se uma ligeira inflexão ou curvatura da berma, imediatamente a norte do esporão. Esta curvatura é assim sinal da ocorrência de muito ligeiro transporte longitudinal de norte para sul, sendo, no entanto, o movimento aluvionar dominado pelo transporte transversal.

Relativamente aos resultados das séries A1 e A2, confirma-se para a ZA as diferenças já apontadas para a região total. Ou seja, tendo sido duas séries de evolução morfológica que partiram do mesmo fundo inicial, sem QMD, os resultados finais divergiram porque as condições hidrodinâmicas diferiram e porque houve alteração dos fundos enquanto decorria o ensaio A1.

Da série A2 para a série B (Figura 3.8b e c) há pequenas diferenças no desenvolvimento da berma na ZA, mas que não são significativas. O mesmo se conclui relativamente à série C (Figura 3.8d).

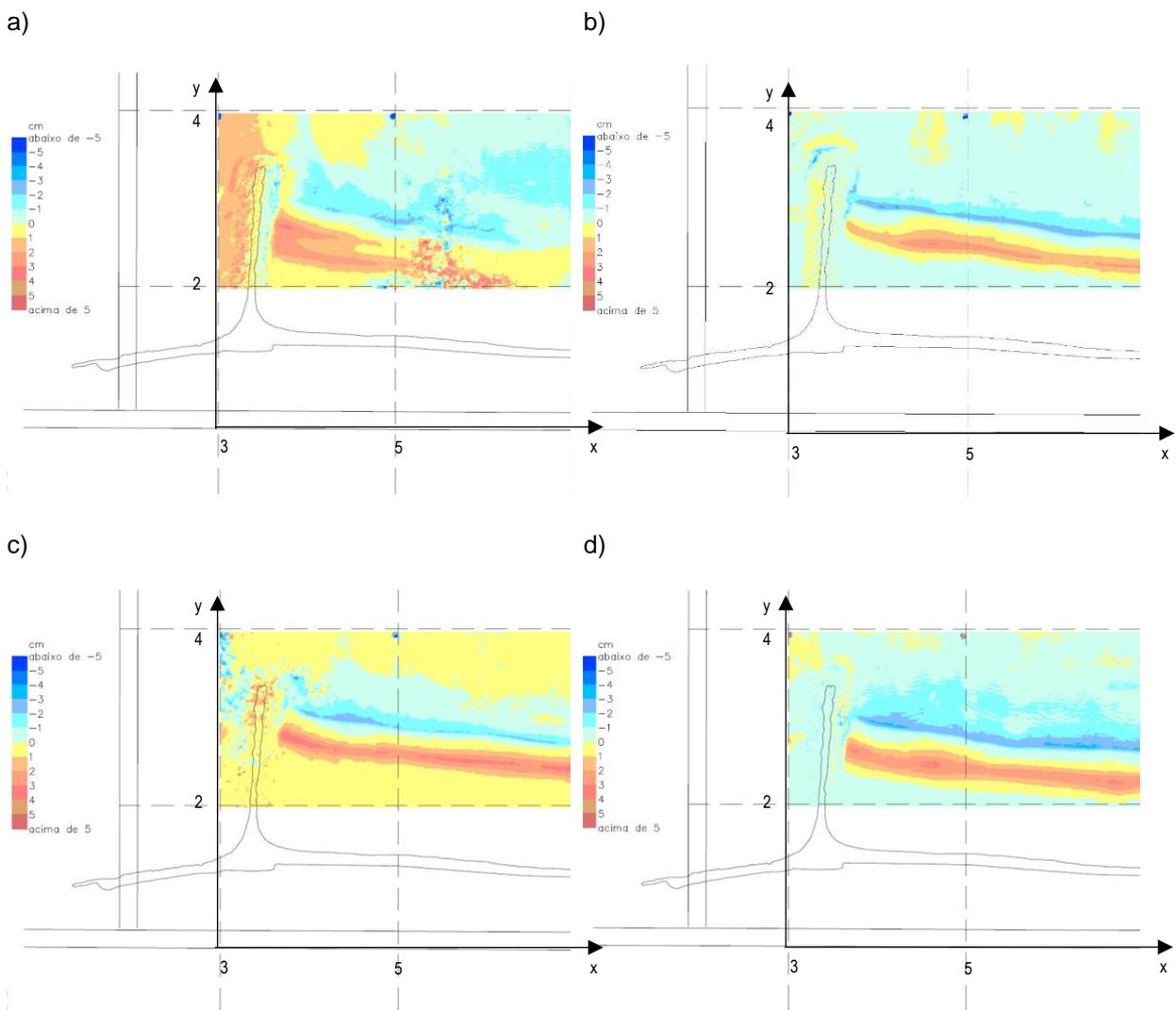


Figura 3.8 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZA das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m)

Área ZB

A área ZB ajuda a identificar as alterações morfológicas na zona abrigada pelo QMD (Figura 3.9).

Na série A1 não se observaram alterações morfológicas significativas, nesta área, ao contrário do esperado e observado na série A2. Tal deve-se, muito provavelmente, ao facto de se ter incluído na série A1 um conjunto de ensaios em preia-mar, com ondas intensas (vide Quadro 2.2, ensaios EM14 a EM16, $H_s=3,0$ m), as quais desfizeram a berma que tinha sido construída nos ensaios prévios em nível-médio, a qual não foi depois reconstruída no decurso dos ensaios EM17 a EM26. Pelo contrário, na série A2 formou-se uma berma longitudinalmente uniforme (Figura 3.9b).

A Figura 3.9c e Figura 3.9d permitem identificar com melhor clareza o crescimento dos salientes formados nas séries B(NM) e C, respetivamente. Em ambos os casos um saliente incipiente desenvolve-se no alinhamento do eixo transversal do QMD, com cerca de 14 cm de extensão transversal máxima (9 m em protótipo). No caso da série C, com o QMD oblíquo, um segundo saliente desenvolve-se cerca de 2 m mais a sul, já referido anteriormente. Contrariamente ao expectável, o saliente central da série B tem menor largura (transversal) que o da série C. Tal pode, no entanto, dever-se à diferença de condições hidrodinâmicas entre séries.

Em todos os casos, exceto na série A1, existe notório predomínio de movimento sedimentar transversal, com acreção de berma.

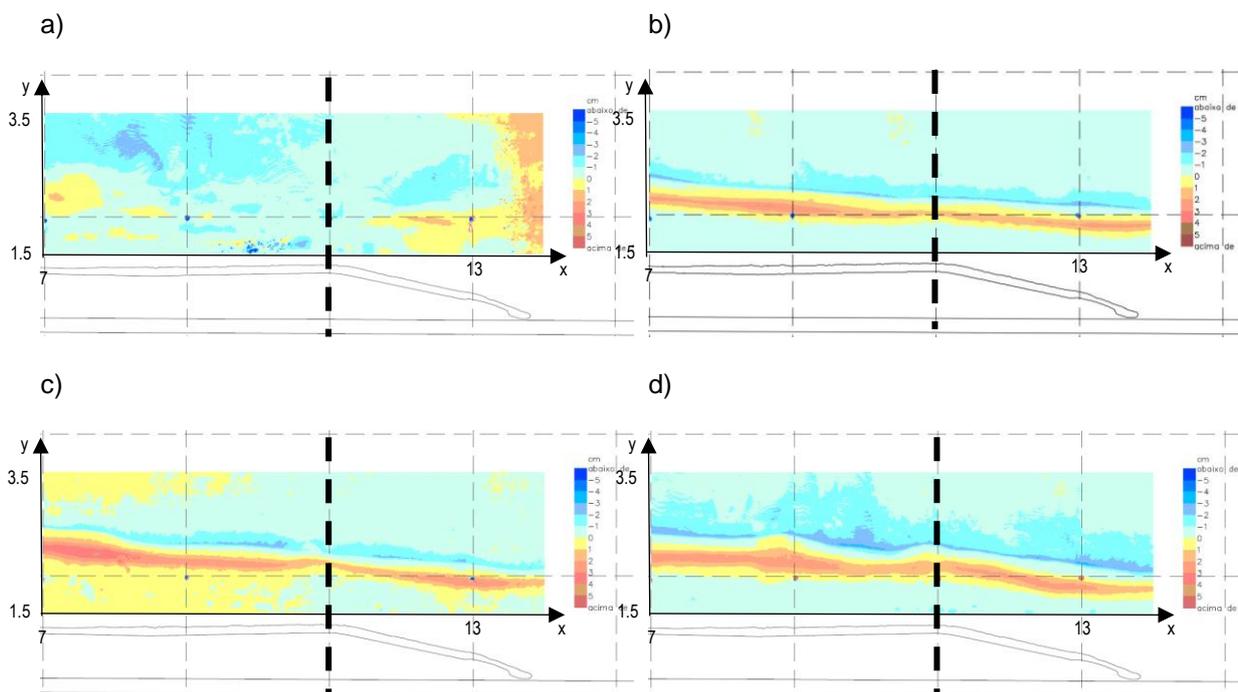


Figura 3.9 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZB das: a) série A1 (EM26 menos EM00); b) série A2 (EM452 menos EM400); c) série B(NM) (EM152 menos EM100); d) série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

Área ZC

Esta área ajuda a identificar erosões localizadas em redor do QMD, na sua posição paralela à praia. Assim, apresenta-se na Figura 3.10 a diferença entre MDT final e inicial da série B. Além de uma mancha amarela que representa ligeira acreção à esquerda da figura, consegue-se discernir uma linha oblíqua no sopé do tardoz interior do QMD, que indica acreção. Essa acreção resulta de ligeira erosão localizada imediatamente a sotamar da estrutura, que não é visível nesta comparação. Ocorre assim alguma infraescavação do fundo no sopé do QMD, com transporte de sedimentos para o talude de intradorso. Este processo, devido a efeitos de escala, não tem forçosamente de ocorrer no protótipo. No entanto, estes resultados mostram que o QMD induz movimentos aluvionares em seu redor, que devem ser acautelados.

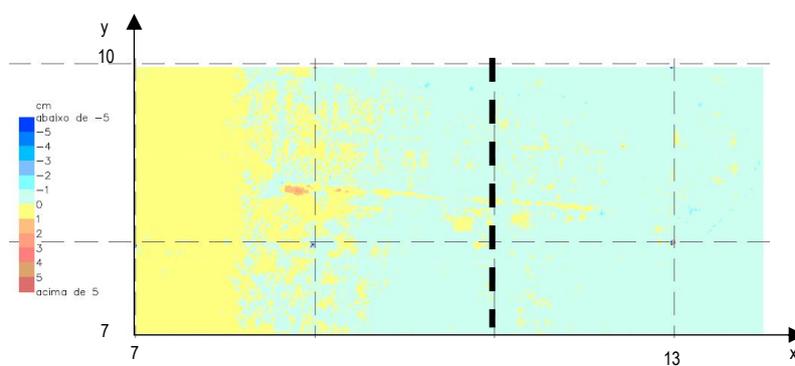


Figura 3.10 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZC da série B(NM) (EM152 menos EM100). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

Área ZD

A área ZD engloba a região envolvente do QMD oblíquo, o que permitirá identificar eventuais erosões localizadas em redor do QMD nessa posição. A diferença entre o MDT final e inicial desta série é apresentada na Figura 3.11, onde se pode visualizar maiores diferenças no sopé do tardoz exterior. Estas são artificiais e não resultaram maioritariamente da ação das ondas, uma vez que após a execução do levantamento inicial, ainda antes do início do ensaio, foi detetado um degrau no sopé do tardoz exterior, que resultou do reposicionamento do QMD. Esse degrau foi assim preenchido com novo sedimento, artificialmente, de modo a se obter uma morfologia contínua entre a estrutura e o fundo adjacente.

A mesma figura mostra ainda ligeiras acreções no sopé do tardoz interior, as quais resultam de movimentos sedimentares provenientes de infraescavações localizadas nesse contacto estrutura-fundo.

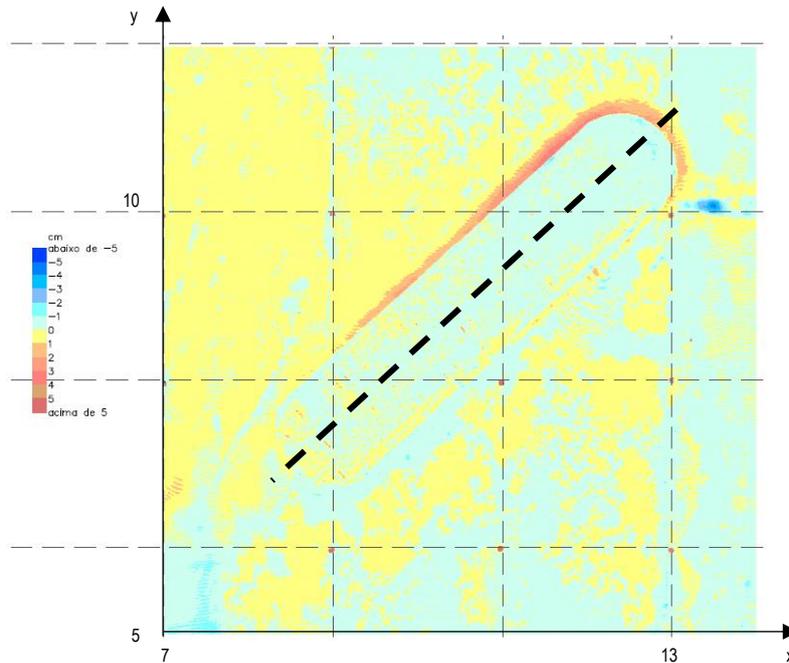


Figura 3.11 – Diferença entre MDT inicial e final para a área ZD da série C (EM371 menos EM300). (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

Efeito isolado do QMD paralelo à costa

Por fim, importa identificar o efeito isolado do QMD, quando está na posição paralela à praia. Identifica-se, assim, na Figura 3.12 as diferenças entre os levantamentos finais das séries B (EM152) e A2 (EM452). Naturalmente, a diferença exhibe claramente o local de implantação do QMD. Além disso, verifica-se que ocorreu também, genericamente em $x < 13$ m, uma maior acumulação na berma da praia no ensaio com QMD (série B, EM152) do que no sem QMD (série A2, EM452). Este resultado é aparentemente contrário ao esperado, pois a presença do QMD diminui a agitação marítima junto à praia na zona abrigada pelo mesmo e, logo, esperar-se-ia menos capacidade construtiva de berma nessa zona. No entanto, o surgimento de uma faixa de diferença negativa entre estes dois levantamentos na zona superior da berma (perto de $y=2$ m) é sinal de que na ausência de QMD o topo da berma é construído mais para terra do que na presença do QMD, o que é compatível com o maior hidrodinamismo que ocorre nessa situação. Ou seja, na ausência de QMD ocorre a formação de uma berma mais a sotamar (com a associada erosão no seu sopé) do que no caso com a presença do QMD.

Na zona norte da praia ($x > 13$ m) ocorre muito menor diferença na formação das bermas, havendo assim equivalência de resultados com e sem QMD nessa zona, i.e., numa zona física em que a hidrodinâmica é equivalente nas duas séries.

Por fim, o pormenor da Figura 3.12c permite identificar a acreção de um muito ligeiro saliente perto de $x=11$ m.

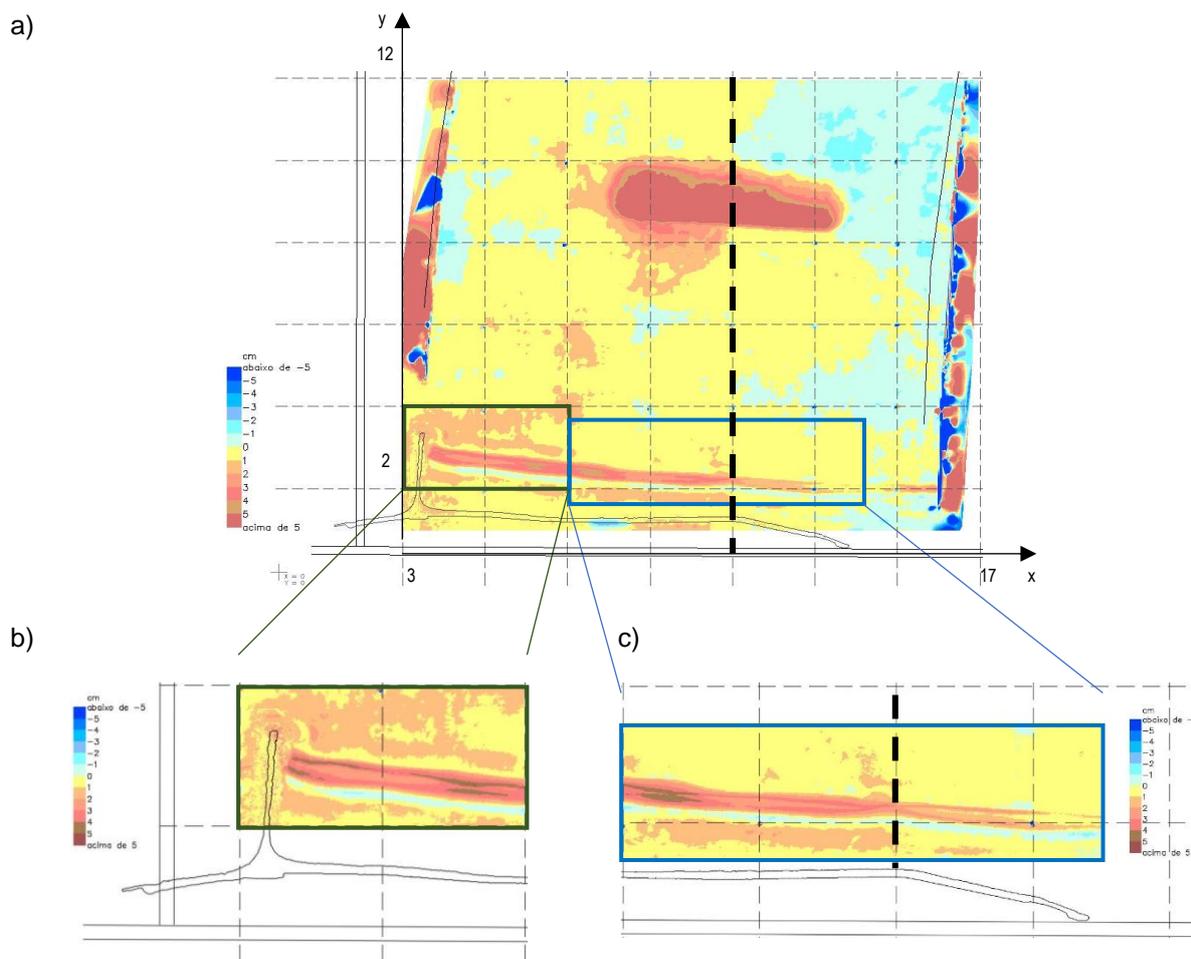


Figura 3.12 – Diferença entre MDT final da série B (EM152) e final da série A2 (EM452): a) área total; b) ZA; c) ZB. (Quadrícula de 2x2 m e indicação do eixo transversal do QMD a tracejado negro)

3.4 Evolução morfológica de perfis transversais

Os MDT das topo-batimetrias inicial e final das séries de ensaios permitiram extrair perfis transversais que são brevemente analisados nesta secção. Para tal, definiram-se 7 perfis paralelos ao eixo y, designados de M1 a M6 (Figura 3.13), não correspondendo exatamente a perfis transversais à praia, mas suficientemente próximos dessa direcção para poderem ser representativos. As posições dos perfis são: M1 - $x=4$ m, M2 - $x=6$ m, M3 - $x=7,3$ m, M4 - $x=9,3$ m, M5a - $x=10,7$ m, M5b - $x=11,3$ m, M6 - $x=12,7$ m. Estas posições dos perfis não coincidem com os alinhamentos dos pontos de controlo, pois caso assim fosse, os perfis mostrariam as posições daqueles pontos conspícuos e não as cotas da superfície da praia mapeada. Os limites de cada perfil são $1,5 < y < 5$ m, e o espaçamento entre pontos do mesmo perfil é 1 cm. Os alinhamentos M5a e M5b distam 30 cm, para cada lado, do alinhamento do eixo transversal do QMD, na sua posição paralela à praia (série B).

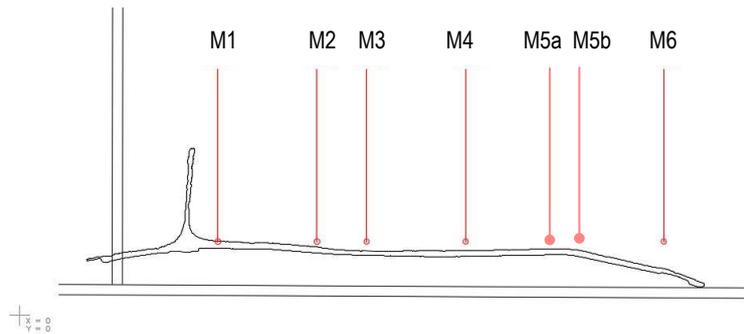


Figura 3.13 – Posição dos perfis M1 a M6 no modelo físico

Apresenta-se na Figura 3.14 a variação longitudinal de cada ao perfil, para uma mesma condição de ensaio. As Figura 3.14a,c,e correspondem às condições iniciais dos ensaios A2, B e C, respetivamente. Como se ilustra em cada sub-figura, existe uma variação longitudinal do perfil inicial, conforme o previsto para a construção do modelo físico (vide Figura 2.6 do Relatório 12, Sancho *et al.*, 2021), ocorrendo um ligeiro decrescimento do declive de sul (M1) para norte (M6). Por outro lado, confirma-se a homogeneidade na reconstituição do fundo inicial, como desejável.

Relativamente aos resultados finais de cada série, em primeiro lugar, confirma-se a evolução morfológica ocorrida na face da praia, de aumento do seu declive e construção de berma. No ensaio sem QMD (série A2, EM371), a morfologia da face de praia e altura da berma é aproximadamente uniforme longitudinalmente (Figura 3.14b). O mesmo acontece para a ligeira depressão erosiva no sopé da face de praia. No ensaio com QMD paralelo (série B, EM152), observa-se uma menor variação morfológica nos perfis M5a e M5b (Figura 3.14d), i.e, naqueles mais próximos do eixo transversal do QMD e, portanto, na sua zona de sombra. Mais ainda, não ocorre no perfil M5a erosão no sopé da face de praia, devido à acumulação afeta ao crescimento do saliente. Não obstante, a presença do saliente não é muito evidente nestes resultados. Na morfologia final dos ensaios com QMD oblíquo (série C, EM452), a variação longitudinal da morfologia da face de praia mostra também uma menor movimentação nos perfis M5a e M5b (Figura 3.14f), e também no perfil M4, próximo da zona onde se observou o segundo saliente (Figura 3.9d).

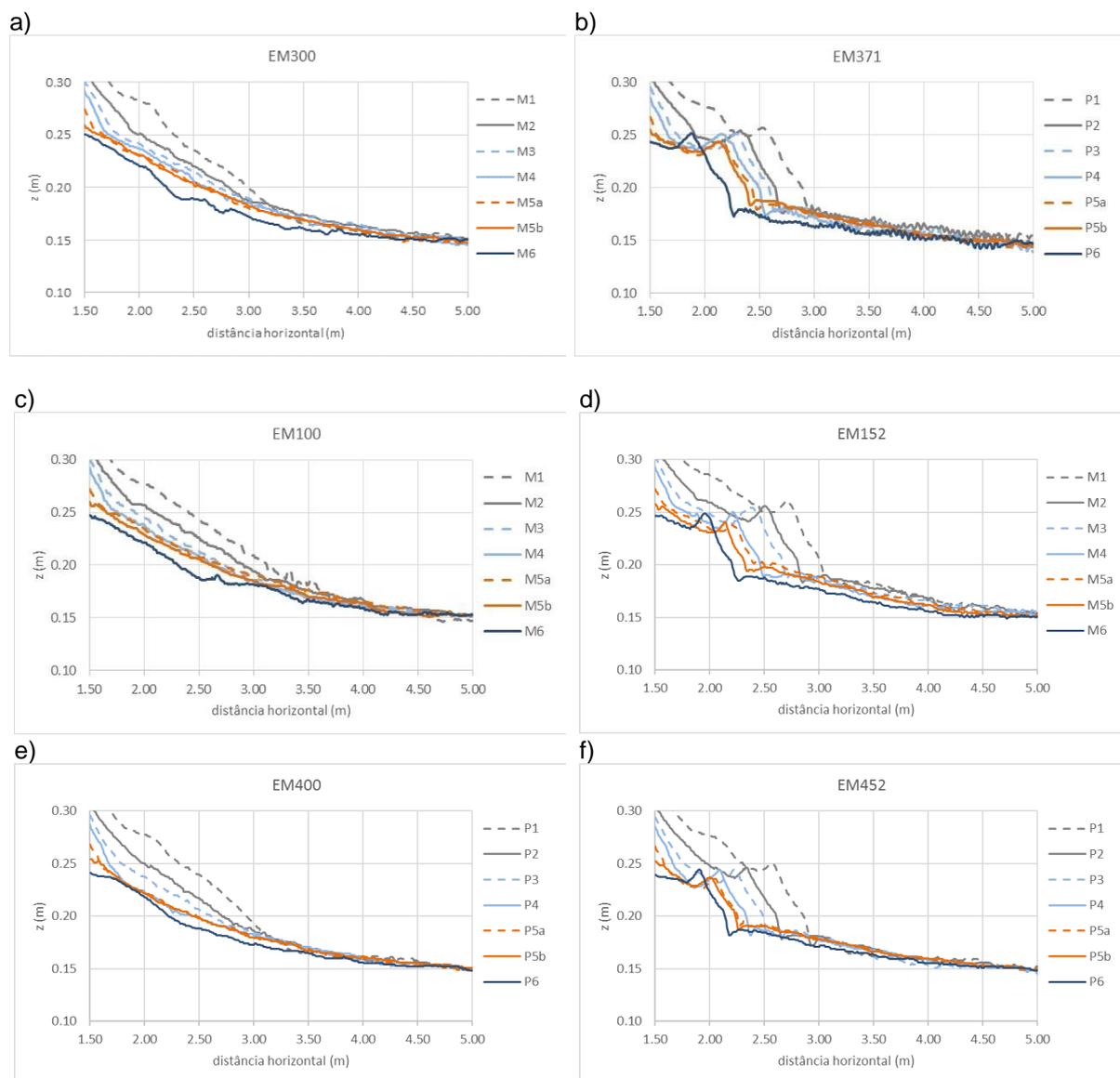


Figura 3.14 – Variação longitudinal do perfil transversal de praia (M1 a M6) para 6 condições de ensaio: a) início da série A2 (EM300); b) final da série A2 (EM371); c) início da série B(NM) (EM100); d) final da série B(NM) (EM152); e) início da série C (EM400); f) final da série C (EM452)

3.5 Evolução da linha de água

Nesta secção apresentam-se os resultados da evolução da linha de água ao longo dos ensaios, obtidas pelo método pormenorizado na secção 2.4.2.2.

Nesta secção apresentam-se os resultados da evolução da linha de água ao longo dos ensaios, obtidas pelo método pormenorizado na secção 2.4.2.2.

Na Figura 3.15a apresentam-se algumas linhas de água obtidas durante a série A1: o eixo vertical representa a distância à linha de base e o eixo horizontal a distância ao longo dessa linha (cuja origem $X'=0$ coincide com a origem do sistema coordenado local, $x=0$); a linha a tracejado cheio indica o eixo de simetria do QMD (quando presente). O esporão da Vagueira situa-se imediatamente à esquerda

das linhas representadas e atente-se ainda à diferença de escalas dos eixos vertical e horizontal. Observa-se elevada sobreposição das linhas EM00, EM11 e EM17 e alguma maior diferença para as linhas EM07 e EM26 (a final da série A1). As observações indicam uma linha final (EM26) com algumas oscilações e aparente avanço (acrecção) da linha de água na zona central.

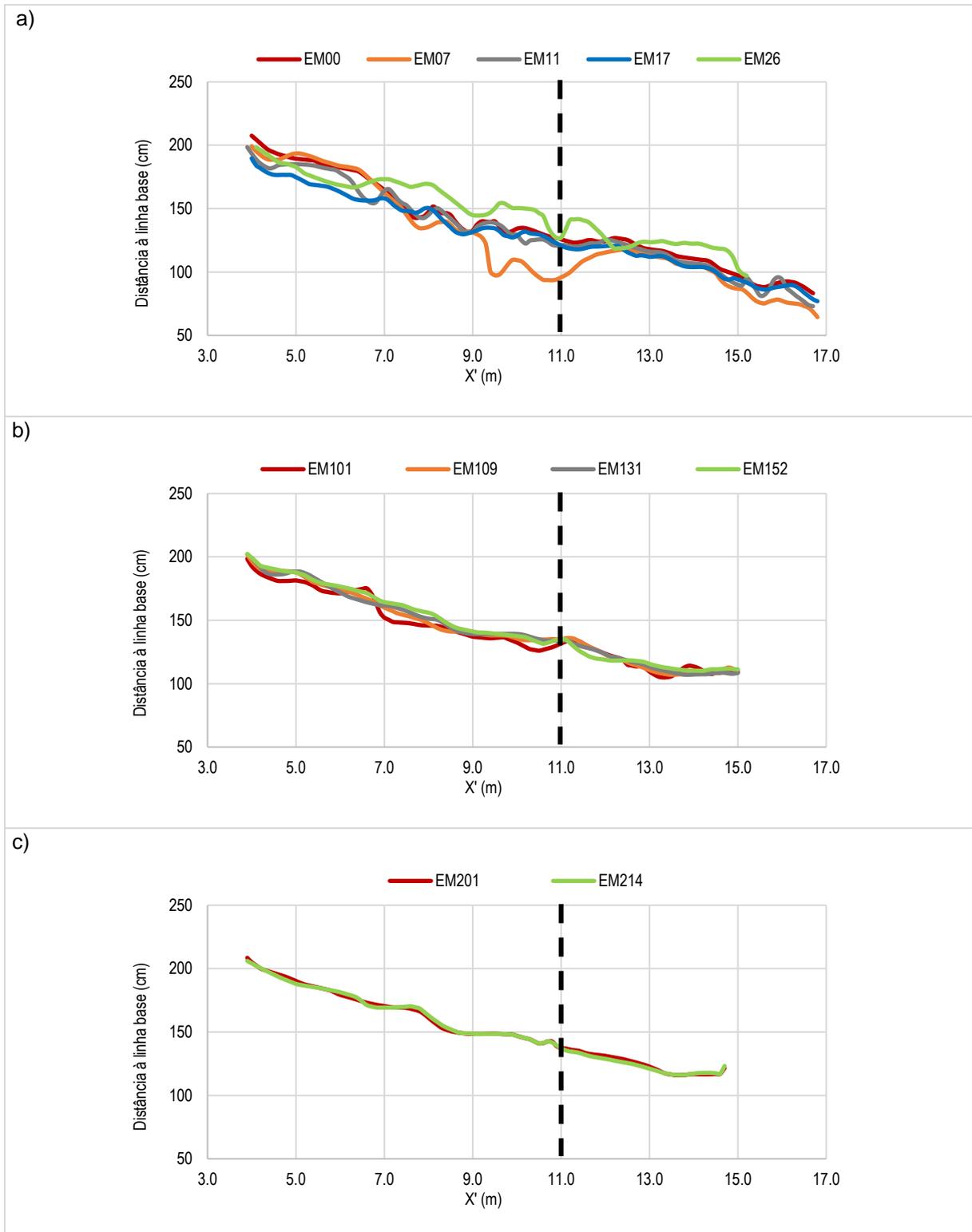


Figura 3.15 – Linhas de água obtidas durante as: a) série A1; b) série B(NM); c) série B(BM). (Eixo transversal do QMD a tracejado negro)

A Figura 3.15b mostra as linhas de água medidas no decurso da série B(NM). Os resultados mostram pouca variabilidade da linha de água e não permitem identificar claramente o crescimento do saliente observado. Este saliente tem, à escala do modelo, uma acreção máxima de cerca de 10 cm (6,5 m no protótipo). O mesmo se conclui dos resultados da linha de água na série B(BM), apresentados na Figura 3.15c, onde em catorze ensaios em baixa-mar não houve variação entre a linha de água inicial e final, indicando assim ter-se atingido no modelo físico uma aparente configuração de linha de costa estável.

No Quadro 3.2 apresentam-se os valores médios das diferenças entre linhas de água final e inicial para as séries A1, B(NM) e B(BM). De acordo com estes resultados, ocorreu ligeiro avanço médio da linha de água nas séries A1 e B(NM) e recuo pouco expressivo na série B(BM). As distâncias médias quadráticas são da ordem de 10 cm ou inferior, isto é, dentro da ordem de erro da metodologia, estimado em ± 10 cm (vide secção 2.4.2.2).

Quadro 3.2 – Distância média e distância média quadrática entre linhas de água final e inicial para as séries A1, B(NM) e B(BM)

	A1	B(NM)	B(BM)
Distância média (cm)	6,14	3,90	-0,27
Distância média quadrática (cm)	11,66	6,26	1,37

3.6 Síntese e discussão

Os resultados dos ensaios em modelo físico obtidos através das três metodologias de análise (observação descritiva, comparação topo-batimétrica e evolução da linha de água) são concordantes e permitem concluir o seguinte:

- na ausência de QMD a dinâmica sedimentar é dominada por movimentos transversais à praia, promovendo a alteração do perfil na antepraia e baixa praia, e o reforço da berma. Estes movimentos sedimentares transversais são justificáveis pelos efeitos de distorção vertical-horizontal induzidos pela modelação física a esta escala e nas condições ensaiadas;
- na ausência de QMD não se verificou a ocorrência de transporte longilitoral;
- a presença de um QMD paralelo à praia, com as características geométricas ensaiadas ($L_{qm}=300$ m, $L_{\sigma}=400$, $h_c=+0,34$ m ZH), conduz à 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;
- a presença do QMD paralelo à praia induz a formação de uma berma na praia mais a barlamar do que na ausência do QMD;
- na presença do QMD paralelo à praia formam-se correntes longitudinais e transversais, e o padrão de circulação representado na Figura 3.3;
- a presença de um QMD oblíquo 45° à praia, com as características geométricas ensaiadas ($L_{qm}=300$ m, $L_{\sigma}=400$, $h_c=+0,34$ m ZH), conduz à formação de dois salientes incipientes na zona

protegida pelo QMD. Estes salientes têm larguras transversais máximas da ordem de 10 m, à escala do protótipo.

Adicionalmente, importa referir que são expectáveis efeitos de escala não desprezáveis, que convém ter em atenção. Recorde-se que o modelo físico e as condições de agitação marítima foram dimensionadas considerando válida a lei de semelhança de Froude, à escala 1:65 (Sancho *et al.*, 2021). Relativamente à dinâmica sedimentar, selecionou-se para o modelo físico uma areia com $D_{50,m}=0,285$ mm, que pretendia representar a areia no protótipo com $D_{50,p}=0,5$ mm, admitindo uma distorção entre a escala vertical e horizontal igual a $\delta=2,4$. Esta distorção significa que os perfis no modelo reduzido deverão ter um declive cerca de 2,4 vezes superior ao declive representado em protótipo (Sancho *et al.*, 2021).

Os perfis transversais obtidos na secção 3.4, para as morfologias finais das séries A2 (EM452), B(NM) (EM152) e C (EM371) apresentam um declive médio na face de praia aproximadamente igual a 0,2 (1:5). Ou seja, aplicando o fator de distorção, este perfil representaria uma face de praia em protótipo com declive igual a $\sim 0,08$ (1:12). Os dados do programa COSMO para o perfil da Praia da Vagueira, PVG1, permitem deduzir o valor do declive real: para a face de praia, encontraram-se valores entre 0,138 (1:7, em julho 2019) a 0,037 (1:28, em fevereiro 2020), com valores intermédios de 0,108 (1:9, em abril 2021) e 0,092 (1:11, em novembro de 2018). Ou seja, o declive da face de praia é muito mais acentuado no verão e em condições de menor agitação marítima. Considerando que as condições de ensaio representam, maioritariamente, condições de agitação média a fraca (e.g., Quadro 2.4), seria de esperar um declive, à escala do protótipo, da ordem de 1:10. Ou seja, efetivamente, o perfil medido em modelo físico é mais acentuado que o representado no protótipo, concordante com o facto de a distorção vertical-horizontal ser da ordem de 2.

Note-se que esta comparação de perfis reais com simulados só faz sentido para o declive da face de praia, uma vez que foi essa zona que, maioritariamente, sofreu alterações morfológicas no decurso dos ensaios. Efetivamente, o declive médio na zona até uma profundidade de cerca de -2 m (ZH) foi no modelo reduzido semelhante ao valor em protótipo, $\sim 1:26$ e $\sim 1:30$, respetivamente.

Face ao exposto e sabendo ainda que em modelos distorcidos o fenómeno de difração (causado pelo QMD) também não é corretamente reproduzido (e.g., Silva *et al.*, 2011), crê-se que o saliente correspondente em protótipo ao obtido experimentalmente teria um declive mais suave e teria também maior largura transversal.

4 | Resultados dos ensaios de surf

4.1 Organização dos resultados

Tendo em consideração as condições de ensaio descritas na secção 2.5, apresenta-se nesta secção a descrição dos resultados obtidos dos ensaios em modelo físico em termos dos índices de agitação nas sondas ao redor do QMD e da localização, comprimento e tipo de rebentação observados, parâmetros que permitem analisar a capacidade do QMD de promover ondas adequadas para a prática de surf.

Apresenta-se ainda uma aplicação do modelo numérico COULWAVE (Lynett e Liu, 2004) que permite complementar a informação obtida dos ensaios em modelo físico. Com efeito, os resultados numéricos permitem calcular outros parâmetros importantes associados à verificação das condições de rebentação e da sua adequabilidade para a prática do surf. São exemplo destes parâmetros, o comprimento da linha de rebentação, a direção da onda no ponto de rebentação, o ângulo de rebentação (parâmetro que permite analisar para que grupo de surfistas se destina esse tipo de rebentação, desde iniciantes a profissionais) e o número de Iribarren e correspondente tipo de rebentação (mergulhante, progressiva ou de fundo).

4.2 Índices de agitação

Os ensaios iniciaram-se pela 1ª fase, situação sem QMD (sem QMD), tal como referido anteriormente, seguidos dos ensaios com o QMD aproximadamente paralelo à costa (QMD 0°), 2ª fase e, finalmente, dos ensaios com o QMD rodado a 45° graus (QMD 45°), 3ª fase.

Da Figura 4.1 à Figura 4.6 apresentam-se os índices de agitação obtidos nos ensaios das três fases (sem QMD, QMD 0° e QMD 45°) juntamente com o perfil de fundo correspondente para cada um dos perfis em análise, P3 a P7 (ver Figura 2.7). Nestes gráficos o eixo das abcissas tem início na linha de costa e a profundidade dos perfis tem a sua origem à cota -12 m (ZH). Dos resultados experimentais relativos aos índices de agitação e da análise visual dos ensaios é possível concluir que, para todas as condições de agitação ensaiadas:

- a rebentação na situação atual (sem QMD) ocorre a sotamar da posição de implantação prevista para o QMD, próxima da linha de costa;
- o QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD.

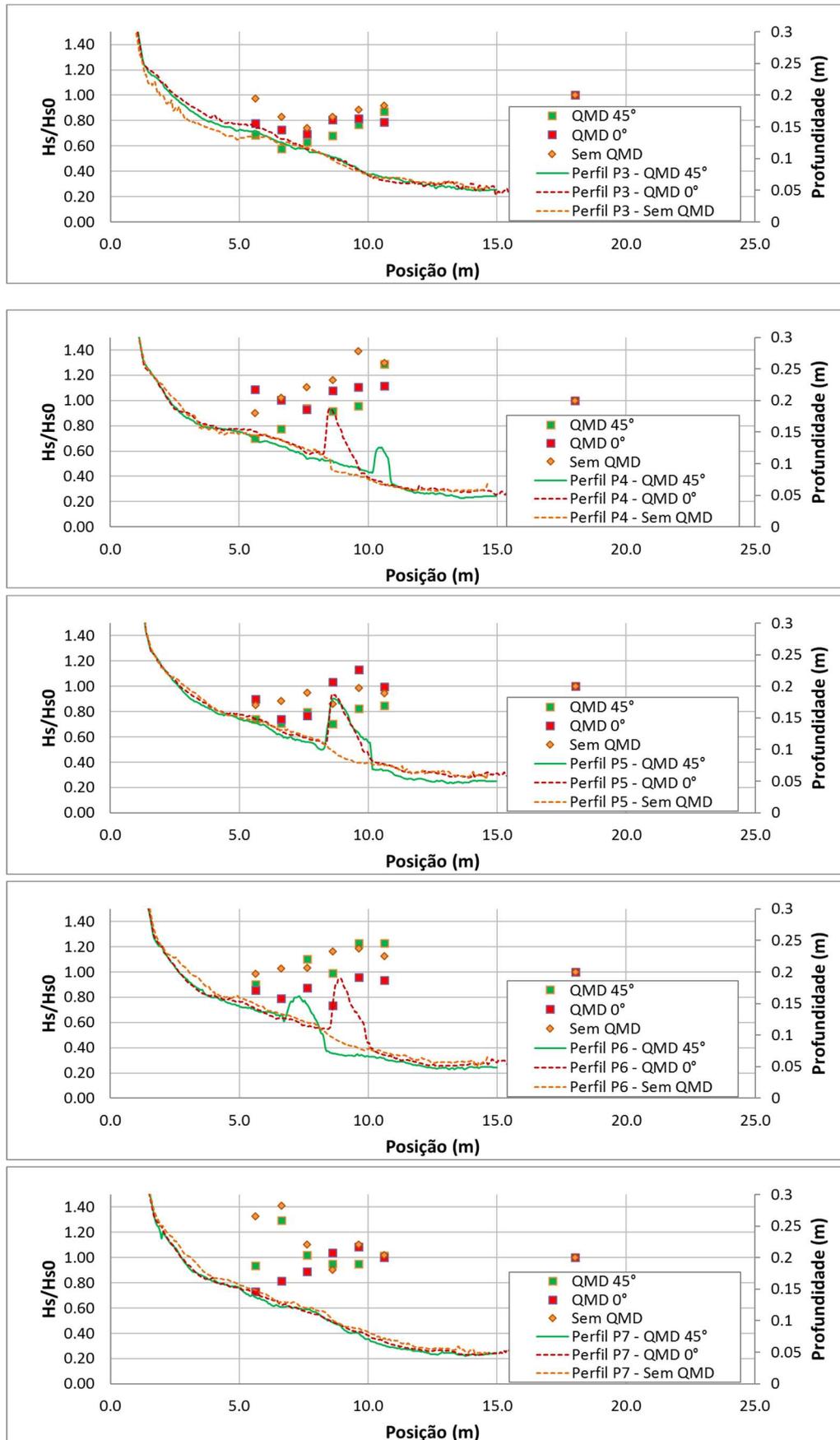


Figura 4.1 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=1,5 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

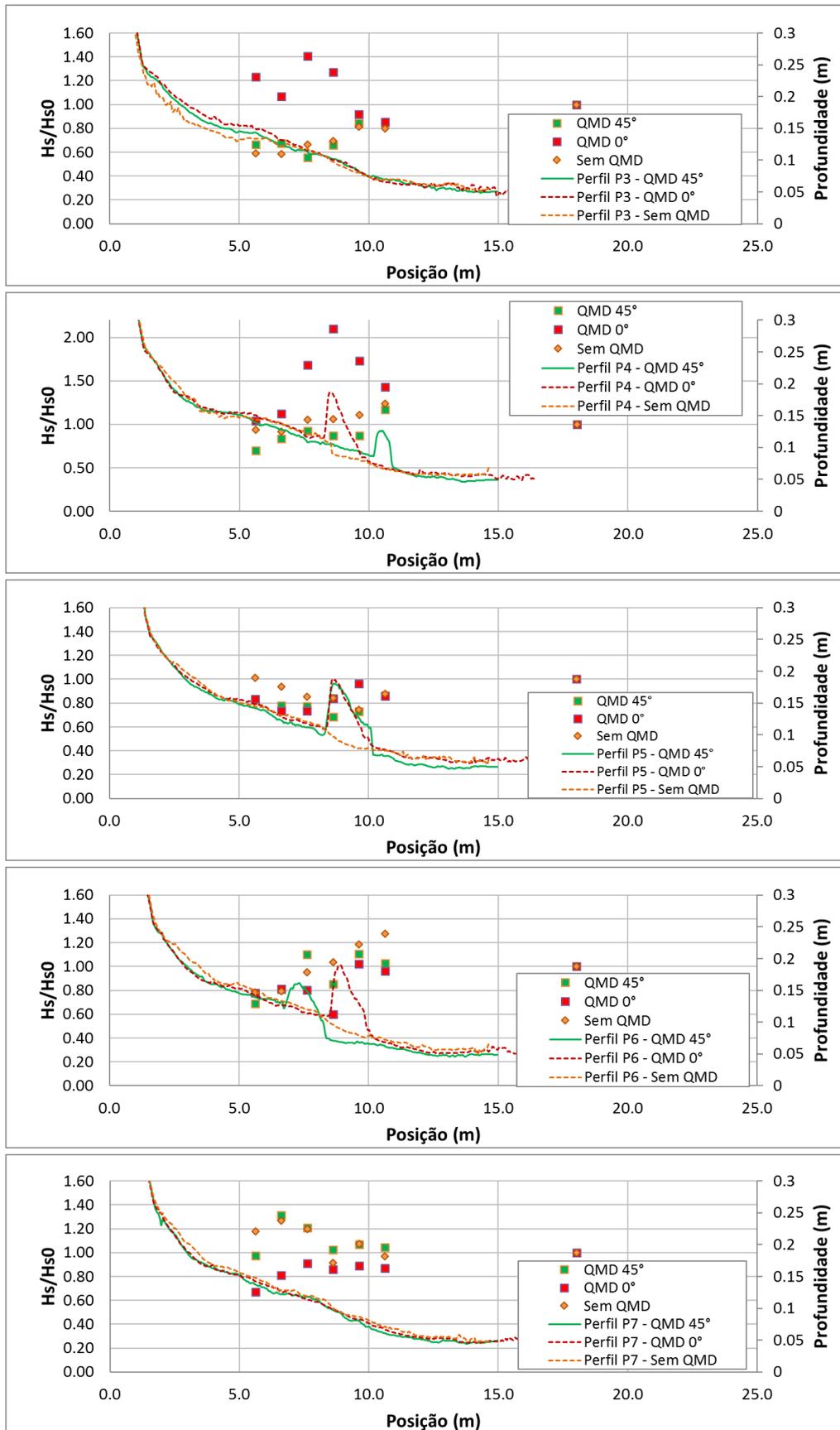


Figura 4.2 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=2,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

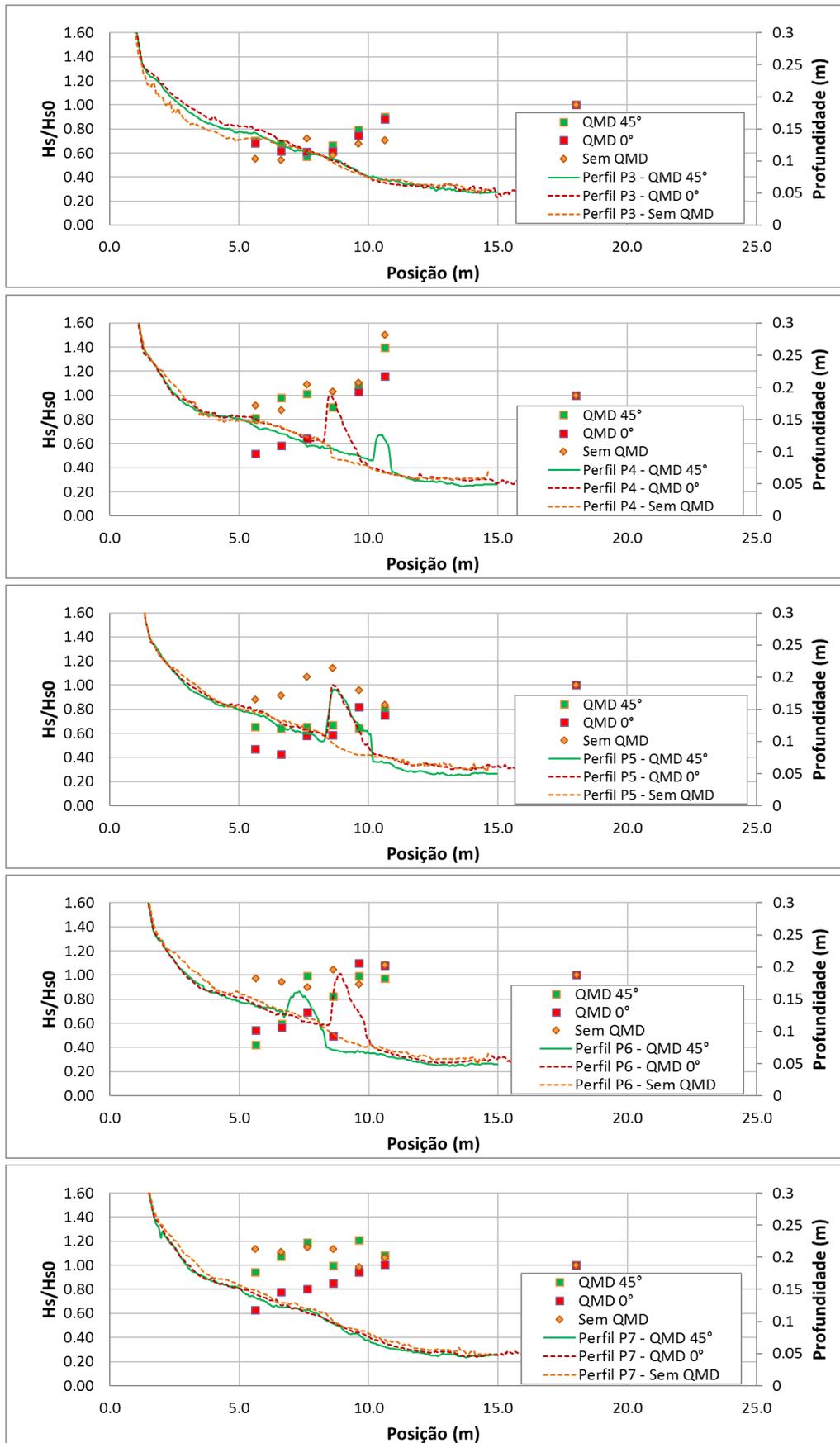


Figura 4.3 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: $T=10$ s; $H=3,0$ m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

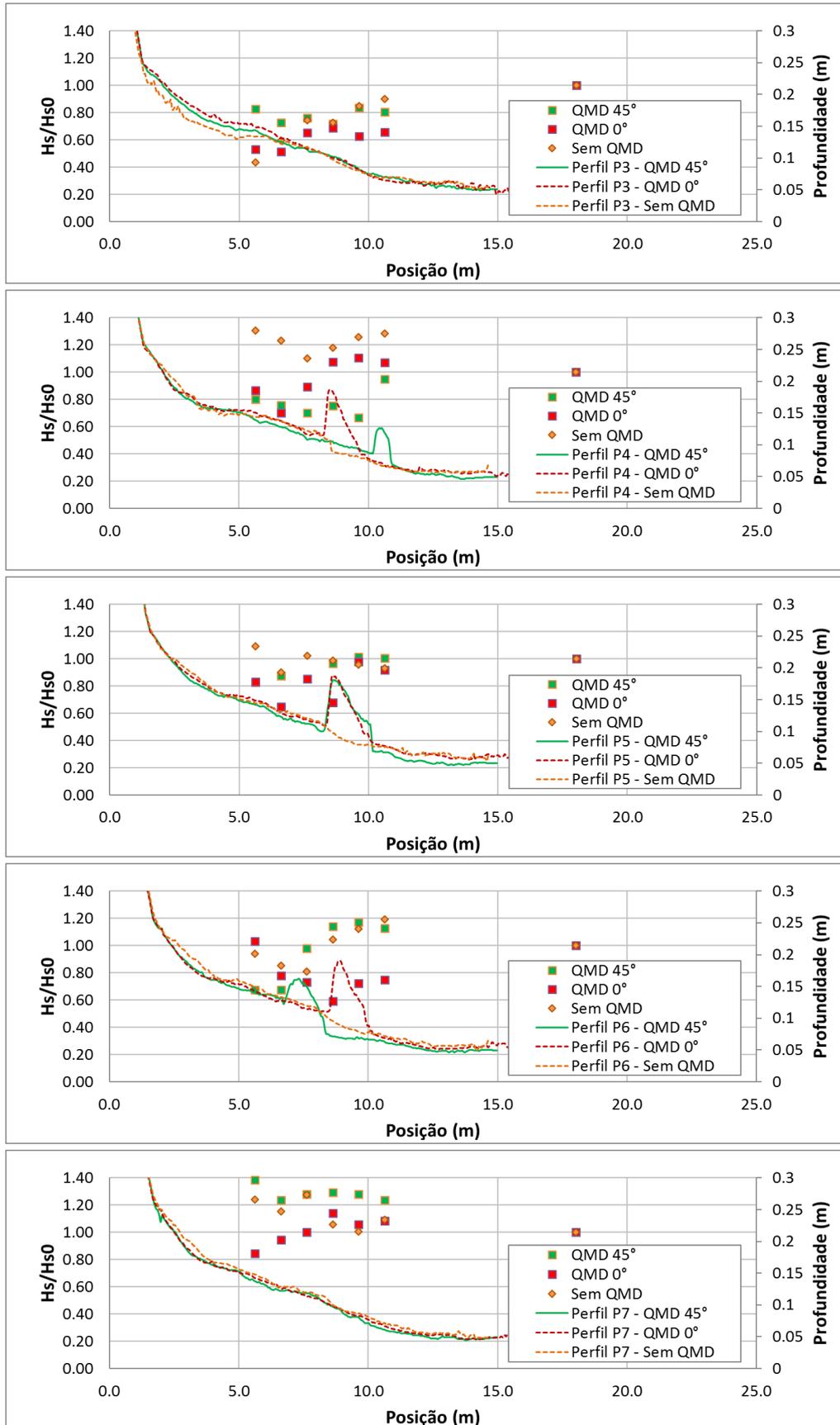


Figura 4.4 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: $T=12$ s; $H=1,5$ m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

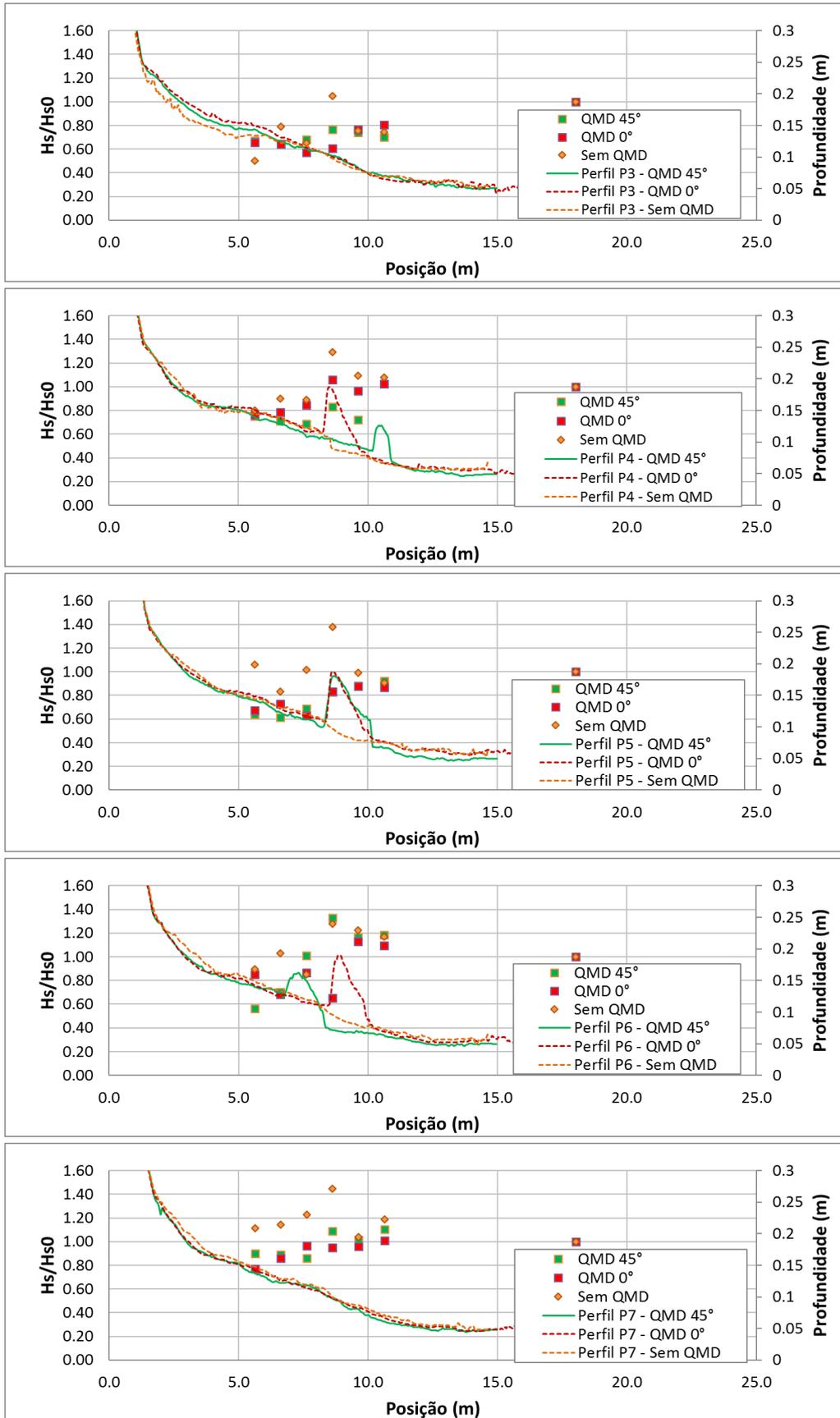


Figura 4.5 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

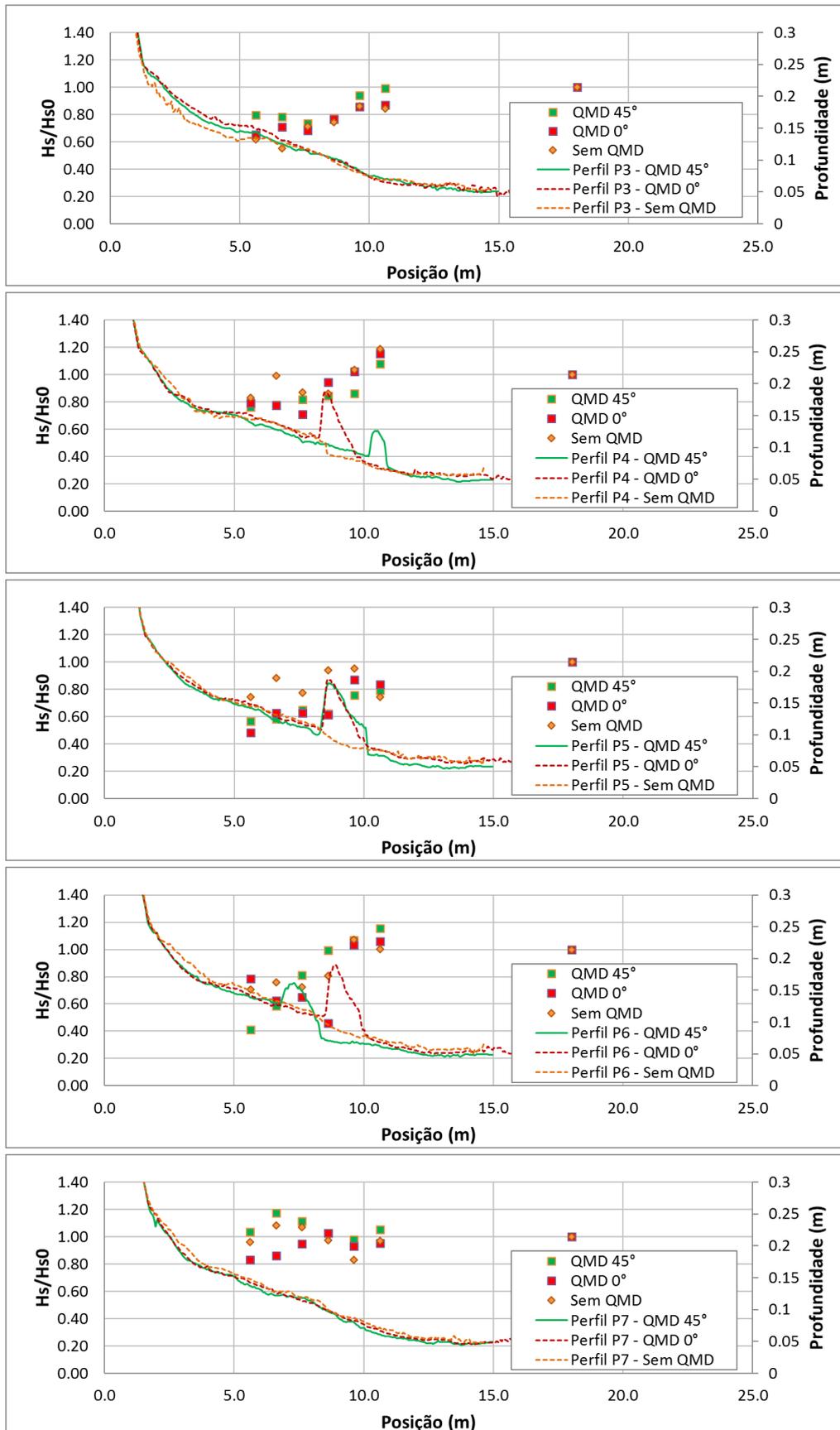


Figura 4.6 – Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=3,0 m, posições P3 a P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

Para o QMD 0°, os valores de H_s/H_{s0} obtidos na zona de sombra do QMD, isto é, nos perfis P4 a P6 e nas duas sondas mais próximas do QMD (S4 e S5, Figura 2.6), são apresentados na Figura 4.7 para as seis condições de agitação ensaiadas. Estes valores variam entre 0.43 e 1.68, sendo o valor médio de 0.77. Destes, 75 % variam entre 0.6 e 0.8 e 89 % entre 0.5 e 0.9.

Para o QMD 45°, os valores de H_s/H_{s0} obtidos na zona de sombra do QMD, isto é, nos perfis P4 a P6 e nas duas sondas mais próximas do QMD, são apresentados na Figura 4.8 para as seis condições de agitação ensaiadas. Estes valores são inferiores aos do caso QMD 0°, variando entre 0.41 e 1.08, com um valor médio de 0.74. Destes, 61 % variam entre 0.6 e 0.8 e 86 % entre 0.5 e 0.9.

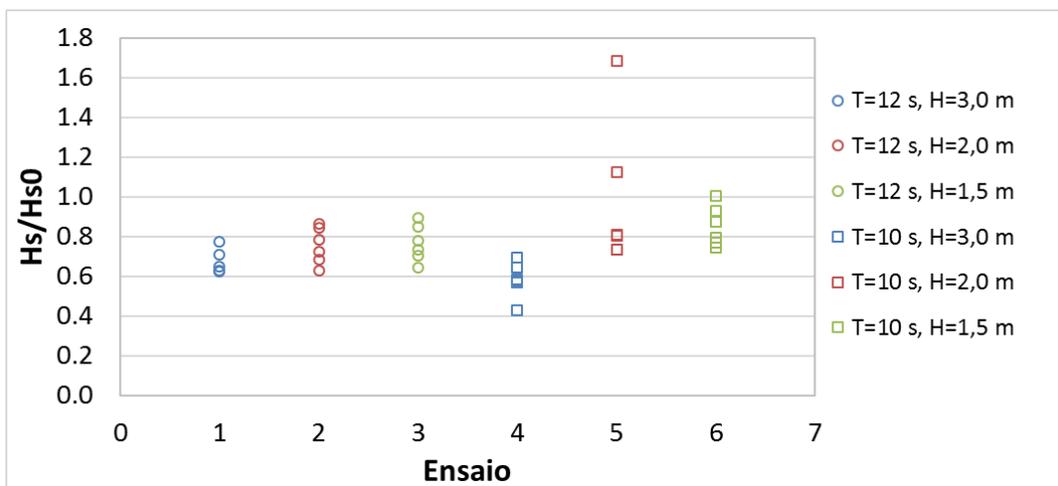


Figura 4.7 – Valores dos índices de agitação na zona de sombra do QMD 0°, para cada condição de agitação

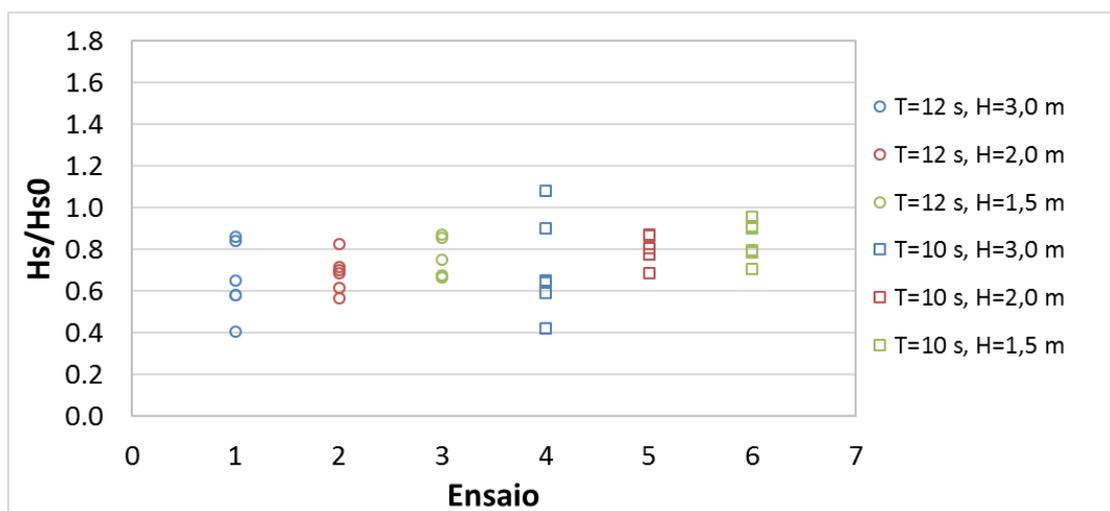


Figura 4.8 – Valores dos índices de agitação na zona de sombra do QMD 45°, para cada condição de agitação

Nos ensaios com QMD, verificou-se que:

- ocorreu um aumento dos índices de agitação na zona do QMD devido à diminuição de profundidade e empolamento da onda, com posterior ocorrência de rebentação;
- a rebentação ocorreu sobre o QMD, na zona do coroamento deste (no caso dos ensaios com menores valores de H_s) ou sobre o talude de barlar (para os ensaios com maiores valores de H_s). A influência do período da onda na posição da rebentação não é tão clara;
- no caso dos ensaios com QMD 45°, as frentes de onda tenderam a ajustar-se à batimetria do QMD, alterando-se a direção de propagação da onda e as condições de rebentação, tornando-as mais apropriadas para a prática de surf.

No que se refere ao comportamento da rebentação por perfil nos ensaios com QMD, verificou-se que:

- No perfil P3, mais a norte, os índices de agitação do QMD 45° diferem, em geral, mais do caso sem QMD que os do QMD 0°, já que aí o QMD 45° está localizado mais a sotamar. No perfil P7, perfil mais a sul, ocorre o contrário, já que aí o QMD 45° está localizado mais a barlar do QMD 0°;
- No perfil P5, localizado no centro do QMD, verifica-se que a rebentação ocorre, em geral, mais a barlar no QMD 45° que no QMD 0°. Esta diferença deve-se às diferenças de geometria entre estes dois QMD, já que no caso do QMD 45° a rebentação inicia-se na secção deste mais a norte que está localizada mais a barlar que no caso do QMD 0°, onde todo o QMD está paralelo à costa e, aproximadamente, paralelo às batimétricas nesta zona;
- Nos perfis P4 e P6 a rebentação dá-se, como referido, na zona do coroamento ou sobre o talude de barlar.

4.3 Localização, comprimento e tipo de rebentação

Da Figura 4.9 à Figura 4.13 apresenta-se a linha de rebentação observada nos ensaios sem QMD, com o QMD na sua posição inicial (cerca de 0°) e rodado de 45°, para as condições de agitação regular ensaiadas.

Para uma mesma altura de onda, o aumento do período faz com que a linha de rebentação se afaste da linha da costa no caso sem QMD e se desloque para uma zona mais a sotamar da estrutura nos casos com QMD 0° e QMD 45°.

Já para um mesmo período de onda, o aumento da altura de onda altera a linha de rebentação de forma diferente conforme o caso. Para o caso sem QMD, para ambos os períodos ensaiados (10 s e 12 s), a rebentação dá-se junto à linha de costa, afastando-se desta, mas mantendo sensivelmente o mesmo comprimento, com o aumento a altura de onda. O tipo de rebentação é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática do surf.

Para o caso com QMD 0° e também para ambos os períodos ensaiados (10 s e 12 s), o aumento da altura de onda leva ao aumento do comprimento da linha de rebentação, mas o seu desenvolvimento

mantém-se localizado ao longo da estrutura. No entanto, embora o comprimento da linha de rebentação seja com alguma dimensão, a rebentação não se dá de forma progressiva, não sendo adequada para a prática do surf.

Para o caso com QMD 45° e também para ambos os períodos ensaiados (10 s e 12 s), tal como para QMD 0°, o aumento da altura de onda leva a um aumento do comprimento da linha de rebentação, mas, neste caso, aumentam as zonas em que ocorre rebentação ao longo da estrutura. O comprimento da linha de rebentação é inferior ao do caso QMD 0°, mas a rebentação é do tipo mergulhante e ocorre de forma progressiva, sendo adequada para a prática de surf. Comparando a linha de rebentação junto à costa no caso sem QMD e no caso do QMD 45° verifica-se que o seu comprimento se reduz, passando a ocorrer sobretudo fora da zona de sombra da estrutura.

Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, dos casos ensaiados, no caso sem QMD e no caso QMD 45° se obtiveram condições de rebentação adequadas à prática de surf.

QMD 45°



QMD 0°



Sem QMD



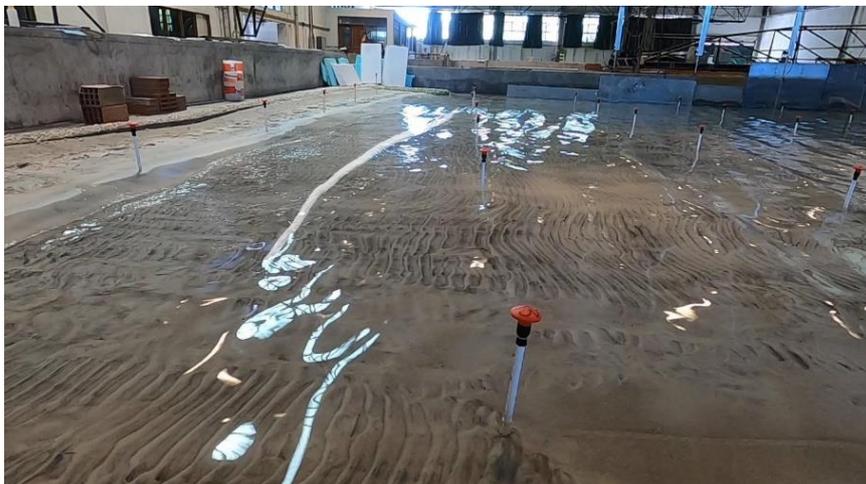
Figura 4.9 – Ensaios sem QMD, com QMD 0° e QMD 45°. Agitação regular: T=10 s; H=1,5 m. Linha de rebentação



QMD 45°



QMD 0°



Sem QMD

Figura 4.10 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=2,0 m. Linha de rebentação

QMD 45°



QMD 0°



Sem QMD



Figura 4.11 – Ensaio sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m. Linhas de rebentação

QMD 45°



QMD 0°



Sem QMD



Figura 4.12 – Ensaios sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=1,5 m. Linha de rebentação



QMD 45°



QMD 0°



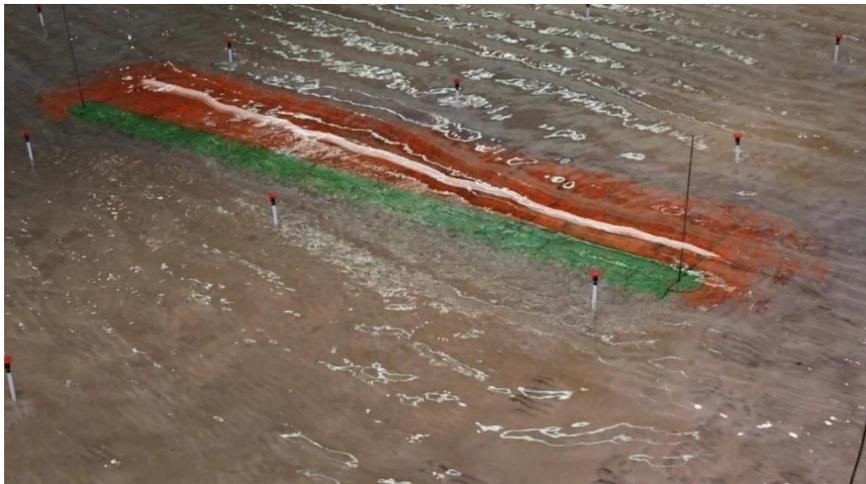
Sem QMD

Figura 4.13 – Ensaios sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m. Linha de rebentação

QMD 45°



QMD 0°



Sem QMD



Figura 4.14 – Ensaios sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=3,0 m. Linha de rebentação

4.4 Comparação dos resultados do modelo numérico com os dados dos ensaios físicos

Nesta secção apresenta-se a comparação dos resultados do modelo físico e do modelo numérico para o QMD 45°, já que foi para esta configuração que no modelo físico se verificaram condições adequadas à prática de surf, considerando a agitação regular de $H=3,0$ m, $T=10$ s e o nível médio de maré.

Aplicou-se o modelo não-linear de tipo Boussinesq, COULWAVE (Lynett e Liu, 2004), na simulação da propagação de ondas na zona em estudo, para a situação antes e após a implantação do QMD. Este modelo permite reproduzir a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes: dispersão de frequência, dispersão de amplitude, empolamento (linear e não-linear), difração, refração pelo fundo e devida às correntes, geração de harmónicas e dissipação de energia por rebentação da onda. O modelo numérico foi aplicado à escala do protótipo, tendo-se convertido os resultados dos ensaios em modelo físico para a escala do protótipo quando necessário.

Pretende-se, assim, verificar se os resultados do modelo numérico são semelhantes aos do modelo físico, de forma a poder utilizar o modelo numérico como fonte complementar de informação aos resultados do modelo físico, para a verificação da adequabilidade da solução aqui proposta para o QMD no que respeita às condições de rebentação para prática do surf.

Assim, primeiramente comparam-se os seguintes resultados dos modelos físico e numérico:

- Transformação da agitação na zona do QMD;
- Zonas de rebentação;
- Índices de agitação ao longo de perfis perpendiculares à costa.

Posteriormente com os resultados do modelo numérico e para complementar a informação do modelo físico, calculam-se outros parâmetros de surfabilidade que caracterizam melhor as condições de rebentação para a prática do surf, nomeadamente, o tipo de rebentação, o ângulo de rebentação, a posição do início da rebentação e a altura da onda na rebentação-.

O **tipo de rebentação** que mais se adequa ao surf é a mergulhante ou tubular (Figura 4.15). A definição do tipo de rebentação é obtida através do número de Iribarren, ξ_b , (Battjes, 1974) ao longo da linha de rebentação (Quadro 4.1).



Figura 4.15 – Exemplos de rebentação tubular

Quadro 4.1 – Tipo de rebentação em função do número de Iribarren

Tipo de rebentação	Número de Iribarren
Progressiva	$\xi_b < 0.4$
Mergulhante	$0.4 < \xi_b < 2.0$
De fundo	$\xi_b > 2.0$

O **número de Iribarren**, ξ_b , por sua vez, é calculado por $\xi_b = s/\sqrt{H_b/L_0}$, em que s representa o declive médio do fundo em relação à direção da onda; L_0 representa o comprimento da onda ao largo; e H_b representa a altura da onda na rebentação.

O **ângulo de rebentação** ao longo da linha de rebentação é definido como o ângulo entre a crista da onda e a linha de rebentação (Figura 4.16), α , em que $\sin \alpha = c/V_s$, onde c é a velocidade de propagação da onda e V_s é a velocidade do surfista.

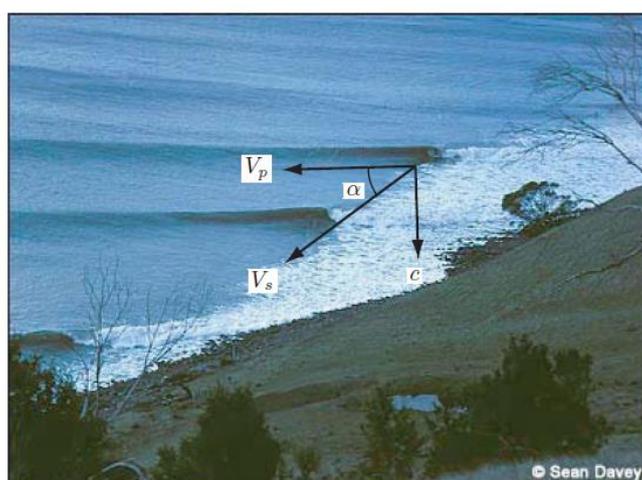


Figura 4.16. Ilustração da velocidade de propagação da onda, c , ângulo de rebentação, α , velocidade do surfista, V_s e a velocidade de rebentação, V_p , (velocidade ao longo da crista da onda, com que se dá a rebentação)

O ângulo de rebentação, α , é relacionado com o nível de dificuldade na execução de manobras (Walker, 1974), (Quadro 4.2). Quanto menor α maior será a dificuldade de manobra e mais experiência é exigida aos surfistas para a realizar.

Consideram-se como boas condições para o surf:

- Rebentação mergulhante, que se traduz num valor do número de Iribarren entre 0.4 e 2.0;
- Linha de rebentação com uma extensão superior a 100 m;
- Ângulo de rebentação entre 30° e 50° , adequado para surfistas experientes.

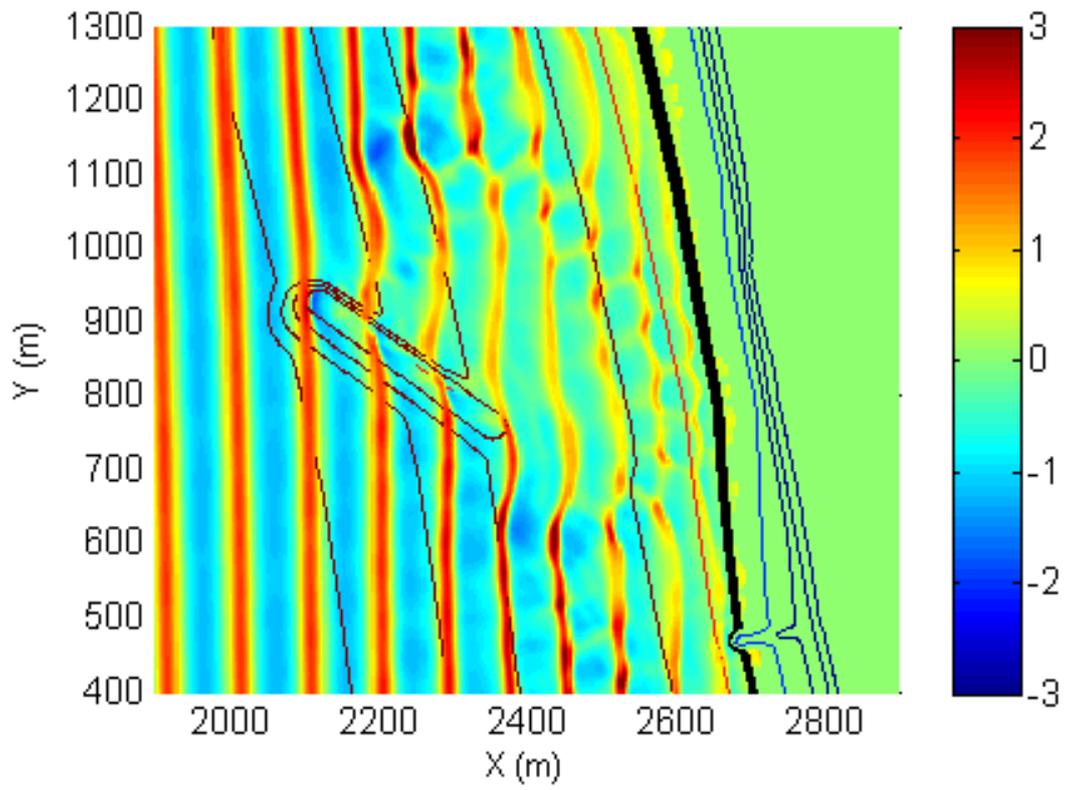
Quadro 4.2 – Ângulo de rebentação em função do nível de dificuldade da manobra

Nível	Descrição	α (°)
1	Iniciados	90
2	Iniciados capazes de surfar lateralmente ao longo da crista de rebentação	70
3	Surfistas que conseguem aumentar a velocidade na face da onda	60
4	Surfistas a aprender as manobras standard do surf	55
5	Surfistas capazes de realizar manobras standard do surf numa única onda	50
6	Surfistas que executam manobras standard de surf consecutivamente	40
7	Surfistas que executam manobras avançadas	29
8	Surfistas profissionais	27

Na Figura 4.17 apresenta-se uma imagem da variação da superfície livre desde a batimétrica -12 m (ZH) até à costa obtida com o modelo numérico onde se vê claramente a influência da presença do QMD nas frentes de onda, e uma fotografia do ensaio em modelo físico para as mesmas condições de agitação e nível de maré. Comparando estas duas imagens, é possível verificar que o modelo prevê corretamente a alteração da frente de onda na zona do QMD e a sotamar deste, com a rotação da frente de onda na extremidade de sotamar do QMD bem visível quer na fotografia do ensaio quer na imagem do modelo numérico.

Na Figura 4.18 apresenta-se a comparação da linha de rebentação obtida com a aplicação do modelo numérico e das zonas de início de rebentação visualizadas no modelo físico. Como se pode observar, o modelo COULWAVE consegue reproduzir corretamente as zonas de início de rebentação observadas no modelo físico.

a)

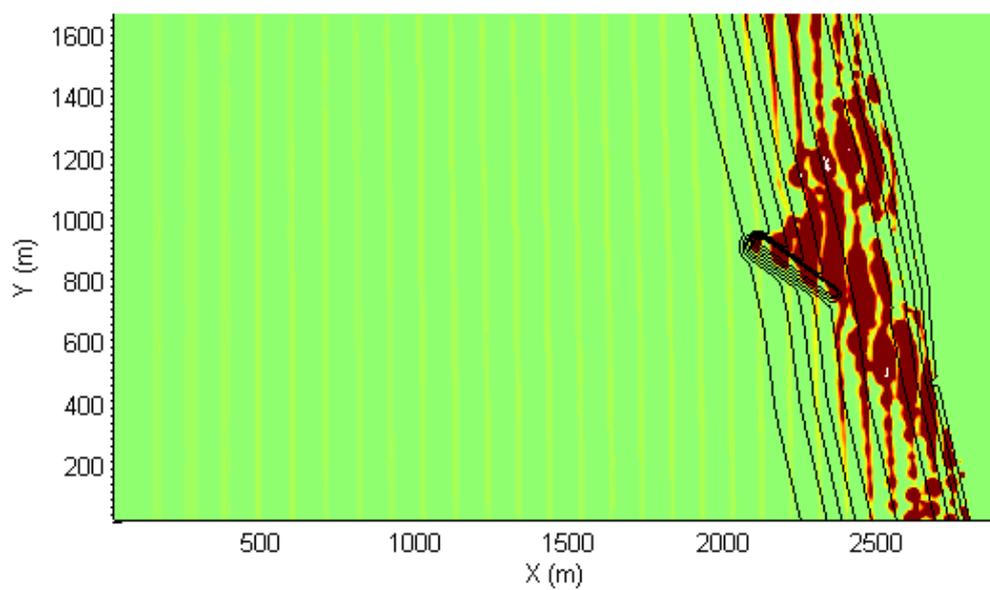


b)



Figura 4.17 – Resultados da elevação da superfície livre obtida com (a) o modelo numérico e (b) o ensaio em modelo físico para $T=10$ s; $H=3,0$ m

a)



b)

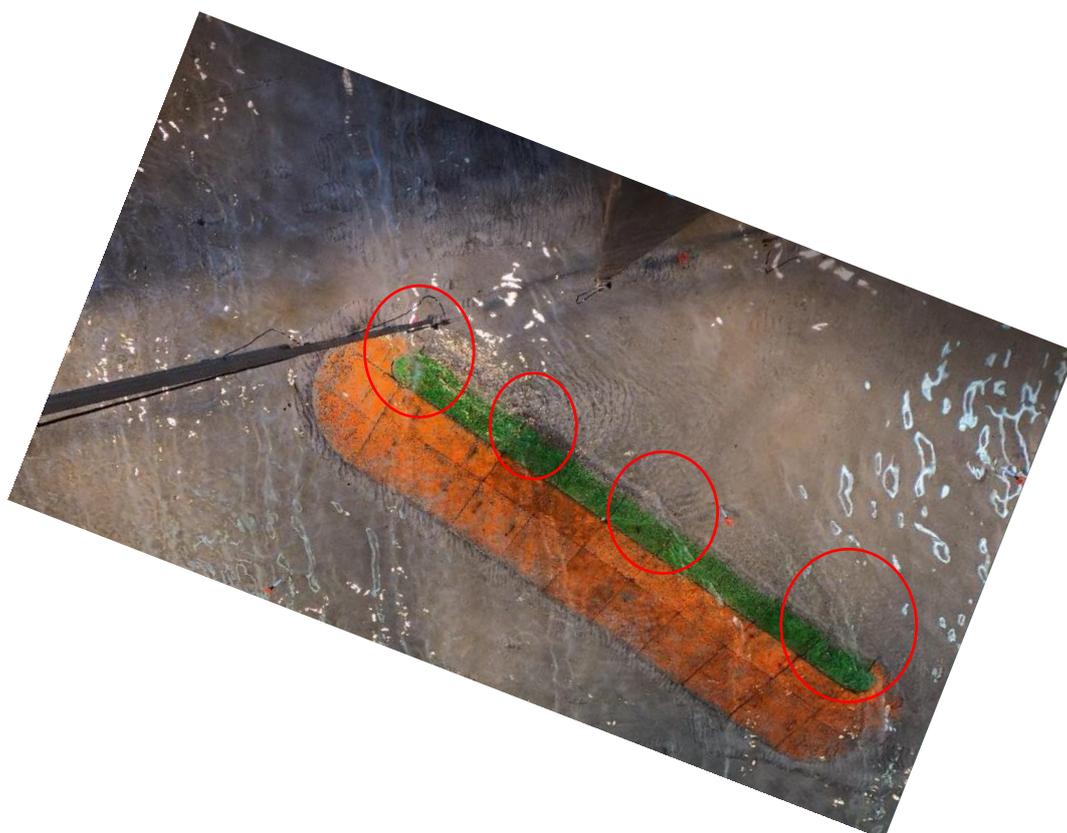


Figura 4.18 – a) Zonas de rebentação da onda obtidas com o COULWAVE; b) Zonas de início de rebentação (círculos vermelhos) obtidas no ensaio em modelo físico para $T=10$ s; $H=3,0$ m

Finalmente, comparam-se os resultados dos índices de agitação ao longo de perfis perpendiculares à costa, perfis P3 a P6, definidos no modelo físico, ver Figura 2.7, e perfis nas mesmas posições no modelo numérico, Figura 4.19. Os resultados do modelo físico são valores pontuais enquanto o modelo numérico permite obter a evolução do índice em todo o perfil, o que permite definir claramente a posição do início da rebentação.

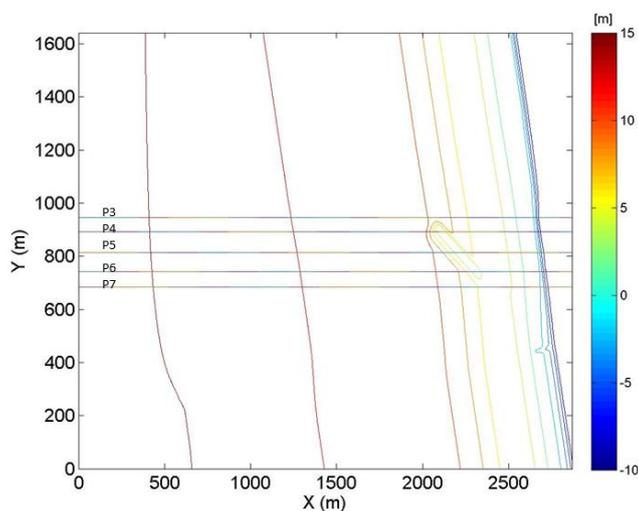


Figura 4.19 – Batimetria e localização das secções P3, P4, P5, P6 e P7 no modelo numérico

Na Figura 4.20 apresenta-se a comparação dos valores dos índices de agitação obtidos com base nos resultados do modelo numérico e nas medições do modelo físico.

Como se pode observar, o modelo COULWAVE consegue reproduzir a tendência da variação da altura de onda ao longo do perfil. A exceção é o Perfil P4 (e, em menor grau, o P5), onde se observa uma maior dissipação de energia por rebentação sobre o QMD no modelo numérico do que a verificada nos ensaios, o que leva a que os resultados do modelo físico sejam superiores aos do modelo numérico para uma distância superior a 2000 m.

De modo a complementar os resultados do modelo físico, ilustram-se, de seguida, alguns resultados do modelo numérico que caracterizam mais adequadamente as condições de rebentação na zona de estudo.

A Figura 4.21 apresenta a posição dos perfis P3 a P9, perpendiculares à estrutura QMD 45°. Em cada perfil é apresentada a variação da altura de onda e ponto de rebentação (Figura 4.22). A partir destes valores, calcula-se o número de Iribarren em cada perfil sobre a estrutura.

Para a condição de onda regular de $T=10$ s, $H=3,0$ m, não se observa rebentação ao longo do perfil P3. Nos perfis P4, P5 e P6 a rebentação ocorre na zona de barlamar da estrutura e, no perfil P7 ocorre também rebentação da onda, influenciada pela extremidade do QMD.

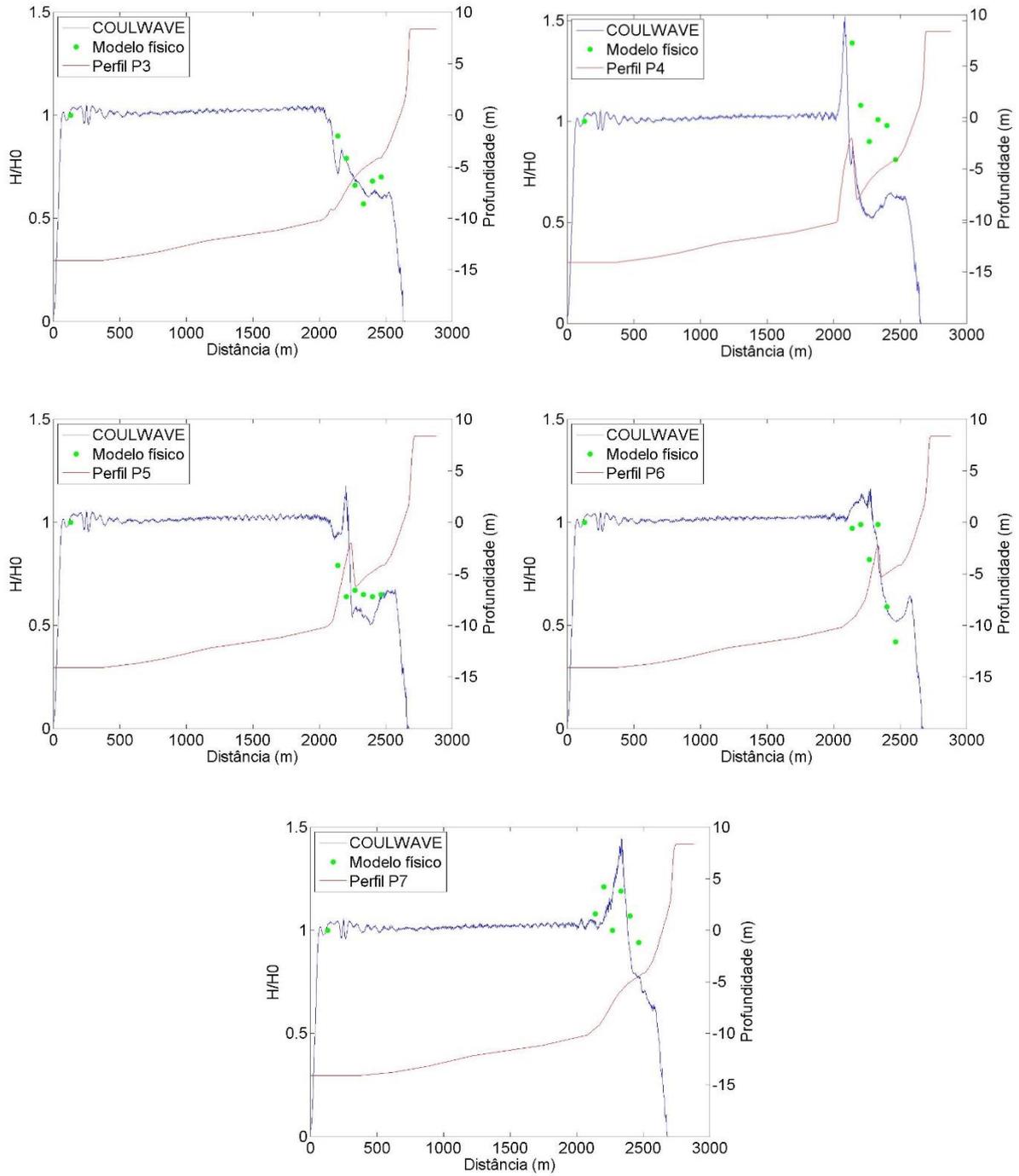


Figura 4.20 – Variação dos índices de agitação ao longo das secções P3 a P7: comparação entre resultados do COULWAVE e modelo físico. Agitação regular: $T=10$ s; $H=3,0$ m

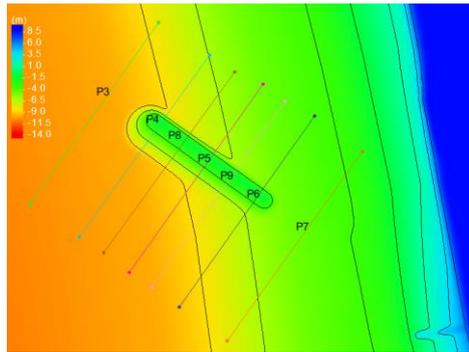


Figura 4.21 – Perfis P3 a P9

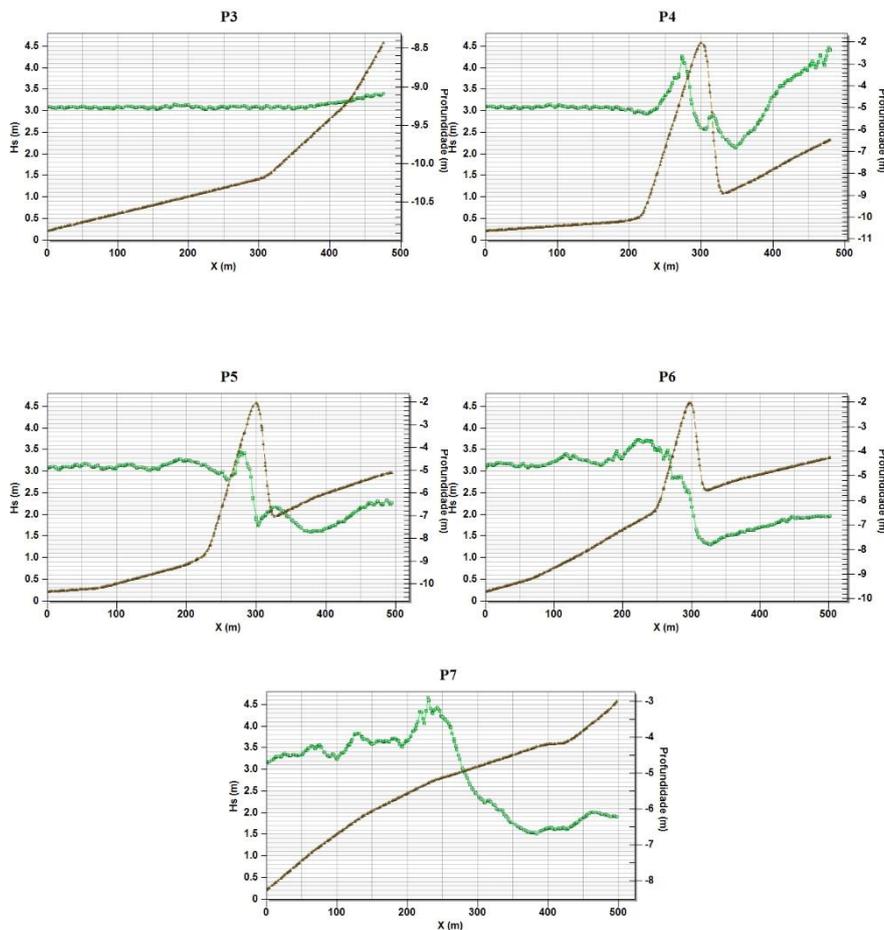


Figura 4.22 – Variação da altura significativa, H_s , ao longo dos perfis P3 a P7. Agitação regular: $T=10$ s; $H=3,0$ m

No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados da altura de onda na rebentação, H_b , da posição do início da rebentação, do número de Iribarren e correspondente tipo de rebentação, e do ângulo de rebentação. Apresenta-se ainda a variação da altura de onda no domínio de cálculo, Figura 4.23, e as zonas de rebentação e a direção da onda na zona próxima ao QMD, Figura 4.24, que permitem determinar o ângulo de rebentação e o número de Iribarren.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que este QMD permite, para esta condição de agitação, uma onda de boa qualidade para o surf, já que se obtém uma rebentação mergulhante e um ângulo de rebentação adequado para surfistas standard/profissionais.

Quadro 4.3 – Resultados do modelo numérico para QMD 45°, H=3 m, T=10 s e nível médio de maré

$L_0=107$ m	P4	P8	P5	P9	P6
s	0.0953	0.0983	0.0992	0.0887	0.0918
H_b (m)	4.26	3.37	3.42	3.20	3.48
Posição do início da rebentação (m)	274	281	282	286	265
Nº de Iribarren	0.48	0.55	0.56	0.51	0.51
Tipo de rebentação	Mergulhante				
Ângulo de rebentação	40°-50°				

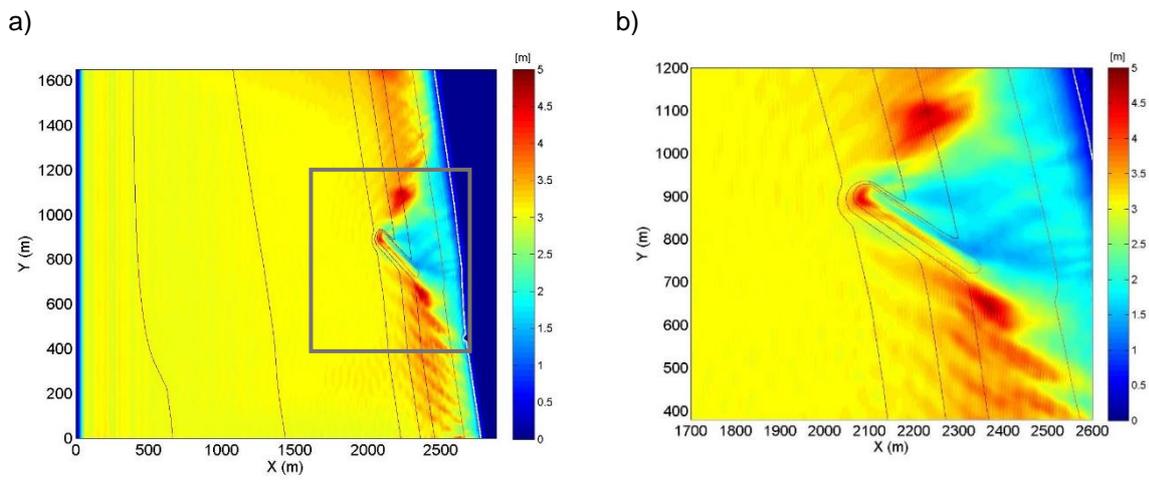


Figura 4.23 – Variação da altura significativa: a) no domínio de cálculo; b) pormenor na zona do QMD

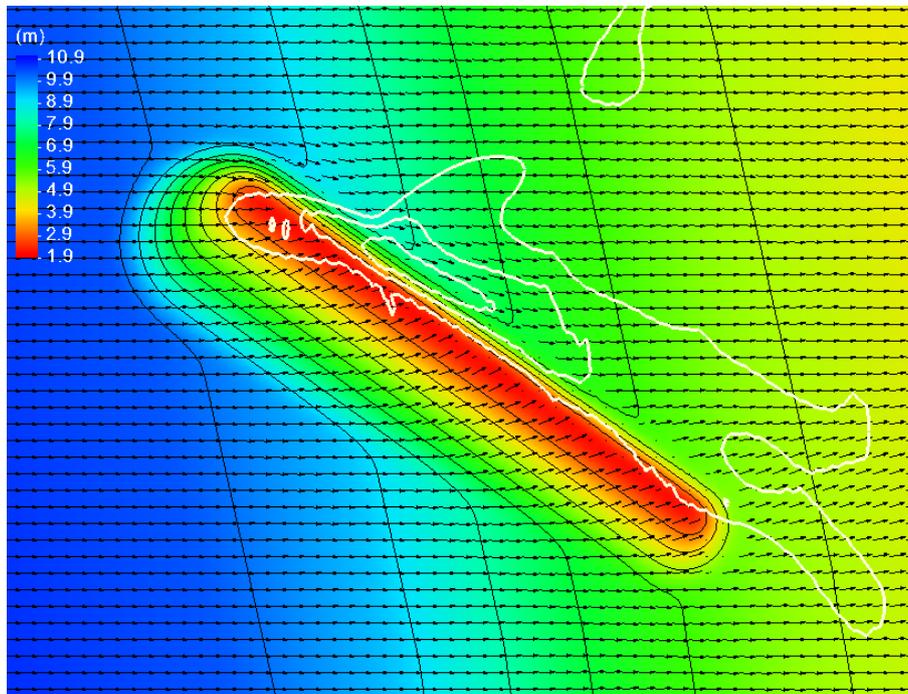


Figura 4.24 – Linha de rebentação (a branco) e direção da onda. Agitação regular: T=10 s; H=3,0 m

5 | Resultados dos ensaios de galgamento

Tendo em consideração as condições de ensaio descritas na secção 2.6.1, apresenta-se nesta secção os resultados da observação do galgamento da defesa longitudinal aderente, recolhida durante os ensaios.

Nos ensaios sem QMD não se observou qualquer galgamento da estrutura, isto é, o grau de galgamento obtido foi grau 0, galgamentos inexistentes (vide Quadro 2.9). Este resultado era o esperado, quer com base no cálculo da probabilidade de ocorrência de galgamento sobre a defesa aderente existente, realizado em Oliveira *et al.* (2020), quer de acordo com os dados fornecidos pela Câmara de Vagos indicando que, após as intervenções de 2015, as ocorrências de galgamentos corresponderam à conjugação de níveis de maré elevados com condições de agitação especialmente energéticas e associadas a vento (Freire *et al.*, 2020).

Da Figura 5.1 à Figura 5.4 ilustram-se os resultados dos ensaios para a condição mais gravosa de cada um dos períodos de pico ensaiados, onde se pode observar claramente que o espriamento atinge o pé da estrutura de defesa longitudinal aderente, não ocorrendo galgamento.



Figura 5.1 – Ensaio sem QMD. Agitação irregular: $T_p=12$ s; $H_s= 5,0$ m. Aspeto do espriamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente



Figura 5.2 – Ensaio sem QMD. Agitação irregular: $T_p=14$ s; $H_s= 4,0$ m. Aspeto do espriamento junto à estrutura de defesa longitudinal aderente



Figura 5.3 – Ensaio sem QMD. Agitação irregular: $T_p=16$ s; $H_s= 3,0$ m. Aspeto do espraio junto à estrutura de defesa longitudinal aderente

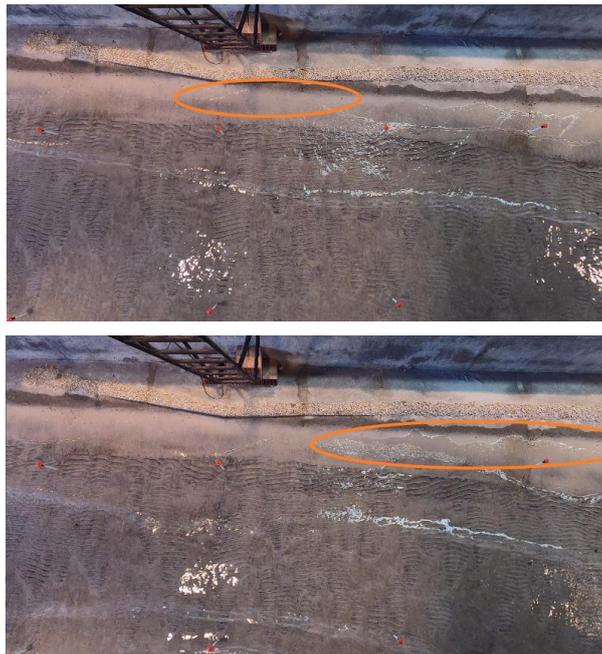


Figura 5.4 – Ensaio sem QMD. Agitação irregular: $T_p=18$ s; $H_s= 3,0$ m. Aspeto do espraio junto à estrutura de defesa longitudinal aderente

Dado que não se obteve galgamento sem o QMD e sendo exetável que a presença do QMD reduza o espraio, foram apenas realizados alguns ensaios de galgamento com a estrutura QMD 45°, para verificação de que não ocorria qualquer galgamento. Nestes ensaios também não foi observado qualquer galgamento da estrutura de defesa aderente, como exetável.

Na Figura 5.5 e Figura 5.6 ilustram-se os resultados obtidos nos ensaios para a condição mais gravosa dos períodos de pico de 12 s e 16 s, respetivamente. É claro nestas imagens que o espraio não atinge o pé da defesa longitudinal aderente e, como tal, não ocorre galgamento.



Figura 5.5 – Ensaio com QMD 45°. Agitação irregular: $T_p=12$ s; $H_s= 5,0$ m. Aspeto do espraio junto à estrutura de defesa longitudinal aderente



Figura 5.6 – Ensaio com QMD 45°. Agitação irregular: $T_p=16$ s; $H_s= 3,0$ m. Aspeto do espraio junto à estrutura de defesa longitudinal aderente

6 | Conclusões

Apresentam-se neste relatório os principais resultados obtidos dos ensaios em modelo físico reduzido tridimensional referentes ao “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira”.

No âmbito do estudo foram reproduzidos, em modelo físico tridimensional à escala 1:65, com fundo móvel, a batimetria desde os -12 m (ZH) até junto à costa, as estruturas de defesa aderente e esporão e o quebra-mar destacado preconizado para esta zona, com vista a analisar o seu efeito na dinâmica sedimentar e na geração de ondas para o surf. As características geométricas do QMD implantado foram: 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).

Os ensaios compreenderam a:

- Avaliação do efeito do quebra-mar destacado (QMD) na dinâmica sedimentar próxima – ensaios de morfodinâmica;
- Avaliação do efeito do quebra-mar destacado (QMD) na geração de ondas para o surf – ensaios de surf.

Realizou-se ainda uma série de ensaios expeditos para análise de galgamento na estrutura de defesa aderente. As conclusões advindas do presente estudo são seguidamente apresentadas.

Morfodinâmica

Relativamente aos ensaios de morfodinâmica, ou de dinâmica sedimentar e evolução morfológica, as principais conclusões são:

- na ausência de QMD, para o rumo da agitação marítima ensaiado, a dinâmica sedimentar é dominada por movimentos transversais à praia, promovendo a alteração do perfil na antepraia e baixa praia, e o reforço da berma. Estes movimentos sedimentares transversais são justificáveis pelos efeitos de distorção vertical-horizontal induzidos pela modelação física a esta escala e nas condições ensaiadas;
- na ausência de QMD, para o rumo da agitação marítima ensaiado, não se verificou a ocorrência de transporte sedimentar longilitoral;
- a presença do QMD paralelo à praia, com as características geométricas ensaiadas, conduz à 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 paralelo à praia induz a formação de uma berma na praia mais a barlar do que na ausência do QMD;
- o QMD paralelo à praia proporciona a formação de correntes longitudinais e transversais na zona de sombra, com o padrão de circulação representado na Figura 3.3;
- 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;
- considerando os efeitos de escala do modelo reduzido e em particular a distorção de escalas vertical-horizontal, crê-se que o saliente correspondente em protótipo ao obtido experimentalmente teria um declive mais suave e teria também maior largura transversal (da ordem do dobro, i.e., com valores da ordem de 15 a 20 m).

Surf

Os ensaios iniciaram-se pela 1ª fase, situação sem QMD, seguidos dos ensaios com o QMD aproximadamente paralelo à costa (QMD 0°), 2ª fase e, finalmente, dos ensaios com o QMD rodado a 45° graus (QMD 45°), 3ª fase.

Dos resultados experimentais relativos aos índices de agitação e da análise visual dos ensaios é possível concluir que, para todas as condições de agitação ensaiadas:

- a rebentação na situação atual (sem QMD) ocorre a sotamar da posição de implantação prevista para o QMD, próxima da linha de costa;
- o QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD;
- na zona de sombra do QMD, mais de 75% (para QMD 0°) e 61% (para QMD 45°) variam entre 0,6 e 0,8.

Relativamente à linha de rebentação observada nos ensaios, para as condições de agitação regular ensaiadas:

- Para o mesmo período, o aumento da altura de onda altera a linha de rebentação de forma diferente conforme o caso:
 - Para o caso 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. A rebentação é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática de surf;
 - Para o caso com QMD 0°, embora o comprimento da linha de rebentação seja com alguma dimensão, a rebentação não se dá de forma progressiva, não sendo adequada para a prática do surf;
 - Para o caso com QMD 45° o comprimento da linha de rebentação é inferior ao do caso QMD 0°, mas a rebentação é do tipo mergulhante e ocorre de forma progressiva, sendo adequada para a prática de surf.

- Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, dos casos ensaiados, no caso sem QMD e no caso com QMD 45° obtiveram-se condições de rebentação adequadas à prática de surf. Comparando a linha de rebentação junto à costa, do caso sem QMD para o caso do QMD 45°, verifica-se que o seu comprimento se reduz, passando a ocorrer sobretudo fora da zona de sombra da estrutura.

Complementarmente, realizou-se a comparação dos resultados do modelo físico e do modelo numérico (COULWAVE) para o QMD 45°, já que foi para este caso que no modelo físico se verificaram condições adequadas à prática de surf. Para uma condição de agitação regular com $H=3,0$ m, $T=10$ s e nível médio de maré conclui-se que:

- o modelo prevê a alteração da frente de onda na zona do QMD e a sotamar deste;
- o modelo consegue reproduzir as zonas de início de rebentação observadas no modelo físico;
- o modelo consegue reproduzir a tendência da variação da altura de onda ao longo dos perfis.

Analisaram-se os resultados do modelo numérico em termos da altura de onda na rebentação, H_b , da posição do início da rebentação, do número de Iribarren e correspondente tipo de rebentação, e do ângulo de rebentação, permitindo concluir que o QMD 45° permite, para esta condição de agitação, uma onda de boa qualidade para o surf, já que se obtém uma rebentação mergulhante e um ângulo de rebentação adequado para surfistas standard/profissionais.

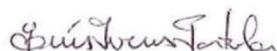
Galgamento

- Para as condições de agitação ensaiadas, não se verificou galgamento da estrutura de defesa longitudinal aderente nos ensaios sem QMD e com QMD, quer paralelo à costa quer rodado a 45°;
- Este resultado era esperado já que, após as intervenções de 2015 na estrutura aderente da praia da Vagueira, os galgamentos ocorridos corresponderam à conjugação de níveis de maré elevados com condições de agitação especialmente energéticas e associadas a vento.

Lisboa, LNEC, março 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



Ana Mendonça
Investigadora Auxiliar



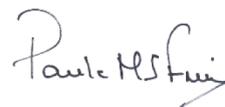
Francisco Sancho
Investigador Auxiliar



Maria Graça Neves
Investigadora Auxiliar com Agregação



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



Paula Freire
Investigadora Auxiliar

Referências bibliográficas

- BATTJES, J.A., 1974 – **Surf Similarity**. Proc. of International Conference on Coastal Engineering (Copenhagen, Denmark), 466-479.
- FREIRE, P.; BAPTISTA, P.R.; CAPITÃO, R.; SANCHO, F.; FORTES, C.J; NEVES, M.G.; PINHEIRO, L., 2020 – **Estudo 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.
- HIMMELSTOSS, E.A.; FARRIS, A.S.; HENDERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; ERGUL, A.; ZHANG, O.; ZICHICHI, J.L.; THIELER, E.R., 2018 – **Digital Shoreline Analysis System (version 5.0)**. U.S. Geological Survey software release, <https://code.usgs.gov/cch/dsas>.
- 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.
- 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.
- SANCHO, F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; CAPITÃO, R., 2019 – **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.
- SILVA, A.N.; TABORDA, R., 2011 – **Rectify Extreme Tool: User Guide**. Geology Department, Science Faculty of Lisbon University.
- SILVA, R.; VELOSO GOMES, F.; TAVEIRA PINTO, F., 2011 – **Modelação física tridimensional com fundos móveis para o estudo da descrição analítica do perfil activo de praia**. 7.^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, 6 e 7 de Outubro de 2011.
- WALKER, J. R., 1974 – **Recreational surf parameters**. Tech. Report 30. University of Hawaii, James K. K. Look Laboratory of Oceanographic Engineering.



www.lnec.pt

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