



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: Estabelecimento
do modelo físico – Relatório 12**



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: Estabelecimento
do modelo físico – Relatório 12**

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

Lisboa • dezembro 2021

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 408/2021 – 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

(T2) Estudos em modelo físico reduzido: Estabelecimento do modelo físico – Relatório 12

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

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

Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Luís Gabriel Silva

Técnico Superior, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas 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

Jan André Marques Hilário

Técnico Superior

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 408/2021

Proc. 0604/1201/21221

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

Resumo

Apresenta-se neste relatório o estabelecimento do modelo físico reduzido e as condições de ensaio referentes ao “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira”.

A escala selecionada, de 1:65, 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 do batedor de ondas e as condições de agitação marítima, tendo ainda em consideração a dimensão do sedimento a utilizar no fundo móvel. Face à elevada variabilidade da topo-batimetria em protótipo (Praia da Vagueira), adotou-se pela escolha de uma configuração de fundo, para reprodução em modelo físico, média das medidas.

Palavras-chave: Condições de agitação / Surf / Escala do modelo reduzido / Fundo móvel

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

(T2) Physical modelling studies: Physical model set-up – Report 12

Abstract

This report contains the small-scale physical model set-up, and test conditions, concerning the characterization and feasibility study for a multifunctional detached breakwater in front of Vagueira beach.

The selected laboratory model scale, 1:65, results from the conciliation between the wave basin dimensions, the extension of the modelling zone and detached breakwater, the characteristics and capacity of the wave maker, the wave conditions to reproduce, and the reduced-scale sediment size (determined from the sediment scaling law). Attending the high variability of the prototype bottom morphology, it was adopted a representative, averaged, bottom configuration, for the physical model set-up.

Keywords: Wave conditions / Surf / Physical model scale / Mobile bed

Índice

1	Introdução	1
1.1	Âmbito e objetivos.....	1
1.2	Tarefas previstas, enquadramento e organização do relatório	1
2	Condições do protótipo	3
2.1	Configuração da zona de estudo e batimetria para o modelo físico	3
2.2	Configuração preliminar do quebra-mar destacado	8
2.3	Condições e dados <i>in situ</i>	10
2.3.1	Agitação marítima relevante para o transporte sedimentar.....	10
2.3.2	Agitação marítima relevante para o <i>surf</i>	12
2.3.3	Agitação marítima para aferição de coeficientes de transmissão	12
2.3.4	Características dos sedimentos.....	13
3	Modelo físico reduzido e condições e metodologia de ensaio	14
3.1	Considerações gerais	14
3.2	Escalas do modelo.....	16
3.2.1	Condições de semelhança hidrodinâmica	16
3.2.2	Condições de semelhança sedimentar.....	17
3.3	Condições de ensaio	19
3.4	Métodos e resultados a obter	20
4	Considerações finais	22
	Referências bibliográficas	24

Índice de figuras

Figura 2.1 – Localização da zona de estudo, com esquema indicativo e dimensões características do QMD a ensaiar em modelo físico reduzido.....	3
Figura 2.2 – Geometria de um QMD com comprimento, L_{qm} , igual a 300 m e distância à linha de costa, L_d , igual a 400 m, sobre a batimetria de julho de 2018 (COSMO), em frente à Praia da Vagueira.....	4
Figura 2.3 – Batimetrias da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4: a) julho de 2018; b) junho de 2019; c) junho de 2020	5
Figura 2.4 – Perfis transversais P1 a P4 em 2018, 2019 e 2020 e resultantes da média das três datas.....	6
Figura 2.5 – Perfil médio abaixo do ZH resultante da média dos perfis P2, P3 e P4 médios	6
Figura 2.6 – Perfis médios P1 a P4 considerados no modelo físico.....	7
Figura 2.7 – Topo-batimetrias utilizadas para reprodução no modelo físico: a) sem QMD, b) com QMD.....	8
Figura 2.8 – Esquema representativo da solução preliminar, a ensaiar em modelo físico: a) vista em planta (L_{sz} =largura da zona de rebentação); b) vista no plano vertical do corte ao longo do eixo transversal do QMD	9
Figura 2.9 – Distribuição conjunta de (a) H_s - T_p e (b) H_s - D_{irm} no ponto P3	11
Figura 3.1 – Vista geral do tanque de ondas com modelo físico construído, sem implementação do QMD.....	14
Figura 3.2 – a) Vista global do QMD implantado no tanque de ondas (a laranja o talude exterior e a verde a crista e talude interior); b) vista de uma peça da construção do QMD, do talude a barlar.....	15
Figura 3.3 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD	17
Figura 3.4 – Curvas granulométricas de 3 amostras do sedimento usado no modelo reduzido.....	18

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Declive dos perfis topográficos P1 a P4, entre as cotas ZH e 4 m ZH, considerados no modelo físico	7
Quadro 2.2 – Valores dos parâmetros preliminares característicos de dimensionamento do QMD da Praia da Vagueira	9
Quadro 2.3 – Estatísticas das séries totais de Hs, Tp, Dirp, Tm e Dirm, no ponto P3, em frente à Praia da Vagueira (adaptado de Relatório 7, Freire <i>et al.</i> , 2020)	11
Quadro 2.4 – Números de Iribarren e declividade das condições de agitação propícias para o <i>surf</i> ...	12
Quadro 3.1 – Escalas no modelo físico.....	17
Quadro 3.2 – Condições de agitação previstas para os ensaios (à escala do protótipo e <i>reduzida</i>)....	20

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 inundações costeiras 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, enquadramento e organização do relatório

De forma a atingir os objetivos, 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 QMD na redução dos galgamentos e diminuição do risco para a população
 - T1.b) Efeito do QMD na promoção de um acréscimo da praia e na dinâmica sedimentar em geral

- T1.c) Efeito do QMD nas correntes litorais
- T1.d) Hidrodinâmica das ondas em torno do QMD para os desportos de deslize
- c) T2 – Estudos em modelo físico reduzido;
 - T2.a) Efeito do QMD na dinâmica sedimentar próxima
 - T2.b) Otimização da solução de QMD 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 Tarefa T2, relativa aos estudos em modelo físico reduzido.

Neste relatório intercalar apresentam-se, primeiramente, as condições em protótipo a simular em modelo reduzido. Estas resultam dos trabalhos anteriormente efetuados nas tarefas 1 e 3. Posteriormente, caracteriza-se o modelo físico e ensaios a realizar, cujos resultados serão objeto de análise e apresentados noutra relatório.

2 | Condições do protótipo

2.1 Configuração da zona de estudo e batimetria para o modelo físico

A zona de estudo é, genericamente, a apresentada na Figura 2.1, onde é visível a configuração da Praia da Vagueira em 18/06/2018, com as obras de defesa costeira existentes. Sobre esta imagem, sobrepôs-se ainda um esquema de um QMD, com as características pormenorizadas na secção seguinte: comprimento (L_{qm}) igual a 300 m, distância à linha PMAV (L_d) igual a 400 m e eixo transversal distanciada 460 m do esporão da Vagueira. Ou seja, este esquema reflete a configuração do QMD a analisar em profundidade e que será objeto de construção do modelo físico.

Face às dimensões do QMD e da frente da Praia da Vagueira, além dos resultados da modelação matemática já efetuados (Relatório 8, Oliveira *et al.*, 2020), a extensão longitudinal de praia a modelar é da ordem de 1000 m, conforme indicado na Figura 2.1. Na extensão transversal, o domínio de interesse será da ordem de 800 m, ou até à profundidade de 12 m (ZH). A geometria deste QMD sobre a batimetria de julho de 2018 (COSMO) é representada na Figura 2.2.

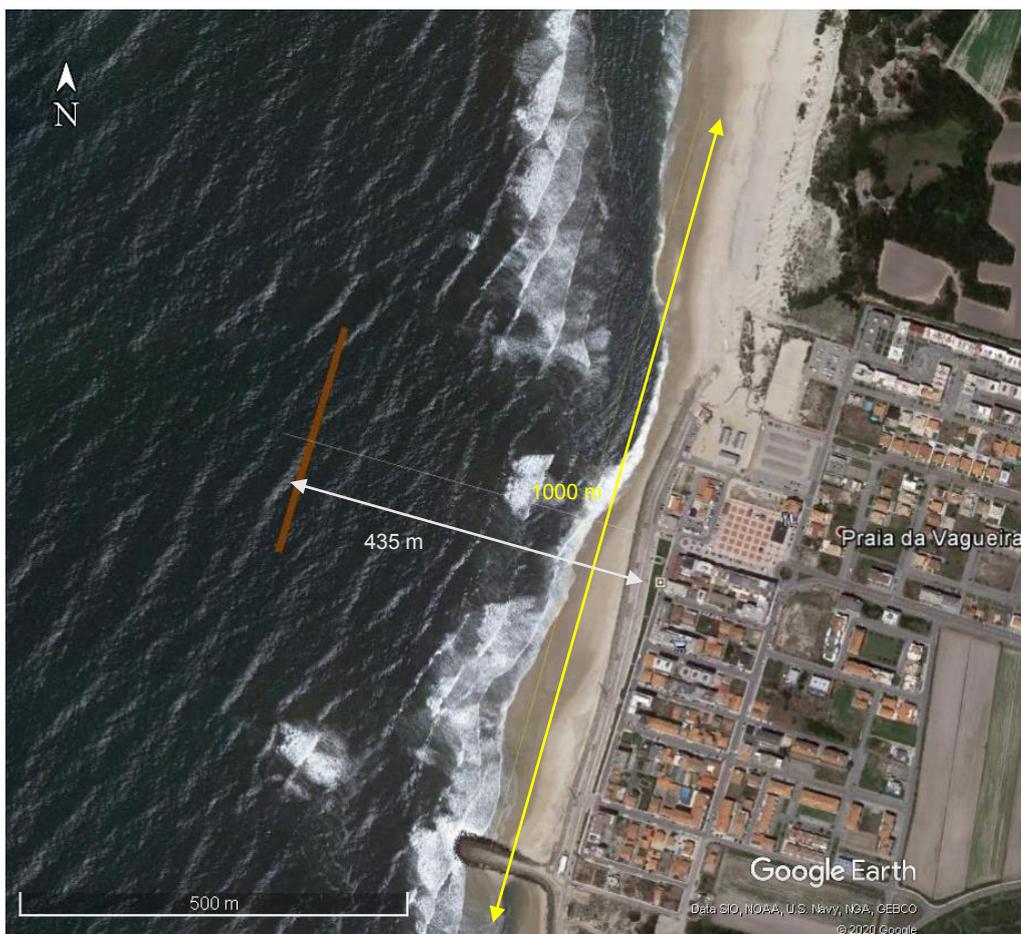


Figura 2.1 – Localização da zona de estudo, com esquema indicativo e dimensões características do QMD a ensaiar em modelo físico reduzido

Uma extensão mais vasta da área marítima adjacente à Praia da Vagueira, com 1500 m de extensão, com indicação dos fundos em julho de 2018, junho de 2019 e junho de 2020, é representada na Figura 2.3. Relativamente aos dois levantamentos mais recentes, o QMD ficaria situado entre as batimétricas -5 e -6 m (ZH), ou seja, ligeiramente a barlar da barra longitudinal situada entre as cotas -1 e -3 m (ZH) em julho de 2018. A análise comparativa destes dados permite ainda concluir que se verificaram acentuadas variações morfológicas acima da cota -8 m ZH, na zona onde se pretende implementar o QMD.

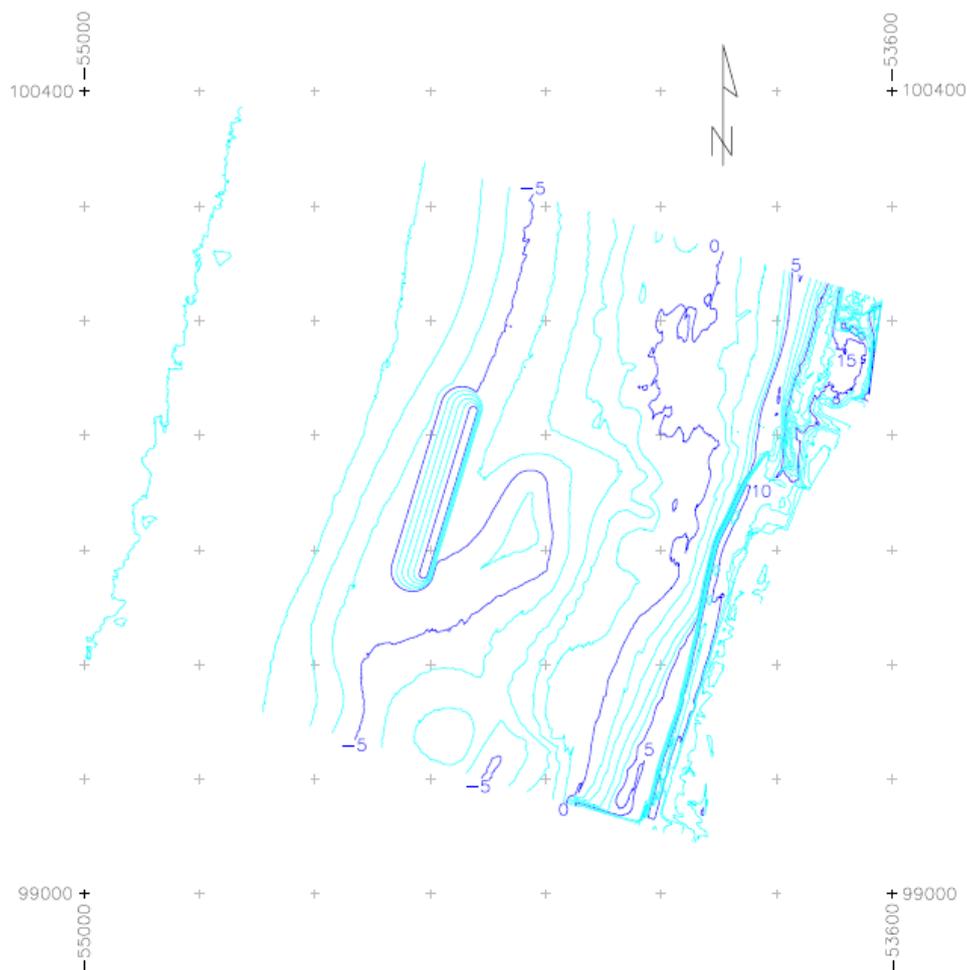


Figura 2.2 – Geometria de um QMD com comprimento, L_{qm} , igual a 300 m e distância à linha de costa, L_d , igual a 400 m, sobre a batimetria de julho de 2018 (COSMO), em frente à Praia da Vagueira

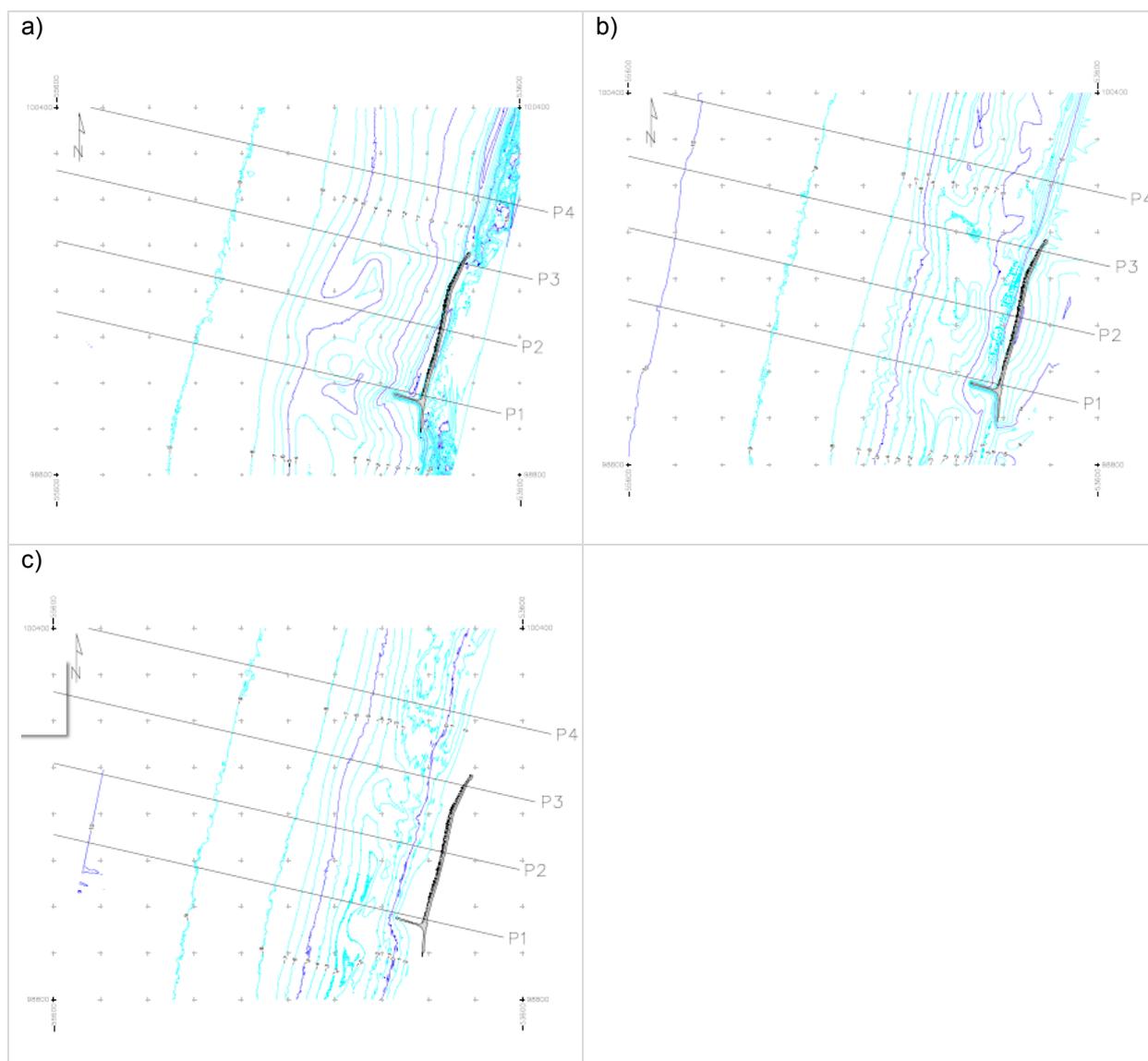


Figura 2.3 – Batimetrias da frente marítima e zona adjacente à Praia da Vagueira e localização dos perfis P1 a P4: a) julho de 2018; b) junho de 2019; c) junho de 2020

Para a topo-batimetria da frente marítima da Vagueira no modelo físico, considerou-se um fundo representativo de condições médias locais. O método utilizado para a sua determinação baseou-se na execução das seguintes etapas:

- a) elaboração de um modelo digital de terreno (MDT) a partir de cada levantamento topo-batimétrico, com recurso ao software AutoCAD Raster Design 2016;
- b) extração de quatro perfis transversais, designados por P1 a P4, equidistantes 300 m, sendo a localização do P1 imediatamente a norte do esporão da Vagueira e a dos restantes a norte deste (assinalados na Figura 2.3);
- c) cálculo de quatro perfis médios, P1 a P4, resultantes da média dos perfis nas três datas, 2018, 2019 e 2020 (Figura 2.4);

- d) para a batimetria, abaixo do ZH: exclusão do perfil P1, pelo facto de ser muito diferenciado dos perfis P2, P3 e P4, e posterior cálculo do perfil médio (Figura 2.5);
- e) para a topografia, entre ZH e 4 m ZH: determinação do declive médio nas três datas, 2018, 2019 e 2020, para cada perfil, P1 a P4 (Quadro 2.1);
- f) para a topografia, entre 4 e 10 m ZH: declive da defesa aderente (aproximadamente 1V:4H);
- g) reconstrução dos quatro perfis representativos, P1 a P4, conjugando o perfil médio global obtido em (d) abaixo do ZH, o declive médio do respetivo perfil (alínea e) entre ZH e 4 m ZH, e o declive da defesa aderente entre 4 e 10 m ZH.

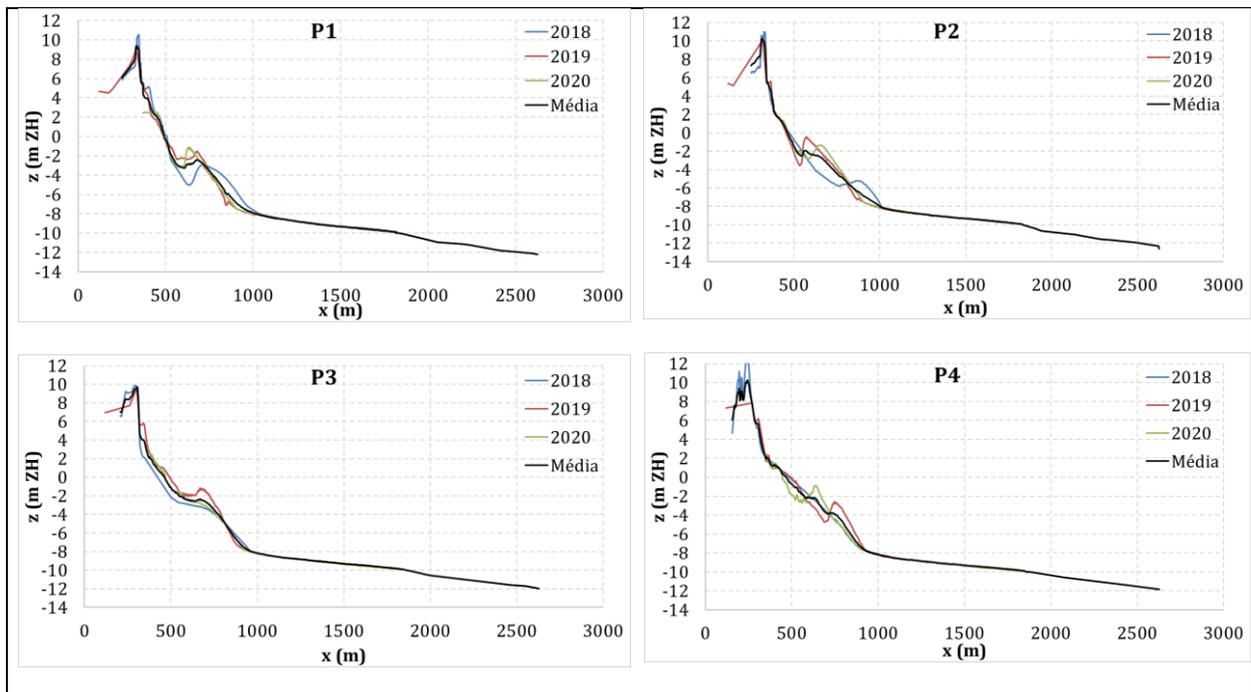


Figura 2.4 – Perfis transversais P1 a P4 em 2018, 2019 e 2020 e resultantes da média das três datas

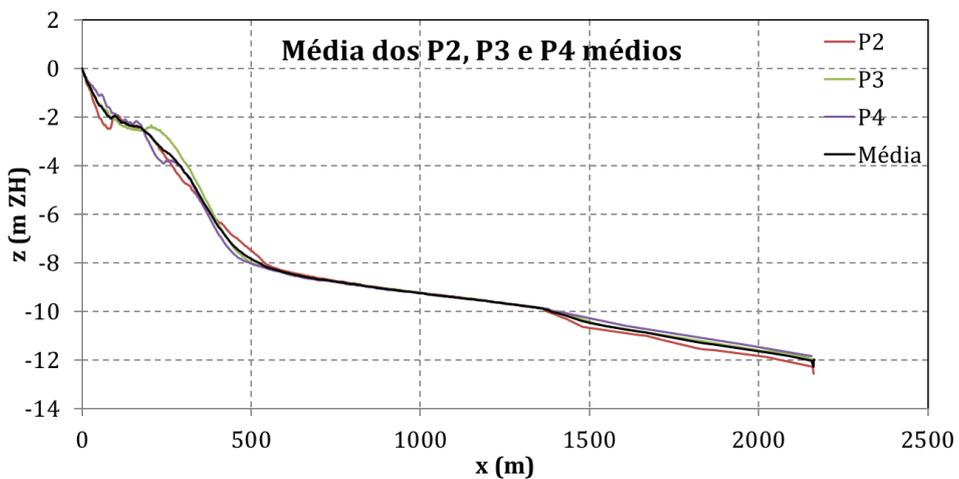
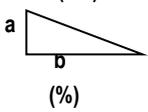


Figura 2.5 – Perfil médio abaixo do ZH resultante da média dos perfis P2, P3 e P4 médios

Quadro 2.1 – Declive dos perfis topográficos P1 a P4, entre as cotas ZH e 4 m ZH, considerados no modelo físico

Perfil	Declive (a/b)
	 (%)
P1	5,4
P2	3,8
P3	3,2
P4	2,8

Da aplicação desta metodologia resultaram os perfis P1 a P4 que se apresentam na Figura 2.6 e foram considerados no modelo físico. Entre perfis, a topo-batimetria considera-se variar (longitudinalmente) linearmente, 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. Na Figura 2.7 apresentam-se plantas das topo-batimetrias utilizada no modelo físico, sem e com QMD.

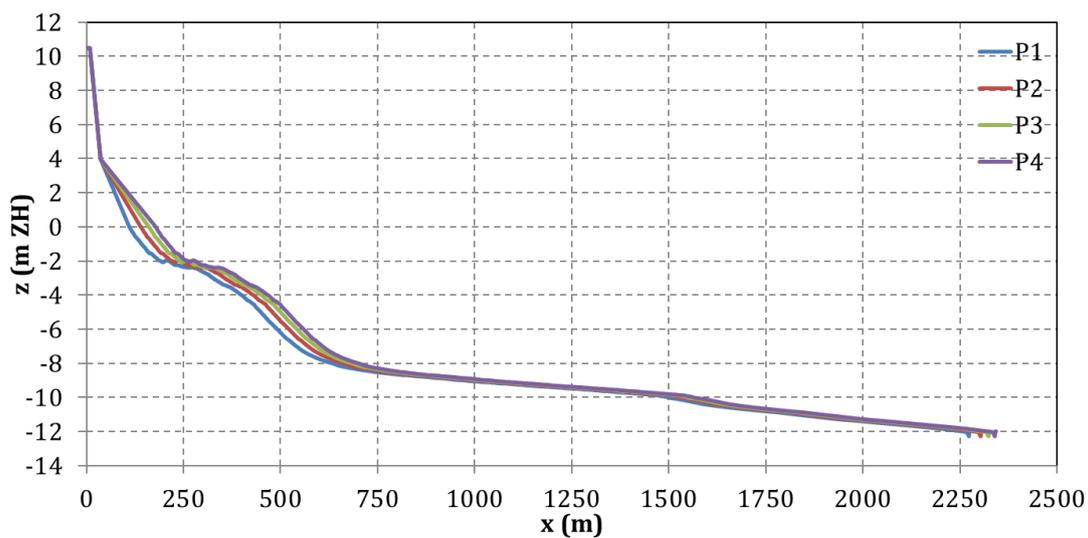


Figura 2.6 – Perfis médios P1 a P4 considerados no modelo físico

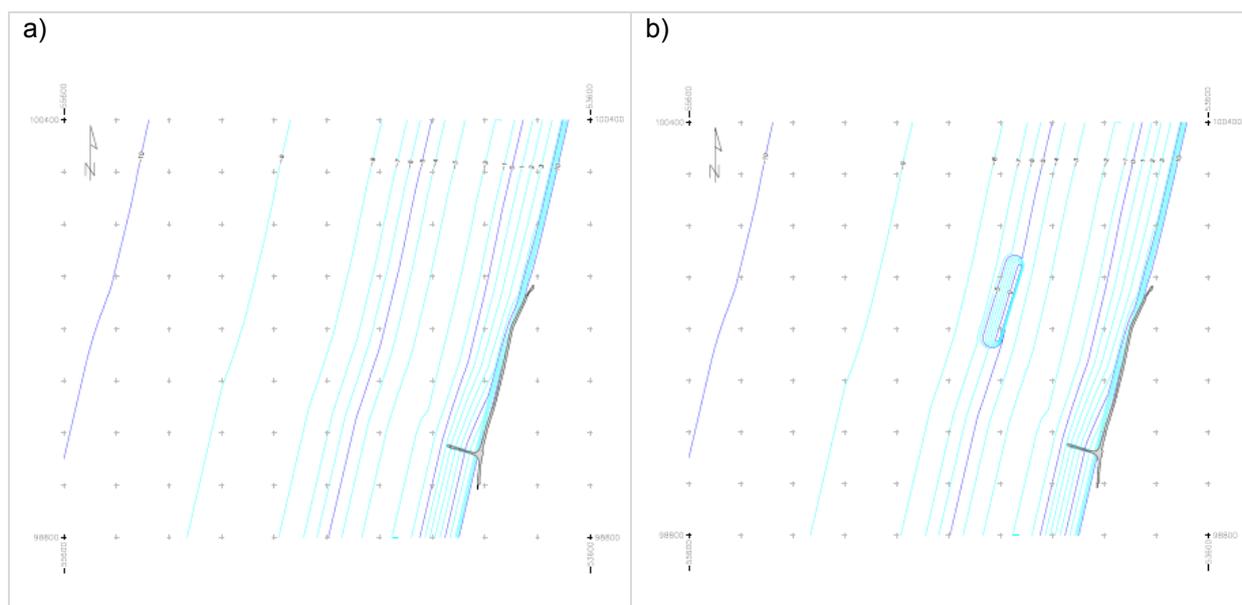


Figura 2.7 – Topo-batimetrias utilizadas para reprodução no modelo físico: a) sem QMD, b) com QMD

2.2 Configuração preliminar do quebra-mar destacado

Nas fases anteriores à presente, que envolveram estudos de modelação matemática, estabeleceu-se a solução mais promissora para a configuração do QMD, de forma a cumprir os objetivos de redução do risco de galgamento costeiro na Praia da Vagueira e de promoção de acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente (Relatório 8, Oliveira *et al.*, 2020). A referida solução é caracterizada por um **QMD com comprimento (L_{qm}) igual a 300 m, distanciada 400 m da linha de costa¹ ($L_c=400$ m)**, de forma linear e paralelo à costa. Apresenta-se na Figura 2.8 um esquema ilustrativo da configuração em planta e em perfil, com referência ao esporão da Vagueira e outras linhas convencionadas.

No Quadro 2.2 apresentam-se os valores preliminares, em protótipo, dos parâmetros do QMD a ensaiar em modelo físico.

¹ Neste contexto, a **linha de costa** foi definida ao nível médio do mar, NMM=+2,17 m (ZH) (vide Relatório 4, Sancho *et al.*, 2019).

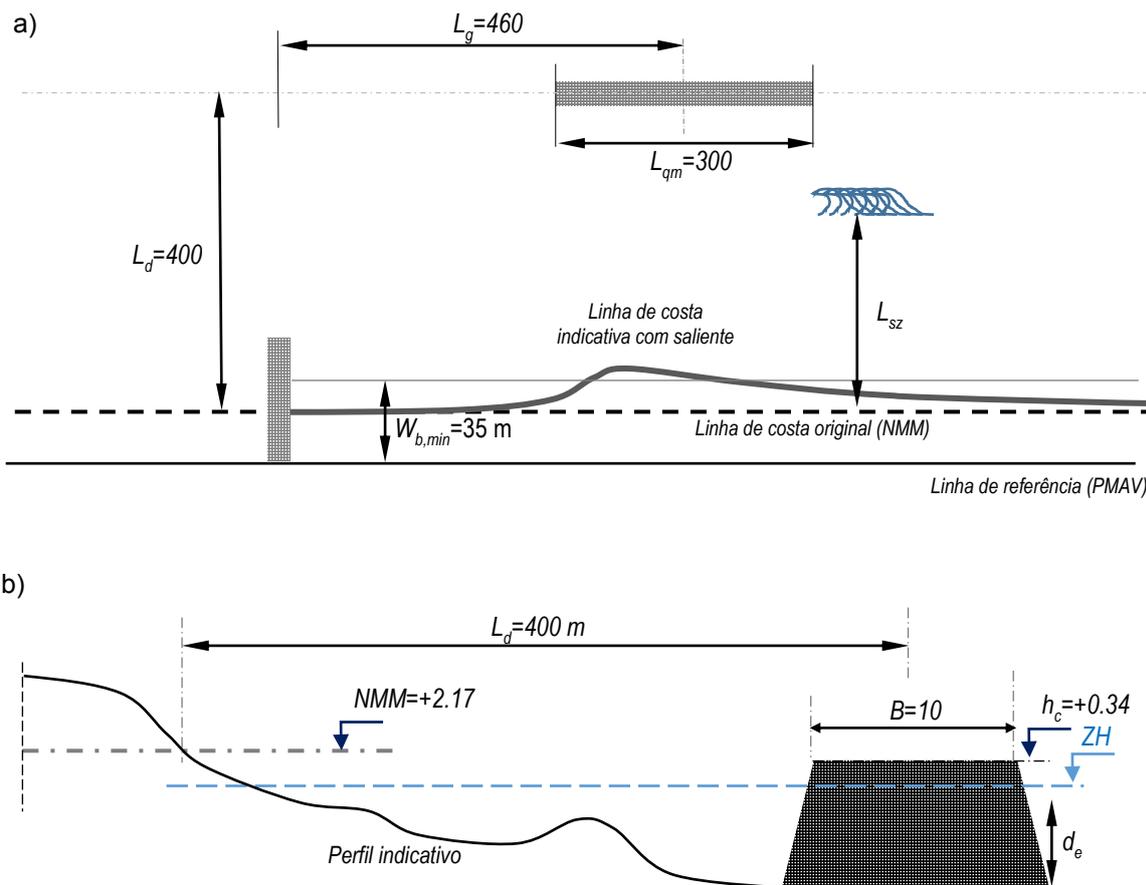


Figura 2.8 – Esquema representativo da solução preliminar, a ensaiar em modelo físico: a) vista em planta (L_{sz} =largura da zona de rebentação); b) vista no plano vertical do corte ao longo do eixo transversal do QMD

Quadro 2.2 – Valores dos parâmetros preliminares característicos de dimensionamento do QMD da Praia da Vagueira

Tipo de parâmetro	Designação	Parâmetro
Estrutural	L_{qm}	300 m
	L_d	400 m (à cota +2,17 m ZH)
	L_{qm}/L_d	0,75
	R_c	-0,5 m, para o nível de baixa-mar de águas vivas média (+0,84 m ZH);
	h_c	+0,34 m ZH, a alterar caso se modifique R_c
	K_t	Variável em função do nível de água
	B	10 m
	h_p	Valor médio \approx -5,5 m ZH, mínimo \approx -3,7 m ZH, máximo \approx -7,1 m ZH
	d_e	$h_c - h_p = 0,34 - (-5,5) = 5,84$ m
	ϕ	$-10^\circ, 0^\circ, +10^\circ$

	L_g	460 m
	β_b, β_s	Barlamar: 1:10, 1:15 Sotamar: 1:2, 1:3
	Forma	Linear oblíqua ou delta assimétrico
	Material	Enrocamento
Hidrodinâmico	H_s	Surf: 1,5 a 3,0 m
	T_p	Surf: 8 a 12 s
	Peel angle	$30 < \alpha < 60^\circ$ durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
	Tipo de rebentação	Surf: $0,4 < \xi_b < 2,0$ durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
	Comprimento linha de rebentação	≥ 55 m, durante, pelo menos, 20% das condições de agitação
	Níveis de maré	BMAV (+0,84 m ZH); NMM (+2,17 m ZH); PMAV (+3,55 m ZH)
Morfodinâmico	$W_{b,min}$	35 m, numa extensão igual à distância do extremo norte do QMD ao esporão da Vagueira, à cota de PMAV, em qualquer período do ano
	Erosão máxima no troço Vagueira – Areão	A taxa de erosão máxima admitida é -4,44 m/ano.

2.3 Condições e dados *in situ*

2.3.1 Agitação marítima relevante para o transporte sedimentar

De forma a estabelecer as condições de modelação física, importa definir a área de estudo a modelar e as condições reais que se pretendem reproduzir, à escala, no modelo físico.

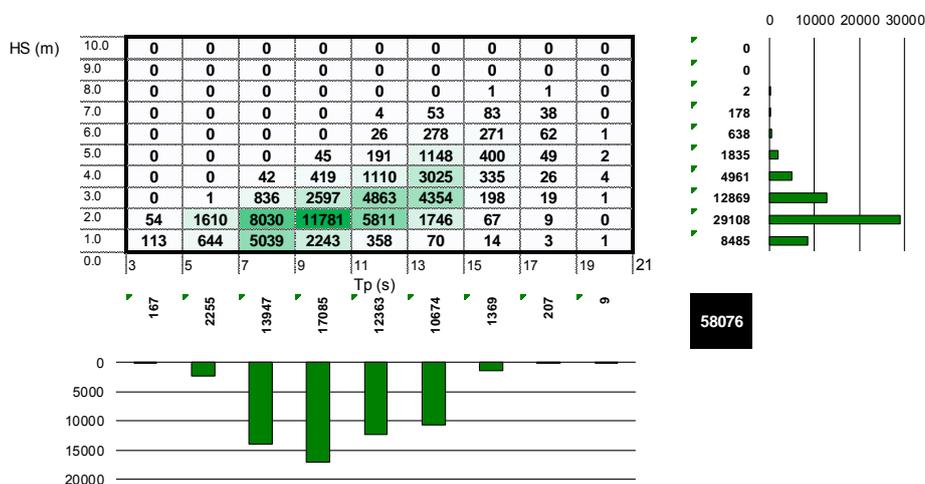
Num ponto em frente à Praia da Vagueira, à profundidade -12 m(ZH), determinaram-se os valores estatísticos do regime de agitação marítima indicados no Quadro 2.3 (Relatório 7, Freire *et al.*, 2020) e as distribuições conjuntas representadas na Figura 2.9. Estas permitem observar as gamas de valores dominantes naquele litoral e com relevância no transporte sedimentar.

Para a solução c300.d400, que foi a selecionada para ensaiar em modelo reduzido (Relatório 8, Oliveira *et al.*, 2020), obteve-se com o modelo LITMOD uma estimativa do fluxo sedimentar médio anual, 3000 m a norte do esporão da Vagueira, entre 628000 e 648000 m³/ano. Na ausência de obra, o fluxo sedimentar no mesmo local é da ordem de 643000 m³/ano e o caudal que transpõe o esporão da Vagueira é da ordem de 648000 m³/ano. Pode-se assim tomar como referência o caudal de 640000 m³/ano para as condições de agitação marítima a simular no modelo físico, que reproduzam as condições médias dos fluxos sedimentares anuais.

Quadro 2.3 – Estatísticas das séries totais de Hs, Tp, Dirp, Tm e Dirm, no ponto P3, em frente à Praia da Vagueira (adaptado de Relatório 7, Freire *et al.*, 2020)

Parâmetro	P3				
	Hs	Tp	Dirp	Tm	Dirm
Média	1,9	10,9	295,1	8,8	296,2
Mediana	1,6	10,9	295,0	8,9	295,1
Moda	1,0	12,1	269,0	9,9	289,7
Desvio-padrão	1,0	2,5	25,8	2,1	26,4
Curtose	2,2	-0,3	23,3	-0,3	19,7
Assimetria	1,4	0,1	-2,2	0,1	-1,9
Mínimo	0,0	3,5	1,0	3,2	0,0
Máximo	7,1	20,3	359,0	16,8	359,7

a)



b)

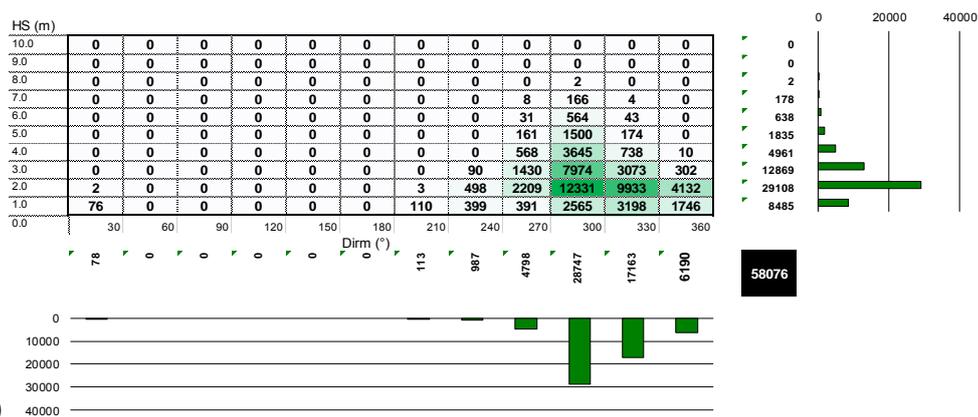


Figura 2.9 – Distribuição conjunta de (a) Hs-Tp e (b) Hs-Dirm no ponto P3

A série de caudais diários dos resultados do modelo LITMOD na simulação sem QMD permitiu identificar 52 combinações de ternos Hs, Tp e Dir que produziram fluxos sedimentares entre 630000 e

650000 m³/ano. Destas, **identificou-se uma condição de agitação marítima, com Hs=1,26 m, Tp=10,9 s e Dirm=296°**, i.e., com valores de Tp e Dir iguais aos valores médios observados em P3 (Quadro 2.3), de que resulta um transporte longilitoral igual a 637144 m³/ano. **É esta a condição, designada por M1, que se procurará reproduzir em modelo físico**, com eventuais ajustes em função da calibração a efetuar. Esta onda M1 pertence também às classes das condições de agitação marítima mais frequentemente encontradas (Figura 2.9).

Os valores de Hs, Tp e Dir da condição M1 são pretendidos, i.e., dever-se-ão observar no modelo físico, à profundidade -12 m(ZH). Para o cálculo do modelo LITMOD, o ângulo da (perpendicular à) linha de base com o Norte foi definido igual a 288°. Em frente à Praia da Vagueira o alinhamento é próximo dos 283° (Capítulo 4, Relatório 8, Oliveira *et al.*, 2020). Logo, tomando este último valor, resulta assim que **a onda M1, à profundidade -12 m(ZH), terá uma obliquidade igual a 296-283=13°**. No modelo físico, será estimada a direção da onda M1 na posição do batedor de ondas com recurso a modelo numérico.

2.3.2 Agitação marítima relevante para o *surf*

Relativamente à prática de *surf*, no Relatório 4 (Sancho *et al.*, 2019b) tinham sido identificadas as condições de agitação teoricamente mais propícias para a mesma. Em particular, concluiu-se que o QMD deveria ser otimizado para uma onda com Hb=2,0 m, devendo também promover a melhoria da surfabilidade para ondas de 1,5 a 3 m. No Quadro 2.4 apresentam-se as condições encontradas. Ressalve-se que as melhores condições seriam aquelas com número de Iribarren, ξ_b , compreendido entre 0,4 e 2,0, e declividade a maior possível.

Quadro 2.4 – Números de Iribarren e declividade das condições de agitação propícias para o *surf*

H_s	T_p	Número de Iribarren, ξ_b	Declividade
1,5	10	0,41	0,031
2	10	0,35	0,036
3	10	0,29	0,044
1,5	12	0,49	0,026
2	12	0,42	0,030
3	12	0,35	0,037

2.3.3 Agitação marítima para aferição de coeficientes de transmissão

Na modelação matemática utilizaram-se várias formulações para o cálculo dos coeficientes de transmissão (secção 5.3.1, Relatório 8, Oliveira *et al.*, 2020) para cada condição de agitação marítima, nível de água e características físicas do QMD. As formulações compreenderam métodos

empíricos e o uso de um modelo de propagação de ondas com refração, difração, reflexão e rebentação (parcial) de ondas. Para todo o conjunto de simulações, resultaram coeficientes de transmissão abrangendo a quase totalidade do intervalo]0, 1[.

Para aferir e validar os resultados da modelação matemática, serão analisados os dados dos ensaios de um conjunto selecionado de condições de agitação anteriores (Quadro 2.4), para a determinação do coeficiente de transmissão.

2.3.4 Características dos sedimentos

De acordo com os dados do Relatório 7 (Freire *et al.*, 2020), a parte emersa da praia da Vagueira é constituída por sedimentos da classe textural das areias, sendo o valor médio do diâmetro mediano (D50) de 0,5 mm (correspondente a areia de grão médio). Na parte submersa, os sedimentos são mais finos, predominando areias finas (D50 entre 0,125 e 0,25 mm), com baixo teor (<20%) de silto-argilosos. A menores profundidades ($h > -6$ m ZH), onde domina o transporte longilitoral, esta fração é quase insignificante (<5%). Assim, tendo em atenção que no modelo físico importará simular o transporte longilitoral e a evolução da linha de costa, **procurar-se-á reproduzir, no modelo reduzido, uma areia no protótipo com D50=0,5 mm.**

A densidade das partículas dos sedimentos da parte emersa da praia da Vagueira varia entre 2,67 e 2,68, respetivamente a norte e sul do esporão da Vagueira. Na parte submersa, os valores medidos foram 2,7 e 2,72, também a norte e sul do esporão da Vagueira, respetivamente (Relatório 7, Freire *et al.*, 2020).

3 | Modelo físico reduzido e condições e metodologia de ensaio

3.1 Considerações gerais

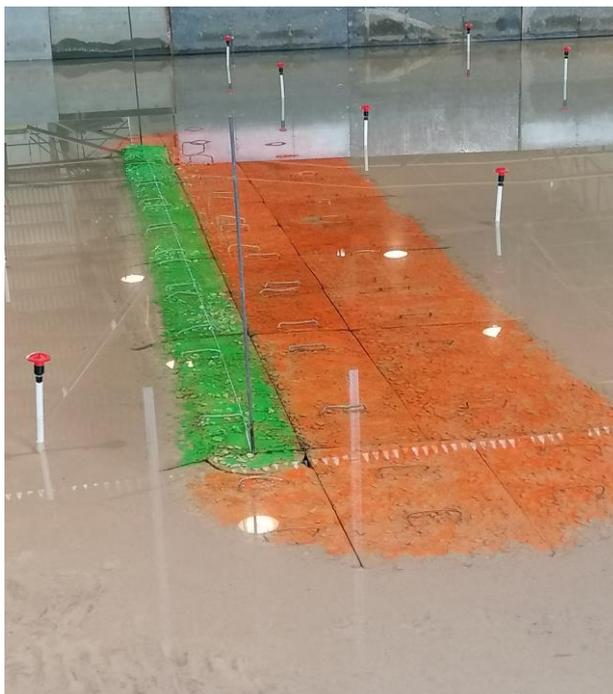
Os ensaios serão realizados no tanque de ondas irregulares do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC com aproximadamente 23,0 m de comprimento por 20,0 m de largura. Serão utilizados dois geradores de ondas irregulares cujas pás têm 6 m de largura (visíveis na extremidade do tanque de ondas, mostrado na Figura 3.1).



Figura 3.1 – Vista geral do tanque de ondas com modelo físico construído, sem implementação do QMD

O estudo compreende a realização de ensaios na situação atual e com a configuração preliminar do QMD (secção 2.1). Tendo em atenção as principais conclusões da revisão bibliográfica efetuada relativamente a projetos potencialmente semelhantes (Relatório 2, Sancho *et al.*, 2019a) e a síntese dos parâmetros de dimensionamento já estabelecidos (vide Quadro 4.1, Relatório 4, Sancho *et al.*, 2019b), o modelo à escala reduzida do QMD será construído com uma rugosidade exterior o mais aproximada possível da de um manto de enrocamento (Figura 3.2).

a)



b)



Figura 3.2 – a) Vista global do QMD implantado no tanque de ondas (a laranja o talude exterior e a verde a crista e talude interior); b) vista de uma peça da construção do QMD, do talude a barlar

Esta solução será implantada sobre fundo móvel que reproduz as condições do protótipo desde uma batimétrica da ordem de -12m (ZH) até junto à costa.

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

3.2 Escalas do modelo

3.2.1 Condições de semelhança hidrodinâmica

A escala geométrica do modelo resultou do compromisso entre as dimensões do tanque de ondas, as dimensões da zona de estudo (vide Capítulo 2) e das obras a implantar, as características e capacidades do bater de ondas e as condições de agitação marítima, tendo ainda em consideração a dimensão do sedimento a utilizar no fundo móvel. Atendendo a que em modelos de hidráulica marítima se consideram como forças dominantes as de gravidade e de pressão, o modelo será construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude.

Face ao indicado, a geometria do modelo reduzido foi estabelecida **adotando a escala geométrica $\mu=1/65$** . A reprodução de ondas seguindo as leis de semelhança de Froude garante a boa simulação da propagação da agitação marítima nos seus aspetos de refração, difração, rebentação e movimentação geral da massa líquida (Vicente, 1991).

A reprodução da batimetria da zona em estudo é realizada de acordo com o protótipo (condições estabelecidas no Capítulo 2). A Figura 3.3 mostra a planta do modelo físico executado, com colocação dos geradores de ondas e do QMD.

No Quadro 3.1 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).

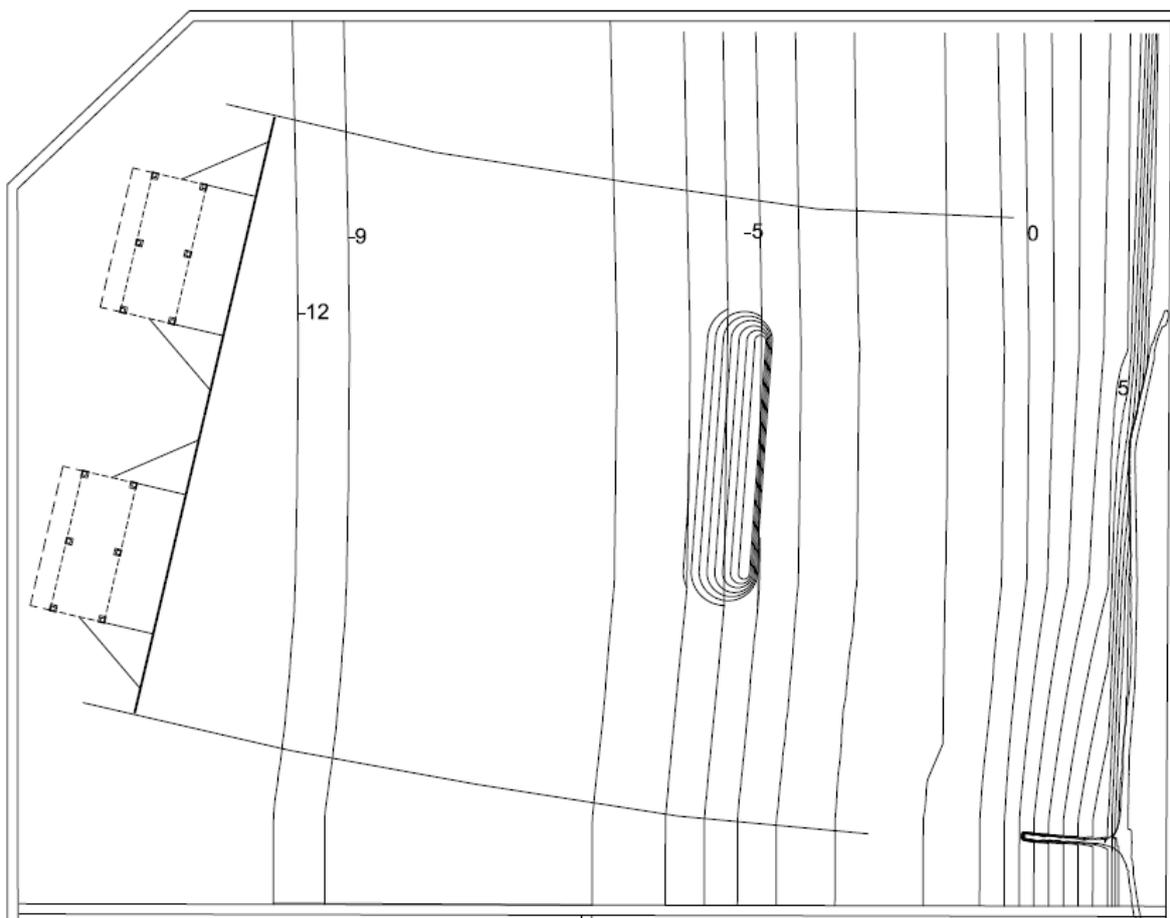


Figura 3.3 – Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD

Quadro 3.1 – 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	$[V]$	$1/65^3 = 1/ 274625$

3.2.2 Condições de semelhança sedimentar

É reconhecida a impossibilidade de cumprimento da semelhança entre o protótipo e o modelo físico reduzido no respeitante a todas relações de forças relevantes (ex., Hughes, 1983; Heller, 2011). Em particular, a modelação física em pequena escala é limitada no respeitante à reprodução da dinâmica

sedimentar, dado não se poderem satisfazer simultaneamente todas as leis de verosimilhança (Kamphuis, 1996; Sancho *et al.*, 2009; van Rijn *et al.*, 2011). Relativamente ao transporte de sedimentos e devido à complexidade deste processo, não é possível obter perfeita similitude simultaneamente no transporte em suspensão e por arrastamento, mantendo a escala de densidades de sedimentos unitária (Alsina *et al.*, 2007).

Recentemente, foram efetuados no LNEC um conjunto de ensaios em modelo reduzido de estabilidade de uma praia artificial (Sancho e Freire, 2015; Sancho *et al.*, 2015), recorrendo alternativamente a areia e a um material granular de baixa densidade (neste caso, baquelite), que permitiram ganhar maior experiência e confiança nas relações de escala sedimentar e reprodução das condições do protótipo. Considerou-se também que a distorção das escalas horizontal e vertical no modelo reduzido, representado por δ , deveria ser minimizada, dado que o fenómeno da difração de ondas provocado pelo QMD não é devidamente reproduzido quando existe essa distorção (Vicente, 1991).

Conforme o exposto na secção 2.2.3, **procurou-se reproduzir, em modelo reduzido, uma areia que no protótipo tenha $D_{50}=0,5$ mm**. Efetuaram-se diversos cálculos para o uso de baquelite ou areia, tendo-se concluído pela preferência da última face a todas as leis de escalas e volume de material necessário para o modelo físico. **Optou-se assim pela utilização, no modelo reduzido, de areia siliciosa² lavada com $D_{50,m}=0,285$ mm e densidade igual a 2,65**. (apresentam-se as curva granulométricas de 3 amostras na Figura 3.4).

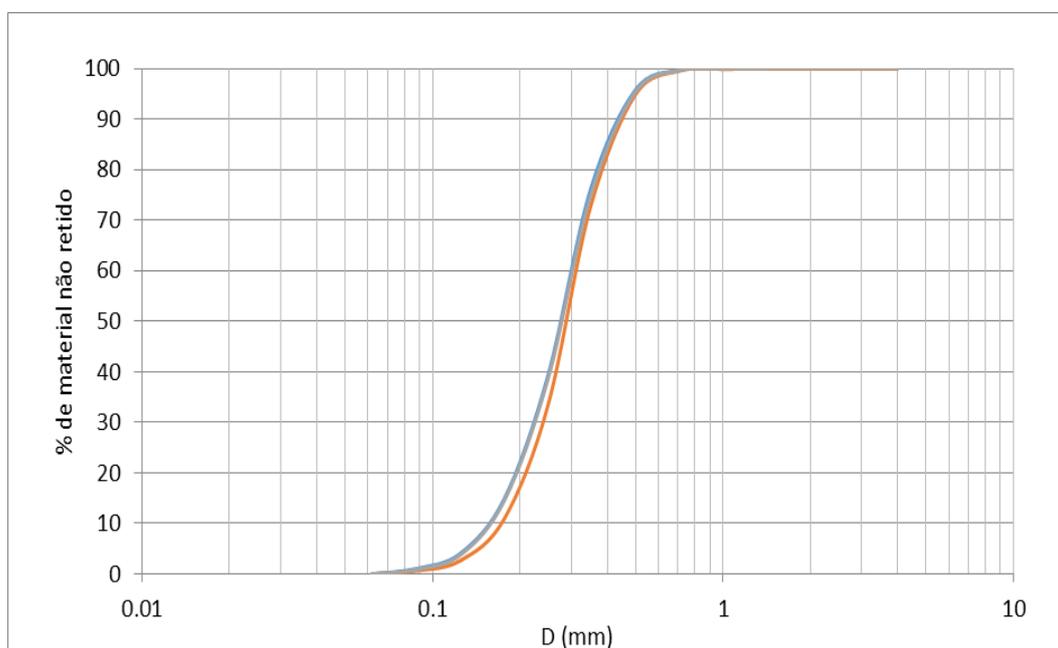


Figura 3.4 – Curvas granulométricas de 3 amostras do sedimento usado no modelo reduzido

² Designação: Sifucel S40/45-CF.

A lei de escalas de van Rijn *et al.* (2011), dada pela eq. 1, permite determinar a escala granulométrica do sedimento:

$$[D] = \delta^2 \mu^{0.56} [\gamma'_s]^{-1} \quad (\text{eq. 1})$$

Considerando a relação entre massas volúmicas dos sedimentos no protótipo e modelo iguais à unidade ($[\gamma'_s] \approx 1$) e considerando no protótipo uma areia com $D_{50,P}=0,50$ mm, **a areia para ensaios com $D_{50,m}=0,285$ mm corresponde à relação de escalas $[D_{50}]=0,56$, com distorção $\delta=2,41$** . Ou seja, nestes ensaios deverá ocorrer alguma distorção da escala vertical face à horizontal, que será mais visível nos perfis de praia, em que os perfis no modelo reduzido deverão ter um declive cerca de 2,4 vezes superior ao declive representado em protótipo.

Por outro lado, a escala de tempo morfodinâmica é distinta da escala do período de onda que resulta da semelhança de Froude (igual a 1/8,06, vide Quadro 3.1) e é dada pela expressão (van Rijn *et al.*, 2011)

$$[t_e] = \mu^{0.4} [\gamma'_s] \delta^{-1.4} \quad (\text{eq. 2})$$

Efetuada este cálculo, **obtem-se $[t_e]=1/18,4$, ou seja, a uma hora de simulação no modelo corresponde 0,77 dias na natureza**. A cada ensaio com duração de cerca de 20 min corresponderá assim o tempo morfológico de ~6,1 horas.

Note-se que a lei de semelhança de van Rijn *et al.* (2011) foi desenvolvida com base em resultados de ensaios de balanços volumétricos aluvionares transversais. A sua generalização para ensaios tridimensionais é algo incerta, embora os resultados de Sancho *et al.* (2015) sustentem que se obtiveram configurações de praia em planta corretas.

3.3 Condições de ensaio

As condições de agitação incidente a simular 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.

Para o transporte sedimentar, foi selecionada a condição de agitação marítima representativa das condições médias observadas e estimadas (vide secção 2.3.1). Os ensaios de estabilidade sedimentar são conduzidos para o nível médio de água. Durante os ensaios, poder-se-á constatar a necessidade de alteração da condição de agitação marítima ou do nível de água, o que será reportado devidamente.

Para a avaliação do *surf*, foram selecionadas a direção de onda, 3 alturas significativas de onda e 2 períodos de pico, conforme indicados no quadro 3.4. A duração dos ensaios será de cerca de 20 minutos no modelo reduzido (dependendo do período de pico) o que corresponderá a aproximadamente 2,7 horas no protótipo.

Serão simuladas condições de agitação marítima irregular, 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.

Quadro 3.2 – Condições de agitação previstas para os ensaios (à escala do protótipo e *reduzida*)

Finalidade do ensaio	H_s (m)	T_p (s)	Rumo (°N)	Nível de maré
Morfodinâmica (escala 1:65)	1,26 (1,9 cm)	10,9 (1,35 s)	296	NMM
Surf (escala 1:65)	1,5, 2 e 3 (2,3, 3,1, e 4,6 cm)	10 e 12 (1,24 e 1,5 s)	296	NMM

Serão ainda realizados ensaios para, de forma expedita, verificar a ocorrência (ou não) de galgamentos sobre a defesa longitudinal aderente.

3.4 Métodos e resultados a obter

Após a construção do modelo para a configuração atualmente existente, será realizada uma série de ensaios de calibração da agitação marítima, tomando-se como características nominais da agitação marítima a registada junto ao gerador de ondas irregulares. A fase de calibração, sem obra, permitirá determinar o efeito de escala na inclinação do perfil, que estes modelos sempre apresentam. Cada conjunto de ensaios é conduzido até ser estabelecido o equilíbrio sedimentar dinâmico. Para a execução de ensaios com alterações da configuração do QMD será reposta a configuração inicial da praia.

Para cada condição de agitação ensaiada, os resultados consistirão em:

- valores da elevação da superfície livre obtidos em sondas colocadas na zona de implantação do QMD e a sotamar deste;
- filmagens e fotografias para análise da localização, comprimento e tipo de rebentação na zona do recife artificial;
- fotografias da linha de água para posterior extração desta por georreferenciação e análise da evolução da linha de água (avanços e/ou recuos);
- levantamento topo-hidrográfico de área recorrendo a técnica fotogramétrica, antes e após cada conjunto de ensaios, para avaliação da variação da elevação do fundo;

- correntes transversais e longitudinais em pontos selecionados (estimativa qualitativa, recorrendo a flutuadores).

Durante a construção do modelo e a realização dos ensaios serão adquiridos dados fotográficos e em vídeo que permitirão complementar os dados anteriores.

No que se refere à análise morfodinâmica, serão analisados os aspetos seguintes: evolução da praia em resposta às condições de cada ensaio; identificação de zonas de erosão e de acumulação de sedimentos; configuração da linha de costa; variação morfológica em perfis transversais à praia (antes e após cada conjunto de ensaios); volumes erodidos e depositados; eficácia do quebra-mar sob o ponto de vista de acréscimo do areal da praia. Estes elementos serão complementados por figuras comparativas da evolução dos fundos (obtidos pela diferença entre as topografias inicial e a final).

No que se refere à avaliação do *surf*, os ensaios serão realizados em 2 fases:

1 – Sem obra, para avaliação das condições de rebentação quer na zona onde será implantado o recife quer junto à costa. Serão colocadas um conjunto de sondas resistivas numa grelha de pontos a estabelecer no modelo físico. Serão medidas séries temporais das elevações da superfície livre, para cada condição de agitação incidente. A análise dessas séries permitirá inferir sobre as características da agitação marítima naqueles pontos. Serão também instaladas 2 câmaras de filmar para análise da rebentação associada a cada condição de agitação marítima incidente;

2 – Com obra, para avaliação das condições de rebentação na zona do QMD. A metodologia é em tudo semelhante à descrita anteriormente para os ensaios sem obra.

A comparação de resultados sem e com obra permitirá avaliar o desempenho do QMD em termos de potenciar condições de *surf* na praia da Vagueira.

4 | Considerações finais

Apresentam-se neste relatório o estabelecimento do modelo físico reduzido e as condições de ensaio referentes ao “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira”.

A escala selecionada, de 1:65, 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 do batedor de ondas e as condições de agitação marítima, tendo ainda em consideração a dimensão do sedimento a utilizar no fundo móvel. Esta escala, por ser muito pequena, implicará maior incerteza ou imprecisão na obtenção de alguns resultados (p.ex., um erro do levantamento topo-batimétrico fotogramétrico da ordem de 1 cm traduzir-se-á em um erro de 65 cm à escala do protótipo).

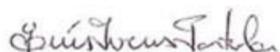
Saliente-se ainda que foram, anteriormente (e.g., Freire *et al.*, 2020), identificadas significativas variações morfológicas na Praia da Vagueira, as quais condicionaram a escolha da configuração de fundo a reproduzir e modelar à escala reduzida. Por outro lado, num modelo físico pretende-se e consegue-se reproduzir somente um conjunto muito pequeno das condições reais que ocorrem no protótipo. Por isso, selecionaram-se condições de teste, de agitação marítima, nível da água e fundo, médias. Consequentemente, os resultados a obter terão de ser analisados neste contexto e deverão ser interpretados como indicativos de certas respostas ou tendências do sistema (neste caso, da praia da Vagueira, com e sem a proteção de um quebramar destacado submerso). Contudo, importa salientar que a modelação física assume particular importância neste estudo na medida em que é complementar à modelação matemática e prevê-se que permita identificar padrões e respostas da zona costeira à implantação de quebra-mar destacado, por vezes não detetáveis ou previstas através da modelação numérica, por limitações desta.

Por último, acrescenta-se que a modelação física tem maiores condicionalismos e imprevistos, de ordem operacional, que a modelação matemática, conduzindo assim a significativa imprevisibilidade no cumprimento do calendário de execução das tarefas.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2021

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Estuários e Zonas
Costeiras



Luís Ivens Portela

A Diretora do Departamento de Hidráulica e
Ambiente



Helena Alegre

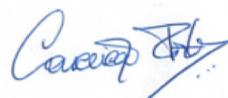
AUTORIA



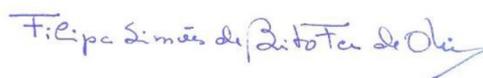
Francisco Sancho
Investigador Auxiliar



Maria da Graça Neves
Investigadora Auxiliar com Agregação



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



Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira
Investigadora Auxiliar



Luís Gabriel Silva
Técnico Superior

Referências bibliográficas

- ALSINA, J.M.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; GIRONELLA, X.; BALDOCK, T.E., 2007 – **Design of scaled movable bed experiments using numerical models**. Journal of Coastal Research, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 379 – 383. Gold Coast, Australia, ISSN 0749.0208.
- 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.
- HELLER, V., 2011 – **Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models**. Journal of Hydraulic Research, 49(3):293–306. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2011.578914>.
- HUGHES, S.A., 1983 – **Advanced Series on Ocean Engineering 7. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering**. World Scientific, London.
- KAMPHUIS, J.W., 1996 – **Physical Modeling of Coastal Processes**. Chapter in "Advances in Coastal and Ocean Engineering, Volume 2", P. Liu (Ed.), Singapore: World Scientific Press, pp. 79-114.
- 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.E.; FREIRE, P., 2015 – **Ensaio em modelo físico tridimensional de uma praia artificial na Ilha do Sal, República de Cabo Verde - Volume I: Estabilidade sedimentar da praia**. LNEC - Proc. 0604/121/18753. Relatório 332/2015 – DHA/NEC.
- SANCHO, F.; FREIRE, P.; OLIVEIRA, F.S.B.F., 2009 – **Modelação física da evolução do perfil de praia a diferentes escalas**. 6.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009.
- SANCHO, F.E.; SILVA, L.G., 2015 – **Ensaio em modelo físico tridimensional de uma praia artificial na Ilha do Sal, República de Cabo Verde - Volume II: Galgamento e otimização da configuração das obras**. LNEC - Proc. 0604/121/18753. Relatório 416/2015 – DHA/NEC.
- SANCHO, F.; OLIVEIRA, F.S.B.F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; COELHO, C.; ROEBELING, P.; BICUDO, P., 2019a – **Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira: (T0) Revisão do estado de arte – Relatório 2**. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório conjunto 248/2019 – DHA/NEC.
- SANCHO, F.; NEVES, M.G.; FORTES, C.J.; CAPITÃO, R., 2019b – **Estudo de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo**

matemático: Memória descritiva – Relatório 4. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2019 – DHA/NEC.

VAN RIJN, L.C.; TONNON, P.K.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; CÁCERES, I.; GRÜNE, J., 2011 – **Scaling laws for beach and dune erosion processes.** Coastal Engineering, Volume 58, Issue 7, pp. 623-636, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.01.008.

VICENTE, C., 1991 – **Aperfeiçoamento de métodos de modelação matemática e física aplicáveis a problemas de dinâmica costeira.** Programa de Investigação; LNEC, Lisboa.



www.lnec.pt

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