



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

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

**(T1) Estudos em modelo matemático: Efeito do quebra-mar
destacado nas correntes e morfologia adjacentes – Relatório 10**

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

Lisboa • junho 2021

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 215/2021 – **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

(T1) Estudos em modelo matemático: Efeito do quebra-mar destacado nas correntes e morfologia adjacentes
– Relatório 10

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Colaboração

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Francisco Sancho

Investigador Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Fernando Aires Brito

Técnico Superior, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 215/2021

Proc. 0604/1201/21221

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

(T1) Estudos em modelo matemático: Efeito do quebra-mar destacado nas correntes e morfologia adjacentes – Relatório 10

Resumo

O presente estudo é constituído por duas componentes. Na primeira analisa-se, com recurso a modelação numérica, o efeito da morfologia da praia da Vagueira na resposta de um quebra-mar destacado submerso implementado na frente marítima. Para isso, utilizam-se dois levantamentos topo-batimétricos recentes, de verão marítimo, que evidenciam grandes diferenças de elevação do fundo. Concluiu-se que a implementação do quebra-mar favorece a geração de elevados gradientes de fundo, incluindo a geração de novos canais, devidos às correntes divergentes, cuja mobilidade constrange a formação de um saliente estável que permita um aumento permanente da largura de praia. Na segunda componente do estudo, desenvolvida para apoiar o estudo em modelo físico, testou-se em modelo numérico o efeito do quebra-mar destacado submerso nas correntes e morfologia adjacentes, em condições hidro-morfológicas representativas. Concluiu-se que os padrões de erosão-acumulação gerados pelo quebra-mar (canais de erosão divergentes, enraizados nos extremos do quebra-mar, que geram a fuga de sedimentos locais e crescimento de um saliente não simétrico relativamente ao eixo transversal do quebra-mar) são mais regulares do que os previstos em condições de topo-batimetria real, pelo facto da batimetria inicial ser mais uniforme e, por isso, permitir um efeito mais destacado (menos difuso) dos mecanismos de resposta do fundo ao forçamento hidrodinâmico.

Palavras-chave: Proteção costeira / Saliente / Morfodinâmica

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

(T1) Mathematical modelling studies: Effect of the detached breakwater on the adjacent currents and morphology – Report 10

Abstract

The present study consists of two components. In the first one, the effect of the morphological variability of Vagueira beach on the response of a detached submerged breakwater implemented in the sea front is analyzed using numerical modelling. For this, two recent topo-bathymetric surveys, of the maritime summer, which show large differences in the bottom elevation, are used. It was concluded that the implementation of the breakwater favors the generation of high bottom gradients, including the generation of channels (or runnels), due to divergent currents, which mobility constrains the formation of a stable salient and, thus, the permanence of the increased beach width. In the second component of the study, developed to support the reduced scale laboratory model, the effect of the detached submerged breakwater under representative hydro-morphological conditions in the adjacent currents

and morphology was tested through a numerical model. It was concluded that the erosion-accumulation patterns generated by the breakwater (the divergent erosion channels that cause the escape of local sediments and the growth of a non-symmetric salient) are more regular than those predicted in real topo-bathymetric conditions, as the initial bathymetry is more uniform and, therefore, allows a more prominent (less diffuse) effect of the bottom response mechanisms to the hydrodynamic forcing.

Keywords: Coastal protection / Salient / Morphodynamics

Índice

1	Introdução	1
1.1	Âmbito e objetivos gerais do estudo	1
1.2	Tarefas previstas e enquadramento do relatório	2
1.3	Organização do relatório.....	3
2	Efeito da variabilidade morfológica na resposta do QMD	4
2.1	Enquadramento	4
2.2	Análise dos levantamentos topo-batimétricos	4
2.3	Condições de teste	8
2.4	Metodologia.....	10
2.4.1	Modelo	10
2.4.2	Validação	11
2.5	Resultados	19
2.6	Conclusões	28
3	Correntes litorais e evolução morfológica nos cenários de modelação física	30
3.1	Enquadramento	30
3.2	Condições de teste	30
3.3	Metodologia.....	33
3.4	Resultados	34
3.4.1	Altura significativa e correntes.....	34
3.4.2	Fluxos sedimentares e evolução morfológica.....	38
3.5	Conclusões	43
	Referências bibliográficas	46

Índice de figuras

Figura 1.1 – Localização da zona de estudo.....	2
Figura 2.1 – Batimetria de julho de 2018 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4	5
Figura 2.2 – Batimetria de junho de 2019 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4	6
Figura 2.3 – Batimetria de junho de 2020 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4	6
Figura 2.4 – Variação morfológica da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira entre julho de 2018 e junho de 2019 (resultado da comparação dos levantamentos batimétricos realizados no âmbito do programa COSMO)	7
Figura 2.5 – Variação morfológica da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira entre junho de 2019 e junho de 2020 (resultado da comparação dos levantamentos batimétricos realizados no âmbito do programa COSMO)	7
Figura 2.6 – Perfis transversais P1 a P4 em 2018, 2019 e 2020.....	8
Figura 2.7 – Topo-batimetria inicial da zona de estudo: levantamento COSMO de julho de 2018 a) sem QMD e b) com QMD; levantamento COSMO de junho de 2019 c) sem QMD e d) com QMD. Localização dos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais em b).....	10
Figura 2.8 – Localização dos pontos onde foram colocadas estruturas de suporte dos instrumentos de medição e do sistema de vídeo-monitorização (ponto azul) (fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020)	12
Figura 2.9 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do ADCP1	14
Figura 2.10 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do ADCP2	15
Figura 2.11 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT1	15
Figura 2.12 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT2	16
Figura 2.13 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT3	17
Figura 2.14 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT4	17
Figura 2.15 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT5	18
Figura 2.16 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT6	19
Figura 2.17 – Evolução morfológica sem QMD simulada sob ação da onda mediana e NMM durante 30 dias: a) e b) topo-batimetria COSMO 2018 inicial e final, e c) e d) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias; e) e f) topo-batimetria COSMO 2019 inicial e final, e g) e h) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias	21
Figura 2.18 – Evolução morfológica com QMD simulada sob ação da onda mediana e NMM durante 30 dias: a) e b) topo-batimetria COSMO 2018 inicial e final e c) e d) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias; e) e f) topo-batimetria COSMO 2019 inicial e final e g) e h) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias	22
Figura 2.19 – Topo-batimetria nos cinco transetos transversais, a), b), c), d) e e), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD	24
Figura 2.20 – Topo-batimetria nos três transetos longitudinais, a), b) e c), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD	25
Figura 2.21 – Variação da topo-batimetria, Δz (erosão/acumulação: -/+), nos cinco transetos transversais, a), b), c), d) e e), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD.....	26
Figura 2.22 – Variação da topo-batimetria, Δz (erosão/acumulação: -/+), nos três transetos longitudinais, a), b) e c), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD.....	27
Figura 2.23 – Variações verticais (Δz) máxima e mínima da topo-batimetria (erosão/acumulação: -/+), nos cinco transetos transversais, a), e nos três transetos longitudinais, b), localizados na	

zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD	28
Figura 3.1 – Topo-batimetria inicial da zona de estudo: a) sem QMD e b) com QMD	32
Figura 3.2 – Topo-batimetria inicial da zona envolvente do QMD. Localização dos cinco transetos transversais e dos três transetos longitudinais designados, de norte para sul e de oeste para este, respetivamente, por: Eixo T + 315 m, Eixo T + 125 m, Eixo T, Eixo T - 125 m, Eixo T - 315 m, Eixo L + 100 m, Eixo L + 200 m e Eixo L + 300 m	32
Figura 3.3 – Topo-batimetria inicial com QMD: a) nos cinco transetos transversais, Eixo T + 315 m, Eixo T + 125 m, Eixo T, Eixo T - 125 m e Eixo T - 315 m; e b) nos três transetos longitudinais, Eixo L + 100 m, Eixo L + 200 m e Eixo L + 300 m	33
Figura 3.4 – Altura significativa da onda, H_s , na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	34
Figura 3.5 – Altura significativa da onda, H_s , nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	35
Figura 3.6 – Velocidade média integrada na vertical na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)	36
Figura 3.7 – Magnitude da velocidade média integrada na vertical, a) componente x e b) componente y, na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	36
Figura 3.8 – Componente x da velocidade média integrada na vertical nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	37
Figura 3.9 – Componente y da velocidade média integrada na vertical nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	37
Figura 3.10 – Transporte total (suspensão e fundo) sem QMD a) na zona envolvente do QMD e b) em detalhe da zona, ao fim de 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)	39
Figura 3.11 – Transporte total (suspensão e fundo) com QMD a) na zona envolvente do QMD e b) em detalhe da zona, ao fim de 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)	39
Figura 3.12 – Evolução morfológica (erosão < 0; acumulação > 0) na zona envolvente do QMD sob incidência da onda mediana na fronteira largo: ao fim de 15 dias a) sem QMD e b) com QMD; e ao fim de 30 dias c) sem QMD e d) com QMD	40
Figura 3.13 – Diferença entre a topo-batimetria com e sem QMD ao fim de a) 15 dias e b) 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo	41
Figura 3.14 – Topo-batimetria inicial e ao fim de 30 dias nos a) cinco transetos transversais e b) três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD, sem QMD, para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	42
Figura 3.15 – Topo-batimetria inicial e ao fim de 30 dias nos a) cinco transetos transversais e b) três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD, com QMD, para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo	43

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Posição dos instrumentos de medição. Coordenadas ETRS89-(M;P) e malha Delft3D-(M;N)	13
Quadro 2.2 – Teste dos coeficientes de calibração <i>Alfa</i> , <i>Gamma</i> , <i>Bottom friction</i>	13
Quadro 2.3 – Variações verticais (Δz) máxima e mínima da topo-batimetria (erosão/acumulação: -/+), nos cinco transetos transversais e nos três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sobre o fundo de 2018 e 2019, sem e com QMD. Assinalam-se com as cores cinzento e rosa os valores máximos de $ \Delta z $ ocorridos nos anos 2018 e 2019, respetivamente	28

1 | Introdução

1.1 Âmbito e objetivos gerais do estudo

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.

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**.

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



Figura 1.1 – Localização da zona de estudo

1.2 Tarefas previstas e enquadramento do relatório

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 inundação costeira evitadas
 - T4.b) Compilação de custos de investimento e de manutenção
 - T4.c) Cálculo de custos e benefícios e realização da análise custo-benefício
 - T4.d) Quantificação dos benefícios esperados com a atividade do surf

O presente relatório diz respeito à atividade T1.c), focada no efeito do QMD nas correntes litorais. Com base na configuração de QMD que melhor cumpre os dois primeiros objetivos pretendidos, definida na componente do estudo de alternativas de quebra-mar destacado para proteção contra galgamentos e erosão costeira (Oliveira *et al.*, 2020), e na aplicação de um modelo numérico de morfodinâmica verificado para as condições da campanha de campo, avaliam-se aqui os efeitos do QMD nas correntes litorais e morfologia adjacentes, para distintas condições de fundo, em complemento à análise já desenvolvida anteriormente. O estudo que aqui se desenvolve tem duas motivações: i) testar o efeito do QMD nas correntes e morfologia adjacentes noutras condições topo-batimétricas observadas, dada a **elevada variabilidade topo-batimétrica** observada na zona de estudo; e ii) **apoiar os estudos em modelo físico reduzido**, Tarefa T2, especificamente a atividade T2.a), focada no efeito do quebra-mar na dinâmica sedimentar próxima.

1.3 Organização do relatório

O presente relatório está organizado em três capítulos. No primeiro faz-se o enquadrando do assunto e identificam-se as motivações e os objetivos deste estudo em particular. No segundo capítulo faz-se a análise do **efeito da variabilidade morfológica** da zona de estudo na evolução induzida pelo QMD na zona adjacente. A análise é efetuada com recurso a um modelo numérico de morfodinâmica cuja **validação**, efetuada contra dados de uma campanha de campo, se descreve neste capítulo. No terceiro capítulo, desenvolvido para **apoio à modelação física**, analisa-se, com recurso ao modelo numérico de morfodinâmica aplicado no capítulo anterior, o efeito da presença do QMD na hidrodinâmica, na dinâmica sedimentar e no fundo arenoso, em condições de teste representativas da zona de estudo.

2 | Efeito da variabilidade morfológica na resposta do QMD

2.1 Enquadramento

A análise que se descreve no presente capítulo é complementar à componente do estudo dedicada à avaliação do efeito do QMD na dinâmica sedimentar e morfologia adjacente, apresentada no Relatório 8 (Capítulo 4, Oliveira *et al.*, 2020). O objetivo que a presidiu foi conhecer o efeito da elevada variabilidade morfológica observada na zona de estudo na evolução induzida pelo QMD na zona envolvente. Especificamente, teve-se em vista comparar o impacto do QMD sobre duas topo-batimetrias, obtidas no âmbito do Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental COSMO, implementado pela APA (COSMO, 2019), que evidenciassem as maiores diferenças de fundo. Para avaliar este impacto recorreu-se ao modelo numérico de morfodinâmica Delft3D.

A elevada variabilidade morfológica é de extrema importância uma vez que:

- pode induzir uma elevada variabilidade das correntes de circulação e desta forma colocar em causa a segurança de banhistas;
- pode colocar em causa a estabilidade da linha de costa entre o QMD e defesa aderente da frente marítima da Vagueira e assim, no limite, comprometer a proteção contra galgamentos e erosão costeira;
- pode colocar em causa a estabilidade do próprio QMD.

Nas secções seguintes deste capítulo descrevem-se: o resultado da análise dos levantamentos topo-batimétricos e da evolução dos fundos para estabelecimento das condições topo-batimétricas de teste; as condições de teste de hidrodinâmica, de sedimentologia e de parâmetros de dimensionamento do QMD; aspetos metodológicos considerados como relevantes no presente contexto, especificamente relativos aos fenómenos tidos em consideração e negligenciados pelo modelo numérico aplicado; a validação do modelo com dados de uma campanha de campo, efetuada nos dias 14 e 15 de outubro de 2019, no âmbito do presente estudo; os resultados numéricos da morfodinâmica na zona adjacente à implementação do QMD, sobre as topo-batimetrias de teste, sem e com QMD; e as conclusões finais.

2.2 Análise dos levantamentos topo-batimétricos

A topo-batimetria da frente marítima da Vagueira evidenciou elevada variabilidade no âmbito de análises efetuadas no presente estudo (ver Relatórios 7 e 8: Freire *et al.*, 2020 e Oliveira *et al.*, 2020, respetivamente). Os Modelos Digitais de Terreno (MDT) dos levantamentos COSMO de julho de 2018, junho de 2019 e junho de 2020, apresentados nas Figura 2.1, Figura 2.2 e Figura 2.3 respetivamente, foram comparados entre datas consecutivas para calcular a evolução morfológica anual na frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira. Os resultados são apresentados nos mapas das Figura 2.4 e Figura 2.5.

Analisaram-se também quatro perfis transversais, designados por P1, P2, P3 e P4, equidistantes 300 m, que se encontram assinalados no MDT de cada levantamento topo-batimétrico. A localização de P1 é imediatamente a norte do esporão da Vagueira. Estes perfis revelaram uma elevada variação morfológica acima da cota -8 m ZH, na zona onde se pretende implementar o QMD (Figura 2.6). Na zona de implementação do QMD observaram-se maiores diferenças topo-batimétricas entre julho de 2018 e junho de 2019 do que entre junho de 2019 e junho de 2020. Assim, definiram-se como condições de fundo de teste os levantamentos de julho de 2018 e de junho de 2019.

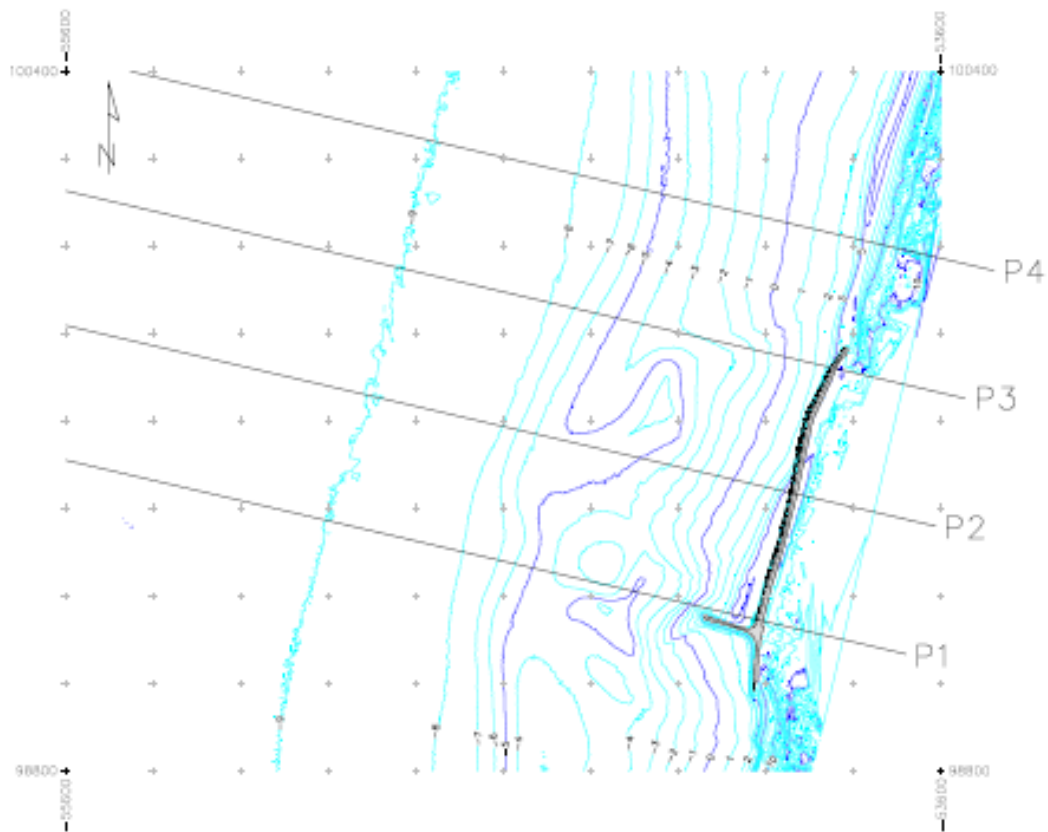


Figura 2.1 – Batimetria de julho de 2018 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4

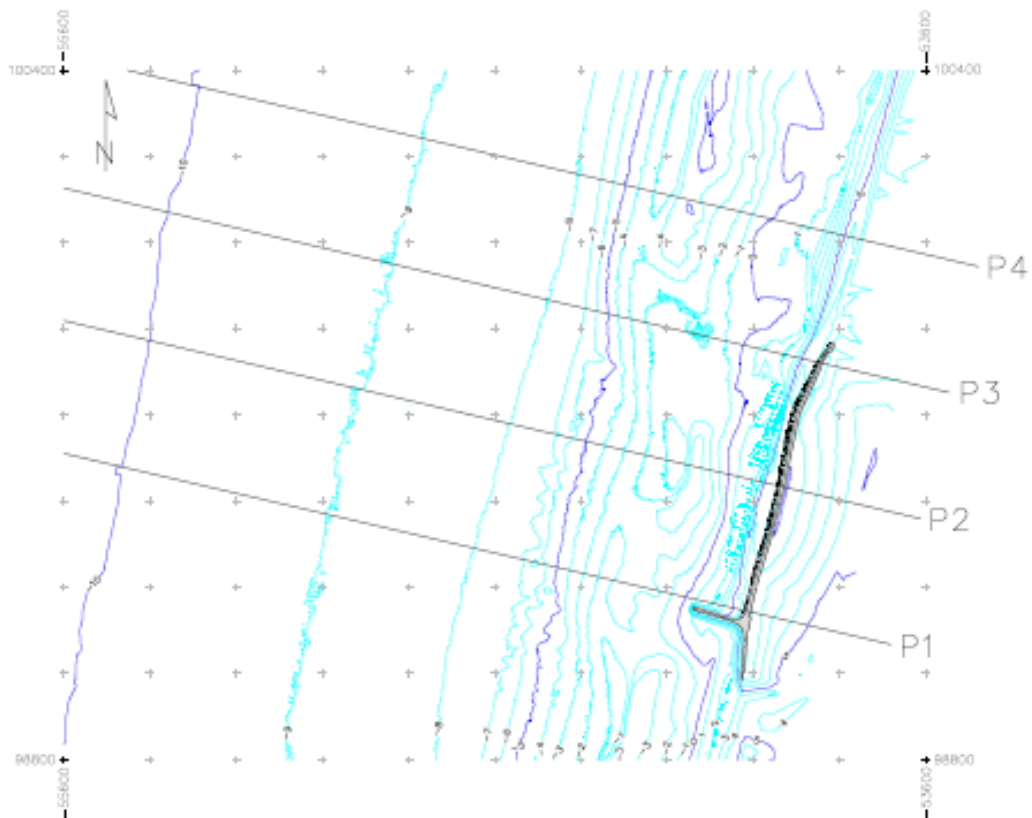


Figura 2.2 – Batimetria de junho de 2019 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4

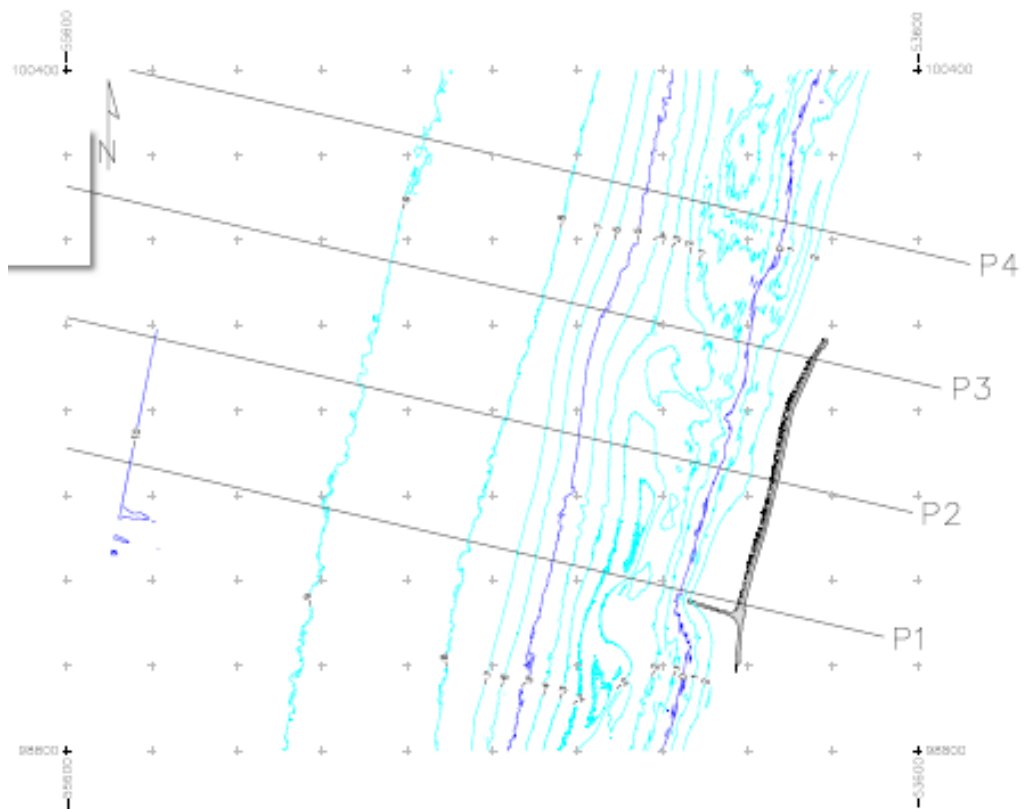


Figura 2.3 – Batimetria de junho de 2020 (COSMO) da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4

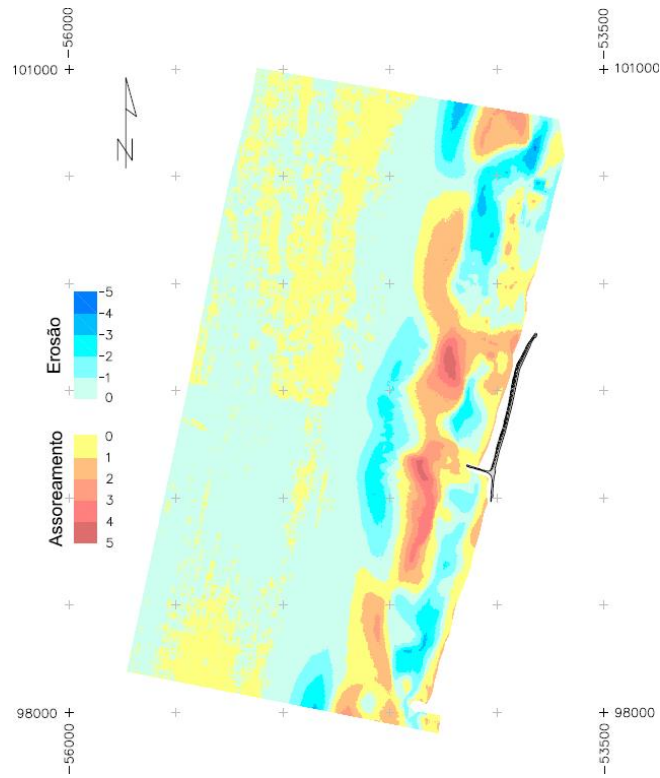


Figura 2.4 – Variação morfológica da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira entre julho de 2018 e junho de 2019 (resultado da comparação dos levantamentos batimétricos realizados no âmbito do programa COSMO)

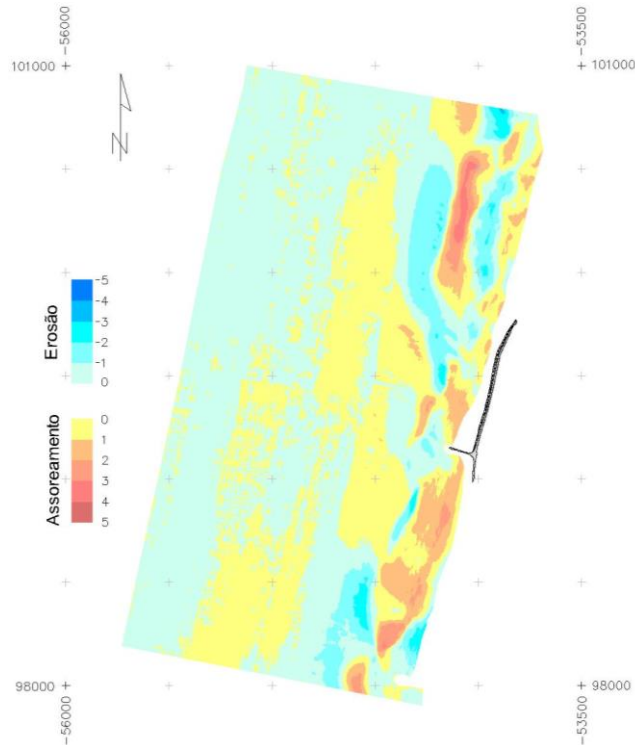


Figura 2.5 – Variação morfológica da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira entre junho de 2019 e junho de 2020 (resultado da comparação dos levantamentos batimétricos realizados no âmbito do programa COSMO)

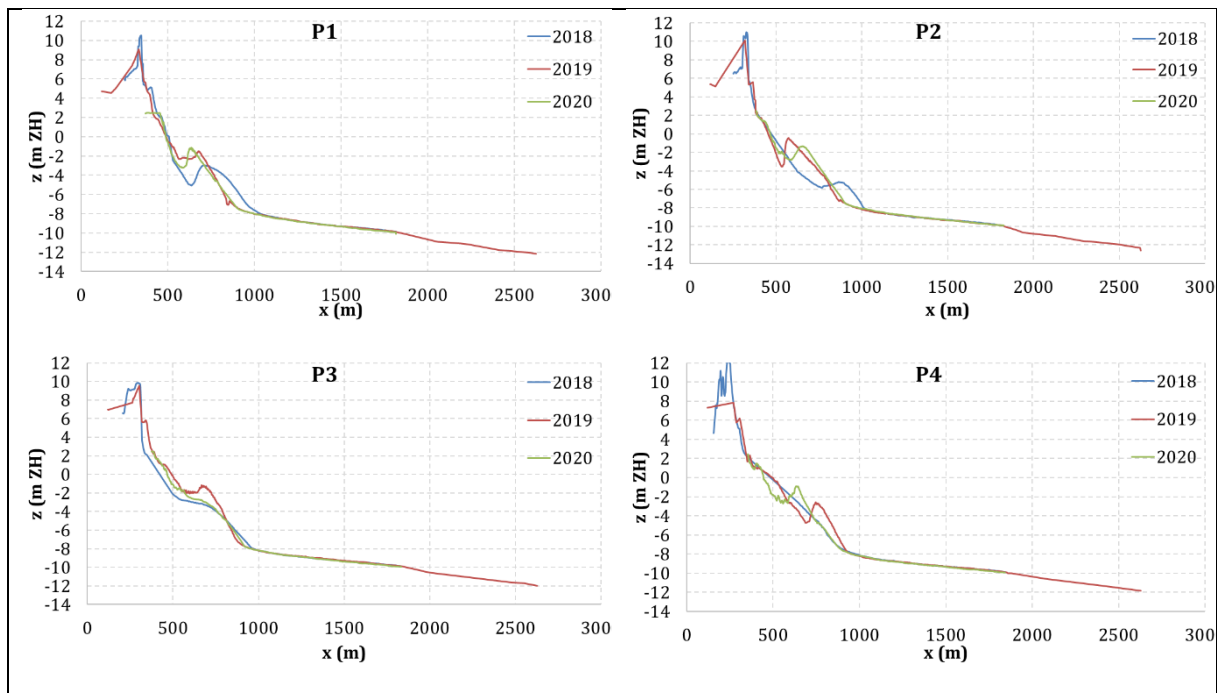


Figura 2.6 – Perfis transversais P1 a P4 em 2018, 2019 e 2020

2.3 Condições de teste

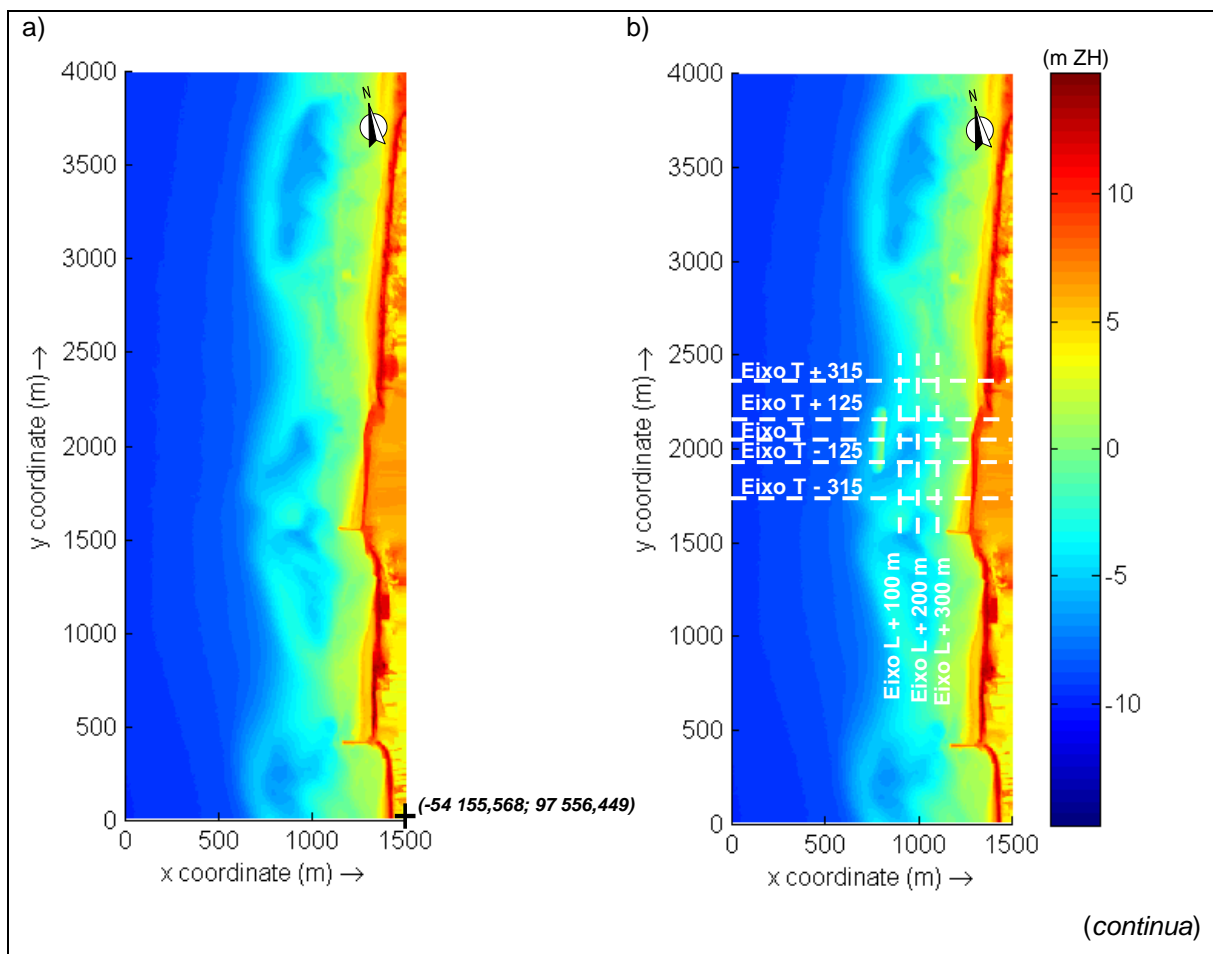
Como condições de **hidrodinâmica** atuantes durante o período de 30 dias consideraram-se:

- A incidência da onda mediana, com parâmetros estatísticos de caracterização $H_s=1,6$ m, $T_p=10,9$ s e $Dir=295^\circ N$, obtidos na fronteira mar da zona de estudo (ver Relatório 7: Freire *et al.*, 2020). Considerou-se a ação de espectros de ondas estacionárias para os casos de simulação.
- Nível do mar constante, igual ao nível médio do mar (NMM) atual na praia da Vagueira, +2,17 m ZH, conforme descrito em Sancho *et al.* (2019).

Como condições de **topo-batimetria, sedimentologia, e localização e dimensionamento do QMD** consideraram-se:

- Os MDT elaborados a partir dos levantamentos topo-batimétricos COSMO de julho de 2018 e junho de 2019, com uma malha quadrada de resolução 5 m num domínio de cálculo com $4 \times 1,5$ km, nas direções longitudinal e transversal, respetivamente (Figura 2.7).
- Diâmetro mediano, D_{50} , dos sedimentos do fundo igual a 0,2 mm e peso específico dos sedimentos igual a $2,65 \text{ kg/m}^3$, conforme as condições do Relatório 8 (secção 4.2.2.3, Oliveira *et al.*, 2020).
- QMD designado por B.c300d400, conforme nomenclatura adotada nos estudos de modelação matemática efetuados no âmbito deste estudo (ver Relatório 8: Oliveira *et al.*, 2020). Os parâmetros característicos de dimensionamento deste QMD têm os seguintes valores:
 - forma linear;
 - largura do coroamento, $B=10$ m;

- bordo livre, R_c , 0,5 m abaixo do nível de baixa-mar de águas vivas média (BMAV=+0,84 m ZH), isto é, à cota $h_c=+0,34$ m ZH;
- inclinação dos taludes de barlar e sotamar, respetivamente, $\beta_b=1:10$, $\beta_s=1:2$;
- distância entre o eixo transversal do QMD e o esporão Sul, $L_g=460$ m;
- orientação do eixo longitudinal do QMD relativamente à linha de costa, $\phi=0^\circ$;
- comprimento do QMD, $L_{qm}=300$ m;
- distância à linha de costa, $L_d=400$ m.



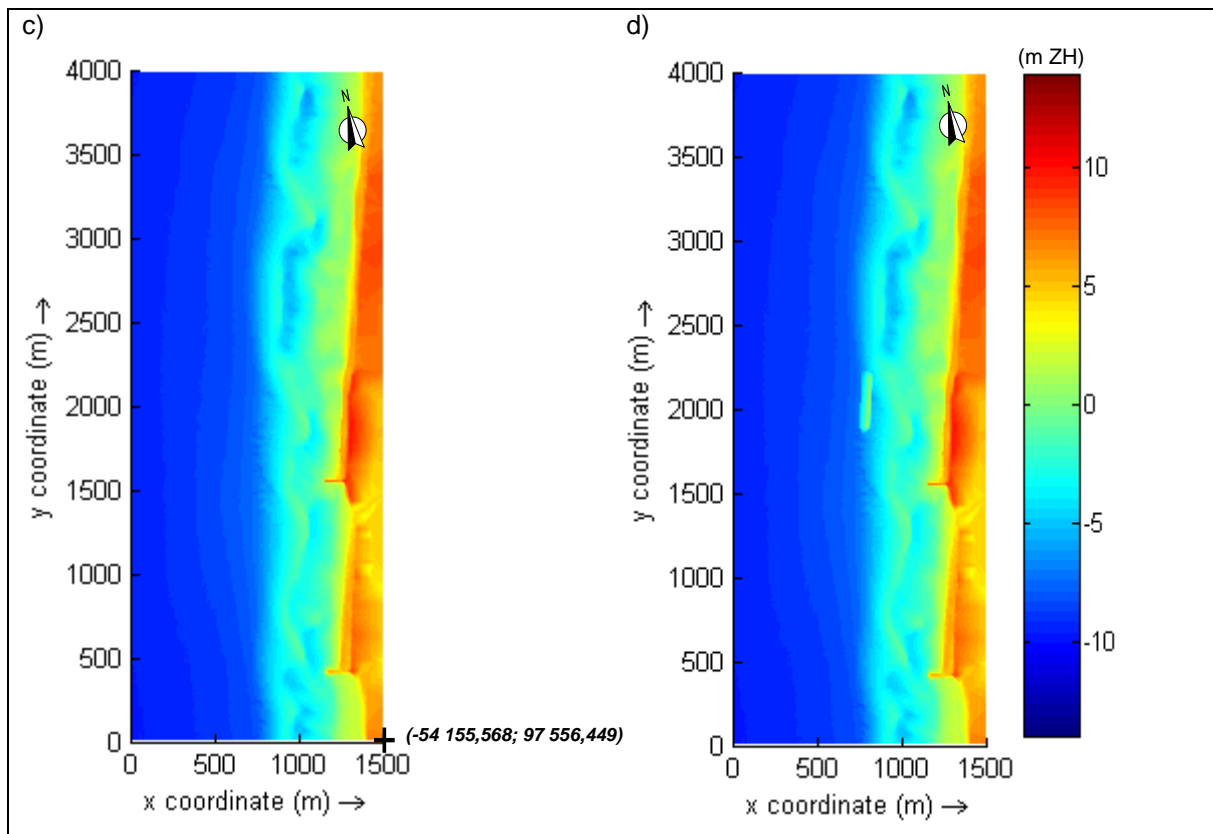


Figura 2.7 – Topo-batimetria inicial da zona de estudo: levantamento COSMO de julho de 2018 a) sem QMD e b) com QMD; levantamento COSMO de junho de 2019 c) sem QMD e d) com QMD. Localização dos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais em b)

2.4 Metodologia

2.4.1 Modelo

O modelo numérico de morfodinâmica aplicado foi o **Delft3D**, que se descreve no ANEXO II do Relatório 8 (Oliveira *et al.*, 2020). Simulou-se o impacte da agitação marítima na dinâmica sedimentar e morfologia do fundo para as condições topo-batimétricas de teste sem e com QMD submerso (Figura 2.7). Na zona protegida pelo QMD, a agitação marítima deve-se à combinação das ondas transmitidas, exclusivamente através do processo de galgamento sobre o coroamento da estrutura, uma vez que a estrutura é considerada não permeável na modelação, e às ondas refratadas pela estrutura e pelo fundo arenoso, uma vez que sendo o QMD permanentemente submerso não ocorre difração. No modelo, na zona do QMD a dissipação de energia deve-se exclusivamente à rebentação das ondas sobre o talude do QMD submerso e ao atrito de fundo, uma vez que a dissipação através da estrutura, no caso de ser porosa, não é considerada.

No que respeita ao cálculo das correntes litorais, nas simulações são tidos em conta os seguintes fenómenos: as correntes induzidas pelas ondas no seu processo de propagação em direção à costa, as correntes geradas pela sobrelevação induzida pela rebentação das ondas e as correntes causadas pelos gradientes de fundo associadas a variações de pressão hidrostática. O modelo considera a interação destas correntes com as correntes locais bi-dimensionais no plano horizontal (2DH) induzidas

pela presença do esporão da Vagueira, localizado 310 m e 460 m a sul, respetivamente, da extremidade sul do QMD e do eixo transversal do QMD. Note-se que correntes de maré e correntes induzidas pelo vento local não foram consideradas na modelação, devido aos custos computacionais acrescidos e à baixa relevância comparativamente com as correntes de circulação induzidas pelos fenómenos considerados. Salienta-se ainda que devido ao facto do QMD se encontrar implementado numa zona de rebentação cuja dinâmica sedimentar é muito elevada, na zona adjacente ao mesmo podem desenvolver-se vórtices, correntes complexas junto aos taludes do QMD e infraescavação local, fenómenos tri-dimensionais, que um modelo deste tipo não tem capacidade de reproduzir.

Apesar de ser um modelo de referência no estado-de-arte, existem limitações e incertezas na reprodução exata da física costeira devido à complexidade dos processos costeiros em causa. No entanto, procedeu-se à validação do modelo, conforme se descreve na secção seguinte, com recurso a dados medidos numa campanha de campo efetuada nos dias 14 e 15 de outubro de 2019 no âmbito do presente estudo (ver Relatório 5 sobre a descrição da campanha, Silva *et al.*, 2019, e Relatório 6 sobre os resultados da campanha, Silva *et al.*, 2020).

2.4.2 Validação

2.4.2.1 Campanha de 14-15/outubro/2019

Na campanha de campo efetuada nos dias 14 e 15 de outubro de 2019 no âmbito do presente estudo, realizaram-se medições de parâmetros de agitação marítima, correntes litorais e transporte sedimentar, (Silva *et al.*, 2019 e 2020). Para além destes ainda foram recolhidas amostras de sedimentos em diferentes posições da praia emersa e imersa e efetuadas medições da topo-batimetria. Complementarmente, foram adquiridas imagens de vídeo através do sistema de vídeo-monitorização instalado (Baptista *et al.*, 2019).

A campanha decorreu entre as 7:00h do dia 14 de outubro e as 12:00h do dia 15 de outubro, durante dois ciclos de maré. Na Figura 2.8 apresenta-se a localização das estruturas de suporte dos instrumentos de medição dos parâmetros hidrodinâmicos e da concentração de sedimentos.



Figura 2.8 – Localização dos pontos onde foram colocadas estruturas de suporte dos instrumentos de medição e do sistema de vídeo-monitorização (ponto azul) (fonte: Silva *et al.*, 2020)

Na praia submersa, a 10 m de profundidade (relativamente ao NMM), foi fundeado o correntómetro acústico da RDInstruments (ADCP1) para medição do perfil de correntes na coluna de água e vários parâmetros representativos da agitação marítima (altura significativa, período e direção média, entre outros). O correntómetro acústico Aquadopp Current Profiler (ADCP2) foi instalado na praia submersa em frente ao esporão sul da Vagueira para medição das correntes e ondulação nesse local, a uma profundidade aproximada de 6,3 m.

Na praia emersa, na zona entre marés (locais P1 a P6 da Figura 2.8), foram colocados sensores de pressão (PT) que fizeram medições durante a preia-mar dos dias 14 e 15 de outubro.

2.4.2.2 Verificação do modelo

Aplicou-se o modelo de morfodinâmica Delft3D para as condições hidro-morfológicas da campanha de 14-15/outubro/2019, com o objetivo de verificar a concordância entre valores medidos e valores numéricos das grandezas **Hs e profundidade** nas posições dos correntómetros acústicos, ADCP1 e ADCP2, e dos sensores de pressão, PT1, PT2, PT3, PT4, PT5 e PT6 (Quadro 2.1). Efetuou-se um teste, designado por *Numérico 5*, com os valores padrão (por defeito) atribuídos a todos os coeficientes de calibração e testes com outros valores atribuídos aos **coeficientes de calibração** que regulam a **dissipação** de energia, com o objetivo de melhorar a concordância. Os coeficientes de calibração testados foram: *Alfa*, *Gamma* e *Bottom friction*. Apresentam-se no Quadro 2.2 a designação dos testes e os respetivos valores dos coeficientes de calibração. As séries temporais de Hs e profundidade, medidas e numéricas, nas oito posições, podem ser vistas desde a Figura 2.9 à Figura 2.16. Concluiu-se o seguinte:

- na posição do ADCP1 há uma boa concordância entre valores medidos e numéricos de Hs uma vez que nesta posição não há evidência de alteração do fundo (a 10 m de profundidade relativamente ao NMM) entre a data do levantamento topo-batimétrico, junho de 2019, e a data da campanha de campo, 14-15 de outubro de 2019.
- na posição do ADCP2 ocorreu erosão do fundo, com valor aproximado de 0,4 m, entre a data do levantamento topo-batimétrico e a data da campanha. Esta erosão deverá ser responsável pela diminuição, variável entre 0,2 – 0,8 m, de Hs.
- dado que os ADCPs estão posicionados antes da zona de rebentação para a série temporal de ondas incidentes, os resultados numéricos não evidenciam sensibilidade aos coeficientes de calibração testados, que regulam a dissipação.
- nas posições de P1 a P5, ou seja, na face de praia a norte do esporão da Vagueira, verifica-se acreção entre a data do levantamento topo-batimétrico e a data da campanha. Este facto justifica as discrepâncias de Hs entre valores observados e numéricos, sendo os últimos mais elevados, como seria de esperar. Os valores dos coeficientes de calibração considerados permitiram obter uma redução de Hs com valor máximo de 0,6 m na posição do PT2 e no segundo ciclo de maré.
- em oposição, na posição do PT6, a sul do esporão, ocorreu erosão entre as datas do levantamento topo-batimétrico e a data da campanha. Por isso, os valores de Hs numéricos são inferiores aos observados.

Em síntese, face aos resultados dos testes efetuados, conclui-se que os coeficientes de calibração utilizados no teste designado por *Numérico 5* são os mais adequados uma vez que as diferenças entre valores medidos e numéricos de Hs deverão ser devidas à variação dos fundos na zona ativa da praia, mesmo tendo em conta possíveis erros de medição e de modelação.

Quadro 2.1 – Posição dos instrumentos de medição. Coordenadas ETRS89-(M;P) e malha Delft3D-(M;N)

Instrumentos de medição	ETRS-M	ETRS-P	Delft3D-M	Delft3D-N
ADCP 1	-54572.93	99515.56	132	364
ADCP 2	-54414.21	99214.56	176	312
PT1	-53894.87	99773.92	252	445
PT2	-54001.92	99495.13	244	386
PT3	-54024.05	99412.53	243	369
PT4	-54045.25	99311.39	244	348
PT5	-54061.19	99214.97	245	328
PT6	-54060.55	98946.83	257	276

Quadro 2.2 – Teste dos coeficientes de calibração *Alfa*, *Gamma*, *Bottom friction*

Designação do teste	<i>Alfa</i> (-)	<i>Gamma</i> (-)	<i>Bottom friction</i> (m ² /s ³)
Numérico 5	1,0	0,73	0,067
Numérico 6	3,0	0,8	0,067
Numérico 7	6,0	0,8	0,067
Numérico 8	6,0	0,8	0,1

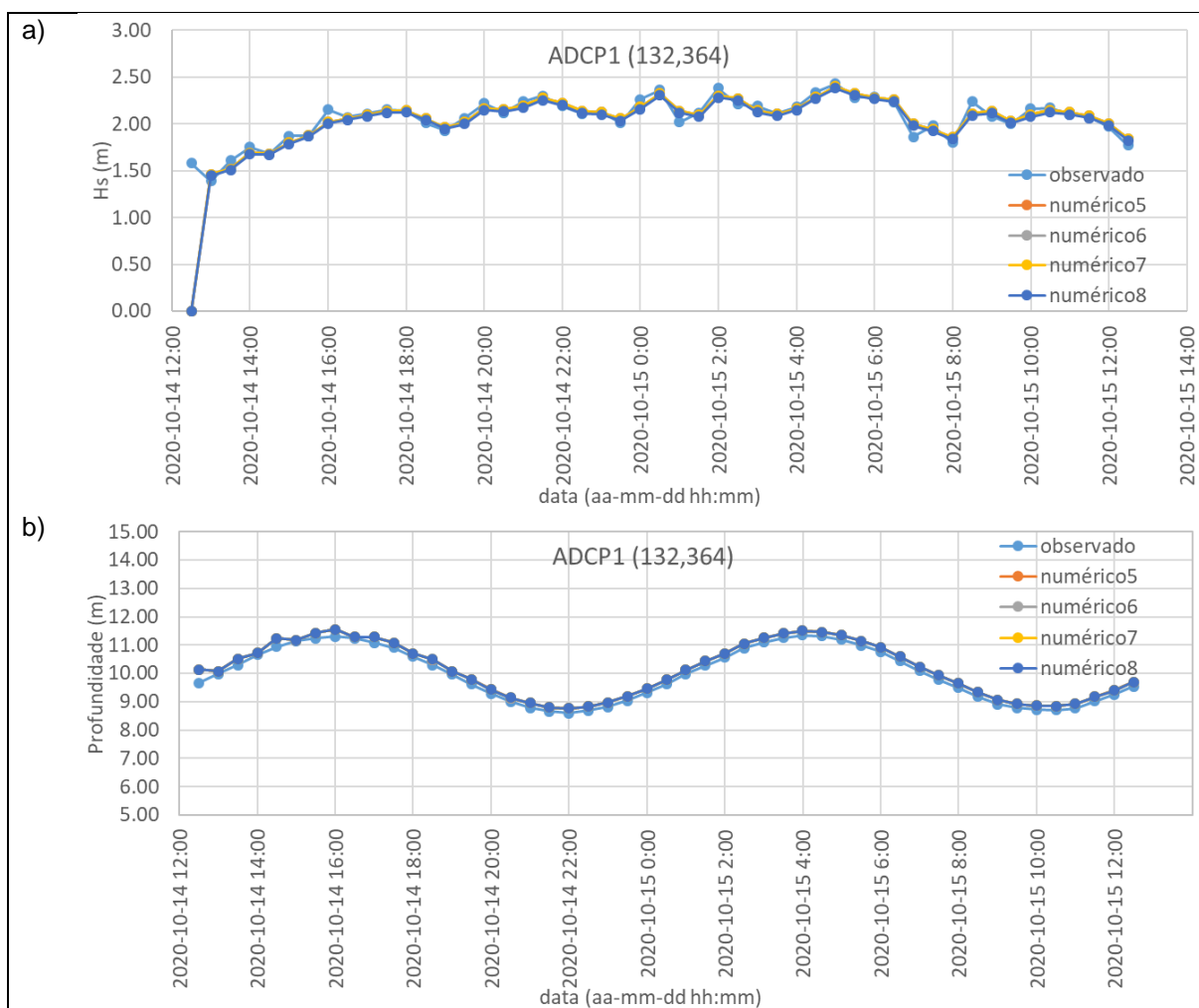
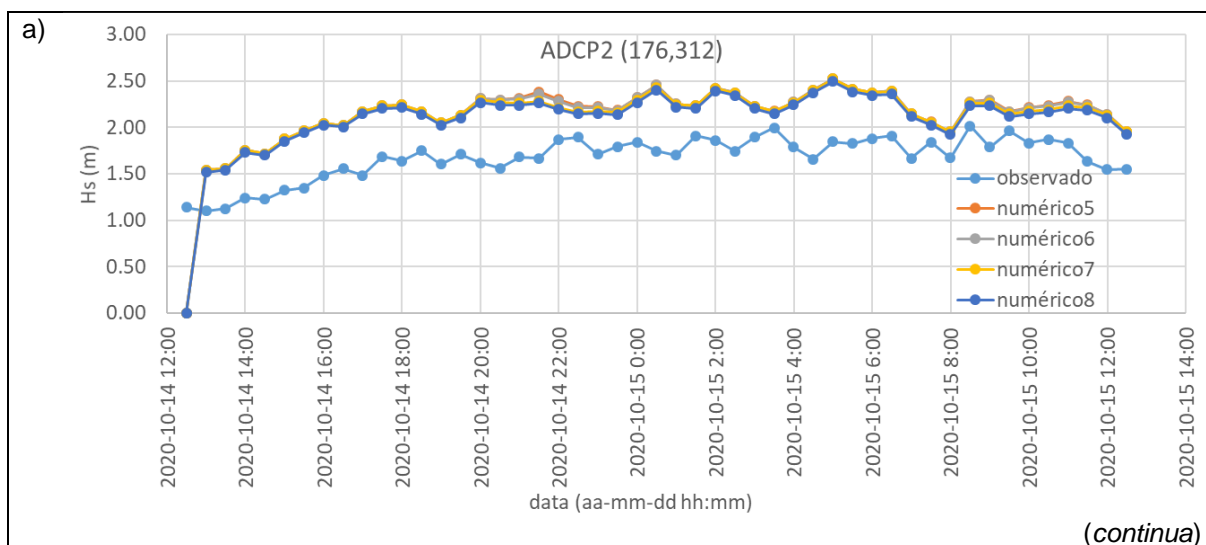


Figura 2.9 – Valores observados e numéricos de H_s e profundidade na posição do ADCP1



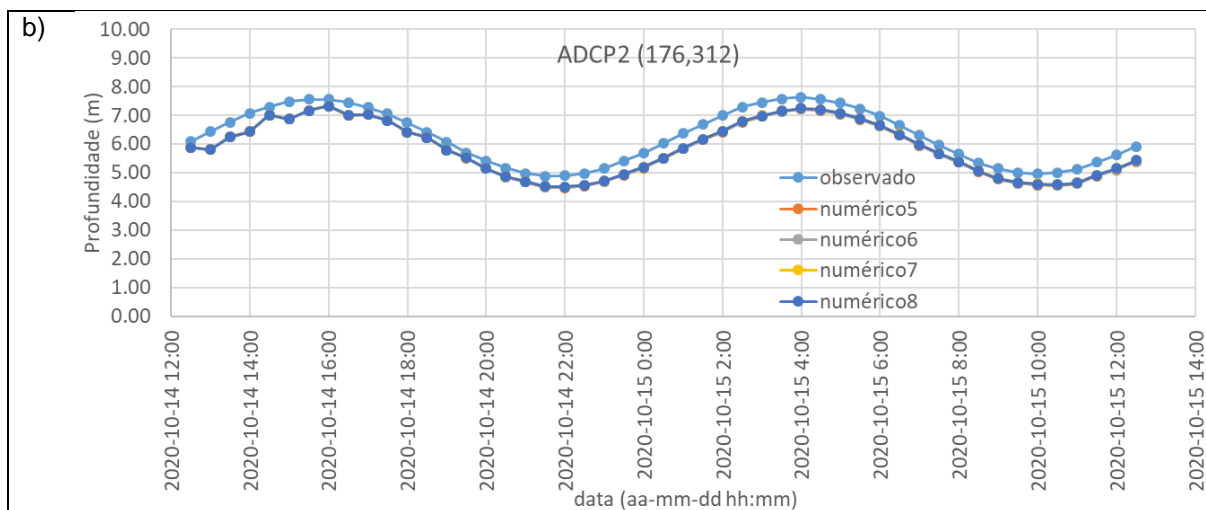


Figura 2.10 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do ADCP2

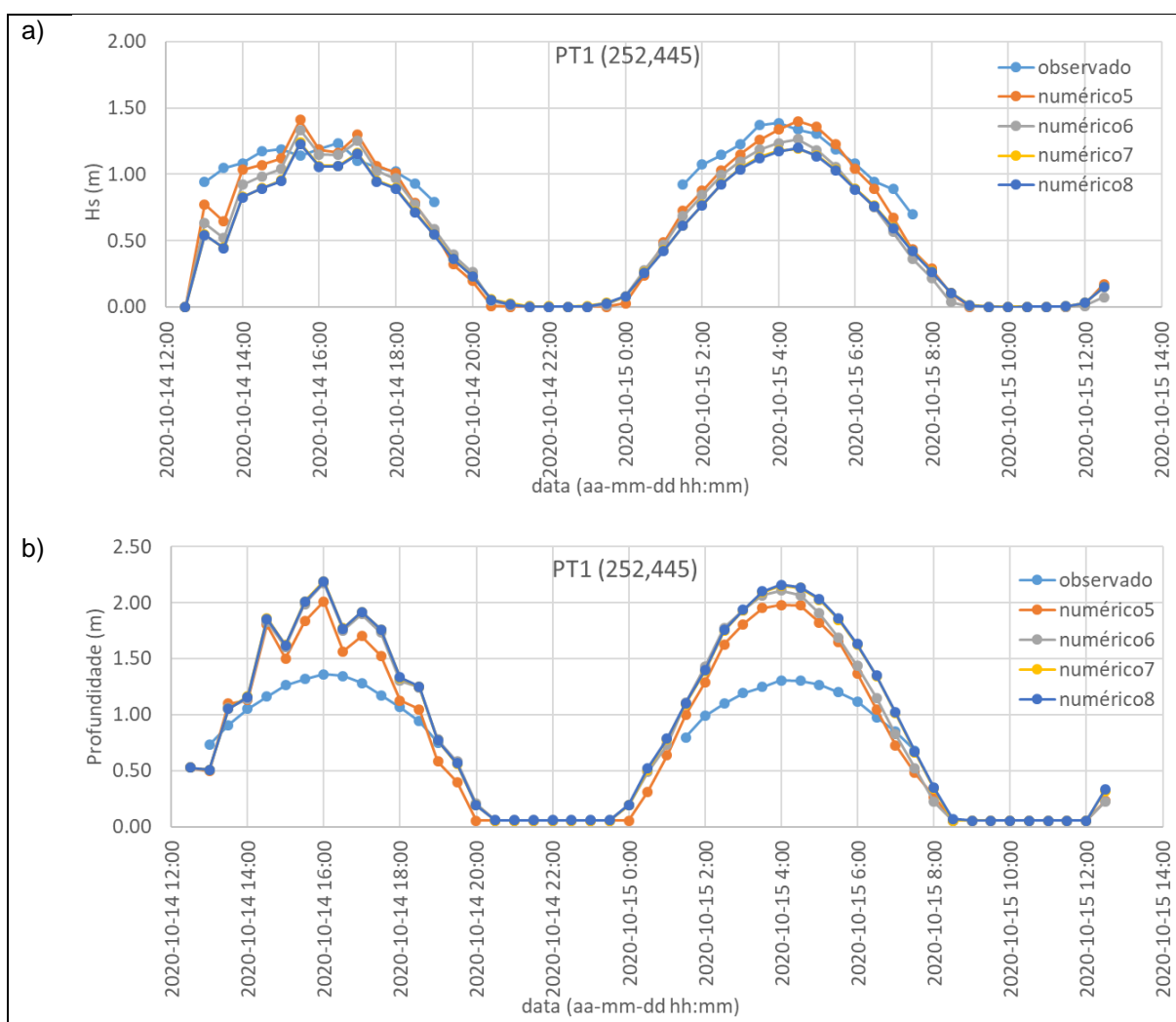


Figura 2.11 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT1

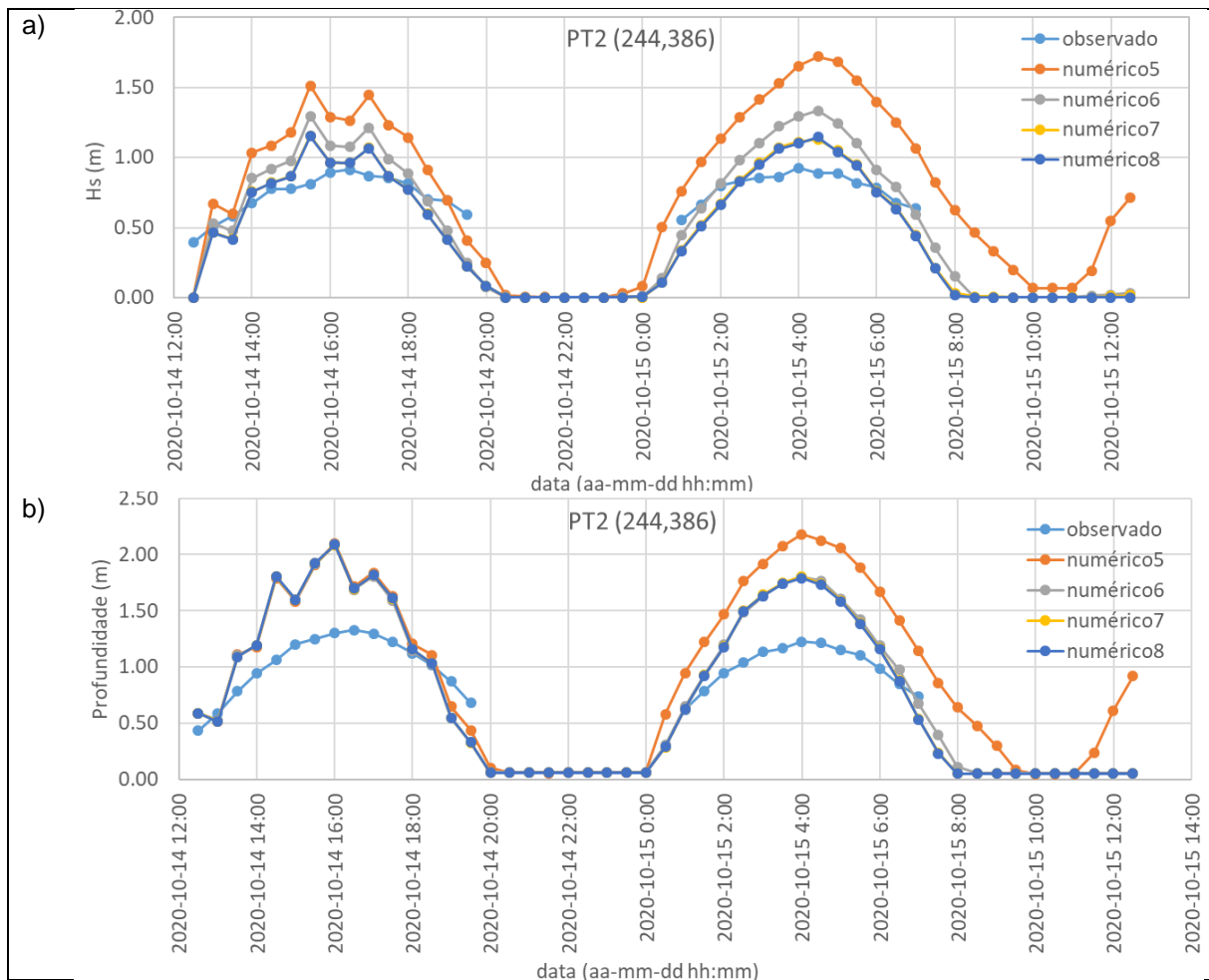
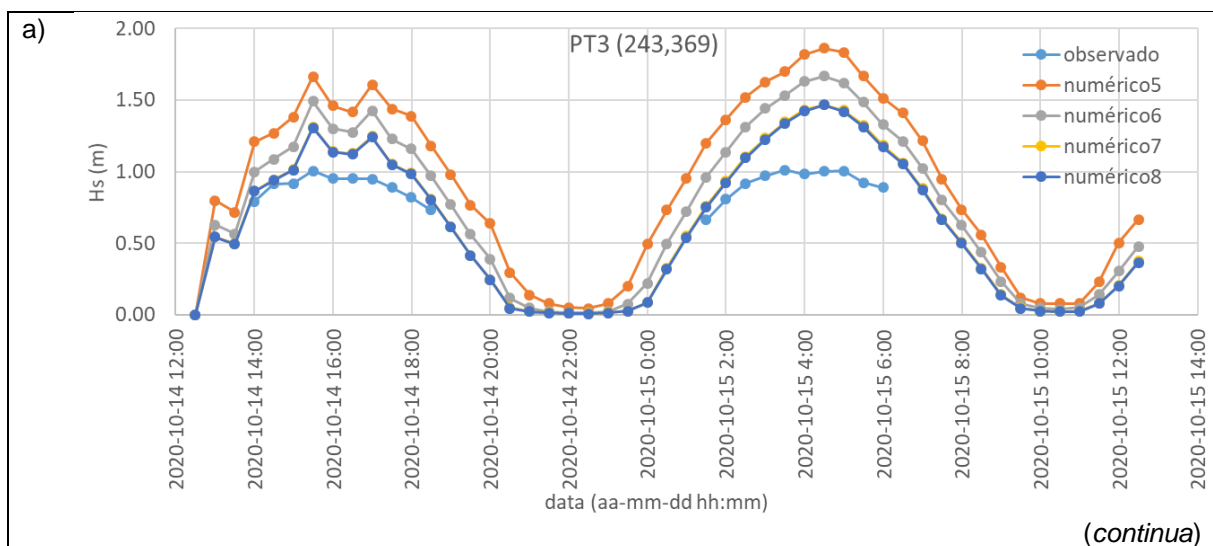


Figura 2.12 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT2



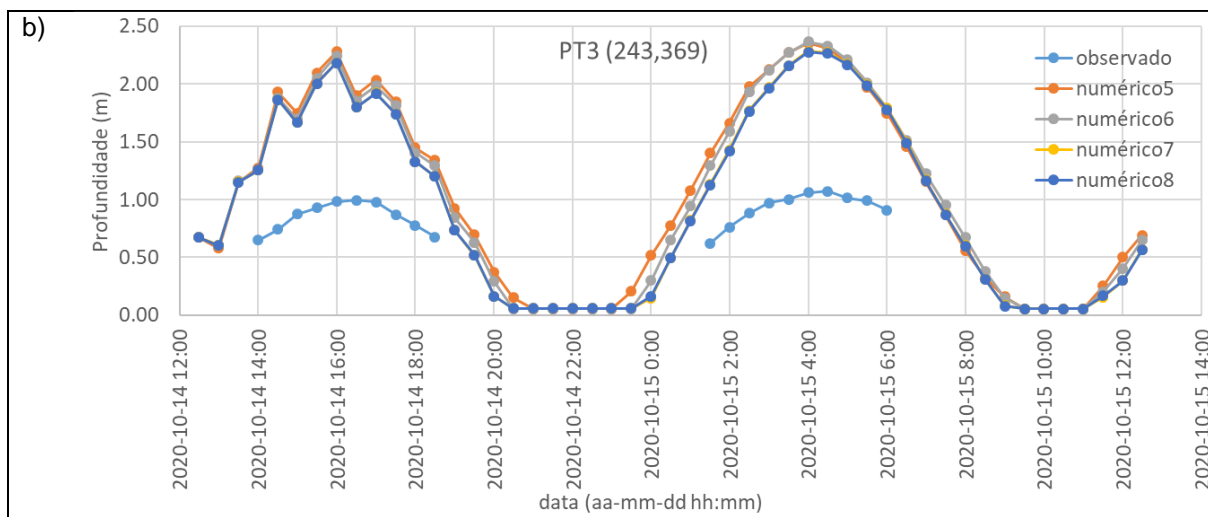


Figura 2.13 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT3

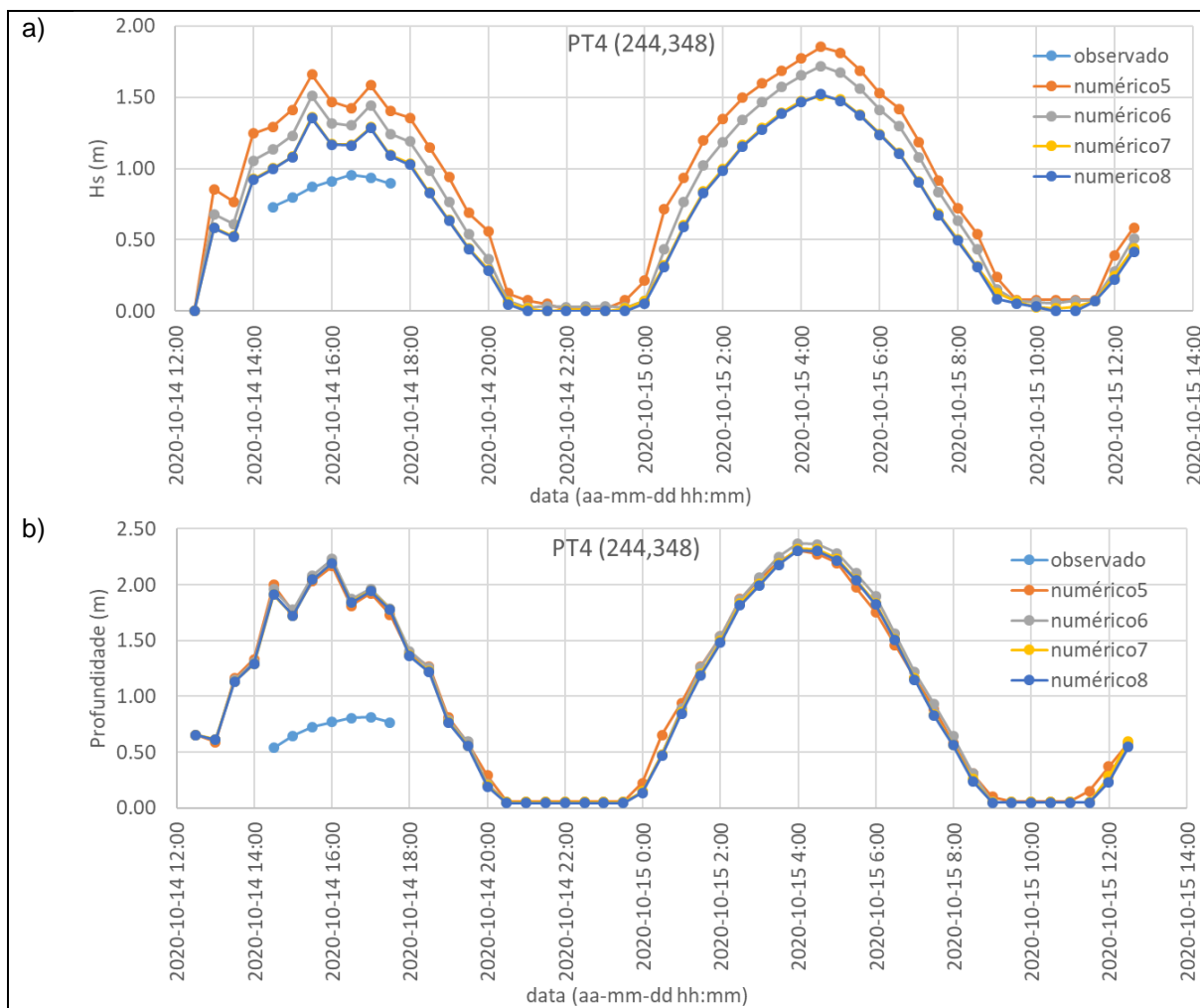


Figura 2.14 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT4

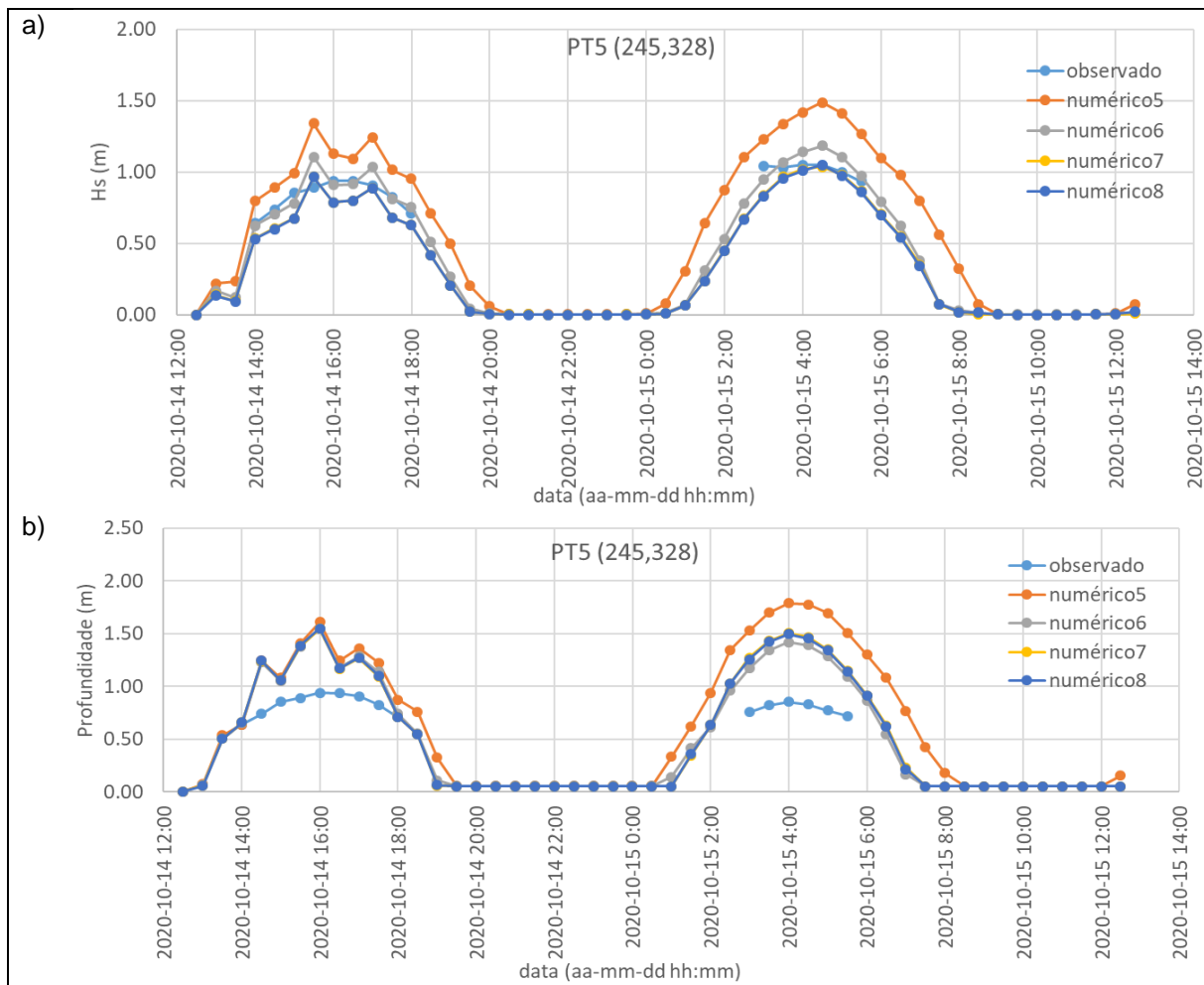
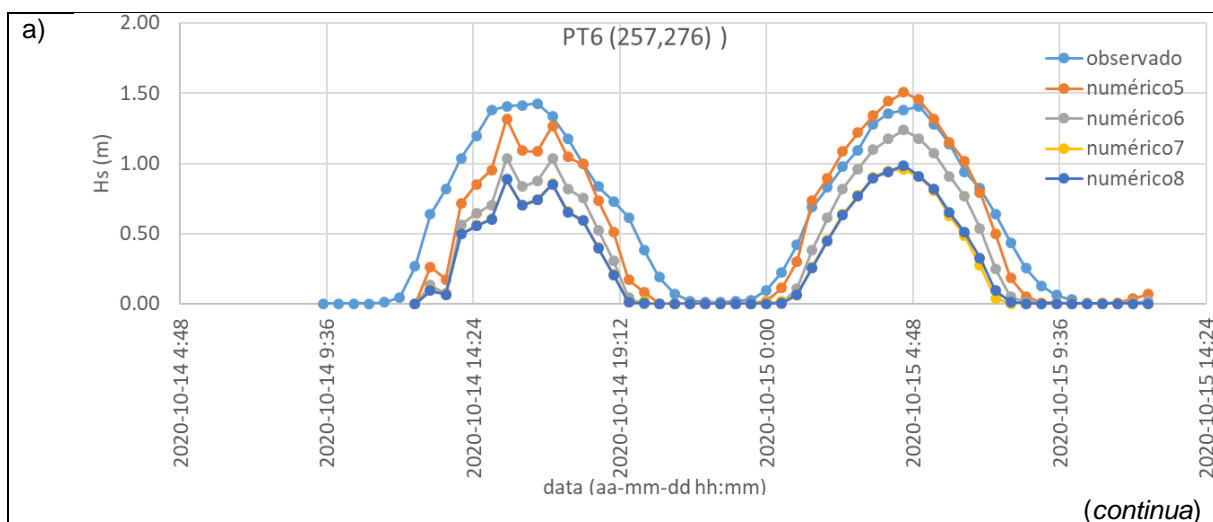


Figura 2.15 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT5



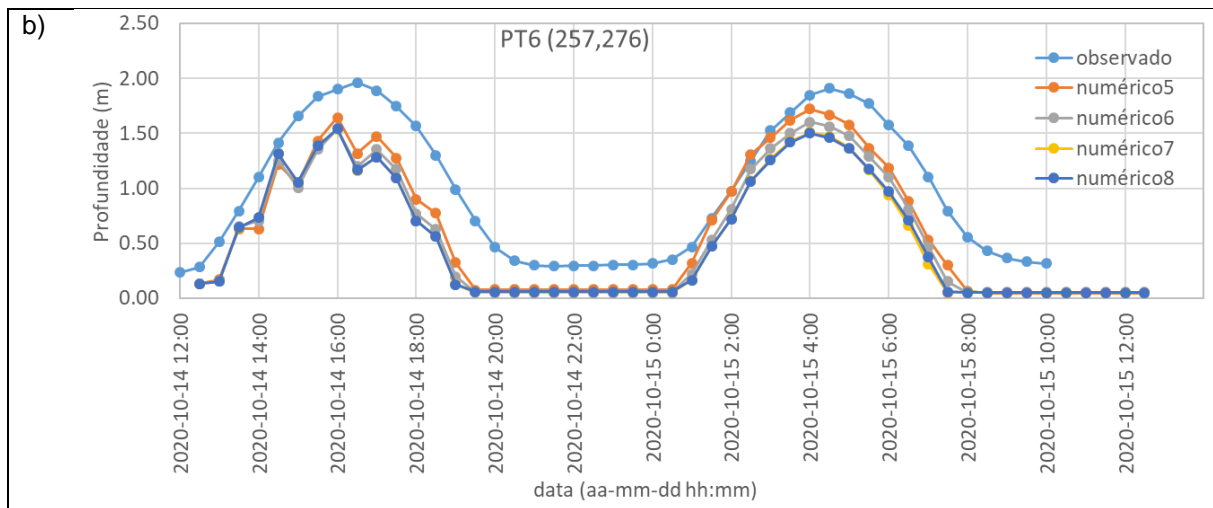


Figura 2.16 – Valores observados e numéricos de Hs e profundidade na posição do PT6

2.5 Resultados

Os resultados das simulações numéricas da **morfodinâmica** na zona adjacente à implementação do QMD, sobre fundos iniciais de julho de 2018 e de junho de 2019, sem e com QMD, sob ação da onda mediana durante 30 dias, são apresentados na seguinte forma:

- em **mapas 2DH** da elevação do fundo relativa ao ZH e da variação morfológica do fundo (Figura 2.17 e Figura 2.18);
- em gráficos da elevação do fundo relativa ao ZH e da variação morfológica do fundo ao longo de **cinco transetos transversais e três transetos longitudinais**, cuja localização, escolhida estrategicamente para abranger a zona de influência do QMD na zona ativa da frente marítima da praia da Vagueira, se assinala na Figura 2.7-b. Designaram-se os cinco primeiros por eixo T + 315 m, eixo T + 125 m, eixo T, eixo T – 125 m e eixo T – 315 m, de norte para sul, sendo o eixo T coincidente com o eixo transversal do QMD, localizado a 460 m do esporão da Vagueira e a 2045 m do eixo-x do sistema de coordenadas local. Designaram-se os três eixos longitudinais por eixo L + 100 m, eixo L + 200 m e eixo L + 300 m, de oeste para este, sendo o eixo L coincidente com o eixo longitudinal do QMD, localizado a 905 m do eixo-y do sistema de coordenadas local. Estes resultados encontram-se nas Figura 2.19, Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22;
- em gráficos das variações verticais (Δz) **máxima** e **mínima** da topo-batimetria nos cinco transetos transversais e nos três transetos longitudinais (Figura 2.23);
- em quadro com Δz **máxima** e **mínima** da topo-batimetria nos cinco transetos transversais e nos três transetos longitudinais, onde se assinalam as máximas variações em valor absoluto, $|\Delta z|$, ocorridas sobre o fundo de 2018 e de 2019 (Quadro 2.3).

Da análise dos resultados destaca-se o seguinte:

- no estado inicial, os dois fundos submersos apresentam elevadas diferenças, que alcançam um valor máximo de aproximadamente 5 m (Figura 2.4 e Figura 2.7). Em 2018 o fundo possui

uma barra longitudinal submersa não uniforme, cujo declive do lado mar se inicia a uma elevação que varia entre -8 e -8,5 m ZH, e que é mais pronunciada na zona do eixo transversal do QMD, onde a crista alcança a elevação -4,2 m ZH e a fossa alcança a elevação -6,3 m ZH (Figura 2.19-c). Em 2019 o fundo apresenta uma barra longitudinal não uniforme que se aproxima da linha de costa de norte para sul (Figura 2.6 e Figura 2.19);

- na ausência de QMD, a evolução do fundo em 2018 caracteriza-se pelo assoreamento da zona entre o QMD e a linha de costa, sendo o foco deste fenómeno aproximadamente simétrico relativamente ao eixo transversal do QMD. A principal diferença relativamente à evolução do fundo em 2019 é que o **foco do assoreamento se verifica mais a sul**, especificamente entre o eixo transversal do QMD e o esporão da Vagueira (Figura 2.17);
- na presença do QMD, os focos de assoreamento do fundo em 2018 e 2019 mantêm-se nos **mesmos locais**, no entanto a **extensão** da zona de assoreamento **diminui** (Figura 2.18);
- a variação do fundo ao longo dos transetos transversais indica que a **erosão** se dá predominantemente **junto à linha de costa** e aos **extremos do QMD** (Figura 2.21);
- a variação do fundo ao longo do transeto longitudinal eixo L + 300 m confirma que o **assoreamento é inferior na presença do QMD** em ambos os fundos, de 2018 e 2019, e que o pico deste assoreamento se localiza mais a sul no fundo de 2019 (Figura 2.22-c);
- os valores máximos das variações verticais (Δz) nos cinco transetos transversais e nos três transetos longitudinais (Figura 2.23) indicam: a) que os **máximos $|\Delta z|$** correspondem a **assoreamento** ($\Delta z > 0$); e b) que o QMD tem **maior capacidade de reduzir estas variações sobre o fundo de 2018** do que sobre o fundo de 2019 uma vez que em 2018 se verificaram seis transetos com máximo $|\Delta z|$ sem QMD e dois transetos com máximo $|\Delta z|$ com QMD, e em 2019 se verificaram quatro transetos com máximo $|\Delta z|$ sem QMD e quatro transetos com máximos $|\Delta z|$ com QMD (Quadro 2.3).

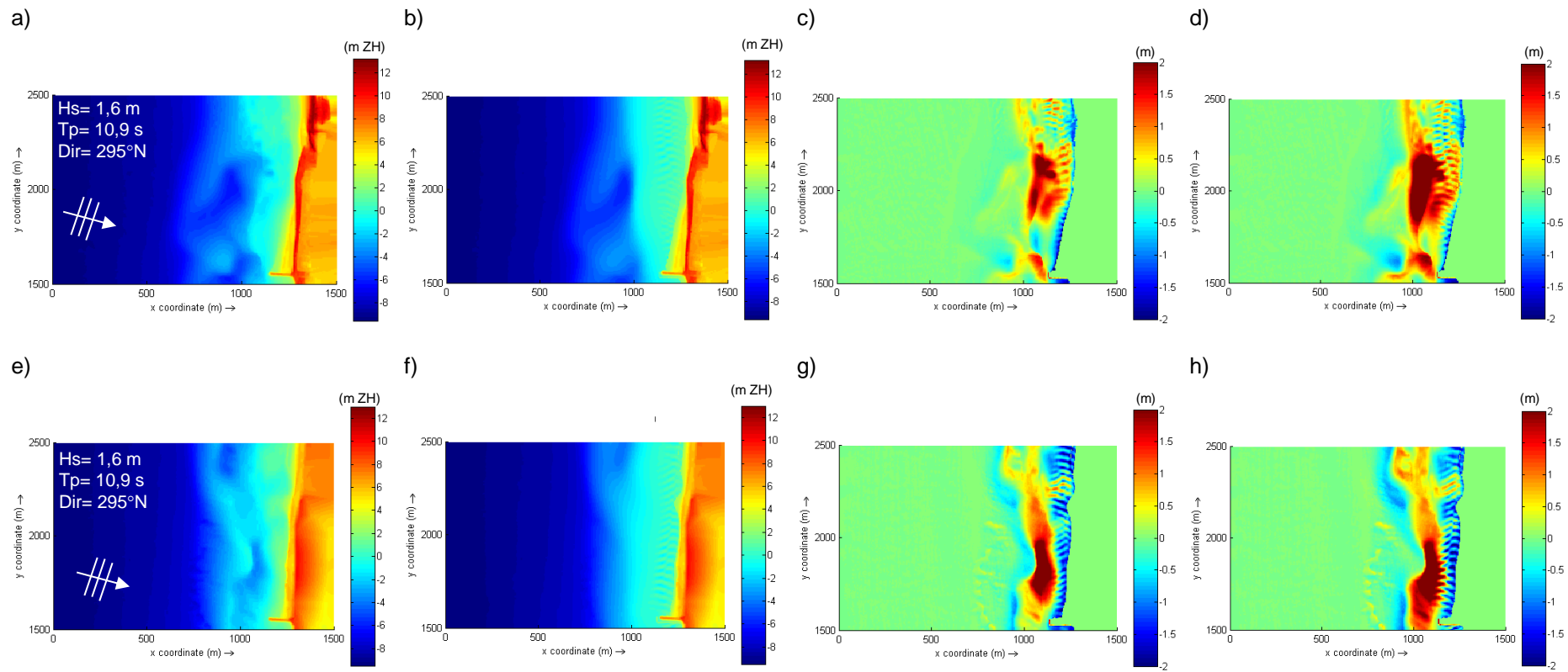


Figura 2.17 – Evolução morfológica sem QMD simulada sob ação da onda mediana e NMM durante 30 dias: a) e b) topo-batimetria COSMO 2018 inicial e final, e c) e d) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias; e) e f) topo-batimetria COSMO 2019 inicial e final, e g) e h) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias

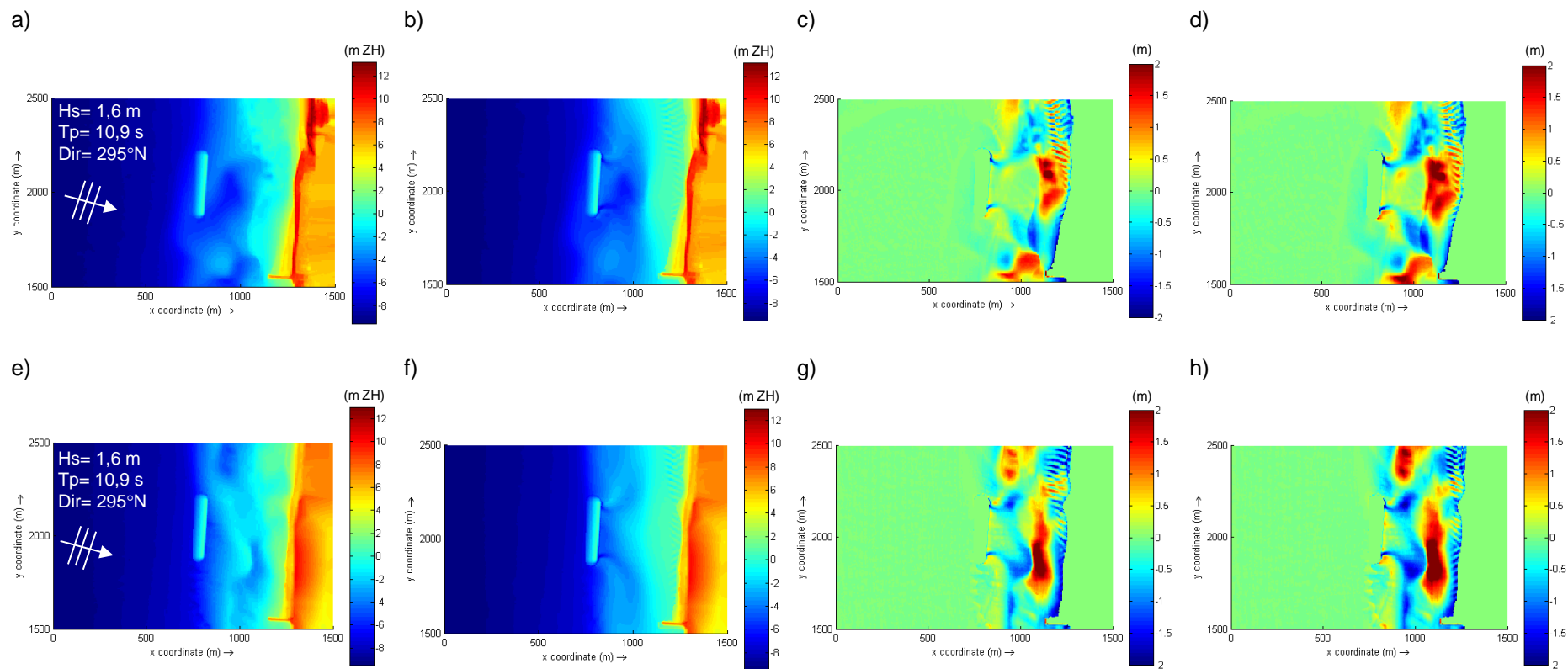
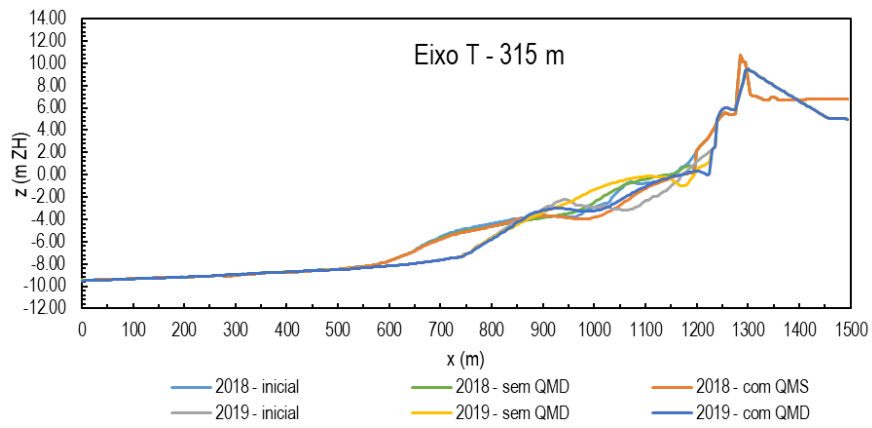
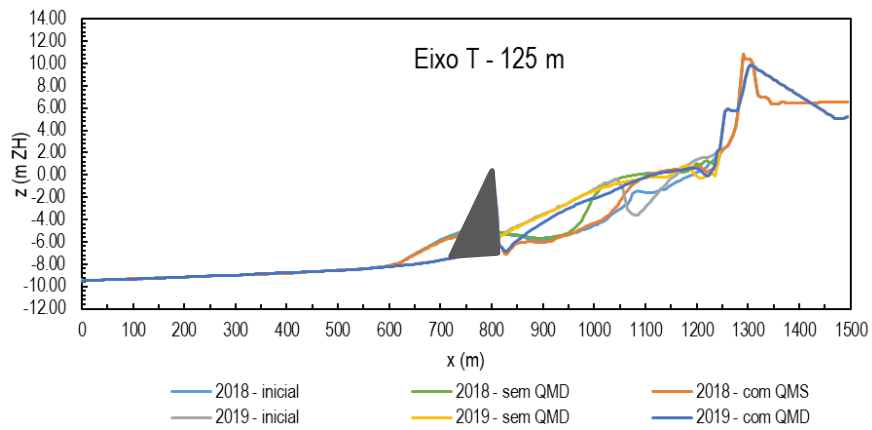


Figura 2.18 – Evolução morfológica com QMD simulada sob ação da onda mediana e NMM durante 30 dias: a) e b) topo-batimetria COSMO 2018 inicial e final e c) e d) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias; e) e f) topo-batimetria COSMO 2019 inicial e final e g) e h) erosão/acumulação (-/+) após 15 e 30 dias

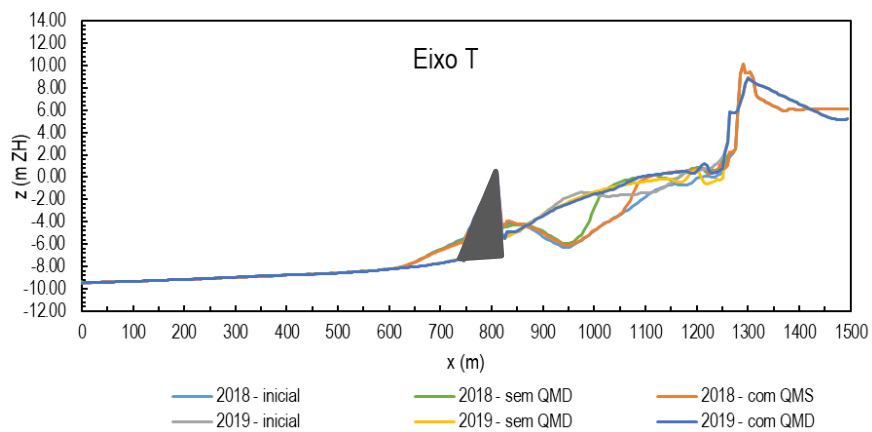
a)



b)

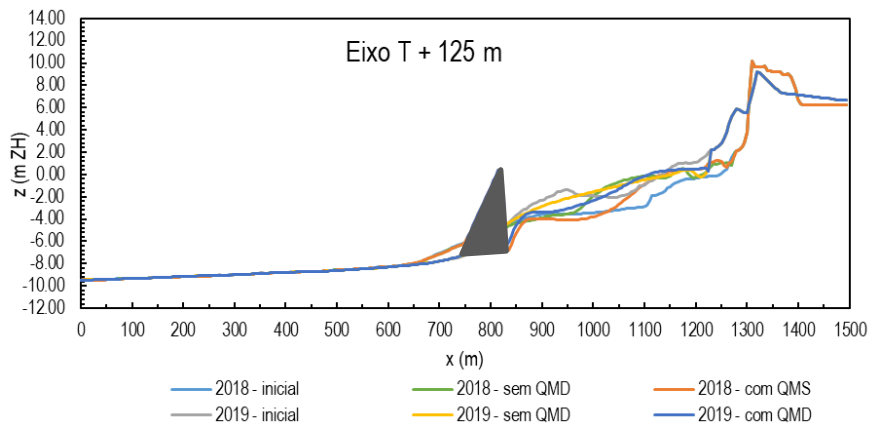


c)



(continua)

d)



e)

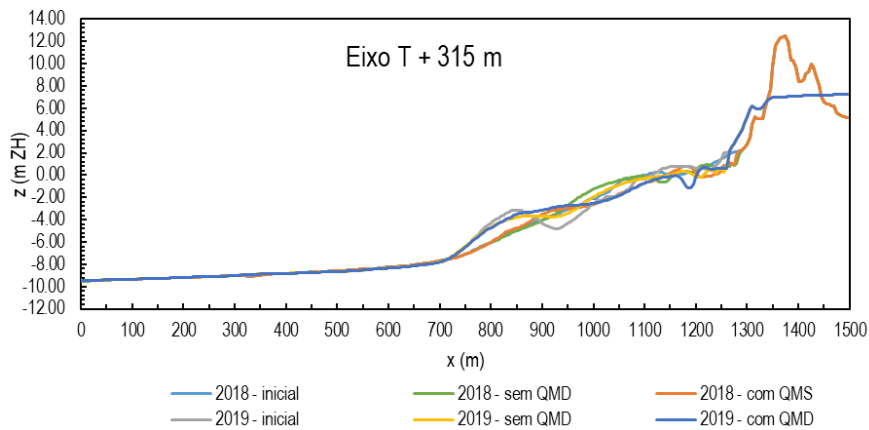
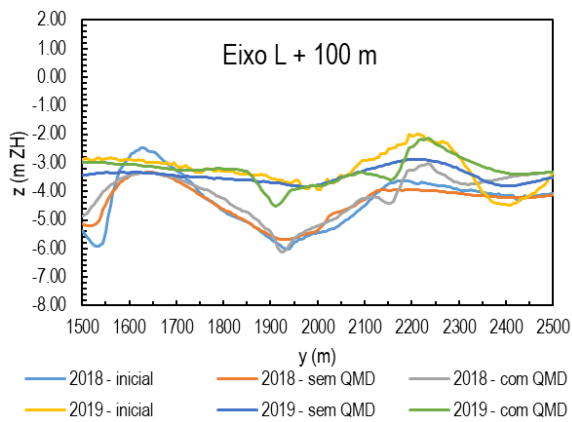
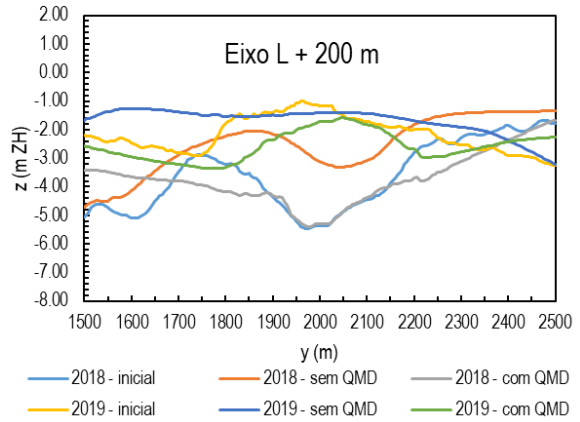


Figura 2.19 – Topo-batimetria nos cinco transetos transversais, a), b), c), d) e e), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD

a)



b)



(continua)

c)

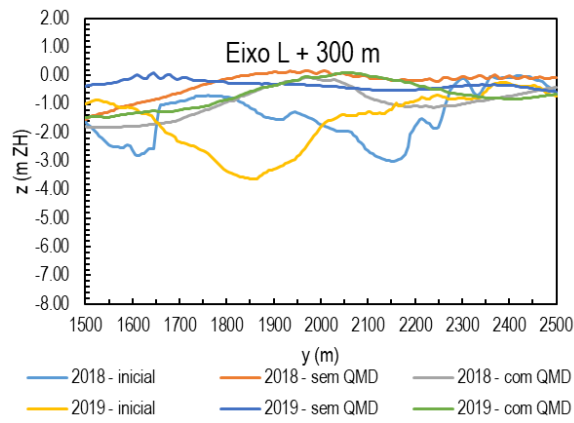
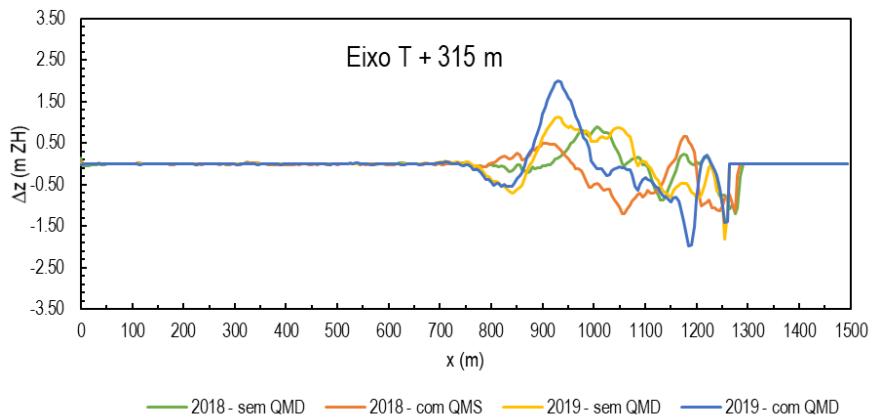
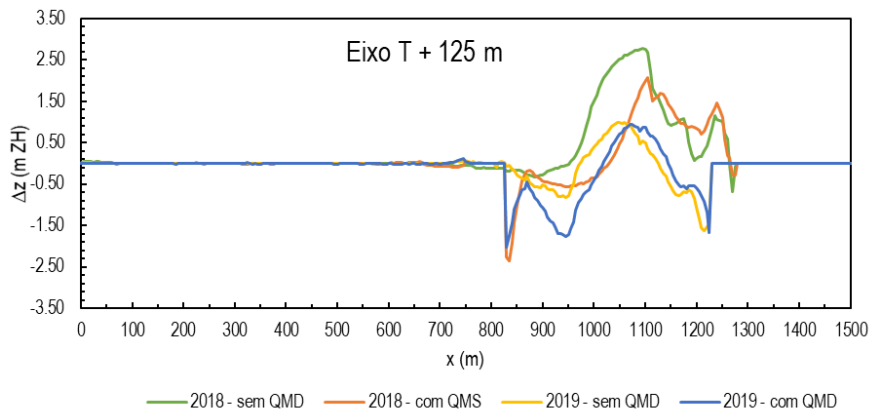


Figura 2.20 – Topo-batimetria nos três transetos longitudinais, a), b) e c), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD

a)



b)



(continua)

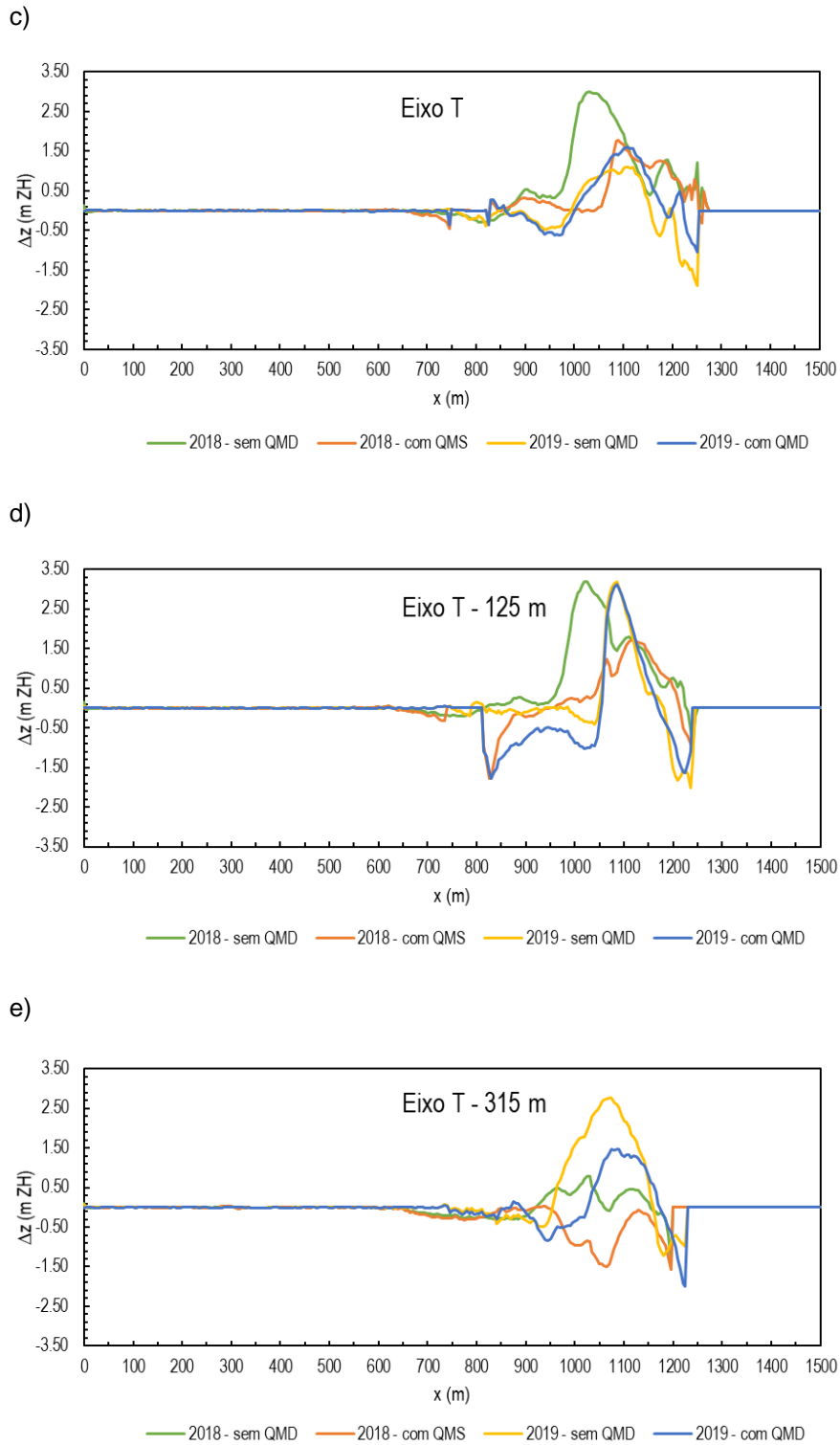


Figura 2.21 – Variação da topo-batimetria, Δz (erosão/acumulação: $-/+$), nos cinco transetos transversais, a), b), c), d) e e), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD

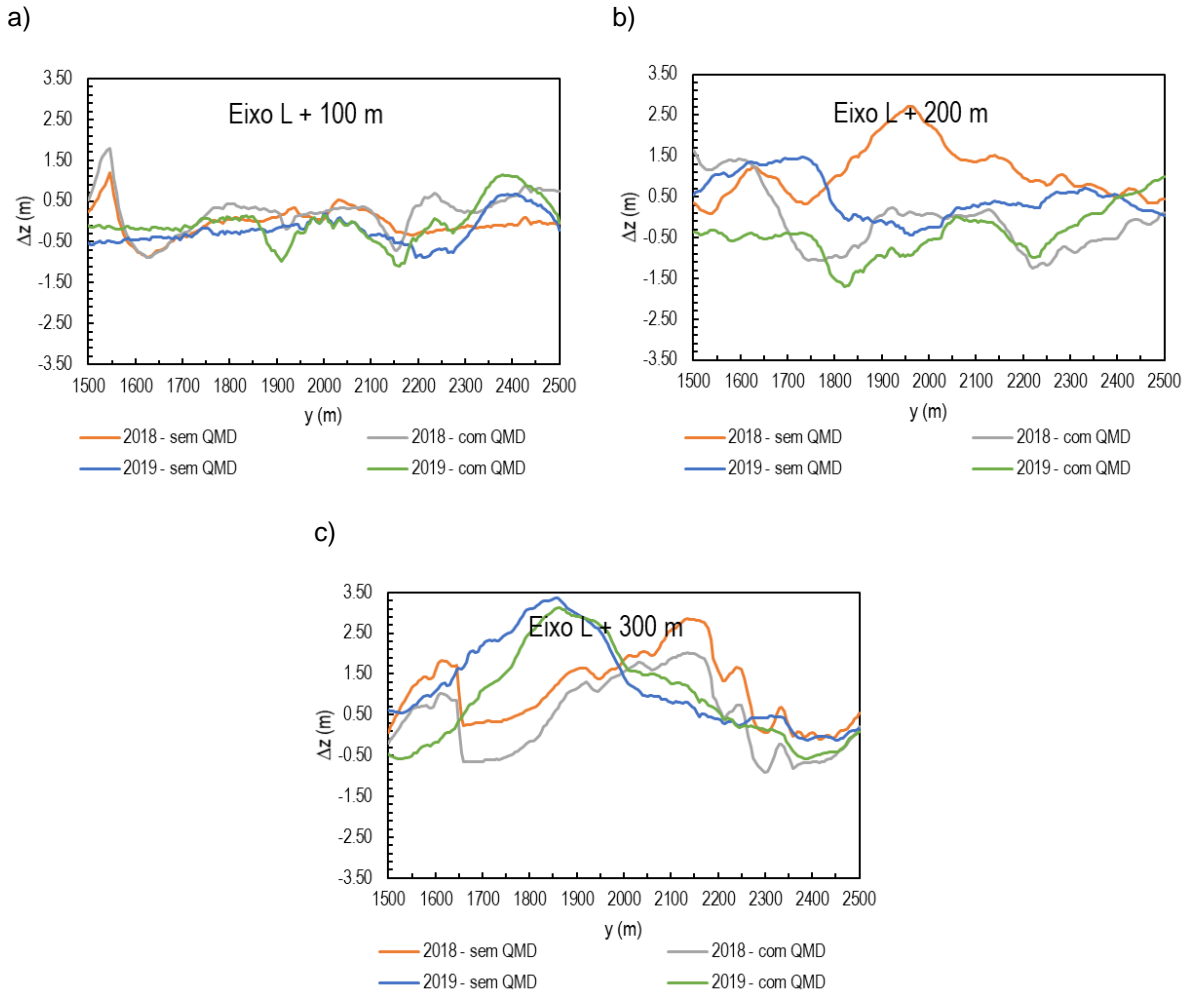
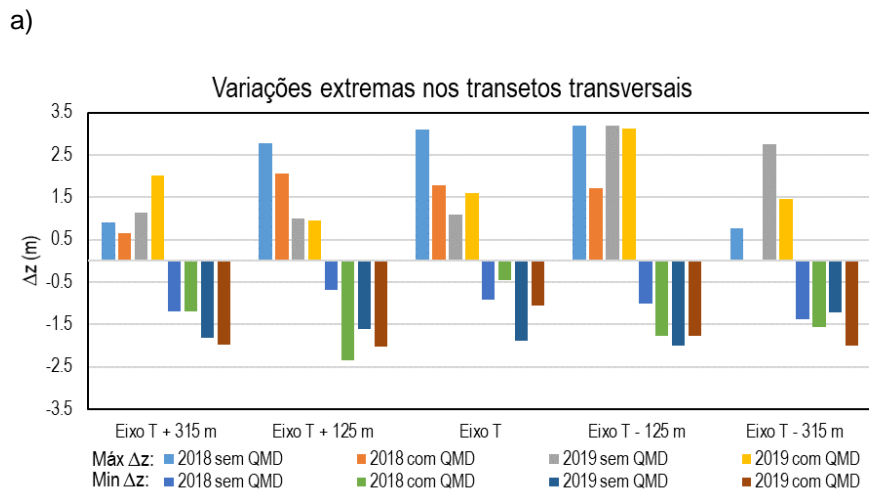


Figura 2.22 – Variação da topo-batimetria, Δz (erosão/acumulação: -/+), nos três transetos longitudinais, a), b) e c), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD



(continua)

b)

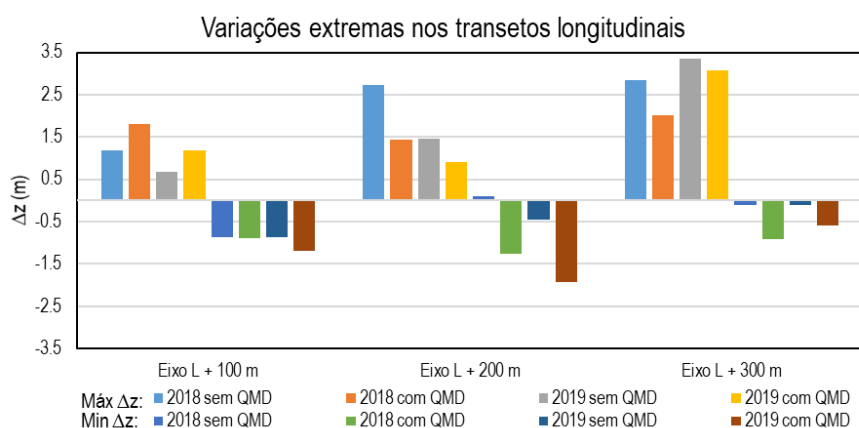


Figura 2.23 – Variações verticais (Δz) máxima e mínima da topo-batimetria (erosão/acumulação: -/+), nos cinco transetos transversais, a), e nos três transetos longitudinais, b), localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sem e com QMD

Quadro 2.3 – Variações verticais (Δz) máxima e mínima da topo-batimetria (erosão/acumulação: -/+), nos cinco transetos transversais e nos três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo durante 30 dias, sobre o fundo de 2018 e 2019, sem e com QMD. Assinalam-se com as cores cinzento e rosa os valores máximos de $|\Delta z|$ ocorridos nos anos 2018 e 2019, respetivamente

Transeto	Máximo Δz (m)				Mínimo Δz (m)			
	2018 sem QMD	2018 com QMD	2019 sem QMD	2019 com QMD	2018 sem QMD	2018 com QMD	2019 sem QMD	2019 com QMD
Eixo T + 315 m	0.899	0.662	1.131	2.004	-1.203	-1.201	-1.810	-1.977
Eixo T + 125 m	2.766	2.070	0.998	0.943	-0.690	-2.351	-1.618	-2.032
Eixo T	3.094	1.771	1.096	1.593	-0.912	-0.450	-1.885	-1.047
Eixo T – 125 m	3.197	1.714	3.192	3.126	-1.003	-1.781	-2.011	-1.777
Eixo T – 315 m	0.779	0.039	2.761	1.469	-1.369	-1.571	-1.214	-2.006
Eixo L + 100 m	1.184	1.801	0.669	1.187	-0.874	-0.887	-0.880	-1.203
Eixo L + 200 m	2.721	1.432	1.472	0.913	0.093	-1.255	-0.447	-1.934
Eixo L + 300 m	2.853	2.021	3.356	3.073	-0.105	-0.912	-0.115	-0.594

2.6 Conclusões

Na presente análise, que **complementa** a “análise do efeito do QMD na dinâmica sedimentar e morfologia adjacente”, desenvolvida no Relatório 8 do presente estudo (Oliveira *et al.*, 2021), concluiu-se:

- A comparação dos levantamentos topo-batimétricos de julho/2018, junho/2019 e junho/2020 demonstrou a elevada variabilidade morfológica que se observa na zona de implementação do QMD. A intensa dinâmica sedimentar resulta da incidência de um regime de agitação marítima multidirecional de elevada energia associado aos fatores estáticos de controle da

hidro-morfodinâmica local, que são a estrutura de defesa longitudinal aderente e o esporão da Vagueira.

- As **maiores diferenças** de elevação do fundo arenoso, da ordem de 5 m, verificaram-se entre os levantamentos topo-batimétricos de **2018 e 2019** (Figura 2.4). Por este motivo, avaliou-se a **evolução do fundo** de 2019, com e sem QMD, sob ação da onda mediana durante 30 dias, que se **comparou** com os resultados obtidos para condições análogas (com e sem QMD) em 2018, com o objetivo de conhecer o efeito da elevada variabilidade morfológica na evolução induzida pelo QMD na zona envolvente.
- **Validou-se** o modelo numérico de morfodinâmica Delft3D com dados observados no período de dois ciclos de maré no âmbito de uma campanha de campo efetuada no decorrer do presente estudo e concluiu-se que ocorreram **variações da elevação do fundo** na zona ativa da praia entre junho/2019 e outubro/2019, no prazo aproximado de **três meses**. Crê-se que estas alterações morfológicas são o principal fator responsável pelas diferenças entre os valores de Hs medidos e estimados (Figura 2.9 a Figura 2.16).
- À **semelhança do comportamento** verificado sobre a topo-batimetria de julho/2018, no caso da topo-batimetria de junho/2019, o QMD também favorece a formação de correntes de circulação e de gradientes de fundo, com potencial formação de canais em ambas as direções, transversal e longitudinal, na zona adjacente.
- Na ausência de QMD, a onda mediana causa assoreamento da zona entre o QMD e a linha de costa sobre ambas as topo-batimetrias, de julho/2018 e junho/2019. No entanto, este assoreamento é aproximadamente **simétrico** relativamente ao eixo transversal do QMD no primeiro caso, enquanto no segundo caso o **centro de gravidade** do assoreamento encontra-se **mais a sul**, entre o eixo transversal do QMD e o esporão da Vagueira.
- Tal como no caso da topo-batimetria de julho/2018, no caso da topo-batimetria de junho/2019 **o QMD também promove a formação de um saliente**. Os **focos** do assoreamento mantêm as **mesmas características** de localização verificadas na ausência de QMD, no entanto a **extensão** da zona de assoreamento **diminui**.

Em síntese, verifica-se que dada a **elevada variabilidade morfológica** observada na zona de estudo, a implementação do QMD favorece a geração de **elevados gradientes de fundo**, incluindo a geração de novos **canais** devidos às correntes divergentes, assim como a sua **mobilidade**, e **constrange** a formação de um **saliente estável** que permita um aumento permanente da largura de praia.

3 | Correntes litorais e evolução morfológica nos cenários de modelação física

3.1 Enquadramento

O objetivo que presidiu esta componente do estudo foi conhecer o efeito do QMD na zona adjacente à praia da Vagueira para a **topo-batimetria representativa** considerada na **modelação física**. Especificamente, conhecer as **correntes litorais**, os **fluxos sedimentares** e a **evolução morfológica** na vizinhança do QMD e dar apoio à modelação física. Como metodologia, utilizou-se o modelo numérico de morfodinâmica Delft3D.

Como condições de teste consideram-se: relativamente à hidrodinâmica, a onda mediana e o nível de mar constante, igual ao NMM; como condições de fundo, uma topo-batimetria simplificada, representativa da zona de estudo. Mediante as condições de escala do modelo reduzido, nomeadamente o limite da área de estudo abrangida, a máxima altura e a máxima obliquidade da onda incidente, serão testadas outras ondas, que permitam **melhorar a análise efetuada com o modelo físico**, quer através de um alargamento da gama de valores dos parâmetros de calibração sobre os quais exista elevada incerteza, quer através do teste de condições de onda extremas que não possam ser reproduzidas no modelo físico, por constrangimentos físicos ou de tempo de execução do estudo.

Analisa-se o efeito do QMD nos parâmetros H_s e componentes transversal e longitudinal, V_x e V_y , das correntes em redor da estrutura sob incidência da onda mediana. Complementarmente analisam-se os fluxos sedimentares e a evolução do fundo arenoso sob ação da onda mediana durante 30 dias, **com e sem QMD**, para avaliar o impacto da presença da estrutura na evolução morfológica nestas condições.

Assim, nas secções seguintes deste capítulo descrevem-se: as condições de teste de hidrodinâmica, topo-batimetria, sedimentologia e localização e dimensionamento do QMD; a metodologia aplicada; os resultados numéricos de altura significativa, correntes, fluxos sedimentares e evolução morfológica obtidos; e por último, as conclusões da análise efetuada.

3.2 Condições de teste

Como condições de **hidrodinâmica** consideraram-se:

- a) A incidência da onda mediana, com parâmetros estatísticos de caracterização $H_s=1,6$ m, $T_p=10,9$ s e $Dir=295^\circ N$, obtidos na fronteira mar da zona de estudo através da análise do regime de agitação marítima efetuada no âmbito deste estudo (ver Relatório 7: Freire *et al.*, 2020). Considerou-se a ação de espetros de ondas estacionárias para os casos de simulação.
- b) Nível do mar constante, igual ao NMM atual na praia da Vagueira, +2,17 m ZH, conforme descrito em Sancho *et al.* (2019).

Como condições de **topo-batimetria, sedimentologia e localização e dimensionamento do QMD** consideraram-se:

- c) Um fundo representativo de condições médias locais (Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3), baseadas nos três levantamentos topo-hidrográficos COSMO de julho 2018, junho 2019 e junho 2020.
- d) Diâmetro mediano, D_{50} , dos sedimentos do fundo igual a 0,2 mm, por se aproximar do valor de referência à profundidade de implantação do QMD, com base nos resultados da análise granulométrica das amostras superficiais efetuadas no âmbito do plano de monitorização, aquisição de dados e trabalho de campo, desenvolvido no presente estudo (ver Relatório 7 deste estudo: Freire *et al.*, 2020); e peso específico dos sedimentos igual a 2,65 kg/m³.
- e) QMD designado por B.c300d400, conforme nomenclatura adotada na componente de modelação matemática efetuada no âmbito deste estudo (ver Relatório 8: Oliveira *et al.*, 2020). Os parâmetros característicos de dimensionamento deste QMD têm os seguintes valores:
 - forma linear;
 - largura do coroamento, $B=10$ m;
 - bordo livre, R_c , 0,5 m abaixo do nível de baixa-mar de águas vivas média (BMAV=+0,84 m ZH), isto é, à cota $h_c=+0,34$ m ZH;
 - inclinação dos taludes de barlamar e sotamar, respetivamente, $\beta_b=1:10$, $\beta_s=1:2$;
 - distância entre o eixo transversal do QMD e o esporão Sul, $L_g=460$ m;
 - orientação do eixo longitudinal do QMD relativamente à linha de costa, $\phi=0^\circ$;
 - comprimento do QMD, $L_{qm}=300$ m;
 - distância à linha de costa, $L_d=400$ m.

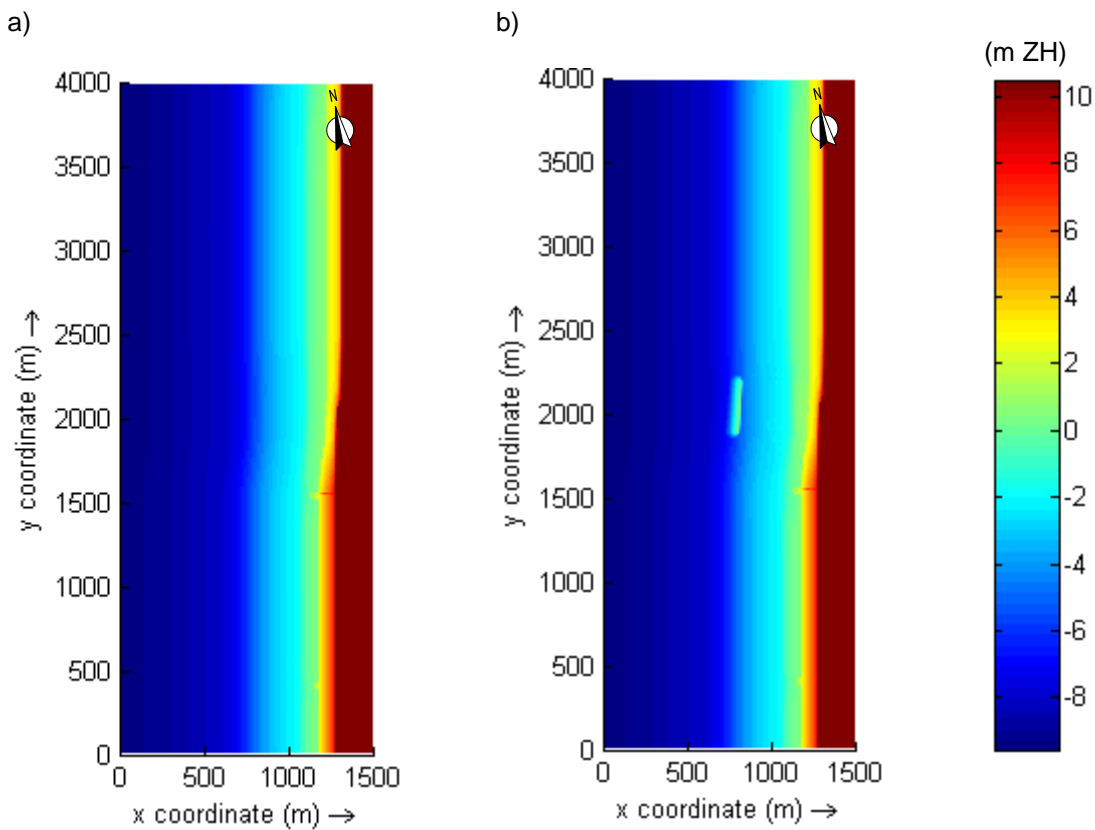


Figura 3.1 – Topo-batimetria inicial da zona de estudo: a) sem QMD e b) com QMD

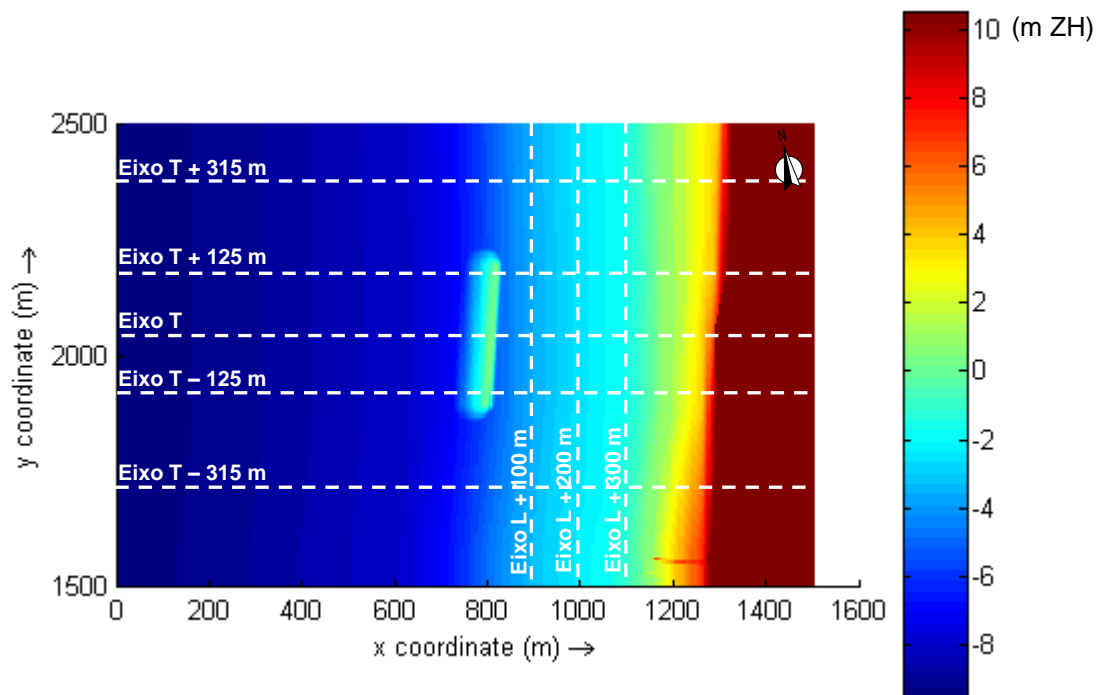


Figura 3.2 – Topo-batimetria inicial da zona envolvente do QMD. Localização dos cinco transetos transversais e dos três transetos longitudinais designados, de norte para sul e de oeste para este, respetivamente, por: Eixo T + 315 m, Eixo T + 125 m, Eixo T, Eixo T - 125 m, Eixo T - 315 m, Eixo L + 100 m, Eixo L + 200 m e Eixo L + 300 m

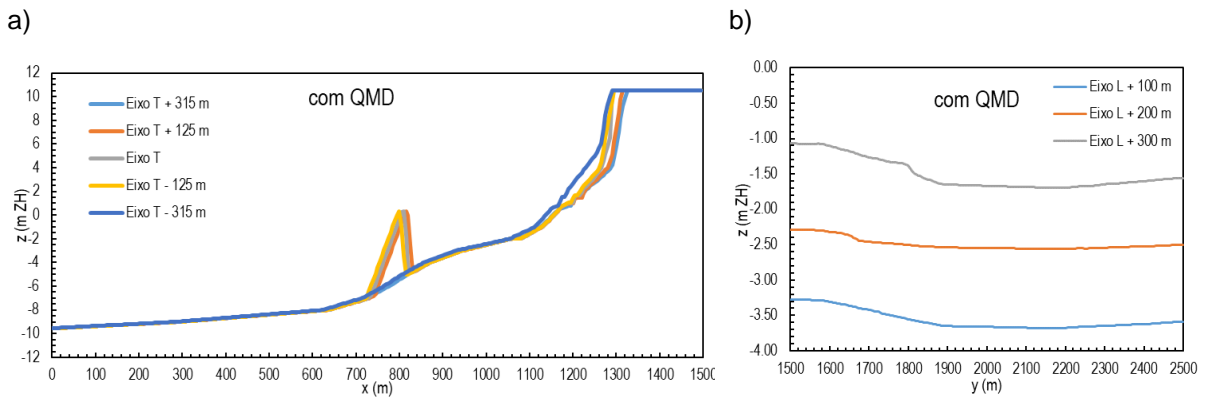


Figura 3.3 – Topo-batimetria inicial com QMD: a) nos cinco transetos transversais, Eixo T + 315 m, Eixo T + 125 m, Eixo T, Eixo T - 125 m e Eixo T - 315 m; e b) nos três transetos longitudinais, Eixo L + 100 m, Eixo L + 200 m e Eixo L + 300 m

3.3 Metodologia

Relativamente ao estabelecimento da **topo-batimetria** da frente marítima da Vagueira para **modelo físico**, aplicou-se um método que se descreve em detalhe no relatório (em curso) dedicado à modelação física realizada neste estudo. Em síntese, calcularam-se os quatros perfis, de P1 a P4, resultantes da análise dos perfis nas três datas, julho/2018, junho/2019 e junho/2020, procedendo da seguinte forma:

- para a batimetria, abaixo ZH: após exclusão do perfil P1, pelo facto de ser muito diferenciado dos perfis P2, P3 e P4, calculou-se o perfil médio;
- para a topografia, entre ZH e +4 m ZH, correspondente à face de praia: determinou-se o declive médio nas três datas, 2018, 2019 e 2020, para cada perfil, P1 a P4;
- para a topografia, entre +4 e +10 m ZH: considerou-se o declive da defesa aderente.

Entre estes perfis, P1 a P4, a topo-batimetria considerou-se a variar de forma linear, ou seja, a geometria do fundo abaixo do ZH é uniforme e a topografia, entre as cotas ZH e +4 m ZH, varia linearmente na direção longitudinal e tem um declive transversal uniforme que diminui de sul para norte, isto é, de P1 para P4. Nas Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3 apresenta-se a topo-batimetria utilizada no modelo físico sem e com QMD.

Relativamente ao modelo numérico de morfodinâmica aplicado, **Delft3D**, para estimar o efeito do QMD na zona adjacente à praia da Vagueira para a topo-batimetria representativa, a descrição é feita no ANEXO II do Relatório 8 (Oliveira *et al.*, 2020). Os fenómenos tidos em consideração e negligenciados pelo modelo com relevância especificamente nesta aplicação são comuns à aplicação efetuada na análise do efeito da variabilidade morfológica na resposta do QMD e encontram-se descritos na secção 2.4.1.

3.4 Resultados

3.4.1 Altura significativa e correntes

As simulações numéricas da hidrodinâmica na zona adjacente à implementação do QMD sob ação da onda mediana, para os casos sem e com QMD, mostram os seguintes resultados relativos à **altura de onda significativa, Hs**:

- A presença do QMD gera proteção da zona situada entre o QMD e a linha de costa relativamente à ação da onda incidente (Figura 3.4).
- Verifica-se que o QMD causa elevado empolamento de Hs sobre o talude barlamar, com consequente dissipação de energia, resultante da rebentação da onda devida à baixa profundidade do bordo livre, 1,83 m abaixo do NMM (2,17 m acima ZH). Este processo de transformação da onda na sua progressão em direção à linha de costa é visível ao longo dos três transetos transversais que intersejam o QMD, Eixo T + 215 m, Eixo T e Eixo T - 125 m (Figura 3.5).
- A área protegida entre o QMD e a linha de costa não é simétrica em relação ao eixo transversal do QMD. Este facto resulta da onda mediana ter uma obliquidade de 12° no sentido horário em relação à normal à linha de costa. Verifica-se que a zona a sul do Eixo T até ao esporão da praia da Vagueira se encontra mais protegida do que a zona espelho a norte do Eixo T (Figura 3.5).

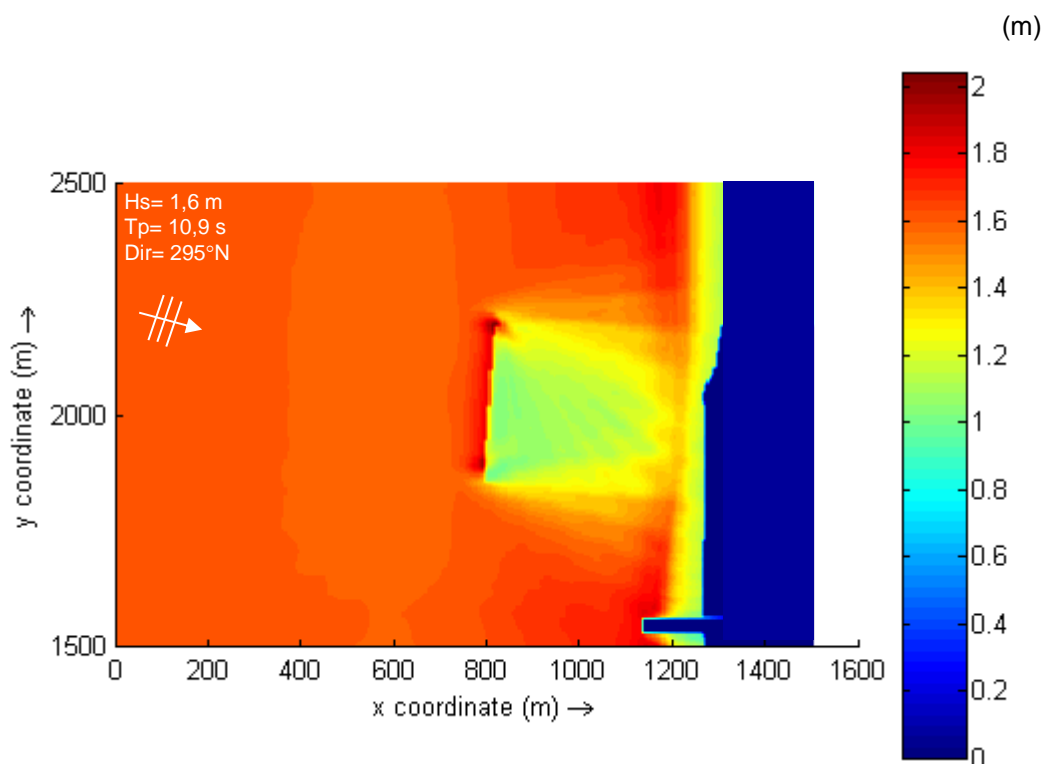


Figura 3.4 – Altura significativa da onda, Hs, na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na frente largo

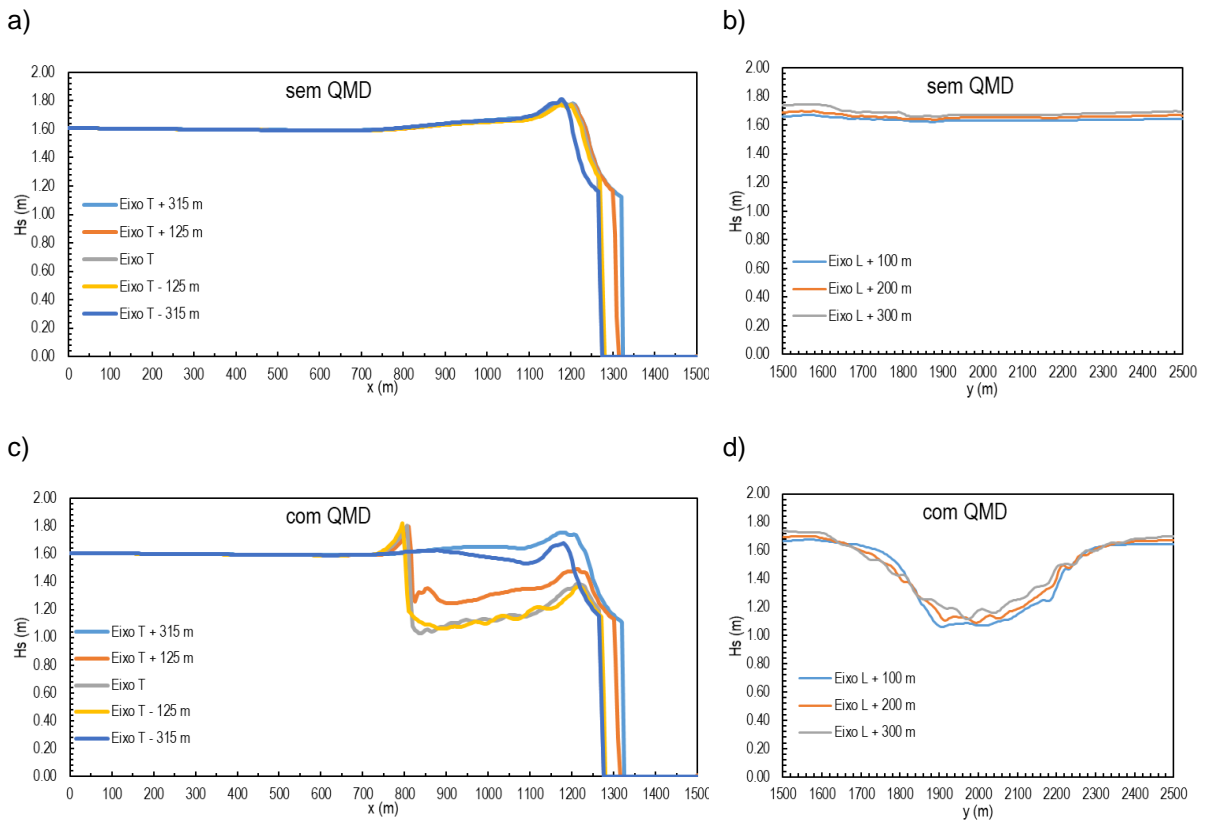


Figura 3.5 – Altura significativa da onda, H_s , nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

As simulações numéricas da hidrodinâmica na zona adjacente à implementação do QMD sob ação da onda mediana, para os casos sem e com QMD, mostram os seguintes resultados relativos à **velocidade média integrada na vertical**:

- Conforme esperado, a presença do QMD submerso induz um padrão de circulação bi-dimensional no plano horizontal na zona entre o eixo longitudinal do QMD e a linha de costa que se estende cerca de 1 km para além dos extremos do QMD. Estas correntes resultam do gradiente do nível do mar devido aos processos de transformação das ondas, principalmente à sobrelevação induzida pela rebentação e ao gradiente do escoamento longitudinal induzido pela obliquidade da onda. As ondas transpõem a estrutura e causam uma sobrelevação na zona de sombra imediatamente adjacente ao quebra-mar. Os gradientes de nível do mar que se geram induzem uma corrente paralela à estrutura em direção às extremidades da mesma, que são as correntes divergentes, as quais tendem a inverter em direção ao largo, sob ação dos gradientes de nível do mar nas extremidades da estrutura. Em resultado da combinação da corrente longitudinal induzida pelas ondas oblíquas com a corrente longitudinal divergente na zona de sombra, a corrente longitudinal é enfraquecida pela corrente divergente na zona a barlar e aumentada pela corrente divergente na zona a sotamar (Figura 3.6 e Figura 3.7).
- A componente x da velocidade média integrada na vertical, ou seja, a componente transversal da corrente, foi intensificada em redor da zona de implementação do QMD com a presença do mesmo, uma vez que não só se verificou um aumento da magnitude de V_x em direção ao largo

junto à linha de costa como também um aumento da magnitude de V_x em direção à costa sobre o coroamento do QMD, onde V_x atingiu valores máximos, cerca de 0,9 m/s, e na zona entre o QMD e a linha de costa (Figura 3.8).

- A componente y da velocidade média integrada na vertical, ou seja, a componente longitudinal da corrente evidencia a preponderância das correntes divergentes na zona de sombra do QMD que alcançam valores da ordem de grandeza de cerca de 0,5 m/s, sendo a magnitude superior a sul do eixo transversal do QMD, em cerca de 7%, uma vez que a corrente divergente é intensificada pela corrente longitudinal induzida pela onda, pelo facto de terem o mesmo sentido (Figura 3.9).

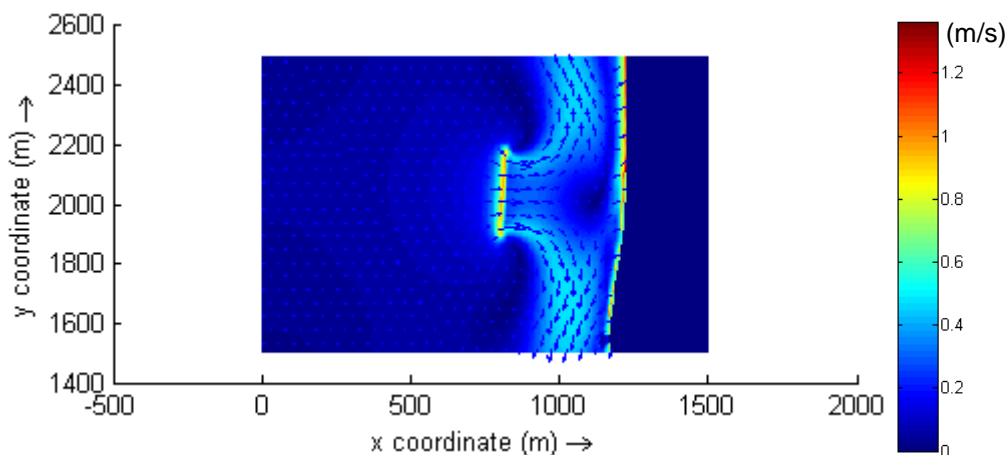


Figura 3.6 – Velocidade média integrada na vertical na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)

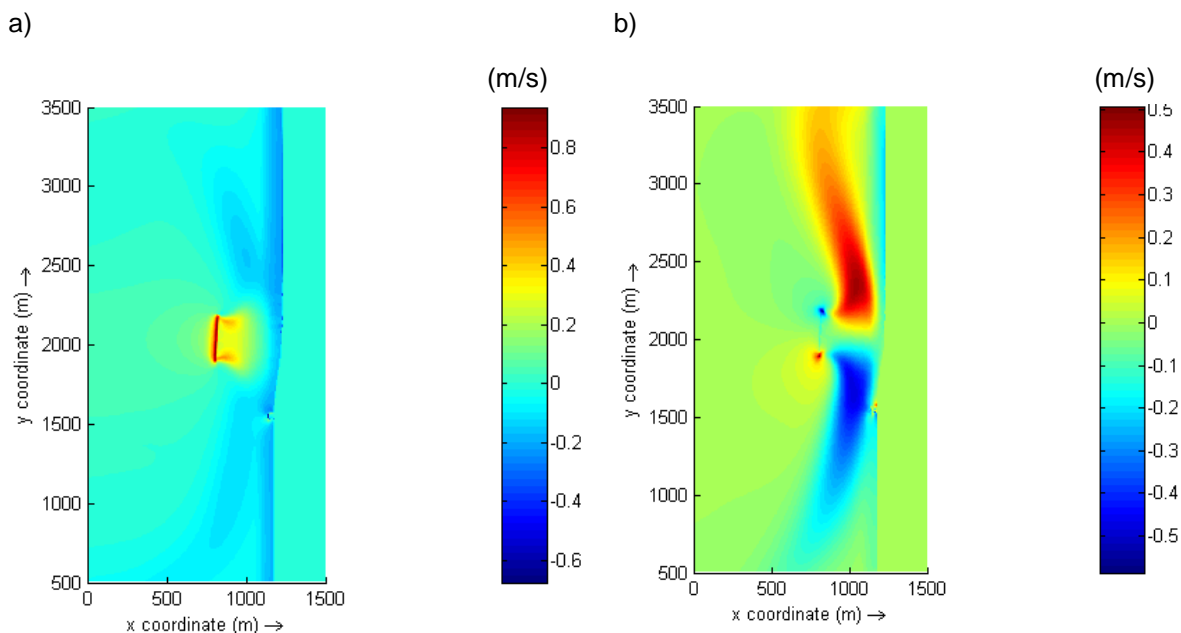


Figura 3.7 – Magnitude da velocidade média integrada na vertical, a) componente x e b) componente y , na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

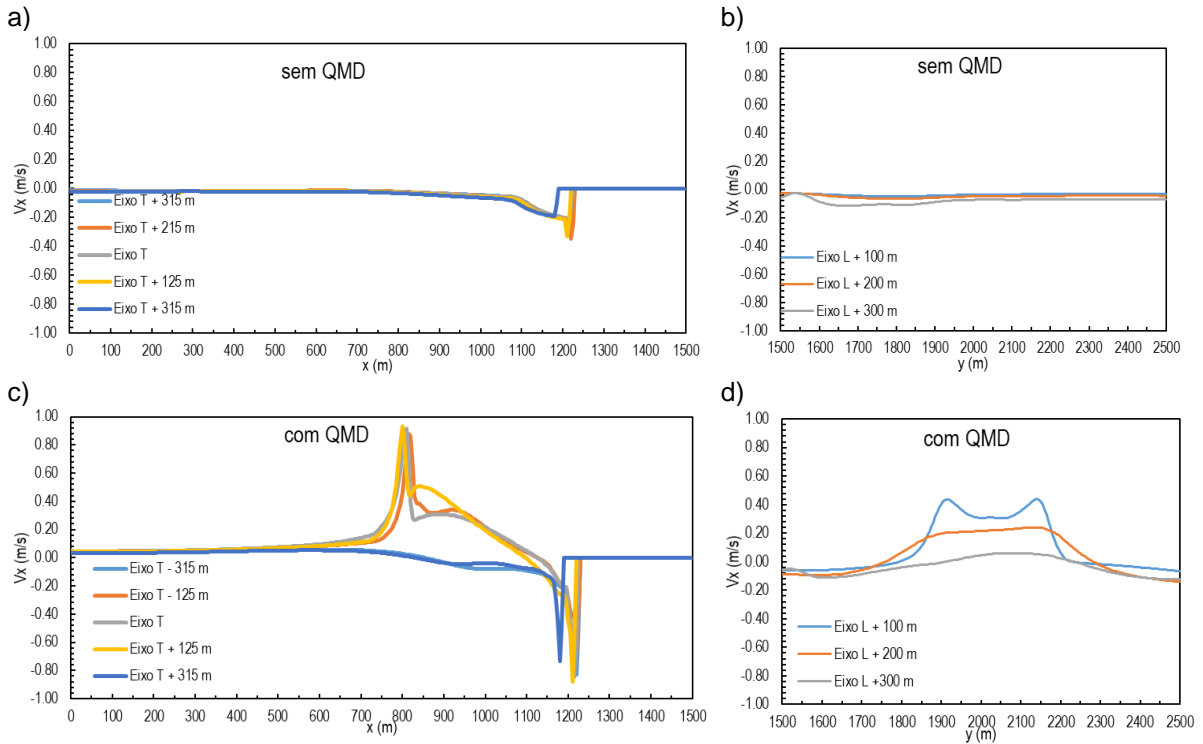


Figura 3.8 – Componente x da velocidade média integrada na vertical nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

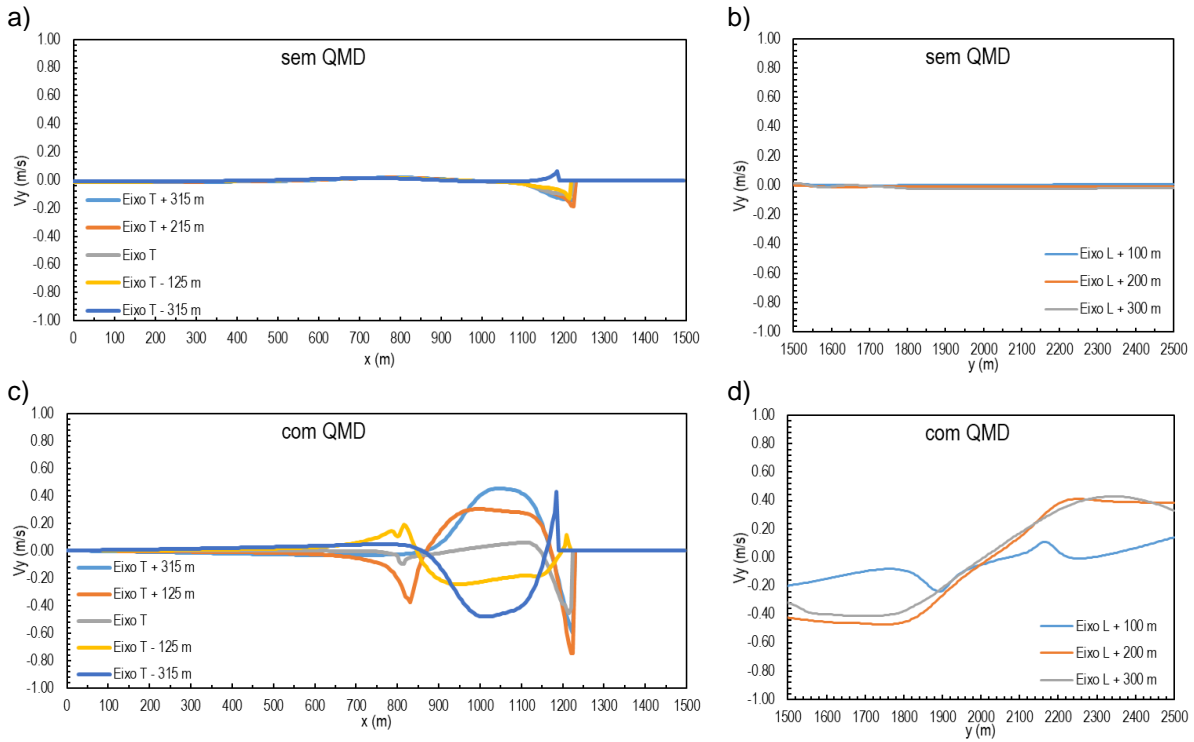


Figura 3.9 – Componente y da velocidade média integrada na vertical nos cinco transetos transversais e três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

3.4.2 Fluxos sedimentares e evolução morfológica

As simulações numéricas da **morfodinâmica** na zona adjacente à implementação do QMD sob ação da onda mediana durante 30 dias, para os casos sem e com QMD, mostram o seguinte:

- Os **fluxos sedimentares** ao fim de 30 dias de incidência da onda mediana evidenciam que o QMD promove a diminuição do transporte sedimentar junto à linha de costa na zona imediatamente adjacente a norte do esporão da Vagueira mas aumenta o transporte sedimentar dirigido para sul em frente ao esporão e a sul do mesmo (Figura 3.10 e Figura 3.11). Verifica-se que o padrão dos fluxos sedimentares é consentâneo com as correntes de circulação resultantes da combinação das correntes divergentes induzidas pelo QMD na zona de sombra com as correntes induzidas pela onda mediana fora desta zona.
- Na **ausência de QMD** a **evolução do fundo** caracteriza-se pela formação de uma barra longitudinal submersa ao longo de todo o domínio, mais robusta a norte do esporão da Vagueira, numa extensão longitudinal com cerca de 750 m, e ligeiramente menos robusta em frente e a sul do mesmo esporão, numa extensão longitudinal com cerca de 500 m. Estas características são visíveis ao fim de 15 dias de incidência da onda mediana e intensificam-se ao fim de 30 dias (Figura 3.12 e Figura 3.14).
- O **QMD** tem um **forte impacte** na **evolução morfológica** da zona de estudo. Durante 30 dias a onda mediana promoveu a acreção da praia submersa mais próximo da linha de costa do que na ausência de QMD. A formação deste saliente ocorreu simultaneamente com o robustecimento da barra longitudinal submersa a norte da extremidade norte do QMD, a cerca de 500 m. As correntes divergentes induzidas pelo QMD geram canais que se aprofundam com a continuidade da incidência da onda mediana. Estes canais alcançam uma extensão maior a sul da extremidade sul do que a norte da extremidade norte do QMD devido à intensificação das correntes divergentes com as correntes longitudinais (Figura 3.12, Figura 3.13 e Figura 3.15).

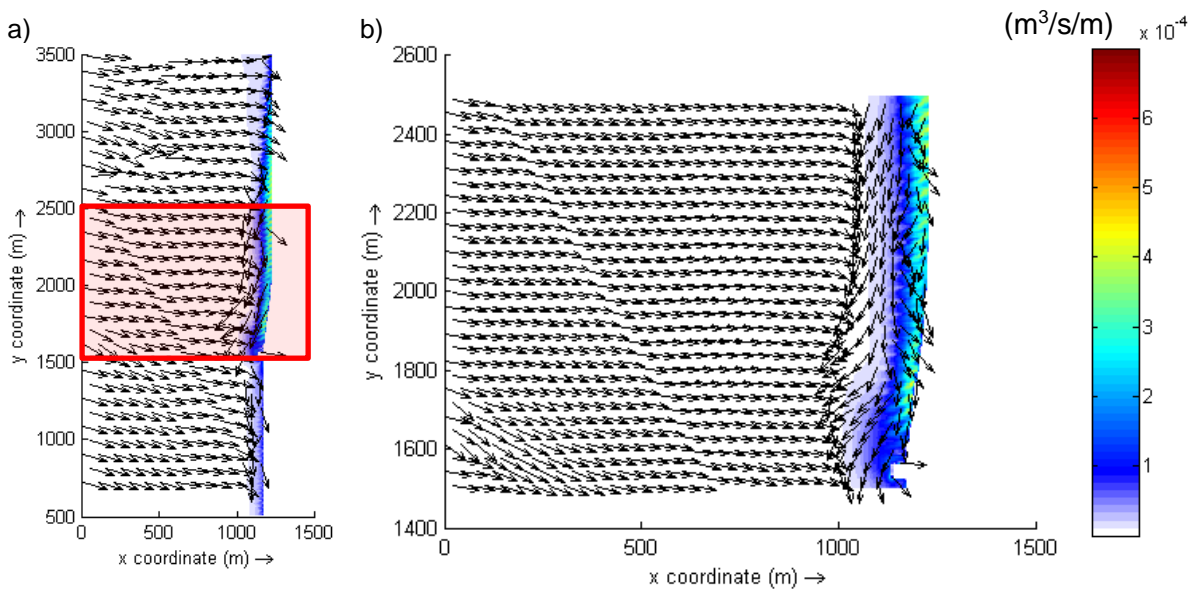


Figura 3.10 – Transporte total (suspensão e fundo) sem QMD a) na zona envolvente do QMD e b) em detalhe da zona, ao fim de 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)

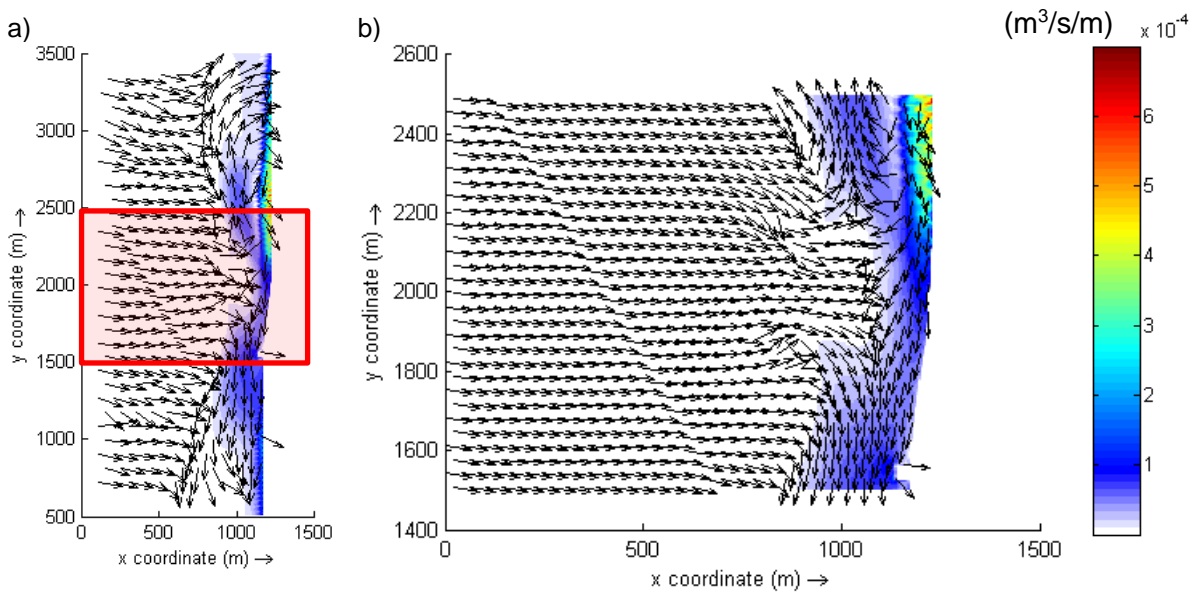


Figura 3.11 – Transporte total (suspensão e fundo) com QMD a) na zona envolvente do QMD e b) em detalhe da zona, ao fim de 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo: magnitude (escala de cor) e direção (vetor normalizado)

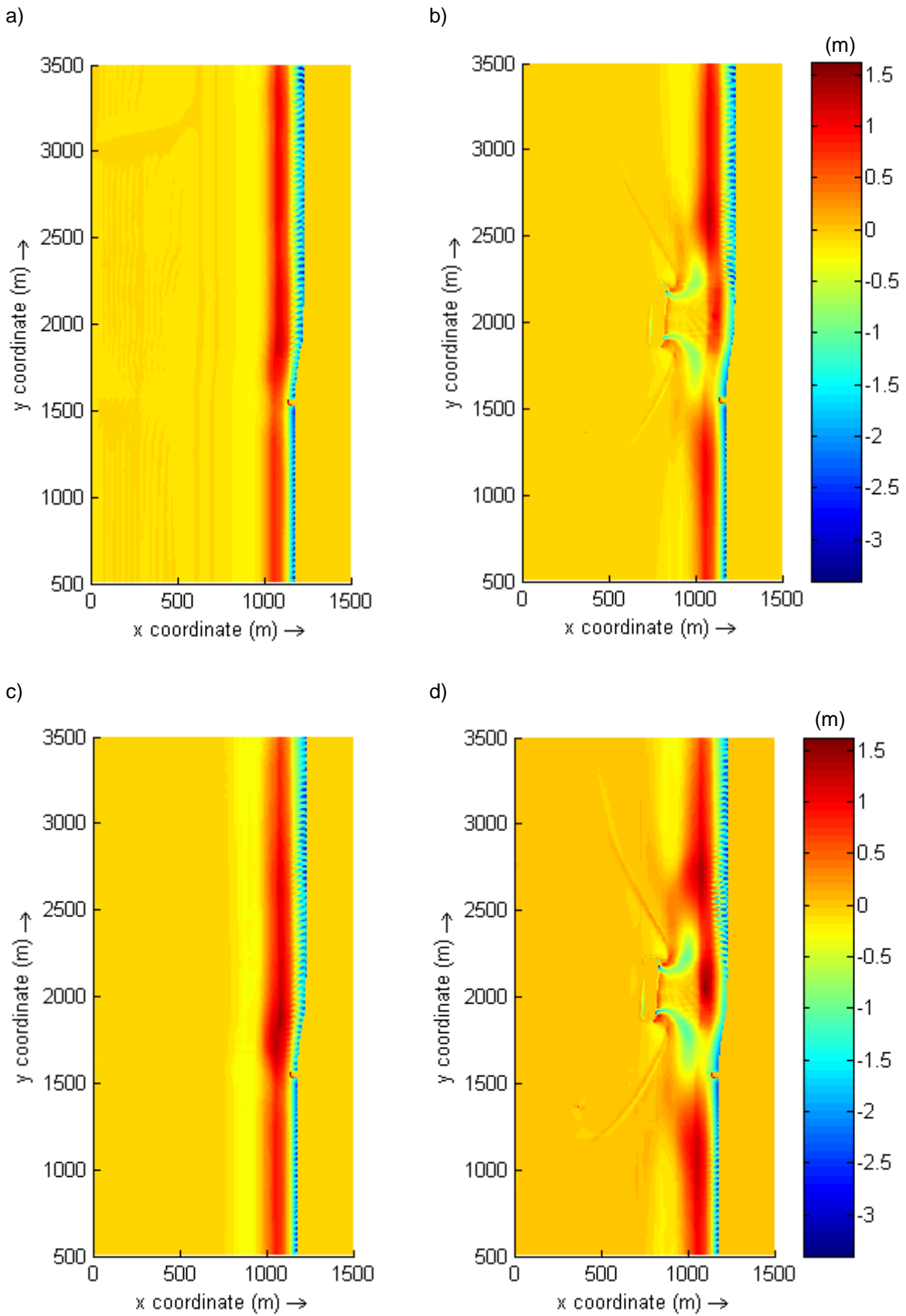


Figura 3.12 – Evolução morfológica (erosão < 0 ; acumulação > 0) na zona envolvente do QMD sob incidência da onda mediana na fronteira largo: ao fim de 15 dias a) sem QMD e b) com QMD; e ao fim de 30 dias c) sem QMD e d) com QMD

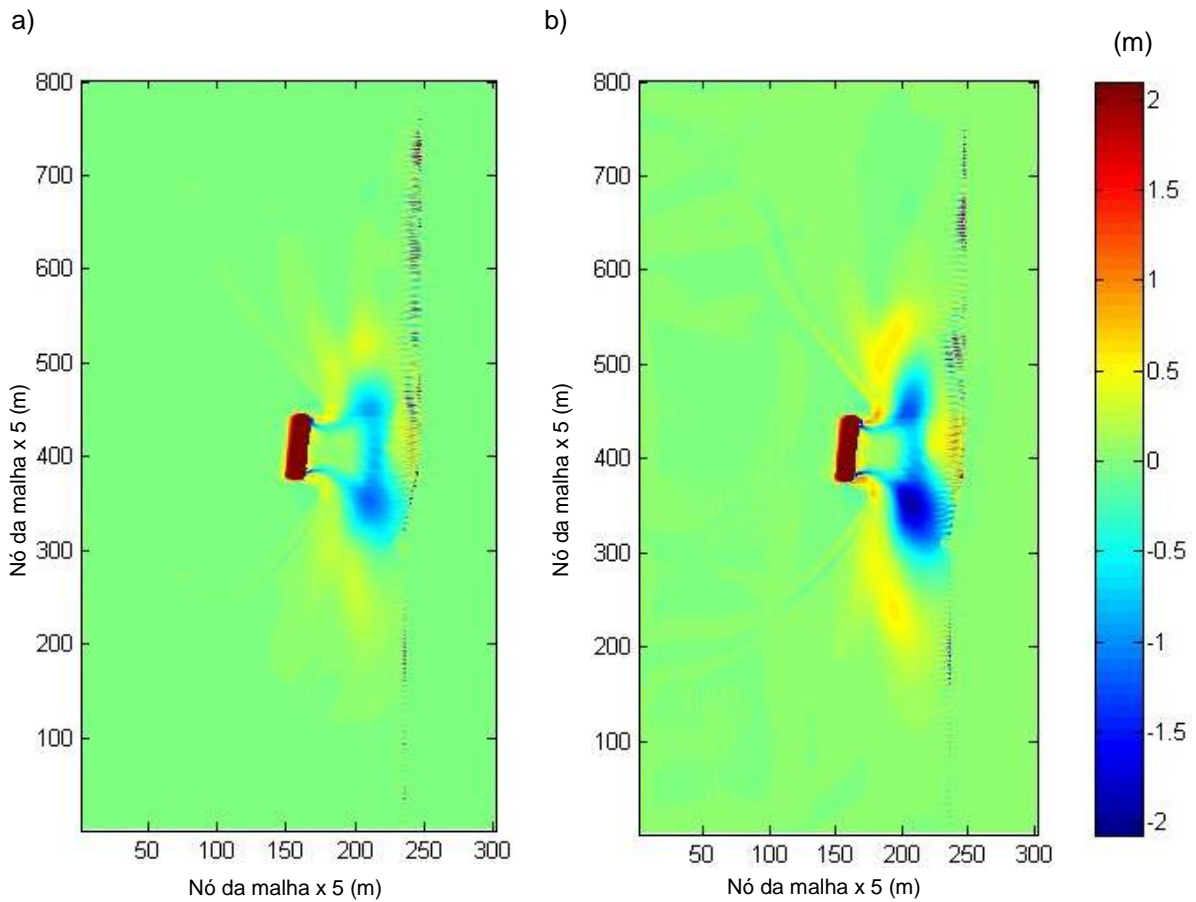
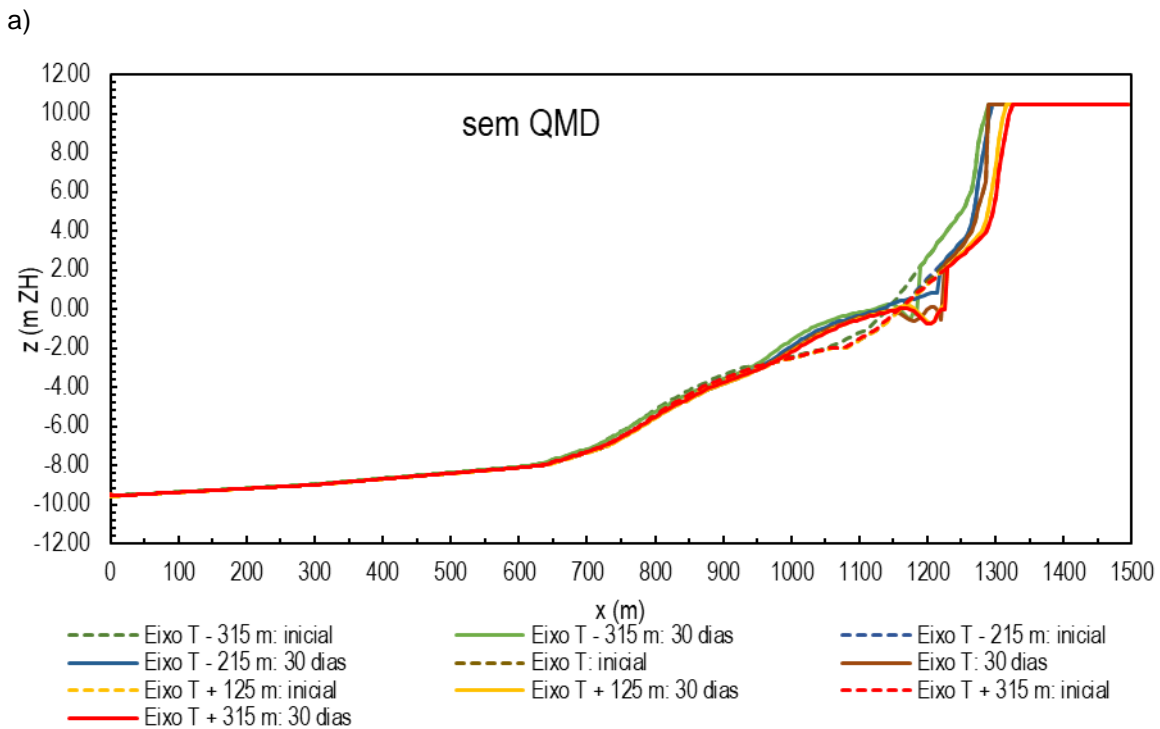


Figura 3.13 – Diferença entre a topo-batimetria com e sem QMD ao fim de a) 15 dias e b) 30 dias de incidência da onda mediana na fronteira largo



(continua)

b)

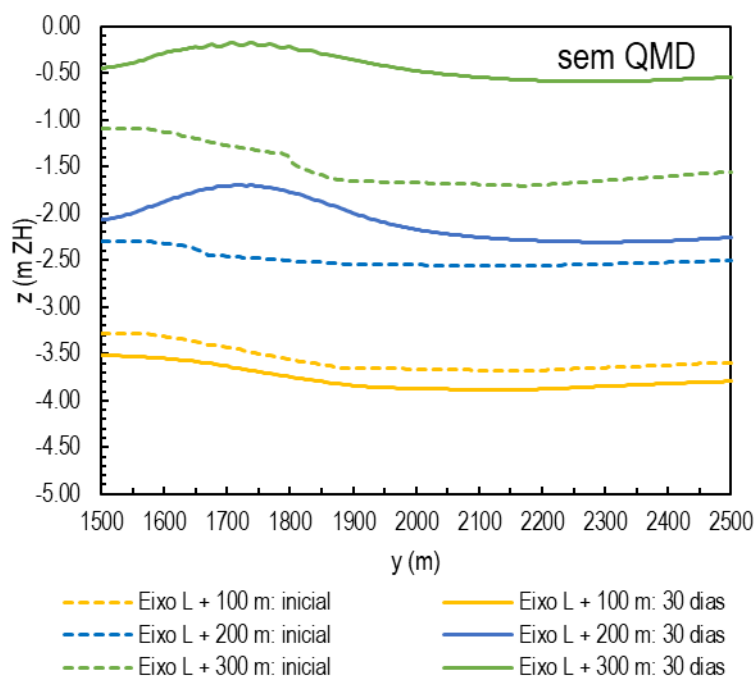
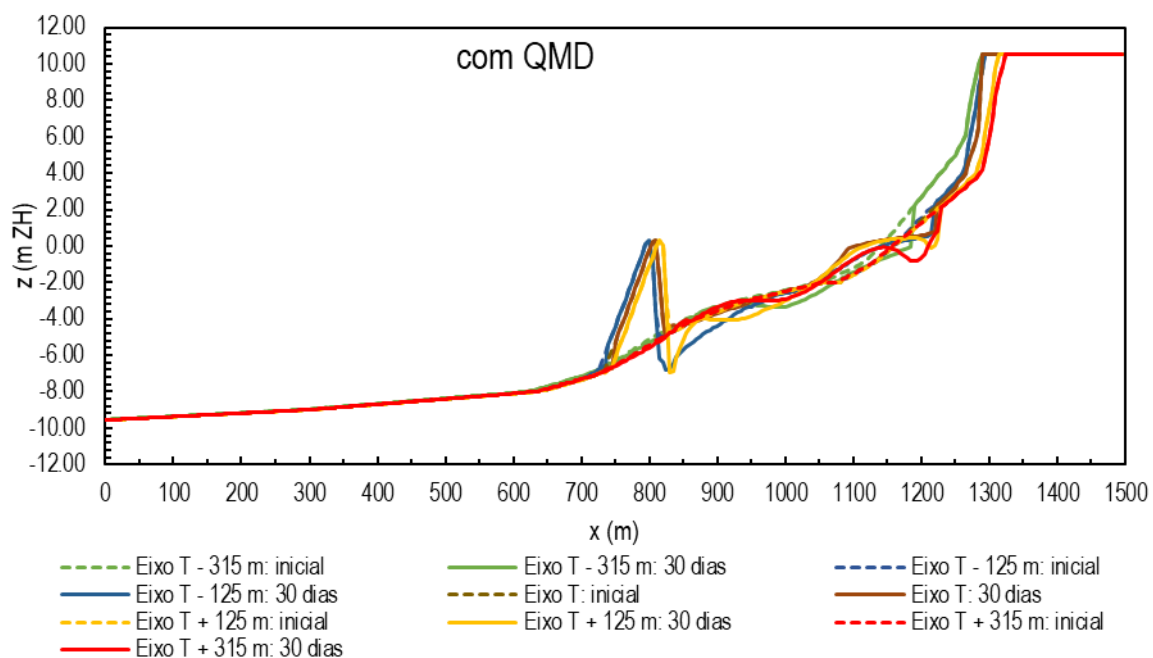


Figura 3.14 – Topo-batimetria inicial e ao fim de 30 dias nos a) cinco transetos transversais e b) três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD, sem QMD, para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

a)



(continua)

b)

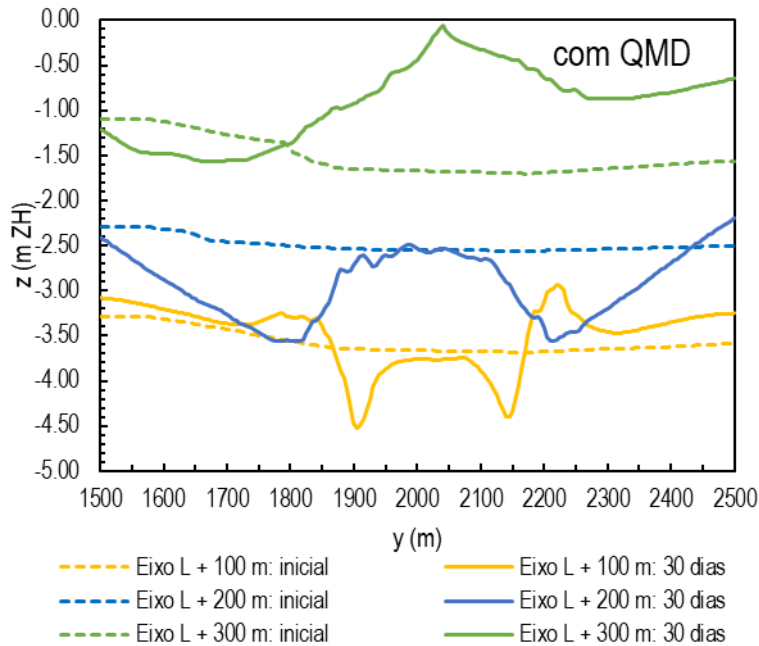


Figura 3.15 – Topo-batimetria inicial e ao fim de 30 dias nos a) cinco transetos transversais e b) três transetos longitudinais localizados na zona envolvente do QMD, com QMD, para condições de incidência da onda mediana na fronteira largo

3.5 Conclusões

Da presente análise, que visa apoiar o estudo em modelo físico, concluiu-se:

- Na progressão da onda mediana em direção à costa, verifica-se que a rebentação ocorre primeiramente sobre o bordo livre do QMD, que se encontra à profundidade 1,83 m abaixo do NMM (2,17 m acima ZH), aproximadamente a cerca de 400 m da linha de costa, e posteriormente junto à linha de costa. Assim, deduz-se que para ondas com altura superior, a presença do QMD gera proteção da zona situada entre o QMD e a linha de costa relativamente à ação da onda incidente.
- Uma vez que a zona de estudo está submetida à incidência de um regime de agitação marítima multidirecional espera-se que a zona protegida pelo QMD seja maioritariamente não simétrica relativamente ao eixo transversal do QMD. A zona a sul do eixo transversal será predominantemente mais protegida do que a zona a norte.
- A presença do QMD causa alterações muito significativas do padrão de circulação em frente à praia da Vagueira. Ela gera fortes correntes transversais sobre o QMD e junto à linha de costa, que no caso da onda mediana podem alcançar valores da ordem de 0,9 m/s (Figura 3.8). As correntes longitudinais aumentam significativamente em redor do QMD e entre ele e a linha de costa, para valores máximos da ordem de 0,5 m/s (Figura 3.9). Sob o ponto de vista da atividade balnear a magnitude destas correntes é significativa.

- A resposta morfológica do fundo arenoso à ação da onda mediana na presença do QMD é a formação de um saliente junto à linha de costa e de canais de erosão enraizados nas extremidades do QMD compatíveis com as correntes de circulação divergentes por ele geradas.

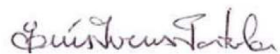
Em síntese, prevê-se que sob ação da onda mediana a topo-batimetria definida como representativa dos fundos da praia da Vagueira sofra alterações significativas quando o QMD é implementado. Prevê-se o surgimento de **canais de erosão divergentes**, enraizados nos extremos do QMD, que geram a fuga de sedimentos locais e o crescimento de um **saliente não simétrico** relativamente ao eixo transversal do QMD. Nestas condições, estima-se que os padrões de erosão-acumulação sejam mais distintos do que os previstos em condições de topo-batimetria real (levantamentos julho/2018 e junho/2019), pelo facto da batimetria inicial ser mais uniforme e, por isso, permitir um efeito mais destacado (menos difuso) dos mecanismos de resposta ao forçamento hidrodinâmico.

Por último, reitera-se que mediante os constrangimentos de escala do modelo reduzido em desenvolvimento, especificamente o limite da área de estudo abrangida, a máxima altura e a máxima obliquidade da onda incidente, serão testadas numericamente outras ondas e/ou outros valores de coeficientes de calibração sobre os quais exista elevada incerteza, que não possam ser reproduzidas no modelo reduzido por constrangimentos físicos ou de tempo, mas permitam melhorar a análise efetuada com modelo físico e robustecer as conclusões.

Lisboa, LNEC, junho de 2021

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Estuários e Zonas
Costeiras



Luís Ivens Portela

AUTORIA



Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira
Investigadora Auxiliar

A Diretora do Departamento de Hidráulica e
Ambiente



Helena Alegre

Referências bibliográficas

- BAPTISTA, P.R.; BARBOSA, J.P.; SILVA, P.A.; ANDRIOLO, U.; SANTOS, F.A.C.; CARVALHEIRO, L.C.O.; SANCHO, F., 2019 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T3) Monitorização, Aquisição de Dados e Trabalho de Campo: Instalação da Estação de Video-monitorização – Relatório 3.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 240/2019 – DHA/NEC.
- COSMO, 2019 – **Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental**, acessível em: <https://cosmo.apambiente.pt/> (último acesso 19.12.2019).
- FREIRE, P.; BAPTISTA, P.R.; CAPITÃO, R.; SANCHO, F.; FORTES, C.J.; NEVES, M.G.; PINHEIRO, L., 2020 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T1) Caracterização da Hidrodinâmica e da Variabilidade Morfo-sedimentar – Relatório 7.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 161/2020 – DHA/NEC.
- 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.
- SILVA, P.A.; BAPTISTA, P.R.; SANTOS, F.A.C.; SANCHO, F.; FREIRE, P., 2019 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T3) Monitorização, Aquisição de Dados e Trabalho de Campo: Descrição da Campanha – Relatório 5.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 450/2019 – DHA/NEC.
- SILVA, P.A.; BAPTISTA, P.R.; SANTOS, F.A.C.; SANCHO, F.; FREIRE, P., 2020 – **Estudo de Caracterização e Viabilidade de um Quebra-mar Destacado Multifuncional em Frente à Praia da Vagueira. (T3) Monitorização, Aquisição de Dados e Trabalho de Campo: Resultados da Campanha – Relatório 6.** LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 124/2020 – DHA/NEC.

