



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Carolina Maria Vilela Sanches

**MODELAÇÃO FÍSICA DO ESPRAIAMENTO E  
GALGAMENTO NUMA SECÇÃO DO QUEBRA-MAR DO  
PORTO DA ERICEIRA**

PHYSICAL MODELING OF RUN-UP AND OVERTOPPING ON  
A SECTION OF THE ERICEIRA HARBOR BREAKWATER

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de  
Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pelo  
Professo Doutor José Simão Antunes do Carmo e pela Engenheira Conceição  
Juana Fortes apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade  
de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Carolina Maria Vilela Sanches

# Modelação Física do Espraçamento e Galgamento numa secção do quebra-mar do Porto da Ericeira

Physical modeling of run-up and overtopping on a section of the Ericeira harbor breakwater

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente,  
orientada pelo Professor Doutor José Simão Antunes do Carmo, pela Eng<sup>a</sup> Conceição Juana Fortes.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2021

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## Agradecimentos

Gratifico em primeiro lugar os meus orientadores não só por toda a ajuda e apoio prestado, mas também toda a orientação minuciosa e todos os conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor José Simão Antunes do Carmo da Universidade de Coimbra, agradeço não só pela boa disposição com que sempre me recebeu como também pela qualidade dos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, empenho, e interesse demonstrado ao longo deste trabalho.

À Engenheira Conceição Juana Fortes Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, agradeço por permitir a realização dos ensaios experimentais nesta instituição, a paciência, a infindável disponibilidade que sempre demonstrou, incentivo incondicional, ajuda e aconselhamento nos momentos mais difíceis.

À Engenheira Rute Lemos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, obrigada por toda as horas despendidas e pelos seus esclarecimentos e apoio prestado em todas as fases deste trabalho. Agradeço também à Ana Mendonça pelo auxílio prestado.

Ao Guilherme e à Inês, agradeço pelo porto de abrigo durante todo este processo, sem vocês não teria sido possível ter realizado os ensaios experimentais no LNEC; pela paciência e apoio absoluto que me transmitiram.

Aos amigos de Coimbra, obrigada por terem feito parte deste meu percurso académico, sem vocês não teria sido uma experiência incrível. Aos amigos de Alcains, obrigada por todo o apoio e amizade incondicional ao longo destes anos. Aos momentos passados e aos que hão-de vir, é um prazer ter-vos por perto!

Às minhas avós e família pelo amor e carinho demonstrados ao longo destes anos.

E por último, agradeço aos meus pais, que com todo o amor e carinho, sempre me deram todas as ferramentas necessárias para chegar a esta fase. Agradeço todo o investimento e por nunca terem desistido de acreditar em mim, nem deixar desistir dos meus sonhos.

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos To-SEAlert – Galgamentos e inundação em zonas costeiras e portuárias: Ferramentas para um sistema de previsão e alerta, planeamento de emergência e de gestão do risco, ref<sup>a</sup>. PTDC/EAM-OCE/31207/2017 e BSafe4Sea - Controlo da Segurança de Quebra-mares através da Análise de um Sistema de Previsão e Apoio à Decisão, ref<sup>a</sup>. PTDC/ECI-EGC/31090/2017, ambos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

A todos Obrigada!

## Resumo

O entendimento dos fenómenos de espraimento e galgamento, tal como a sua correta previsão através de ensaios em modelo físico reduzido e fórmulas empíricas, tem despertado desde há muito um contínuo interesse. Isto deve-se ao facto do impacto da agitação marítima incidente em quebra-mares de talude conduzir a várias consequências, tais como danos nas estruturas, suspensão de atividades pesqueiras e custos elevados de obras de manutenção, entre outras, as quais tenderão a acentuando-se em cenários de alterações climáticas. Por conseguinte, existe a necessidade de compreender e antever de uma forma tão correta quanto possível os fenómenos de interação onda/estrutura, por forma a tornar as estruturas de proteção costeira mais seguras.

Assim, no presente trabalho procura-se essencialmente avaliar o espraimento e o galgamento num quebra-mar de talude sob diferentes condições de agitação marítima incidente usando para tal o caso específico do porto da Ericeira. Para tal, desenvolveram-se ensaios em modelo físico reduzido no canal de ondas irregulares do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O perfil de secção ensaiado foi a zona do cais do quebra-mar do porto da Ericeira, tendo sido testados os períodos de pico de 12 s, 14 s e 16 s associados a diferentes alturas de onda significativa entre os 4 m e os 8.5 m para três níveis de maré: Preia-mar, Nível-médio e Baixa-mar.

Através de ensaios em modelo físico foi possível medir a elevação da superfície livre, o espraimento na face do talude e o volume total galgado. A partir dos resultados obtidos em modelo físico compararam-se os valores de espraimento e do caudal médio galgado por metro de desenvolvimento da estrutura com os obtidos através de várias fórmulas empíricas. A análise realizada demonstra que as ferramentas utilizadas para o cálculo do espraimento e do galgamento têm algumas limitações e vantagens, devendo por isso serem tidas em conta na sua aplicação.

Por último, resumem-se as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, complementando-se com algumas propostas para desenvolvimentos futuros com o fim de aprofundar os conhecimentos sobre o tema.

**Palavras-Chave:** Espraimento, Galgamento, Fórmulas Empíricas, Modelo Físico, Ericeira, Quebra-mar de talude.

## **Abstract**

The understanding of run-up and overtopping phenomenon, as well as their correct prediction through reduced physical model tests and empirical formulae, has long been of continuing interest. The impact of wave action on slope breakwaters can lead to adverse consequences such as damage in structures, suspension of fishing activities, high costs of maintenance work among others, which are increased in scenarios of climate change. Therefore, there is a need to understand and correctly predict this wave/structure interaction phenomenon, to make these structures safer.

Thus, this work aims to evaluate the run-up and overtopping of a slope breakwater under different conditions of incident wave using the specific case of Ericeira's harbor. For this purpose, tests were developed on a scale model in the irregular wave flume of the Unit of Ports and Marine Structures in the Portuguese National Laboratory of Civil Engineering. The cross-section profile tested was the breakwater quay of Ericeira's harbor with different significant wave heights between 4m and 8.5 m for three tidal levels: High-tide, Mid-tide, and Low-tide.

Through physical model tests it was possible to measure the free surface elevation, the run-up on the slope surface and the total volume overtopped. From the results of the physical model, it was possible to compare the values of the run up and the average flow per meter of structure development with the values obtained by several empirical formulae. The analysis carried out shows that the tools used to calculate de run-up and overtopping have some limitations and advantages and must therefore be taken into consideration when they need to be applied.

Finally, the main conclusions about the work developed are summarized, being complemented with some proposals for future developments to deepen the knowledge about the subject.

**Keywords:** Run-up, Overtopping, Empirical Formulae, Physical Model, Ericeira, Breakwater.

## Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Índice .....	v
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Quadros .....	ix
Simbologia.....	x
Abreviaturas.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivo e metodologia.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
2. Breve revisão de conceitos básicos .....	4
2.1. Caracterização da agitação na superfície do mar .....	4
2.1.1. Caracterização de estado de mar .....	4
2.1.2. Caracterização da onda.....	5
2.2. Processos de propagação e transformação da onda .....	6
2.2.1. Refração.....	8
2.2.2. Difração .....	9
2.2.3. Rebentação.....	9
2.2.4. Espraçamento .....	11
2.2.5. Galgamento.....	13
2.3. Quebra-mares .....	15
3. Modelação Física.....	17
3.1. Relação de semelhança e escolha da escala.....	18
3.2. Erros e Efeitos de Escala associados .....	20
4. Caso de Estudo .....	22
4.1. O Porto da Ericeira .....	22
4.2. Descrição das Instalações de Ensaio .....	23
4.3. Secção transversal do modelo .....	24
4.4. Equipamento experimental .....	26
4.4.1. Sondas do tipo resistivas .....	26
4.4.2. Reservatório e balança para medição de galgamento .....	29
4.4.3. Equipamento de vídeo .....	30
4.5. Programa de Ensaios.....	30
4.6. Metodologia dos ensaios.....	32

---

5. Apresentação e Análise de Resultados .....	33
5.1. Introdução .....	33
5.2. Características da agitação marítima .....	34
5.3. Espraimento .....	36
5.4. Análise dos Galgamentos.....	40
5.4.1. Casos sem descarga .....	41
5.4.2. Casos com descargas .....	45
5.4.3. Comparação com fórmulas empíricas de galgamento .....	49
6. Conclusões .....	54
Referências Bibliográficas.....	57
Anexos .....	A
Anexo A – Séries Temporais e espectrais do estado de agitação.....	A
Anexo B – Resultados de espraimento .....	C
Anexo C – Comparação do espraimento em função da altura de onda, $H_{m0}$ ou $H_s$ , dos valores estimados e observados. ....	D
Anexo D – Comparação do espraimento adimensional previsto em função do espraimento adimensional observado. ....	F



## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Parâmetros de ondas regulares (adaptado de US Army Corps of Engineers (USACE, 2008)).	5
Figura 2.2 – Parâmetros das ondas irregulares (adaptado de Bay, 2005).	6
Figura 2.3 – Propagação das ondas desde águas profundas até águas pouco profundas (adaptado dos apontamentos das aulas de EFC, Antunes do Carmo, 2019).	7
Figura 2.4 – Fenómeno de refração da onda, para diferentes batimetrias e linhas de costa (adaptado de Coastal Engineering Research Center (CERC, 1984)).	8
Figura 2.5 – Fenómeno de difração das ondas (adaptado de Veloso-Gomes (1996) in Antunes do Carmo, 2016).	9
Figura 2.6 – Modos de rebentação da onda e respetivos valores de Iribarren (adaptado de Van der Meer et al., 2018; Antunes do Carmo, 2016)	10
Figura 2.7 – Representação esquemática dos fenómenos de espraçamento e refluxo (adaptado de USACE, 2011a).	11
Figura 2.8 – Representação esquemática do fenómeno de galgamento, (adaptado de Brito, 2007).	13
Figura 2.9 – Elementos de um quebra-mar de talude convencional (adaptado de USACE, 2011b).	16
Figura 3.1 – a) Modelo reduzido tridimensional (adaptado de Lemos e Silva, 2013); b) Modelo reduzido bidimensional (adaptado de Lemos e Silva, 2013).	17
Figura 4.1 – a) Vista satélite do porto da Ericeira (Fonte: Google Earth, 8 de agosto de 2020); b) Localização do porto da Ericeira no mapa de Portugal continental.	22
Figura 4.2 – Planta do molhe cais do porto da Ericeira.	23
Figura 4.3 – Vista lateral do COI1.	24
Figura 4.4 – Vista em planta do COI1.	24
Figura 4.5 – a) Localização aérea da secção transversal ensaiada (Fonte Google Earth, agosto 2020); b) Secção transversal do quebra-mar construído no COI1.	25
Figura 4.6 – Esquema da implantação do modelo, no COI1.	25
Figura 4.7 – Esquema da secção transversal detalhada.	26
Figura 4.8 – Distribuição das sondas ao longo do canal.	26
Figura 4.9 – a) <i>Software</i> SAM que gera as ondas; b) Localização do batedor e das sondas AW0 e AW1 no canal.	27
Figura 4.10 – a) Localização do batedor e das sondas AWA0, AWA1 e S1; b) Localização da sonda S2 no canal; c) Localização das sondas S3 a S5 junto à obra.	27
Figura 4.11 – Localização da sonda S8 no topo da superestrutura.	28
Figura 4.12 – a) Localização da sonda S7 no canal, com vista de cima; b) Localização da sonda S7, com vista lateral.	28
Figura 4.13 – a) Localização da sonda S6; b) Computador junto ao canal.	28

Figura 4.14 – a) Vista frontal da rampa atrás da estrutura; b) Localização da sonda S6 e vista lateral do equipamento.....	29
Figura 4.15 – a) Programa para aquisição de dados da balança; b) Equipamento da balança que regista os galgamentos. ....	29
Figura 4.16 – Esquema do plano de visualização usado para a captura dos vídeos utilizando duas câmaras.....	30
Figura 4.17 – Perspetivas das câmaras de vídeo: a) Perspetiva de topo no quebra-mar; b) Perspetiva lateral no quebra-mar. ....	30
Figura 5.1 – Séries temporais nas sondas S1 a S5. Ensaio com $T_p=16$ s, $H_s=4$ m nas sondas S1, S2, S3 e S4, para PM. ....	35
Figura 5.2 – Espectro unidimensional da elevação da superfície livre do ensaio $T_p=16$ s $H_s=4$ m para as sondas S1, S 2, S3 e S4. ....	35
Figura 5.3 – Espraçamento, em termos de $R_{u\ 2\%}$ , medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para nível de PM e $T_p=14$ s. ....	37
Figura 5.4 – Espraçamento, em termos de $R_{u\ 2\%}$ , medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para PM e $T_p=16$ s. ....	37
Figura 5.5 – Espraçamento, em termos de $R_{u2\%}/H_{m0}$ ou $R_{u2\%}/H_s$ , medido em ensaios e previstos por fórmulas empíricas em função de $\xi_{m0}$ , $\xi_p$ ou $\xi_m$ , para PM.....	38
Figura 5.6 – Espraçamento, em termos de $R_{u2\%}/H_{m0}$ ou $R_{u2\%}/H_s$ , medido em ensaios e previstos por fórmulas empíricas em função de $\xi_{m0}$ , $\xi_p$ ou $\xi_m$ , para NM. ....	38
Figura 5.7 – Comparação do espraçamento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para a fórmula proposta pelo EurOtop (2018). ....	39
Figura 5.8 – Comparação do espraçamento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para a fórmula proposta por Allsop et al., (1985). ....	39
Figura 5.9 – Comparação entre Sonda e Balança no Ensaio $T_p=14$ s $H_s =4$ m rep1.....	43
Figura 5.10 – Comparação entre sonda e balança no Ensaio $T_p=14$ s $H_s=8$ m. ....	44
Figura 5.11 – Comparação entre Sonda e Balança no Ensaio $T_p=16$ s $H_s=8$ m rep1.....	45
Figura 5.12 – Comparação dos valores de volume entre sonda e balança no ensaio $T_p=16$ s $H_s=8$ m V2. ....	48
Figura 5.13 – Comparação dos caudais médios galgados previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (2018), a partir da Equação 5.1 com os medidos nos ensaios.....	50
Figura 5.14 – Comparação dos caudais previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (2018), a partir da Equação 5.2. com os medidos nos ensaios. ....	50
Figura 5.15 – Comparação dos caudais previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (Pullen et al., 2007) com os caudais observados nos ensaios, a partir da Equação 5.3.....	51
Figura 5.16 – Comparação do galgamento relativo, $q/\sqrt{(g H_{m0}^3)}$ e $\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ .....	52
Figura 5.17 – Valores de caudal médio galgado relativo, $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ , estimado e medido em relação ao bordo livre relativo, $R_c/H_{m0}$ . ....	53

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Algumas fórmulas empíricas para o cálculo do espraçamento em estruturas de defesa costeira (adaptado de Poseiro, 2019).....	12
Quadro 2.2 – Fórmulas empíricas existentes para o cálculo do caudal médio galgado (adaptado de Poseiro, 2019). ....	14
Quadro 3.1– Resumo dos métodos de escala (adaptado de Kortenhuis et al., 2005). ....	19
Quadro 4.1 – Número de ensaios e repetições para as condições de agitação ( $H_s$ , $T_p$ ) e nível de água.....	31
Quadro 4.2 – Duração dos ensaios para cada período de pico das ondas ( $T_p$ )......	31
Quadro 5.1 – Valores da altura significativa espectral do estado de agitação, $H_{m0}$ , da altura significativa, $H_s$ , do período médio, $T_m$ e de pico, $T_p$ para os ensaios $T_p=16$ s $H_s=4$ m.....	34
Quadro 5.2 – Ensaios selecionados para cenário sem descarga, referente a PM. ....	42
Quadro 5.3 – Ensaios selecionados para cenário sem descarga, referente a NM. ....	43
Quadro 5.4 – Ensaios selecionados para cenário sem descarga, referente a BM. ....	44
Quadro 5.5 – Valores de caudal médio galgado medidos pela balança, pela sonda e no reservatório exterior, referente a um nível de PM. ....	46
Quadro 5.6 – Ensaios selecionados para cenário com descarga, referente a NM. ....	47

## Simbologia

### Alfabeto latino

a e b – Coeficientes empíricos nas expressões de cálculo do caudal médio galgado (-)

$A_\gamma$  –  $1-0.287\ln(\gamma)$  fator de normalização adimensional (-)

c – Celeridade ou velocidade de propagação de uma onda (m/s)

$c_0$  – Celeridade ou velocidade de propagação de uma onda em águas profundas (m/s)

$D_n$  – Diâmetro nominal de um bloco de proteção ( $= \sqrt[3]{M/\rho_a}$ ) (m)

f – Frequência da onda (Hz)

g – Aceleração da gravidade ( $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ )

h – Profundidade ou altura da coluna de água (m)

H – Altura de onda (m)

$H_m$  – Altura média da onda (m)

$H_{m0}$  – Altura de onda espectral ou significativa (m)

$H_{m\acute{a}x}$  – Altura de onda máxima num registo ou altura da onda a partir da qual rebenta (m)

$H_{rms}$  – Raiz do valor quadrático médio de todas as alturas de onda num registo (m)

$H_s$  – Altura da onda significativa (m)

$H_{1/3}$  – Média do terço das maiores alturas de onda observadas, ou altura significativa (m)

k – Compressibilidade do fluido; Número de onda ( $2\pi/L$ ) ( $\text{m}^{-1}$ )

L – Comprimento de onda (m)

$L_0$  – Comprimento de onda ao largo (m)

$L_{m0}$  – Comprimento de onda espectral (m)

$L_p$  – Comprimento de onda ao largo determinado com  $T_p$  (m)

M – Massa do bloco (kg)

$m_0$  – Momento de ordem 0 do espectro

$m_1$  – Momento de ordem 1 do espectro

N – Relação entre medidas no protótipo e as medidas no modelo (-)

$N_L$  – Escala de comprimento (m)

$N_s$  – Número de estabilidade (-)

$N_q$  – Escala de caudais ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

$N_t$  – Escala de tempo (s)

$N_u$  – Escala de velocidade (m/s)

$N_v$  – Escala de volume ( $\text{m}^3$ )

$N_p$  – Escala de massa volúmica ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$N_\nu$  – Escala de viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

- $N_\gamma$  – Escala de tensão superficial (N/m)  
 $N_k$  – Escala de compressibilidade  
 $q$  – Caudal médio galgado ( $m^3/s$ )  
 $Q$  – Caudal médio de galgamento adimensional (-)  
 $R$  – Espraçamento (m)  
 $R_{1/3}$  ou  $R_s$  – Espraçamento significativo, média do terço dos maiores espraçamentos observados (m)  
 $R_{2\%}$  – Valor do espraçamento excedido por 2% de todos os espraçamentos num registo (m)  
 $R_{m\acute{a}x}$  – Espraçamento máximo registado (m)  
 $Re$  – Número de Reynolds  
 $Rc$  – Altura do bordo livre da estrutura relativamente ao nível de água (m)  
 $R_d$  – Refluxo (m)  
 $R_u$  – Espraçamento (m)  
 $R$  – Bordo livre da estrutura adimensional (-)  
 $S$  – Declividade da onda (-)  
 $S_J$  – Variância do espectro JONSWAP (-)  
 $S_p$  – Declividade da onda determinada com  $T_p$  (m)  
 $S_m$  – Declividade da onda determinada com  $T_m$  (m)  
 $S_{PM}$  – Variância do espectro Pierson-Moskowitz (-)  
 $T$  – Período de onda (s)  
 $T_m$  – Período de onda médio de todas as ondas num registo (s)  
 $T_{m0}$  – Período de onda médio espectral determinado por  $m_0/m_1$  (s)  
 $T_0$  – Período médio ao largo (s)  
 $T_p$  – Período de pico espectral (s)  
 $T_{1/3}$  – Período significativo, média do terço dos maiores períodos de onda observados (s)  
 $V$  – Volume de galgamento ( $m^3$ )  
 $V_{m\acute{a}x}$  – Volume individual máximo galgado por unidade de comprimento ( $m^3$ )

#### Alfabeto grego

- $\alpha$  – ângulo de declividade do fundo ( $^\circ$ )  
 $\gamma$  – Parâmetro de elevação de pico do espectro (-)  
 $\gamma_b$  – Coeficiente de influência da existência de uma berma no talude da estrutura (-)  
 $\gamma_f$  – Coeficiente de influência da rugosidade/ permeabilidade da estrutura (-)  
 $\gamma_h$  – Coeficiente de influência de águas pouco profundas (-)  
 $\gamma_\beta$  – Coeficiente de influência da obliquidade das ondas relativamente à estrutura (-)  
 $\Delta$  – Massa volúmica relativa =  $(\rho_a - \rho)/\rho$  (-)  
 $\theta$  – Ângulo entre as batimétricas e a crista da onda em águas pouco profundas ( $^\circ$ )  
 $\theta_0$  – Ângulo entre as batimétricas e a crista da onda em águas profundas ( $^\circ$ )  
 $\lambda$  – Escala (-)  
 $\nu$  – Viscosidade cinemática da água ( $=10^{-6} m^2/s$ ) ( $m^2/s$ )

$\xi$  – Número de Iribarren (-)

$\xi_{m0}$  ou  $\xi_0$  – Número de Iribarren para um período espectral (-)

$\xi_p$  – Número de Iribarren determinado com  $T_p$  (-)

$\rho_a$  – Massa volúmica dos blocos de proteção ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\rho_w$  – Massa volúmica da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$\sigma$  – Parâmetro de largura do espectro (-)

$\chi$  – Tensão superficial do fluido (N/m)

$\omega$  – Frequência angular da onda ( $\omega=2\pi/T$ ) (rad/s)

$\omega_p$  – Frequência angular espectral de pico ( $\omega_p=2\pi/T_p$ ) (rad/s)

## **Abreviaturas**

AWASYS – Active Wave Absorption System  
BM – Baixa-Mar  
CERC – Coastal Engineering Research Center  
COI1 – Canal de Ondas Irregulares 1  
EFC – Engenharia Fluvial e Costeira  
FIR – Finte Impulse Response  
JONSAWP – Joint North Sea Wave Project  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
MAMO – Modelling and Analysis of Marine Operations  
NAE – Nível de Água Estático  
NM – Nível-Médio  
NMA – Nível Médio de Água  
PM – Preia-Mar  
SWL – Still Water Level  
TOT – Todo o Tamanho  
USASE – Us Army Corps of Engineers  
ZH – Zero Hidrográfico

## 1. Introdução

### 1.1. Considerações gerais

Os quebra-mares são das estruturas mais comuns em obras para abrigo portuário e defesa costeira, sendo essencialmente concebidas para a redução da agitação marítima das zonas abrigadas por essas estruturas, possibilitando, desse modo, uma melhoria das condições de navegação e operação dentro do porto e uma garantia das condições de segurança das pessoas e bens, durante o tempo de vida útil da estrutura. Contudo, o impacto da agitação marítima incidente neste tipo de estruturas pode levar a várias consequências, tais como danos na estrutura e equipamentos, suspensão das atividades pesqueiras, condicionamento da náutica e operacionalidade do porto, restrição de atividades turísticas, interrupção da circulação de pessoas e tráfego em zonas de risco e, num cenário mais grave, a perda de vidas humanas (Silva et al., 2012). Estas consequências podem ser ainda mais gravosas num cenário de alterações climáticas em que a previsível subida do nível do mar e o aumento da frequência e da intensidade de tempestades tornam as estruturas mais vulneráveis aos efeitos da agitação marítima.

Assim, importa compreender e antever de uma forma correta os fenómenos que resultam da interação das estruturas marítimas com a ação das ondas. E desses fenómenos, salientam-se neste trabalho o espraimento e o galgamento.

Existem várias formulações de índole empírica na literatura que têm sido propostas para o cálculo do espraimento e do galgamento (Hunt, 1958; Bonakdar Etemad-Shahidi, 1992; Allsop et al., 1985; Van der Meer e Stam, 1992; Van der Meer et al., 2018; Pullen et al., 2007). Estas fórmulas sendo de carácter empírico foram deduzidas a partir de ensaios em modelos físicos e por ensaios de campo, pelo que a sua franca aplicação apenas é válida para as condições base que foram tidas em conta nos ensaios ou nos trabalhos de campo. Outra ferramenta importante são os ensaios em modelos físicos, que apesar de serem dispendiosos e demorados, revelam-se bastante eficientes já que permitem uma representação muito aproximada dos fenómenos envolvidos na interação da ação da agitação marítima com as estruturas marítimas. Para além disso a modelação física pode também ser usada no desenvolvimento de métodos empíricos ou na calibração/validação de modelos numéricos.

Nesse âmbito, está em curso o projeto Bsafe4sea, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), cujo objetivo é desenvolver, testar e comprovar o conceito de



previsão do comportamento estrutural de quebra-mares de talude, que constitui a base de um sistema inovador de apoio à decisão. Este projeto utiliza a modelação numérica e física como base de comparação com as medições em protótipo, contribuindo assim, para o conhecimento do comportamento hidráulico-estrutural de quebra-mares de talude. Desta forma é possível apoiar o planeamento e priorização de trabalhos de manutenção e reparação, aumentando assim, a segurança, funcionalidade e a resiliência destas obras. Os casos de estudo deste projeto são o porto da Ericeira e o porto de Peniche.

O quebra-mar do porto da Ericeira, um quebra-mar de talude construído na década de 70 tem vindo, ao longo dos anos, a ser parcialmente destruído por tempestades de duração e intensidade elevada. Em 2019, a passagem de duas depressões que causaram fortes danos estruturais no molhe do porto de pesca levou ao seu encerramento tendo sido realizadas obras de reabilitação de emergência no porto. Apesar de se encontrar reabilitado, atualmente, a proporção dos estragos, a intensidade das solicitações e o investimento vultoso necessário para a sua reabilitação justificam que se continue a analisar os fenómenos que originaram a sua ruína, procurando compreender e antever situações futuras.

É nesse sentido que no presente trabalho se pretende avaliar, com o auxílio da modelação física, o espraimento e o galgamento que acontece no presente porto, para diferentes condições de agitação incidente e níveis de maré para posteriormente inferir sobre os seus efeitos no dano da estrutura. Este trabalho também servirá para uma posterior validação de métodos empíricos ou para uma calibração/validação de modelos numéricos, por reunir informação relativamente à geometria da estrutura e dados relativos à agitação marítima.

## **1.2. Objetivo e metodologia**

A presente dissertação tem como principal objetivo avaliar o comportamento de um perfil do quebra-mar de proteção do porto da Ericeira, face à incidência de diferentes condições de agitação, em termos do espraimento e galgamento daquela estrutura. Para tal, realizaram-se ensaios em modelo físico reduzido no canal de ondas irregulares COII, situado nas instalações do pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC, para o perfil da secção da zona de cais do quebra-mar de talude do porto da Ericeira. Foram testados os períodos de pico de 12, 14 e 16 s associados a diferentes alturas significativas de três níveis de maré: Preia-mar (PM), Baixa-mar (BM) e Nível médio (NM).

Através das sondas resistivas colocadas ao longo do canal foi possível medir a elevação da superfície livre, o espraimento na face do talude e eventos de galgamento, assim como medir os volumes individuais galgados e o volume total. Com os resultados obtidos através dos ensaios em laboratório comparou-se os valores do espraimento e do caudal médio galgado por metro de desenvolvimento de estrutura através da aplicação de fórmulas empíricas, sendo

espectáveis maiores volumes de galgamento com o aumento do período de pico e de altura de onda.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação divide-se em 6 capítulos, aos quais se adiciona um capítulo relativo às referências bibliográficas.

No *Capítulo 1 – Introdução* apresenta-se uma contextualização breve das temáticas abordadas na presente dissertação, frisando a sua importância no âmbito da Engenharia Costeira. Também são definidos os principais objetivos do trabalho e a metodologia nele adotada, finalizando-se com uma síntese de cada capítulo.

No *Capítulo 2 – Breve revisão de conceitos básicos* discutem-se alguns conceitos que servirão de base ao presente estudo, nomeadamente conceitos básicos referentes à agitação marítima, visto que a compreensão dos fenómenos envolvidos na interação da agitação marítima com as estruturas marítimas é essencial para uma correta previsão do espraçamento e do galgamento em quebra-mares. Também se fez uma breve descrição dos diferentes tipos de quebra-mares existentes e aprofundou-se na descrição dos constituintes de quebra-mar de taludes.

No *Capítulo 3 – Modelação Física* é apresentada uma descrição dos conceitos fundamentais da modelação física, sendo abordadas as condições de semelhança entre protótipo e modelo assim como as suas fontes de erros e efeitos de escala.

Em seguida, no *Capítulo 4 – Caso de Estudo*, é apresentado o caso de estudo referente ao porto da Ericeira. Neste capítulo é feita uma descrição do porto da Ericeira e das instalações experimentais onde foram realizados os ensaios em modelo reduzido bidimensional. Também é apresentada a metodologia adotada, equipamento técnico, ferramentas informáticas utilizadas e o plano de ensaios adotado.

No *Capítulo 5 – Apresentação e Análise de Resultados* procura-se, fundamentalmente, apresentar e analisar os dados obtidos nos ensaios em modelo reduzido, bem como compará-los com as várias fórmulas empíricas existentes na bibliografia.

Por fim, no *Capítulo 6 – Conclusões e Discussão* resumem-se algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido, acrescentando-se algumas propostas para trabalhos futuros com o objetivo de aprofundar o conhecimento nesta temática.

## 2. Breve revisão de conceitos básicos

### 2.1. Caracterização da agitação na superfície do mar

#### 2.1.1. Caracterização de estado de mar

De acordo com Thurman e Trujillo (1999), as ondas têm origem em perturbações na água, sendo as ondas oceânicas resultado desta perturbação que pode ocorrer devido à ação do vento, sismos ou forças gravitacionais. Os autores afirmam ainda que a maior parte da energia das ondas oceânicas encontra-se nas ondas geradas devido ao vento. Por ação do vento, durante a sua atuação, uma parte considerável de energia e quantidade de movimento são transferidos para a massa de água que vai ser transmitida na direção da força de impulsão; pelo que, grande quantidade de energia é transportada pelas ondas até águas pouco profundas e outra parte da energia é dispersa por efeitos de inércia, convecção e radiação (Antunes do Carmo, 2016).

Têm sido vários os modelos paramétricos que se têm vindo a desenvolver ao longo dos anos para descrever a distribuição em frequência da energia das ondas. De facto, têm-se desenvolvido formas espectrais com base em longos registos de campo de ondas inerentes a fatores como a duração do vento, o *fetch* ou distância sobre o qual o vento atua, e a profundidade da massa de água (Antunes do Carmo, 2016).

Desta forma, surgiu o espectro de Pierson-Moskowitz, em 1964, onde foi assumido que, se o vento incidisse regularmente durante um longo período numa vasta área, as ondas estariam em equilíbrio com o vento. Este conceito denomina-se por estado de mar completamente desenvolvido. Assim, o espectro de Pierson-Moskowitz é válido para águas profundas e estado do mar completamente desenvolvido, sendo dado pela Equação 2.1 e pode ser caracterizado por  $H_s$ ,  $\omega$  e  $\omega_p$  (Modelling and Analysis of Marine Operations (MAMO), 2011).

$$S_{PM} = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (2.1)$$

Mais tarde, surgiu o espectro de JONSAWP (Hasselmann et al., 1973) baseado numa larga análise de dados recolhidos no contexto de um projeto que decorreu no mar do Norte (*Joint North Sea Wave Project*). Este espectro coincide com uma forma modificada do espectro de Pierson-Moskowitz para estados de mar que se manifestam em condições de *fetch* limitado. O espectro de JONSAWP é dado pela Equação 2.2 (MAMO, 2011).

$$S_j(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma \exp \left[ -0.5 \left( \frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

### 2.1.2. Caracterização da onda

De um modo geral, as ondas regulares são descritas segundo três parâmetros básicos e essenciais: a altura de onda,  $H$ , que traduz a diferença entre as cotas das cristas e da cava vizinha; o comprimento de onda,  $L$ , que expressa a distância entre duas cristas de ondas consecutivas; e o período de onda,  $T$ , que é considerado como o tempo que decorre entre duas cristas consecutivas num determinado ponto. Outros parâmetros podem ser obtidos analiticamente em função destas quantidades básicas, como, a título de exemplo, a frequência,  $f$ , que é dada pelo inverso do período, e a celeridade ou velocidade de propagação da onda. A Figura 2.1 apresenta um esquema da onda regular segundo a teoria linear.

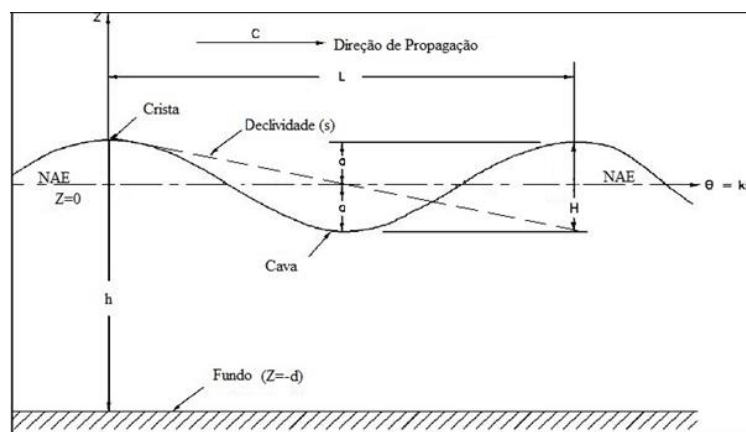


Figura 2.1 – Parâmetros de ondas regulares (adaptado de US Army Corps of Engineers (USACE, 2008)).

Contudo as ondas do mar tomam uma forma irregular na natureza, sendo estas uma combinação entre vagas, ondas de período reduzido, geralmente inferior a 8 s, e ondulação, em geral com períodos compreendidos entre os 8 s e os 25 s. Na Figura 2.2, pode observar-se uma representação esquemática de onda irregular. Segundo Hammeken Arana (2017) é expectável que as ondas irregulares apresentem uma variabilidade estatística, podendo assim, ser aplicados métodos estatísticos e probabilísticos de modo a estimar os parâmetros de ondas irregulares. O autor acrescenta ainda que, os dois parâmetros mais importantes das ondas irregulares para a caracterização do estado do mar são a altura da onda característica e o período característico, a partir dos quais pode ser o comprimento de onda característico.

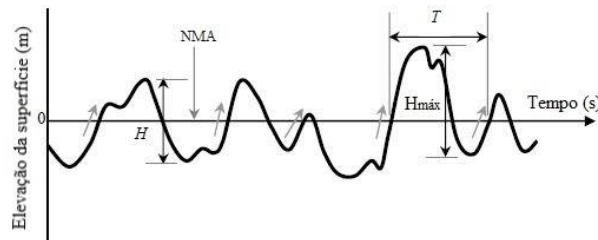


Figura 2.2 – Parâmetros das ondas irregulares (adaptado de Bay, 2005).

Num registo de ondas observadas, a altura de onda característica pode ser caracterizada pela: altura da onda média,  $H_m$ , a altura de onda significativa que é a média do terço das maiores alturas de onda observadas,  $H_s$  ou  $H_{1/3}$ ; a altura máxima da onda verificada,  $H_{máx}$ ; e a raiz do valor quadrático médio de todas as alturas de onda num registo,  $H_{rms}$ . De acordo com Van der Meer et al. (2018), a altura de onda usada em algumas fórmulas, a fim de determinar o espraimento e galgamento, é a altura de onda significativa incidente no pé da estrutura determinada por análise espectral,  $H_{m0}$ . A Equação 2.3, permite obter a altura de onda significativa incidente.

$$H_{m0} = 4(m_0)^{1/2} \quad (2.3)$$

Em que  $m_0$  corresponde ao momento de ordem zero do espectro.

Também para o período existem várias formas para se caracterizar o espectro de onda. O período significativo,  $T_{1/3}$ , é a média do terço dos maiores períodos de onda observados, o período médio,  $T_m$ , é a média de todos os períodos analisados e o período de pico,  $T_p$ , corresponde ao período de pico do espectro. De acordo com Van der Meer et al. (2018), o período de onda usado em algumas fórmulas empíricas para determinar o espraimento e galgamento é o período de onda espectral,  $T_{m0}$ , e é dado pela Equação 2.4.

$$T_{m0} = m_0/m_1 \quad (2.4)$$

Onde  $m_0$  corresponde ao momento espectral de ordem 0, dado por  $m_0 = \int_0^\infty S(\omega)\Delta\omega d\omega$  e  $m_1$  representa o momento espectral de ordem 1, dado  $\int_0^\infty \omega S(\omega) d\omega$ .

## 2.2. Processos de propagação e transformação da onda

Um pressuposto essencial para uma estimativa fiável da incidência da agitação marítima em estruturas costeiras é a compreensão detalhada da forma como as ondas se transformam durante a sua propagação até à costa, após terem sido geradas pelo vento em zona de águas profundas

(Goda, 2000). A Figura 2.3 ilustra as características das ondas progressivas ao propagarem-se em diferentes meios, desde águas profundas, passando por águas intermédias e até águas pouco profundas.

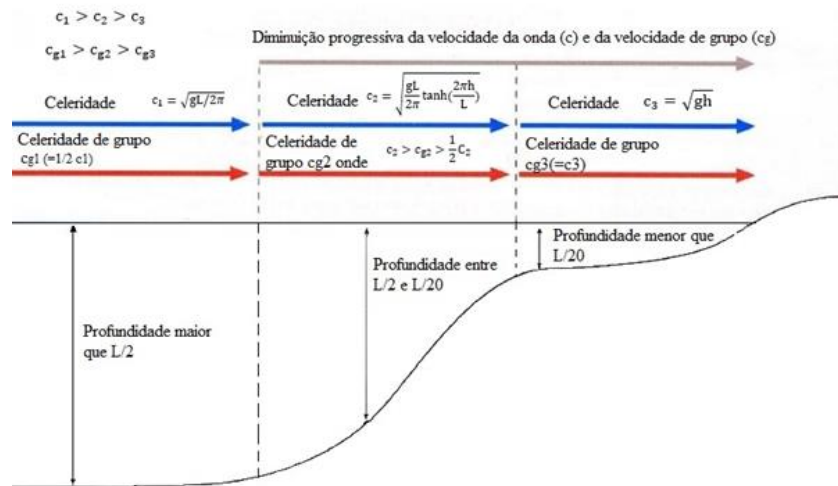


Figura 2.3 – Propagação das ondas desde águas profundas até águas pouco profundas (adaptado dos apontamentos das aulas de EFC, Antunes do Carmo, 2019).

São condições de águas profundas, ou *offshore* na língua inglesa, se a profundidade da água ( $h$ ) for superior a meio comprimento de onda ( $L$ ), sendo que nestas circunstâncias a onda não sente o fundo, pelo que a sua celeridade é apenas dependente do período da onda ( $T$ ), como se pode observar pela Equação 2.5.

$$c = \frac{gT}{2\pi} \approx 1.56T \quad (2.5)$$

Com a progressão da onda, ao entrar em meio de águas intermédias, na gíria inglesa *nearshore*, ( $0.05L < h < 0.5L$ ), esta começa a sentir a topografia do fundo e a celeridade passa a ser também função do comprimento de onda e da profundidade da água. Nestas condições a celeridade é dada pela Equação 2.6.

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (2.6)$$

Com,  $k = \frac{2\pi}{L}$ . Continuando a progredir, ao entrar em meio de águas pouco profundas, na gíria inglesa *onshore*, ( $h < 0.05L$ ), a celeridade da onda passa a ser apenas função da profundidade. A Equação 2.7 apresenta a celeridade em condições de águas pouco profundas.

$$c = \sqrt{gh} \quad (2.7)$$

Com o aproximar da onda à costa, o seu comprimento  $L$  diminui e a sua altura de onda,  $H$  aumenta existindo um aumento da declividade da onda, ou empolamento. Devido a este aumento na declividade da onda, esta atinge uma altura crítica, levando a um estado de instabilização fazendo com que rebente (Robertson et al., 2013). Van der Meer et al. (2018) definem a declividade da onda como a relação entre a altura significativa da onda,  $H_s$ , e o comprimento de onda ao largo,  $L_0$ , e é dado pela Equação 2.8.

$$s = \frac{H_s}{L_0} \quad (2.8)$$

O comprimento de onda ao largo é dado pela Equação 2.9.

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.9)$$

### 2.2.1. Refração

Quando uma onda se propaga de águas profundas para águas menos profundas a diminuição da celeridade da onda e a incidência oblíqua da mesma faz com que a onda mude de direção, tendendo a crista a ficar mais paralela à batimetria.

Este fenómeno é designado por refração, o qual ocorre, essencialmente quando, a crista de uma onda se propaga em diferentes profundidades, isto é, quando existem troços da crista em que a profundidade é menor deslocando-se mais lentamente que os troços em que a profundidade é maior (Antunes do Carmo, 2016). Deste modo, a crista tende a encurvar-se, adaptando-se à morfologia do fundo. A Figura 2.4 representa o fenómeno de refração da onda, para diferentes características batimétricas e de linha de costa, à medida que a onda se propaga aproximando-se de águas pouco profundas.

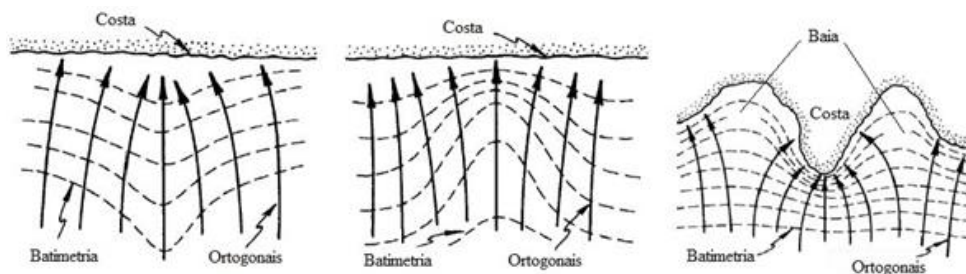


Figura 2.4 – Fenómeno de refração da onda, para diferentes batimetrias e linhas de costa (adaptado de Coastal Engineering Research Center (CERC, 1984)).

O fenómeno de refração pode ser descrito, em caso de batimetria paralela, pela lei de Snell, dada pela Equação 2.10. Esta equação relaciona a mudança de direção de uma onda com a alteração da velocidade de propagação da onda,

$$\frac{\text{sen } \theta}{c} = \frac{\text{sen } \theta_0}{c_0} \quad (2.10)$$

onde,  $\theta$  e  $\theta_0$  correspondem ao ângulo entre as batimétricas e a crista da onda, em águas profundas e águas pouco profundas, respetivamente;  $c$  e  $c_0$  corresponde à celeridade da onda em águas profundas e águas pouco profundas, respetivamente.

### 2.2.2. Difração

A difração das ondas é um fenómeno caracterizado pelo transporte de energia lateral ao longo de uma crista de onda, sendo mais perceptível considerando, um conjunto de ondas que se propaga em direção à costa e é interrompido por um quebra-mar ou uma barreira natural (CERC, 1984). Este fenómeno de difração pode sere identificado em três zonas distintas, a Figura 2.5 apresenta o fenómeno da difração das ondas e as várias zonas.

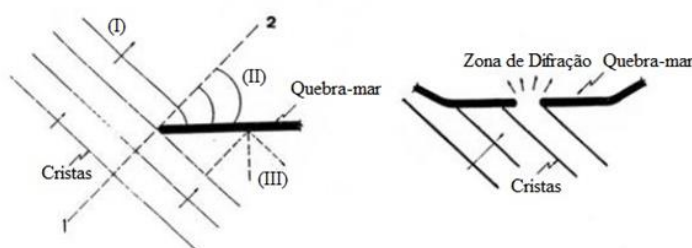


Figura 2.5 – Fenómeno de difração das ondas (adaptado de Veloso-Gomes (1996) *in* Antunes do Carmo, 2016).

A zona I não se apresenta perturbada pela existência do quebra-mar e as ondas propagam-se normalmente. Já na zona II, que é abrigada pelo quebra-mar, as cristas das ondas apresentam uma forma aproximadamente circular. As ondas da zona I transmitem energia à zona de abrigo II através do fenómeno de difração, ou seja, através da transmissão lateral de energia. A zona III é reconhecida pela sobreposição da onda incidente com a onda refletida pelo quebra-mar.

### 2.2.3. Rebentação

Com a aproximação da onda à linha de costa, devido à gradual redução de profundidade, a velocidade de propagação da onda vai diminuindo. Deste modo, como o fluxo é energético tem de se manter constante à altura da onda, que é proporcional à sua energia, vai aumentando



progressivamente até que a declividade da onda atinge um valor limite e conseqüentemente, a onda rebenta.

De modo a estimar a transformação de uma onda em águas pouco profundas é necessário identificar o início e o tipo de rebentação da onda (Camenen e Larson, 2007). Bay (2005) acrescenta ainda que o modo de rebentação da onda está relacionado com o número de Iribarren, sendo um dos parâmetros mais importantes para estimar o espreamento e o galgamento. O número de Iribarren é o parâmetro adimensional que melhor caracteriza o efeito da inclinação do fundo e da declividade da onda. Este parâmetro é também conhecido como *surf similarity parameter* na gíria inglesa, o qual foi introduzido pela primeira vez por Iribarren e Noagles (1949) sendo definido como a relação entre a declividade do talude e a raiz quadrada da declividade da onda. A Equação 2.11 expressa o número de Iribarren, onde  $\alpha$  representa o ângulo de declive do fundo.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.11)$$

O modo de rebentação de uma onda pode ser governado pelo número de Iribarren ao largo. Deste modo, pode-se classificar, geralmente, a rebentação de uma onda em quatro tipos diferentes: rebentação progressiva, mergulhante, colapsante e de fundo. A Figura 2.6 ilustra os tipos de rebentação existentes.

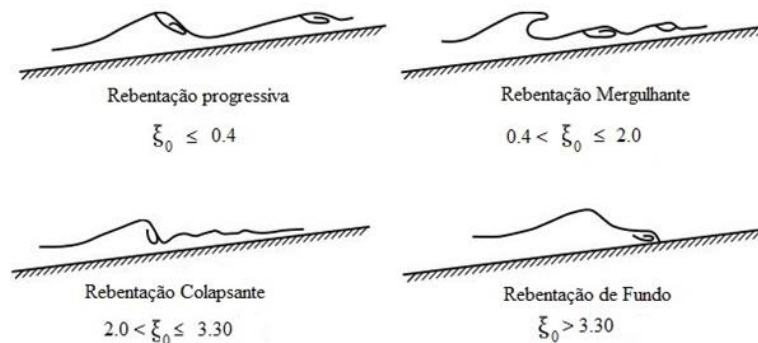


Figura 2.6 – Modos de rebentação da onda e respetivos valores de Iribarren (adaptado de Van der Meer et al., 2018; Antunes do Carmo, 2016).

Assim, para valores de Iribarren inferiores a 0.4 a rebentação da onda é considerada progressiva; para valores de Iribarren entre os 0.4 e 2.0 a rebentação já é considerada como onda mergulhante; para valores de Iribarren entre 2.0 e 3.30, a rebentação é colapsante; por fim, para valores superiores 3.30 ocorre rebentação de fundo.

O parâmetro de rebentação também se pode definir para parâmetros espectrais, e é dado pela Equação 2.12.

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_{m0}}}} \quad (2.12)$$

O comprimento de onda ao largo para um período espectral é dado pela Equação 2.13.

$$L_{m0} = \frac{gT_{m-1,0}^2}{2\pi} \quad (2.13)$$

#### 2.2.4. Espraimento

O fenómeno de espraimento, ou *run-up* na gíria inglesa, conduz a uma sobrelevação (*setup*), a qual se pode entender segundo Hammeken Arana (2017), como a cota máxima atingida por uma onda, medida na vertical acima do nível de água estática, em inglês *Still Water Level* (SWL). O refluxo,  $R_d$ , é referente à fase de oscilação descendente em que a onda atinge a cota mínima (*setdown*), ou seja, abaixo do nível de água estática (Antunes do Carmo, 2016). O espraimento é assim definido através da altura na vertical,  $R_u$ , que a água atinge sobre a estrutura em relação ao nível de água estática. A Figura 2.7 demonstra o fenómeno de espraimento e refluxo, com o nível definido pela distância vertical entre o nível de água estática e as cotas máxima e mínima atingidas pela onda incidente, respetivamente.

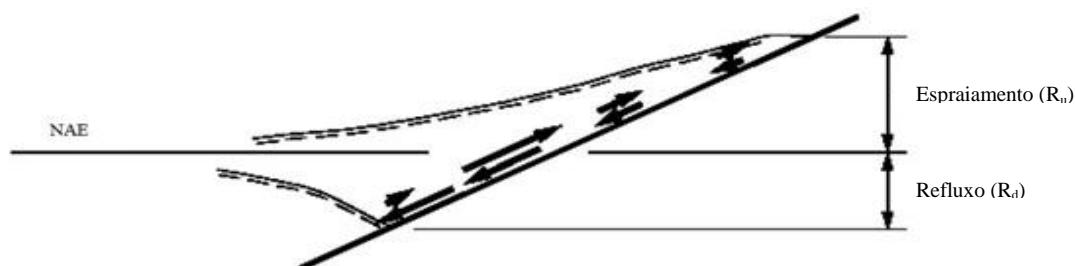


Figura 2.7 – Representação esquemática dos fenómenos de espraimento e refluxo (adaptado de USACE, 2011a).

Hammeken Arana (2017) afirma ainda que o espraimento pode ser altamente influenciado pela condutividade hidráulica e pela rugosidade da superfície. Isto é, ao longo dos taludes do quebra-mar, os fenómenos de espraimento e de refluxo originam escoamentos turbulentos e com grandes velocidades que podem levar a movimentos excessivos dos blocos no manto resistente acima dos limites de dimensionamento, ou até mesmo a lavagem de material das camadas interiores. As cotas do espraimento e do refluxo vão depender puramente da altura de onda e do período de onda.

Na literatura encontram-se várias fórmulas de carácter empírico que têm sido propostas para o cálculo do espraimento e das respetivas cotas máximas de inundação, sendo que, na generalidade, estas dependem das condições de agitação marítima (Neves et al., 2013). Segundo

o *European Overtopping Manual*, EurOtop (Van der Meer et al., 2018), devido à natureza estocástica das ondas incidentes em estruturas portuárias, cada onda proporcionará um espraimento diferente. Assim, segundo os autores, pode definir-se, o  $R_{1/3}$  como o *run-up* significativo, isto é, a média do terço dos maiores espraimentos num registo;  $R_{u2\%}$ , como o *run-up* excedido por 2% de todos os espraimentos num registo, no pé da estrutura, e  $R_{máx}$  como o *run-up* máximo registado.

As fórmulas empíricas desenvolvidas para estruturas costeiras para a previsão do espraimento foram testadas para condições específicas da onda e de nível de maré e considerando alguns tipos de estrutura/geometrias diferentes. O Quadro 2.1 apresenta algumas fórmulas empíricas para estruturas de defesa costeira, sendo que a maioria tem por base medições em laboratório.

Quadro 2.1 – Algumas fórmulas empíricas para o cálculo do espraimento em estruturas de defesa costeira (adaptado de Poseiro, 2019).

Autores	Equações	Aplicação e Limitações
Allsop et al., (1985)	Taludes com tetrápodes no mando de proteção: $R_{u2\%} = 1.83H_s(1 - e^{-0.3\xi_p})$  Taludes com blocos Antifer no manto de proteção: $R_{u2\%} = 1.52H_s(1 - e^{-0.34\xi_p})$	Para taludes com tetrápodes e blocos antifer no manto de proteção. Com configuração em laboratório e ondas irregulares. Tem por bases a equação de Losada and Gimenez-Curto (1981).
Van der Meer e Stam (1992)	Para $1 < \xi_m \leq 1.5$ $R_{u2\%} = 0.96H_s \xi_m$ Para $1.5 < \xi_m \leq 3.1$ $R_{u2\%} = 1.17 * H_s * \xi_m^{0.46}$ Para $3.1 < \xi_m \leq 7.5$ $R_{u2\%} = 1.97H_s$	Para taludes permeáveis e homogéneos, incluindo revestimentos e quebra-mares. $1:15 < \alpha < 1:4$ . Com configuração em laboratório e ondas irregulares (na maioria com um espectro Pierson-Moskowitz). Válida para águas relativamente profundas no pé da estrutura, para uma distribuição de alturas de onda de Rayleigh.
Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011)	Para $\xi_m \leq 2.1$ $R_{u2\%} = 0.86H_s \xi_m^{0.69}$ Para $2.1 < \xi_m \leq 3.9$ $R_{u2\%} = 1.16H_s \xi_m^{0.31}$ Para $\xi_m > 3.9$ $R_{u2\%} = 1.56H_s \xi_m^{0.15}$	Estruturas com monte de entulho (rocha e encostas rugosas). Fórmulas baseadas em dados pré existentes de laboratório e de campo. Para ondas irregulares.
EurOtop (2018)	Para taludes rochosos e rugosos: $R_{u2\%} = 1.65 * H_{m0} * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_\beta * \xi_{m-1,0}$ Com um máximo de: $R_{u2\%} = 1.0 * H_{m0} * \gamma_{f \text{ surging}} * \gamma_\beta * \left( 4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b * \xi_{m-1,0}}} \right)$ Para $1.8 < \xi_{m-1,0} \leq 10$ $\gamma_{f \text{ surging}} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 1.8) * (1 - \gamma_f) / 8.2$ Para $\xi_{m-1,0} > 10$ $\gamma_{f \text{ surging}} = 1$	Válida para vários tipos de rochas e taludes rugosos, sobre núcleos impermeáveis e permeáveis. Com configuração em laboratório e ondas irregulares. Os valores de $\gamma_f$ variam consoantes as características, para um núcleo permeável com camadas de tetrápodes no manto de proteção $\gamma_f = 0.38$ .

### 2.2.5. Galgamento

De acordo com Besley (1999), os galgamentos em estruturas marítimas ocorrem como resultado de um espraimento excessivo na face da estrutura, isto é, se os níveis de espraimento forem bastante elevados a água vai atingir e transpor a crista do talude. Assim pode definir-se o galgamento, ou *overtopping* na bibliografia inglesa, como a massa de água que transpõe a estrutura, medida através do seu volume,  $V$  (em  $m^3$ ), ou através do seu caudal médio,  $q$  (em  $m^3/s$  ou  $l/s$ ), por metro linear de desenvolvimento de estrutura (Rodrigues, 2011). A Figura 2.8, representa um esquema do fenómeno de galgamento, sendo  $q$  o caudal médio galgado por metro linear de estrutura.

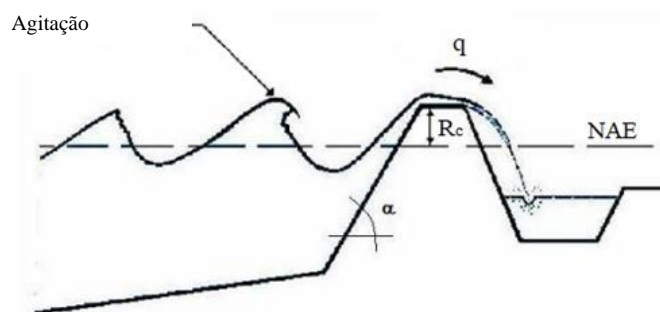


Figura 2.8 – Representação esquemática do fenómeno de galgamento, (adaptado de Brito, 2007).

O galgamento pode ser classificado em três tipos diferentes, dependendo da massa de água que transpõe a estrutura. O galgamento mais significativo é denominado por *Green Water*, na gíria inglesa, e ocorre quando um espraimento excessivo cria uma lâmina de massa de água contínua que passa a crista da estrutura (Brito, 2007). Sendo o galgamento mais significativo é também o mais relevante devendo este ser o usado no dimensionamento de estruturas marítimas onde a resposta da estrutura a este fenómeno vai definir o seu desempenho (Silva, 2014).

Outra forma de galgamento é designada por *splash*, na literatura inglesa, o qual ocorre quando uma onda rebenta sobre o talude dando origem a um grande volume de salpicos que transpõe a estrutura. Por último, o galgamento menos significativo é designado por *spray*, na gíria inglesa, e ocorre exclusivamente por ação do vento. Este processo pode ter significado se se verificar uma forte ação do vento ou em regiões frias, onde os salpicos podem solidificar e causar danos (Brito, 2007).

O fenómeno de galgamento é um processo aleatório no tempo e no espaço, devido à ação irregular das ondas, onde, a ondas de maiores alturas está agregada uma maior passagem de volume de água sobre a cota de coroamento da estrutura, enquanto, ondas de menores alturas acabam por não causar galgamento. Geeraerts et al., (2006) afirmam que o galgamento não é

um problema simples de ser quantificado, avaliado, e de simples dimensionamento da cota de coroamento da estrutura, existindo, no entanto, várias fórmulas empíricas para a previsão das descargas médias em excesso nas estruturas costeiras.

O manual EurOtop (Van der Meer et al., 2018) fornece vários valores críticos de referência para caudais médios galgados críticos,  $q$ , e também para volumes individuais máximos,  $V_{máx}$ . Estabelecendo assim, valores limites para rotura estrutural, de impacto limite para as propriedade e equipamentos portuários localizados atrás da estrutura e valores limite referentes às pessoas e veículos.

Para o cálculo efetivo do caudal médio galgado, várias pesquisas têm-se dedicado ao desenvolvimento de fórmulas empíricas obtidas a partir de ensaios em laboratório, onde a escolha principal da fórmula a utilizar depende essencialmente das características da estrutura e das condições de agitação em estudo.

As expressões mais comuns são  $Q = a \exp(-bR)$  e  $Q = a R^{-b}$ . Onde  $Q$  é o galgamento médio adimensional,  $R$  é o bordo adimensional e  $a$  e  $b$  são coeficientes adimensionais determinados a partir de análise de regressão com base nos dados disponíveis. No Quadro 2.2 apresenta-se algumas das fórmulas existentes na literatura para determinar o caudal médio galgado.

Quadro 2.2 – Fórmulas empíricas existentes para o cálculo do caudal médio galgado (adaptado de Poseiro, 2019).

Autores	Estruturas	Fórmulas de Galgamento	Caudal Médio Adimensional, $Q^*$	Bordo Livre Adimensional, $R$
Perdersen e Burcharth (1992)	Enrocamento colocado em taludes semi-impermeáveis com muro-cortina	$Q = aR$	$\frac{qT_{m0}}{L_{m0}^2}$	$\frac{H_s}{R_c}$
Franco et al. (1994)	Quebra-mares verticais com ou sem frente perfurada	$Q = a \exp(-bR)$	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}$
Van der Meer e Janssen (1995)	Taludes lisos impermeáveis, rugosos, simples e com berma	$Q = a \exp(-bR)$	Para $\xi_p < 2$ $\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{S_p}{\tan \alpha}}$ Para $\xi_{op} > 2$ $\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	Para $\xi_p < 2$ $\frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{S_p}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}$ Para $\xi_p > 2$ $\frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_f \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}$
Pullen et al., (2007)	Para taludes com declive acentuado.	$Q = a \exp(-bR)$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta}$
EurOtop (2018)	Para taludes com declive acentuado	$Q = a \exp[(-b R)^c]$	$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}}$	$\frac{R_c}{H_{m0} \gamma_f \gamma_\beta}$

Dada a variabilidade do galgamento em estruturas marítimas, a média dos galgamentos, apesar de poder ser semelhante, pode dar origem a resultados diferentes. Assim, uma pequena quantidade de ondas pode apresentar grandes volumes e as restantes apresentarem galgamentos pouco significativos. Vários ensaios em modelo físico permitiram deduzir que a distribuição de probabilidade do volume galgado por onda e por unidade de comprimento segue uma distribuição de Weibull (Franco et al., 1994; Van der Meer e Janssen, 1995).

### 2.3. Quebra-mares

Usualmente, os quebra-mares são construídos junto à linha de costa de forma aproximadamente paralela a esta, com geometria e comprimento dependentes da zona a proteger, direção predominante do vento, das correntes de transporte de sedimentos e também, em caso de se tratar de um abrigo portuário, da capacidade de manobra das embarcações que entram no porto (Silva, 2014). Geralmente os quebra-mares podem ser classificados em três tipos: quebra-mar de talude, quebra-mar vertical, quebra-mar misto.

A escolha do tipo de quebra-mar em obra a seleccionar depende de vários fatores, tais como:

- A função que o quebra-mar desempenha no porto;
- A profundidade do local de implementação;
- A disponibilidade de materiais a utilizar na sua construção;
- A disponibilidade do equipamento adequado à sua construção.

Os quebra-mares de talude são das estruturas mais utilizadas no mundo e também dos mais comuns em Portugal. Estas estruturas apresentam um paramento inclinado com camadas de enrocamento de várias dimensões, podendo a camada exterior ser composta por blocos de betão artificiais (como, por exemplo, tetrápodes ou blocos antifer). Nestas estruturas trapezoidais a onda dissipa energia por rebentação, por atrito e formação de uma emulsão ar-água. Segundo Pita (1985), o espraçamento e rebentação da agitação incidente sobre o manto de blocos proporcionam dissipação de energia, sendo a restante refletida para o largo. A estrutura porosa apresentada em quebra-mares de talude permite a dissipação de energia através das camadas interiores e do núcleo.

Os quebra-mares de talude têm como principais vantagens:

- A simples manutenção, do ponto de vista técnico;
- A possibilidade de construção em fundos irregulares e sem grandes características de resistência;
- A fácil construção, devido ao facto de não necessitar de equipamentos especiais;

- A inexistência de limitações quanto à profundidade.

No entanto, a imprescindibilidade de grande quantidade de materiais de construção e manutenção periódica são as principais desvantagens destas soluções de engenharia. A Figura 2.9 apresenta um perfil de quebra-mar de talude e os seus elementos constituintes.

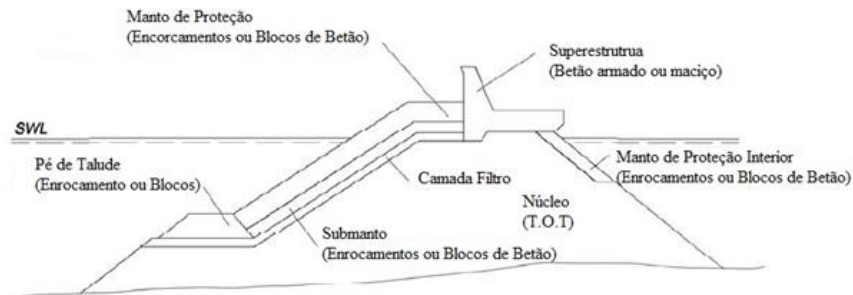


Figura 2.9 – Elementos de um quebra-mar de talude convencional (adaptado de USACE, 2011b).

Nesta estrutura identificam-se:

- Núcleo ou *core*, na gíria inglesa, é a zona de enchimento de forma trapezoidal localizada no interior do quebra-mar normalmente constituído por enrocamentos de “todo o tamanho” (T.O.T). A sua principal função é a atenuação da propagação das ondas, suportar o manto resistente e o submanto;
- Submanto ou *underlayer*, é a zona composta por uma ou mais camadas de enrocamentos também designados por filtros. O objetivo desta camada é evitar a saída do material do núcleo e assegurar uma camada resistente de suporte ao manto de proteção para que este não sofra assentamentos, sendo os materiais constituintes desta camada enrocamentos selecionados;
- Manto de proteção (*armor layer*), é a zona constituída por blocos (naturais ou artificiais) dispostos normalmente em duas camadas, sendo a camada externa do talude sobre a qual a agitação marítima incide diretamente. O principal objetivo desta camada é dissipar a energia das ondas incidentes e prevenir a erosão do submanto e do núcleo devido à agitação marítima;
- Risberma ou pé do talude (*toe berm*) é o remate inferior do manto de proteção e é constituído por enrocamento ou blocos tendo como objetivo suportar a camada resistente do manto;
- Superestrutura (*Wall superstructure*), é um bloco de betão ou alvenaria de blocos que compõem o coroamento da estrutura, permitindo o acesso de veículos, incluindo guindastes para manutenção e reparação, ou instalação de redes de condutas necessárias a este tipo de estruturas.

### 3. Modelação Física

O espraimento e galgamento em estruturas marítimas são fenómenos complexos e de difícil quantificação, pelo que é fundamental o conhecimento destes fenómenos que resultam do contacto da agitação incidente com as estruturas marítimas, de forma a diminuir os estragos provocados nestas estruturas pela agitação marítima, à data do seu dimensionamento (Rodrigues, 2011). Estas ocorrências dependem essencialmente das características das ondas, de parâmetros estruturais e do fluido envolvente.

Os ensaios em modelo físico são sem dúvida uma representação suficientemente mais aproximada do conjunto de fenómenos envolvidos na interação da agitação incidente com as estruturas marítimas, permitindo a simulação simultânea de vários fenómenos (Fortes et al., 2014). Os autores acrescentam ainda que a modelação física acaba por ser mais eficiente a modelar fenómenos físicos que os métodos empíricos, podendo também ser usada na calibração/validação de modelos numéricos.

Os estudos em modelo físico podem enquadrar-se em tridimensionais (3D) ou bidimensionais (2D), dependendo da zona a estudar. Os ensaios tridimensionais, que são realizados em tanques de ondas, têm como objetivos a reprodução da linha de costa, a batimetria e a geometria das obras de maneira a simular da melhor forma possível todas as condições que alteram ou têm influência nas características da agitação marítima. Já nos ensaios 2D, que são construídos e explorados em canais de ondas, é reproduzido apenas um trecho da secção transversal da obra que se pretende estudar. Em ambos os casos, o principal objetivo dos ensaios é a análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural, face à agitação incidente. Na Figura 3.1 a) é apresentada uma configuração 3D de e em b) uma configuração 2D, de modelos reduzidos referentes ao porto de São Miguel, Açores.

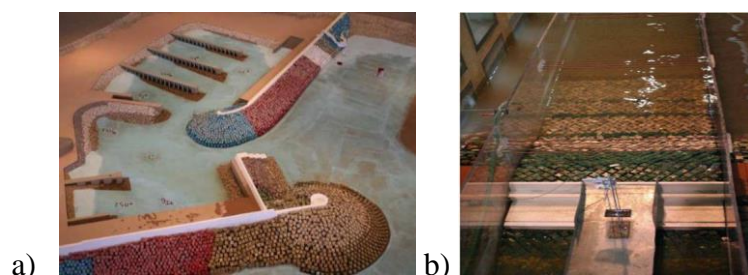


Figura 3.1 – a) Modelo reduzido tridimensional (adaptado de Lemos e Silva, 2013); b) Modelo reduzido bidimensional (adaptado de Lemos e Silva, 2013).



Usualmente, um ensaio de modelação física compreende um estado de agitação caracterizado por uma altura de onda significativa ( $H_s$ ), um período de pico ( $T_p$ ) com origem numa determinada direção ou rumo para um determinado nível de maré. Todos os ensaios em modelo físico contemplam numa fase inicial, a sua construção, onde se preparam todos os elementos a reproduzir, seguindo-se a implementação da batimetria e a construção do modelo. Numa fase posterior é feita a exploração do modelo, onde se faz a calibração da agitação marítima e a realização dos programas de ensaios previstos. Por último, procede-se à análise e interpretação dos dados/resultados obtidos.

### 3.1. Relação de semelhança e escolha da escala

De acordo com Quintela (1998), as leis que relacionam as grandezas intervenientes num fenómeno podem ser simplificadas pela análise dimensional. O autor acrescenta ainda que a permuta para o protótipo dos resultados obtidos num modelo é governada pela teoria da semelhança, que é frequentemente tratada em conjunto com a análise dimensional.

Pode dizer-se que dois sistemas são fisicamente semelhantes, relativamente a um conjunto de grandezas, quando existe uma relação constante entre os valores homólogos dessas grandezas nos dois sistemas. Assim, de modo a garantir a semelhança entre modelo-protótipo, é necessário verificar:

- A semelhança geométrica, que é a semelhança das formas e traduz a existência de uma relação constante entre comprimentos homólogos nos dois sistemas;
- A semelhança cinemática, que é a semelhança do movimento e consiste em partículas homólogas que descrevem percursos homólogos em tempos proporcionais;
- A semelhança dinâmica, que é a semelhança de forças e significa que partículas homólogas são atuadas por forças cujas resultantes têm direção e sentido iguais e cujas grandezas ou módulos são proporcionais.

Com o intuito de todos os fenómenos envolvidos na interação onda-estrutura serem representados à escala (modelo-protótipo) os números de Reynolds ( $Re$ ), Froude ( $Fr$ ), Weber ( $We$ ) e Cauchy ( $Ca$ ) deveriam ser iguais tanto no modelo como no protótipo (Ferraz, 2014). Todavia estes critérios não podem ser satisfeitos em simultâneo; assim, e de acordo com os principais fenómenos envolvidos na interação da onda-estrutura, opta-se por algum ou alguns destes parâmetros e com base nestes definem-se as escalas do modelo (Bastos, 2017). No Quadro 3.1 podem observar-se alguns dos parâmetros habitualmente considerados nos modelos físicos segundo as semelhanças de Froude, Cauchy, Weber e Reynolds.

Quadro 3.1– Resumo dos métodos de escala (adaptado de Kortenhau et al., 2005).

Parâmetro	Froude	Cauchy	Weber	Reynolds
Relação das forças [-]	Inércia/ Gravidade	Inércia/ Elasticidade	Inércia/ Tensão de superfície	Inércia/ Viscosidade
Equações [-]	$\frac{u}{\sqrt{gL}} = \text{const.}$	$\frac{\rho u^2}{k} = \text{const.}$	$\frac{\rho L u^2}{\chi} = \text{const.}$	$\frac{uL}{\nu} = \text{const.}$
Comprimento [m]	$N_L$	$N_L$	$N_L$	$N_L$
Volume [m <sup>3</sup> ]	$N_V = N_L^3$	$N_V = N_L^3$	$N_V = N_L^3$	$N_V = N_L^3$
Tempo [s]	$N_t = \sqrt{N_L}$	$N_t = \sqrt{\frac{N_\rho}{N_k}} N_L$	$N_t = \sqrt{\frac{N_\rho}{N_\chi}} N_L^{1.5}$	$N_t = \frac{N_L^2}{N_\nu}$
Caudais [m <sup>3</sup> /s/m]	$N_q = N_L^{1.5}$	$N_q = \sqrt{\frac{N_k}{N_\rho}} N_L$	$N_q = \sqrt{\frac{N_\chi}{N_\rho}} N_L$	$N_q = N_\nu$

Os principais fenómenos existentes em ensaios de modelo reduzido de quebra-mares são associados a escoamentos com superfície livre, onde as forças de gravidade e de inércia são extremamente importantes. Com o objetivo de garantir a semelhança entre os escoamentos no modelo e no protótipo é imprescindível respeitar a semelhança de Froude, ou seja, terá de se garantir a igualdade do número de Froude no modelo e no protótipo (Pedro, 2015). É de notar que a semelhança de Froude só será relevante quando as forças de viscosidade forem desprezáveis em relação às forças de gravidade e de inércia (Bastos, 2017). Quando essas forças não são desprezáveis terá de ser respeitada a semelhança de Reynolds.

De forma a assegurar que o escoamento é turbulento nas camadas do manto protetor no modelo, tal como é no protótipo, deverá de ser cumprido o seguinte critério relativo ao número de Reynolds, como expressa a Equação 3.1.

$$Re = \frac{\sqrt{gH_s} * D_n}{\nu} \quad (3.1)$$

A relação entre as massas dos blocos no modelo e no protótipo é essencial para a determinação da escala no modelo, visto que garante igual número de estabilidade entre o protótipo e o modelo. A Equação 3.2 apresenta o número de estabilidade,  $N_s$ , sendo este a relação entre a altura de onda significativa que instabiliza o bloco,  $H_s$ , e as suas características físicas, como a massa volúmica relativa,  $\Delta$ , e o diâmetro nominal,  $D_n$ . Mantendo as mesmas características físicas é necessária uma altura de onda significativa maior para instabilizar o bloco, assim, grandes números de estabilidade determinam blocos mais estáveis (Ferraz, 2014). O parâmetro  $N_s$ , tem em consideração a diferença entre massas volúmicas da água (água salgada no protótipo

e água doce no modelo) e a diferença das massas volúmicas dos blocos do manto de proteção no protótipo e no modelo.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (3.2)$$

Onde,  $\Delta$  é a massa volúmica relativa dada por  $\left(\frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}\right)$ , sendo,  $\rho_a$  massa volúmica dos blocos de proteção e  $\rho_w$  a massa volúmica da água. O diâmetro nominal,  $D_n$ , é dado pela Equação 3.3:

$$D_n = \left(\frac{M_a}{\rho_a}\right)^{1/3} \quad (3.3)$$

Na qual,  $M_a$  é a massa do bloco do manto resistente e  $\rho_a$  massa volúmica do bloco de proteção. Assim, se o número de estabilidade for igual no modelo e no protótipo a escala pode ser calculada pela Equação 3.4.

$$\lambda = \frac{H_{s,p}}{H_{s,m}} = \frac{\Delta_p}{\Delta_m} * \left(\frac{M_p}{M_m}\right)^{1/3} * \left(\frac{\rho_{a,m}}{\rho_{a,p}}\right)^{1/3} \quad (3.4)$$

### 3.2. Erros e Efeitos de Escala associados

A exata reprodução dos fenómenos de interação onda-estrutura em laboratório não é possível devido a distorções provocadas pela construção à escala e a impossibilidade de cumprir simultaneamente todos os parâmetros adimensionais iguais no modelo e no protótipo (Pedro, 2015). Por conseguinte, uma das principais fontes de erros em modelação física deve-se ao comportamento do modelo, denominando-se por efeitos de escala. A título de exemplo apresentam-se em seguida alguns destes efeitos:

- Influência da viscosidade da água na garantia de obtenção do escoamento turbulento;
- Diferentes galgamentos no modelo e no protótipo frutos de uma incorreta reprodução da porosidade no modelo, isto é, quanto menor a porosidade maior é o galgamento;
- Escoamentos através dos filtros do núcleo, ou seja, existirá uma maior perda de carga com a diminuição da porosidade no modelo.

A incorreta reprodução de algumas características do protótipo, como por exemplo, a geometria da estrutura, a resistência mecânica dos blocos artificiais e as características das ondas e das correntes, devido às condições de fronteira do modelo, denominam-se por efeitos de modelo.

A não reprodução da permeabilidade dos filtros e do núcleo é um efeito de modelo que tem grande influência na estabilidade do manto e no galgamento, não permitindo a correta reprodução de fenómenos associados à reflexão, transmissão e dissipação de energia por não exhibir perfeitamente as fronteiras do modelo. Os blocos artificiais têm uma resistência superior no modelo em relação ao protótipo, pelo que não se verificam fissuras e roturas resultantes do choque entre eles ou quedas (algo que acontece com frequência no protótipo). A escolha de uma determinada escala geométrica prende-se com as características da agitação a reproduzir (como o período e altura de onda), com as características da obra (como a profundidade, a cota de coroamento, o peso dos blocos e a inclinação do talude) e com as características da instalação (a área disponível, a profundidade máxima possível, e as alturas e períodos máximos das ondas que é possível gerar).

Outras fontes de erro a ter em conta em todos os ensaios de modelo físico são as que derivam das medições e as suas incertezas intrínsecas à medida, as quais, podem estar associadas ao próprio equipamento de medição e à sua calibração. Estas fontes de erros e incertezas podem ser refletidas nos resultados obtidos, como por exemplo:

- Na repetição de testes que necessitem de tratamento estatístico;
- Nas várias constantes de calibração do equipamento de medição do nível da superfície livre (por exemplo, sondas);
- Nos diferentes resultados quando comparados com diferentes sistemas de medição;
- Na repetibilidade de ensaios.

Estes efeitos podem ter manifestações significativas quando se compara os resultados entre modelos idênticos, mas desenvolvidos em instalações experimentais diferentes.

## 4. Caso de Estudo

### 4.1. O Porto da Ericeira

A presente dissertação centra-se num caso de estudo referente ao porto da Ericeira, sendo este porto situado na freguesia da Ericeira, costa ocidental de Portugal, pertencendo ao concelho de Mafra e distrito de Lisboa. A Figura 4.1 a) apresenta a vista do porto da Ericeira via satélite e b) a sua localização no mapa de Portugal continental.



Figura 4.1 – a) Vista satélite do porto da Ericeira (Fonte: Google Earth, 8 de agosto de 2020);  
b) Localização do porto da Ericeira no mapa de Portugal continental.

O porto da Ericeira tem como objetivo principal dar abrigo a uma pequena frota de pesca artesanal. É um porto de reduzidas dimensões constituído por um molhe, que também funciona como cais de acostagem, e por uma rampa de varadouro. Este molhe protege uma baía que contém a praia dos pescadores e o porto piscatório, que se encontram particularmente vulneráveis à agitação dominante ao largo, especificamente a Noroeste e Oés-Noroeste.

A construção do molhe enraizado iniciou-se em 1973. No entanto, desde cedo, o quebra-mar sofreu vários danos que culminaram, em 1977, com a rotura do quebra-mar em dois na sequência de uma tempestade. Ao longo dos anos ocorreram diversos temporais que levaram ao colapso da superestrutura e do seu manto de proteção, levando a sofrer obras de reabilitação de emergência. Atualmente, este porto apresenta algumas limitações à sua atividade em situações de tempestade devido aos galgamentos que se fazem sentir, originando agitação significativa no interior da baía, dificultando assim o acesso ao cais de acostagem, à lota e à zona de estacionamento de embarcações.

O quebra-mar tem aproximadamente 450 m de comprimento no seu total, dos quais cerca de 60 m pertencem à zona do molhe cais, tendo também cerca de 30 m de largura nesta zona. No presente, o quebra-mar é constituído por blocos *antifer* na cabeça do quebra-mar com 400 kN dispostos de forma regular. Na parte interior do quebra-mar, o talude é constituído por enrocamento de 90 a 120 kN. Na parte exterior, o talude é constituído por tetrápodes com 300 kN e disposto de forma irregular ao longo do seu desenvolvimento. A Figura 4.2 apresenta a planta do molhe cais do porto da Ericeira.

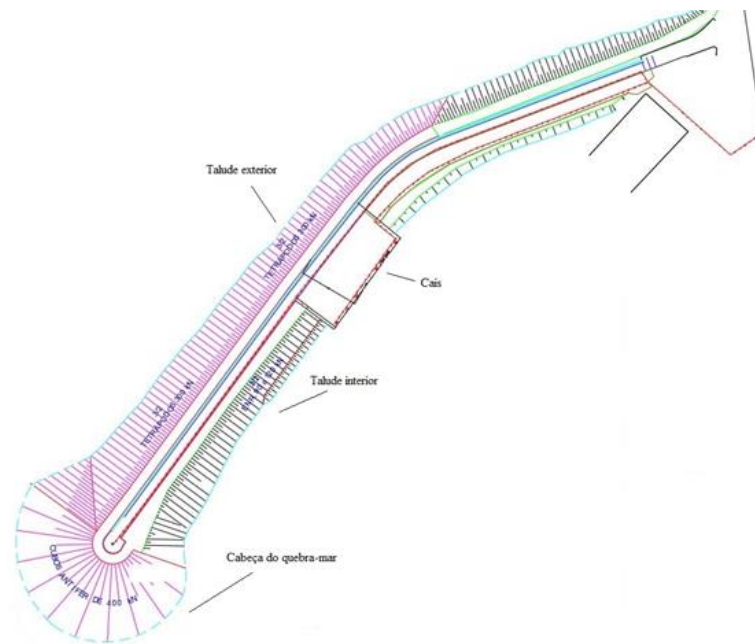


Figura 4.2 – Planta do molhe cais do porto da Ericeira.

#### 4.2. Descrição das Instalações de Ensaio

Os ensaios em modelo físico reduzido foram realizados nas instalações do pavilhão de Hidráulica Marítima do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em particular, no canal de ondas irregulares (COI1). Este canal foi o primeiro canal de ondas irregulares do LNEC e foi construído em 1971. A sua construção tem permitido a realização de estudos em modelo físico reduzido em 2D, de agitação, de estabilidade, galgamento de quebra-mares, de pressões em estruturas marítimas, entre outros, com condições mais aproximadas às condições reais.

O COI1 é um canal com uma secção retangular, com um comprimento aproximado de 50 m, 1.95 m de largura e 1.20 m de altura. As dimensões interiores são de 49.60 m de comprimento e 1.60 m de largura, sendo a largura útil para ensaios de 0.80 m. A Figura 4.3 apresenta a vista lateral do COI1 e a Figura 4.4 representa a vista em planta do COI1.



Figura 4.3 – Vista lateral do COI1.

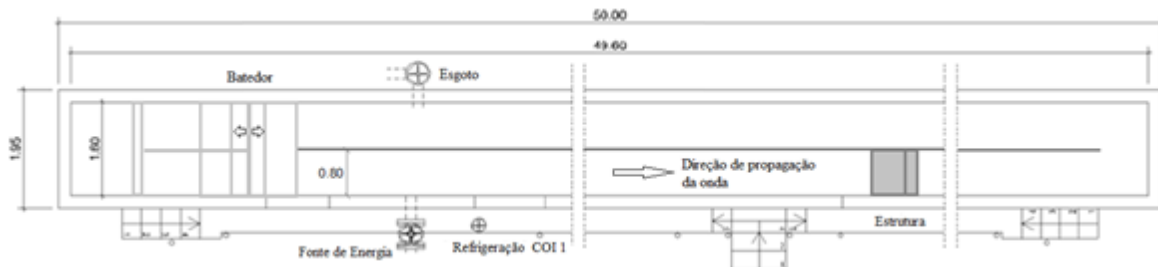


Figura 4.4 – Vista em planta do COI1.

O COI1 permite a geração de ondas regulares ou periódicas e de ondas irregulares ou aleatórias através de um gerador do tipo pistão que é controlado por uma placa de geração de sinais que se encontra conectada a um computador. Esta placa permite ainda utilizar o sistema de absorção ativada da reflexão AWASYS (*Active Wave Absorption System*) (Troch, 2005).

O sistema AWASYS permite a absorção dinâmica das ondas evitando que as ondas refletidas a partir da estrutura no canal sejam refletidas pela pá do batedor transformando-se em ondas incidentes, isto é, o sistema faz a compensação destas ondas. A exata posição destas sondas depende da configuração adotada aquando do dimensionamento dos filtros digitais FIR (*Finite Impulse Response*), componente fundamental do sistema AWASYS. O funcionamento do sistema de absorção ativa de onda é condicionado por estes filtros e deverão ter em conta, entre outros, as frequências mínimas e máximas dos espectros de agitação a reproduzir durante os ensaios. O dimensionamento destes filtros deve ser executado sempre que seja necessário efetuar uma nova configuração do sistema.

### 4.3. Secção transversal do modelo

Os ensaios em modelo físico reduzido foram realizados para uma secção do quebra-mar de talude permeável do porto da Ericeira que protege o cais ali existente. A Figura 4.5 a) apresenta

a localização da secção transversal no porto e b) a secção transversal do quebra-mar construído no COI1.

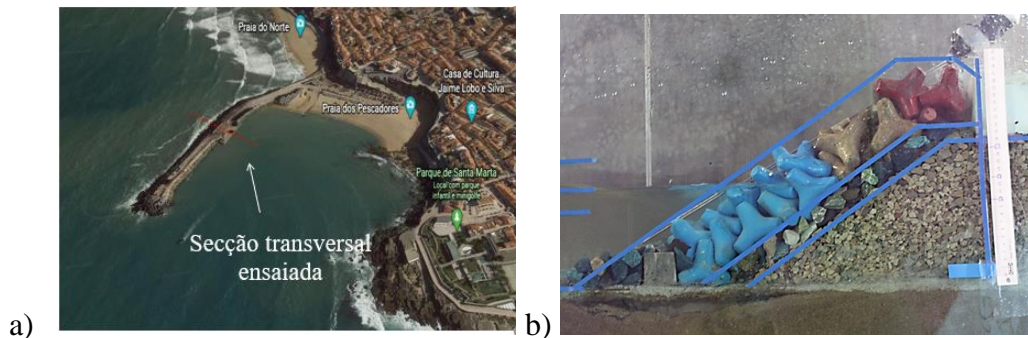


Figura 4.5 – a) Localização aérea da secção transversal ensaiada (Fonte Google Earth, agosto 2020); b) Secção transversal do quebra-mar construído no COI1.

O modelo foi construído e explorado de acordo com os pressupostos na lei de semelhança de Froude, com uma escala geométrica de 1:50. Os fundos em frente ao local de implantação foram reproduzidos por intermédio de uma rampa com uma inclinação de 4.3 % a partir do pé do talude do perfil (-4.5 m ZH, zero hidrográfico) até à cota de -6.0 m ZH, desenvolvendo-se a partir desse ponto uma inclinação de aproximadamente 1.6 % até à cota de -27.5 m ZH. A Figura 4.6 ilustra a implantação do modelo.

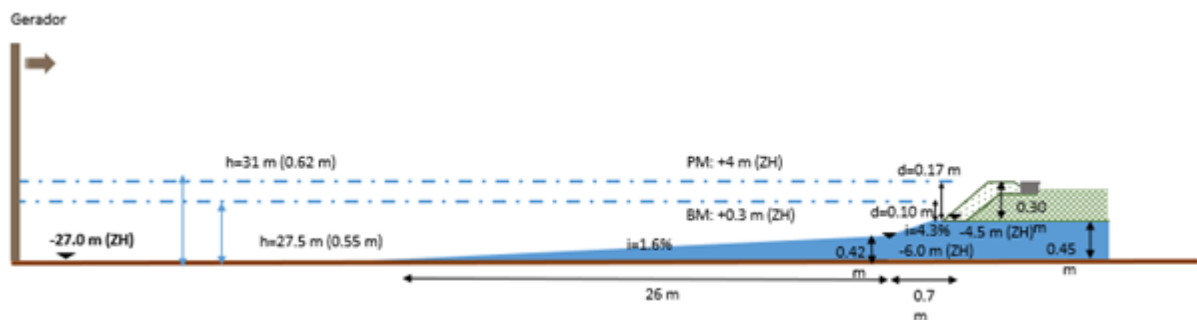


Figura 4.6 – Esquema da implantação do modelo, no COI1.

A secção transversal testada tem uma inclinação do manto de proteção de 2(V):3(H) com duas camadas de tetrápodes com cerca de 300 kN (200 g, à escala do modelo). No pé da estrutura encontra-se uma fila de blocos Antifer para criar uma barreira com os tetrápodes. O submanto contém uma camada de enrocamento designada por camada filtrante (20 a 40 kN), sendo esta camada constituída por enrocamento com um peso muito menor que os tetrápodes utilizados no manto de proteção. O material utilizado para a constituição do núcleo é um enrocamento com cerca de 20 kN (14 g à escala do modelo) de forma a reproduzir a permeabilidade do quebra-mar no protótipo.



O coroamento da estrutura tem 2.64 m (5.28 cm, à escala do modelo) de largura, com um bordo livre ( $R_c$ ) de 6.20 m para um nível em PM e 9.99 em BM, o que corresponde, no modelo, a 12.4 cm e 20 cm para os níveis de PM e BM, respetivamente. A estrutura contém ainda uma laje de betão de 3.25 m de largura (6.5 cm à escala de modelo). A Figura 4.7 apresenta o esquema da secção transversal detalhada. A secção transversal foi construída perto da extremidade do canal, adjacente a um vidro onde era permitido observar visualmente os ensaios.

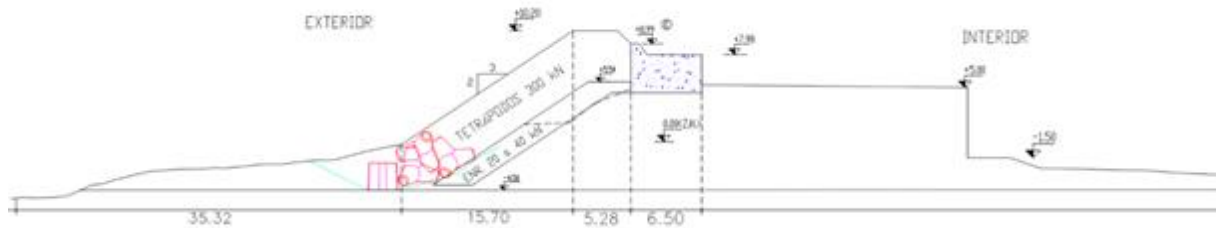


Figura 4.7 – Esquema da secção transversal detalhada.

#### 4.4. Equipamento experimental

Foram instalados vários equipamentos de medição ao longo do canal, sobre a estrutura e no seu tardo, nomeadamente:

- Sondas resistivas, para medir a elevação da superfície livre, o *run-up* e detetar eventos de galgamento;
- Uma balança e um reservatório, para medir o volume de galgamento individual e o volume total de galgamento, respetivamente;
- Duas câmaras de vídeo, uma a apontar para o quebra-mar através da janela lateral do canal e outra a apontar para o quebra-mar a partir de uma vista de topo, com o intuito de gravar as ondas sobre a estrutura e os eventos individuais de galgamento.

##### 4.4.1. Sondas do tipo resistivas

Para analisar a elevação da superfície livre, foram distribuídas 10 sondas resistivas ao longo do canal, AW0, AW1, S1 a S8. A Figura 4.8 apresenta a distribuição das sondas ao longo do canal.

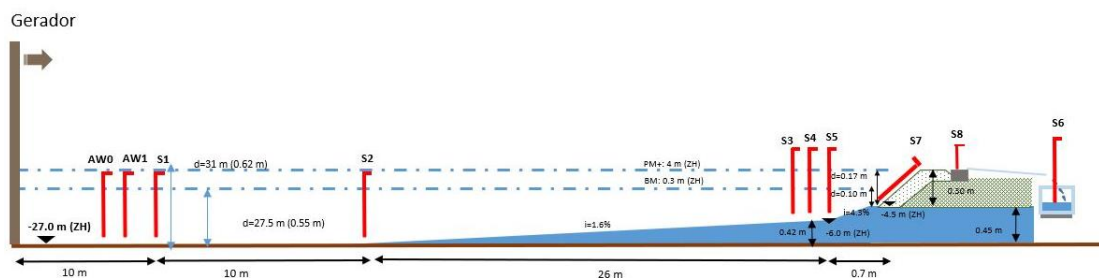


Figura 4.8 – Distribuição das sondas ao longo do canal.

Duas sondas do tipo resistivo (AW0 e AW1) foram instaladas no canal próximo do batedor e têm como função o controle da agitação marítima que se pretende gerar e fornecer informação para o sistema de absorção. Estas sondas estão ligadas a um computador que gera o sinal de onda incidente com o auxílio do software interno SAM (Capitão, 2002). Este computador adquire e regista em simultâneo os dados destas sondas AW0 e AW1 como uma entrada para o sistema de absorção das ondas. A Figura 4.9 a) apresenta o *software* que gera as ondas e b) a localização do batedor e das sondas AW0 e AW1 colocadas no canal.

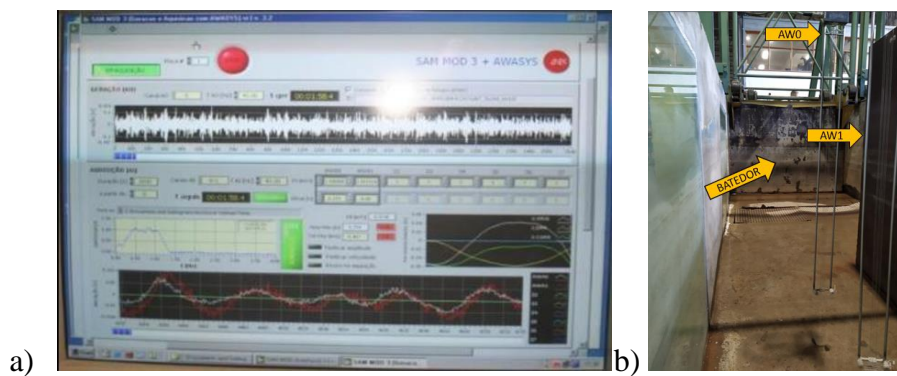


Figura 4.9 – a) *Software* SAM que gera as ondas; b) Localização do batedor e das sondas AW0 e AW1 no canal.

Ao longo do canal foram dispostas as sondas S1 a S5, também do tipo resistivo, cujo objetivo é a medição da elevação da superfície livre em vários locais. A sonda S1 encontra-se a cerca de 4.23 m do batedor, na zona plana do canal. Já a sonda S2 localiza-se no início da rampa, com o declive de 1.6%. As sondas S3 a S5 localizam-se junto ao pé do talude, sendo a sonda S3 a que se encontra no pé do talude. Na Figura 4.10 a) pode observar-se a posição da sonda S1, tal como a localização do batedor e das sondas AWA0 e AWA1, em b) a localização da sonda S2 no canal e em c) a localização das sondas S3 a S5 junto à obra.

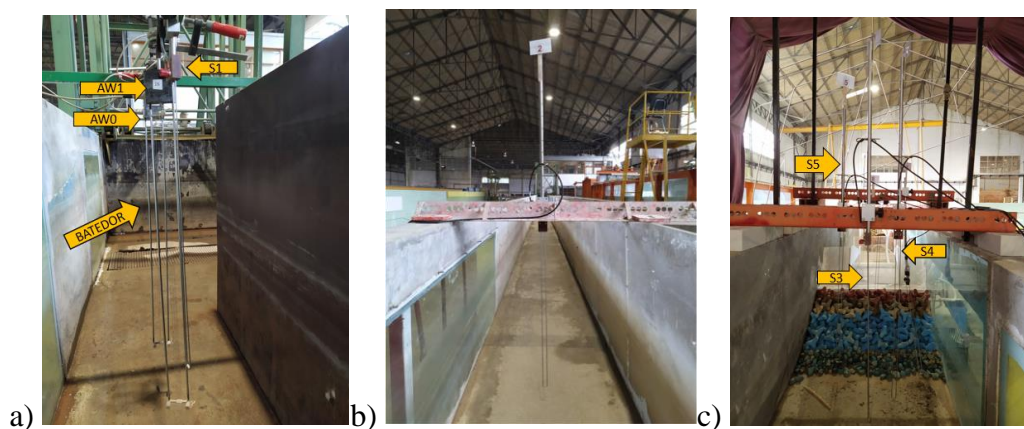


Figura 4.10 – a) Localização do batedor e das sondas AWA0, AWA1 e S1; b) Localização da sonda S2 no canal; c) Localização das sondas S3 a S5 junto à obra.

A sonda S8 localiza-se no topo da superestrutura e serve para identificar os eventos de galgamento. A Figura 4.11 apresenta a localização da sonda S8 no topo da superestrutura.



Figura 4.11 – Localização da sonda S8 no topo da superestrutura.

A sonda S7 foi colocada sobre o manto de proteção com o intuito de medir os níveis de espraçamento. A Figura 4.12 a) apresenta a localização da sonda S7 no canal com vista de topo e a b) apresenta a localização da sonda S7 com vista lateral.

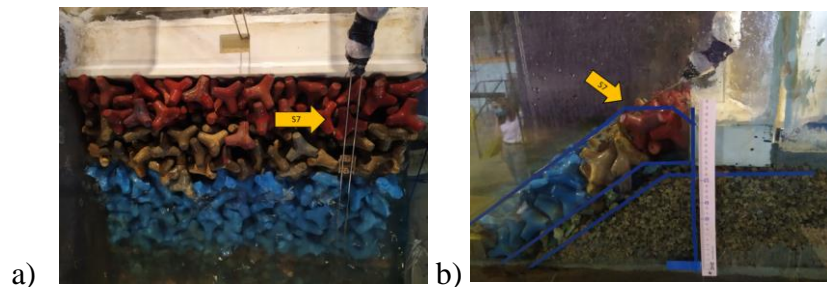


Figura 4.12 – a) Localização da sonda S7 no canal, com vista de cima; b) Localização da sonda S7, com vista lateral.

A Figura 4.13 a) apresenta a localização da sonda S6 dentro do reservatório que armazena a água proveniente dos galgamentos sofridos na estrutura, sendo esta sonda utilizada para medir o galgamento. A aquisição dos dados destas sondas é efetuada através de um computador junto ao canal, o qual é apresentado na Figura 4.13 b).

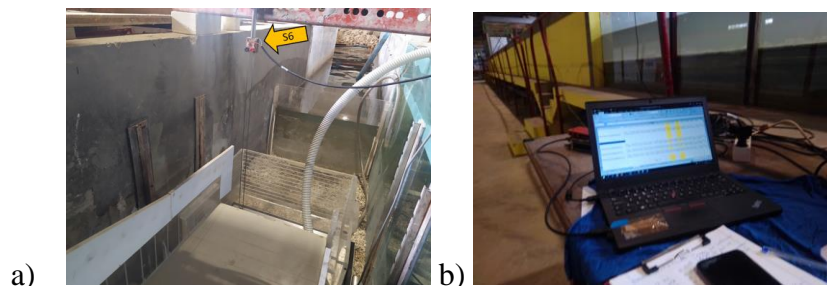


Figura 4.13 – a) Localização da sonda S6; b) Computador junto ao canal.

#### 4.4.2. Reservatório e balança para medição de galgamento

Durante o período de ensaios, a fim de medir os volumes de galgamento, foi instalado um reservatório atrás da estrutura, sobre uma balança de pesagem. O reservatório tem as dimensões de 0.4 m de largura, 0.5 m de comprimento e 0.3 m de altura.

Uma calha de 0.4 m de largura e 1 m de comprimento foi colocada entre a parede da estrutura e o reservatório, com o intuito de conduzir a água que galga a estrutura para o reservatório.

A Figura 4.14 a) apresenta a vista frontal da rampa atrás da estrutura e b) a localização da sonda S6 e vista lateral do equipamento.

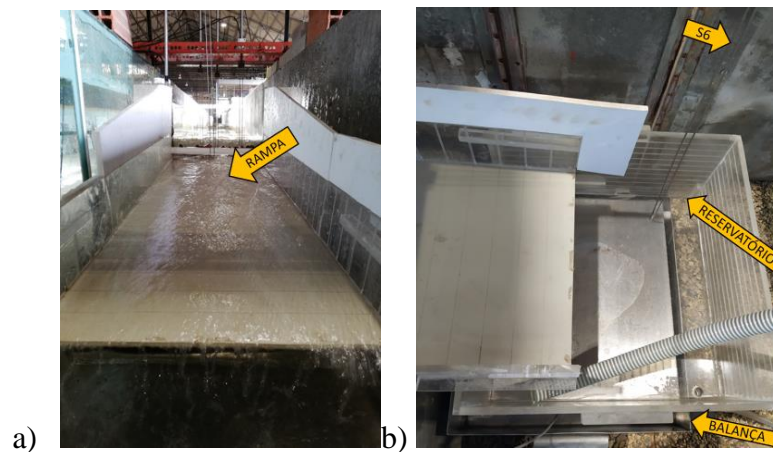


Figura 4.14 – a) Vista frontal da rampa atrás da estrutura; b) Localização da sonda S6 e vista lateral do equipamento.

Um computador foi colocado perto do reservatório e da balança para adquirir os dados medidos pela balança de galgamento. A Figura 4.15 a) apresenta o programa para a aquisição de dados e b) equipamento da balança que pesa a massa de água ao longo dos ensaios.

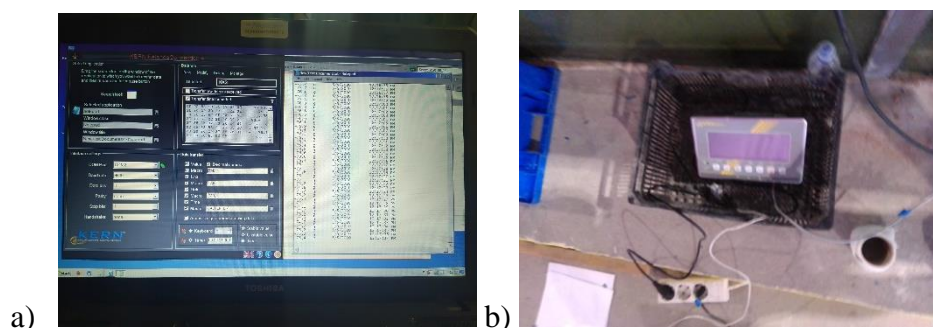


Figura 4.15 – a) Programa para aquisição de dados da balança; b) Equipamento da balança que regista os galgamentos.

#### 4.4.3. Equipamento de vídeo

Durante os ensaios foram gravados uma série de vídeos sendo as filmagens destinadas a documentação e a referência visual. O sistema de vídeo não foi configurado para ser usado em técnicas de monitorização de vídeo. A Figura 4.16 mostra um esquema do plano de visualização usado para a captura dos vídeos utilizando duas câmaras. Foram colocadas duas câmaras de vídeo comerciais, uma de frente para o quebra-mar através da janela lateral do canal e outra com vista de topo para o quebra-mar. A Figura 4.17 apresenta as duas perspetivas de filmagem do quebra-mar.

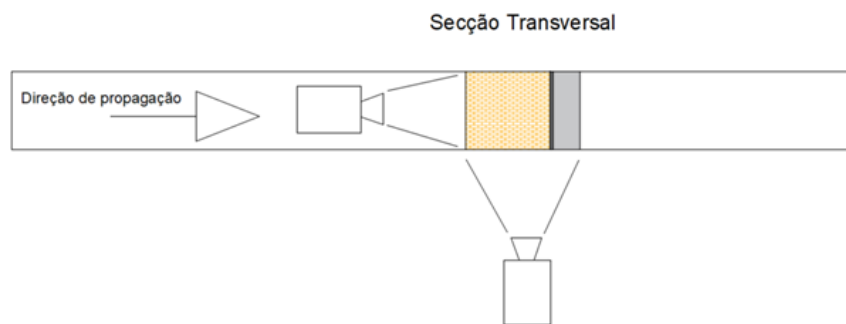


Figura 4.16 – Esquema do plano de visualização usado para a captura dos vídeos utilizando duas câmaras.

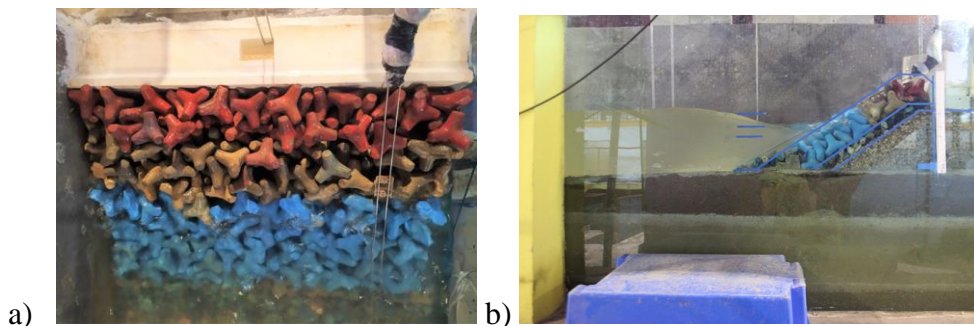


Figura 4.17 – Perspetivas das câmaras de vídeo: a) Perspetiva de topo no quebra-mar; b) Perspetiva lateral no quebra-mar.

#### 4.5. Programa de Ensaios

Foram testadas várias condições de agitação marítima e de níveis de maré. Os valores das condições de agitação marítima basearam-se no regime de agitação marítima no porto da Ericeira (Zózimo et al. 2019) e em valores extremos de alturas de onda para ter em conta as alterações climáticas (associados à subida do nível do mar).

Os níveis de maré ensaiados foram os de Baixa-mar que correspondem a +0.3 m (ZH), Preia-Mar que corresponde a +4.0 m (ZH) e Nível médio correspondendo a +2.0 m (ZH). Os períodos

de pico ensaiados foram de 12, 14 e 16 s para os três níveis de maré. As alturas de onda significativa ( $H_s$ ) ensaiadas são de 4, 5, 6, 7 e 8.5 m para Preia-Mar e 8 m para Baixa-Mar e Nível Médio.

No Quadro 4.1 é apresentado o número de testes realizados assim como as repetições de ensaio efetuadas. Com base nestas condições de nível de maré e altura de onda produziu-se um ficheiro informático contendo a série temporal de deslocamentos da pá do batedor a serem utilizadas na geração de ondas. Como referido anteriormente, foi utilizado o *software* interno da SAM (Capitão, 2002), para esse efeito.

Quadro 4.1 – Número de ensaios e repetições para as condições de agitação ( $H_s$ ,  $T_p$ ) e nível de água.

		Número de testes e repetições								
		PM (+4.00 ZH)			BM (+0.3 ZH)			NM (+2.00 ZH)		
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	12	14	16	12	14	16	12	14	16
	4		3	7	8	-	-	-	-	-
5		7	10	7	-	-	-	-	-	-
6		9	14	8	1	-	-	-	-	-
7		6	5	2	-	-	-	-	-	-
8		-	-	-	2	2	2	6	5	6
8.5		8	6	2	-	-	-	-	-	-

Cada ensaio foi realizado para um dado nível de água, altura de onda e um período de pico, durante um período equivalente de 1000 ondas. O Quadro 4.2 apresenta os períodos de pico das ondas no protótipo e no modelo reduzido e as durações dos ensaios até ser atingida a milésima onda em cada ensaio. As ondas irregulares foram geradas de acordo com a configuração espectral empírica de JONSWAP, com um fator de melhoria de pico  $\gamma=3,3$ . No total, foram realizados aproximadamente 130 ensaios, incluindo várias repetições, com o intuito de aferir a exatidão dos resultados obtidos.

Quadro 4.2 – Duração dos ensaios para cada período de pico das ondas ( $T_p$ ).

$T_p$ (s)		Duração do ensaio em modelo reduzido (Escala de 1:50)	
Modelo	Protótipo	Tempo de ensaio 1000 ondas (s)	Tempo de ensaio 1000 ondas (min)
1,697	12	1697	29
1,980	14	1980	33
2,263	16	2263	38

Em cada ensaio efetuou-se a medição das seguintes variáveis:

- Elevação da superfície livre nas sondas AW0, AW1, S1 a S5;
- do espraimento na sonda S7;

- Eventos de galgamento na sonda S8;
- Peso da água no reservatório da balança instalada no tardo da estrutura;
- Altura da água, correspondente ao galgamento da estrutura, na sonda S6.

A gravação vídeo foi também realizada tal como descrito no subcapítulo 4.4.3.

#### **4.6. Metodologia dos ensaios**

A metodologia dos ensaios compreendeu a realização de um conjunto de tarefas antes, durante e no final dos ensaios. Em relação a cada ensaio foram realizadas as seguintes tarefas para o caso de estudo em análise:

Antes do Ensaio:

- Conexão dos computadores às sondas para a aquisição dos dados;
- Conexão do computador à balança para aquisição de dados;
- Calibração das sondas.

Durante:

- Medição da elevação da superfície livre junto ao batedor, a meio do canal e no pé da estrutura (sondas S1 a S5);
- Medição do espraimento no talude da estrutura (Sonda S7);
- Medição de eventos de galgamento no coroamento da estrutura (Sonda S8);
- Armazenamento do caudal galgado em reservatórios e medição (Sonda S6);
- Obtenção de fotografias e filmagens do espraimento e galgamento na estrutura.

No final do ensaio:

- Medição da altura de água no reservatório da balança (ou nos reservatórios exteriores ao canal) com uma fita métrica para obter posteriormente o volume de água total galgado considerando a área do reservatório;
- Recolha de dados das sondas e da balança;
- Tratamento dos dados recolhidos pelas sondas e pela balança através do *software Matlab*.

## 5. Apresentação e Análise de Resultados

### 5.1. Introdução

Para as diferentes condições de agitação incidente simuladas nos ensaios em modelo físico bidimensional, foi possível adquirir dados de elevação de superfície livre nas sondas colocadas ao longo do canal, bem como do peso da água no reservatório da balança instalada no tardo da estrutura. A análise destes dados adquiridos foi efetuada através de *scripts* desenvolvidos em *Matlab*, (Pinheiro, 2019, Lemos, 2020 e Fortes e Santos, 2020).

Para as sondas S1 a S5, efetuou-se uma análise espectral e temporal das séries temporais de elevação da superfície livre, obtendo-se entre outros, os valores de altura significativa,  $H_s$ , da altura significativa espectral do estado de agitação,  $H_{m0}$ , do período médio,  $T_m$  e de pico,  $T_p$ .

Para a sonda S7, efetuou-se uma análise temporal da série temporal obtendo-se os valores de espraimento em termos de  $R_{u2\%}$ ,  $R_{u\text{ médio}}$  e  $R_{u\text{ máx}}$ . Note-se que por definição, o espraimento é o deslocamento vertical máximo da onda na face do talude da estrutura. O valor máximo do espraimento neste caso é limitado pela altura de coroamento da estrutura do quebra-mar. Assim, apenas é contabilizado o espraimento abaixo do coroamento do manto de proteção.

Já a análise da série temporal obtida na sonda S6, que se encontrava dentro do reservatório da balança, colocado atrás da estrutura, permitiu registar a altura de água nesse reservatório com o intuito de calcular o volume total de água galgado e, deste modo, avaliar o galgamento ocorrido. Procedeu-se também no fim de cada ensaio, à medição da altura de água no reservatório da balança (ou nos reservatórios exteriores ao canal) com uma fita métrica para obter o volume de água total galgado considerando a área do reservatório.

Nas próximas secções apresentam-se os resultados obtidos nos diferentes ensaios, em termos das características da agitação marítima ao longo do canal, do espraimento e do galgamento.



## 5.2. Características da agitação marítima

Através da análise espectral e temporal das sondas resistivas foi possível obter valores, entre outros, da altura significativa,  $H_s$ , da altura significativa espectral do estado de agitação,  $H_{m0}$ , do período médio,  $T_m$  e de pico,  $T_p$ . Estes parâmetros são utilizados na maioria das fórmulas empíricas de espraimento e galgamento existentes na literatura e permitem também calcular o parâmetro de rebentação  $\xi$ .

Com os *scripts Matlab*, foi também possível produzir diversos gráficos com a série temporal medida em cada sonda resistiva, bem como os respetivos espectros. Em seguida apresenta-se, a título de exemplo, tabelas e gráficos dos resultados obtidos após se executar os *scripts Matlab*. O Quadro 5.1 apresenta os valores de altura significativa,  $H_s$ , da altura significativa espectral do estado de agitação,  $H_{m0}$ , do período médio e de pico para os ensaios realizados com  $T_p=16$  s e associados a  $H_s=4$  m, para um nível de maré de PM.

Quadro 5.1 – Valores da altura significativa espectral do estado de agitação,  $H_{m0}$ , da altura significativa,  $H_s$ , do período médio,  $T_m$  e de pico,  $T_p$  para os ensaios  $T_p=16$  s  $H_s=4$ m.

Sondas Wallingford				
Nº Sonda	$H_{m0}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_p$ (s)	$T_m$
S1 (Gerador)	0.0897	0.0931	2.3378	2.2662
S2	0.0785	0.0817	2.3632	2.4498
S3	0.0622	0.0747	1.1324	2.3659
S4	0.0635	0.0782	1.1324	2.3006
S5	0.08202	0.0918	2.3632	2.6724
S6 Reservatório	0.0071	0.0096	-	-
S 7 Run-up	0.1617	0.1599	2.1961	2.3520
S8 Topo da estrutura	0.0005	0.0006	-	-

A título de exemplo, a Figura 5.1 apresenta as séries temporais durante o ensaio realizado com  $T_p=16$  s e associado a  $H_s=4$  m nas sondas S1, S2, S3 e S4. As séries temporais, para as sondas S5, S6, S7 e S8 podem ser consultadas na Figura A.1, do Anexo A. De igual modo a Figura 5.2 apresenta o espectro do ensaio realizado com  $T_p=16$  s e associado a  $H_s=4$  m para as sondas S1, S2, S3 e S4, para as sondas S5, S6, S7 e S8 o espectro pode ser consultado na Figura A.2, do Anexo A.

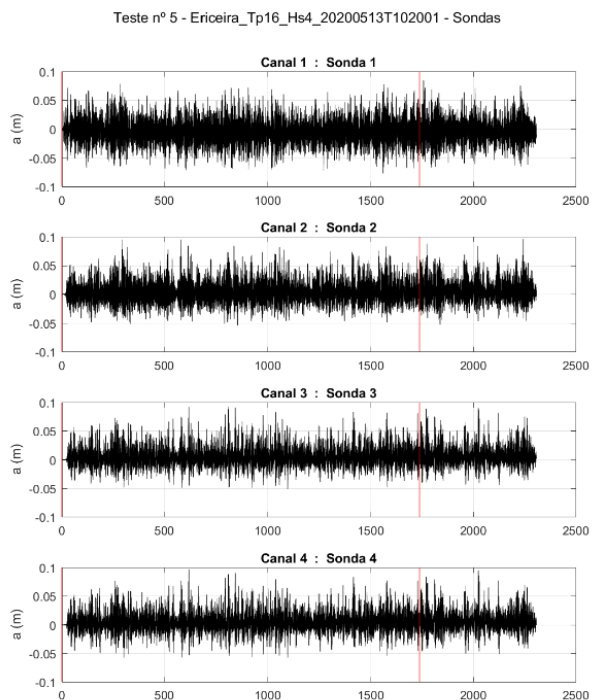


Figura 5.1 – Séries temporais nas sondas S1 a S5. Ensaio com  $T_p=16$  s,  $H_s=4$  m nas sondas S1, S2, S3 e S4, para PM.

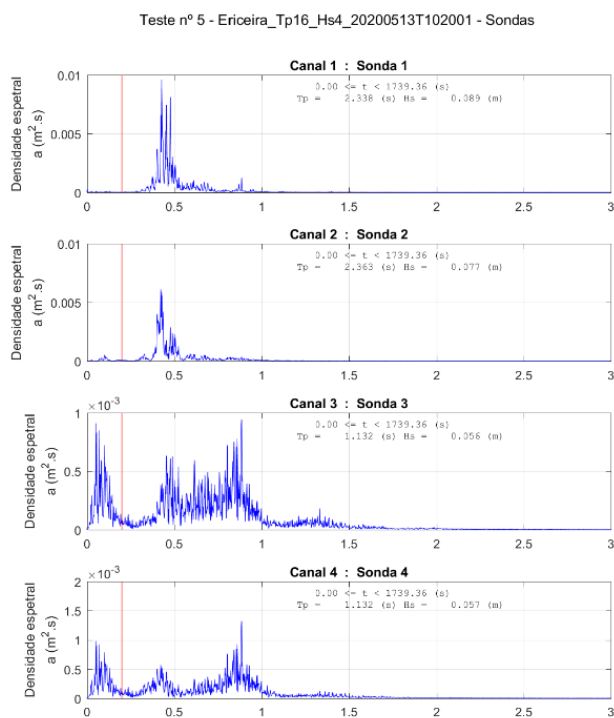


Figura 5.2 – Espectro unidimensional da elevação da superfície livre do ensaio  $T_p=16$  s  $H_s=4$  m para as sondas S1, S 2, S3 e S4.

Com o tratamento dos dados obtidos nos ensaios em modelo físico, obteve-se o período de maior energia do espectro, ou seja, o período de pico  $T_p$ , como também, se obteve o período de pico médio,  $T_m$ .

Todavia, algumas das fórmulas empíricas mais utilizadas para o cálculo do espraimento e galgamento, como é o caso do manual *EurOtop* (Van der Meer et al., 2018), utiliza o período espectral,  $T_{m0}$ , este período espectral é calculado com os momentos dos zeros ascendentes do espectro, tal como foi referido na secção 2.1.2 deste trabalho. Sendo o período espectral o mais adequado, e não obtendo esse valor no processamento dos dados obtidos nos ensaios em modelo físico, para o cálculo do espraimento e do galgamento realizou-se uma aproximação que é bastante utilizada quando apenas se conhece o período de pico e não se conhece os momentos espectrais. Assim, utilizou-se a relação fixa entre o período de pico e o período espectral,  $T_{m0}=T_p/1.1$  (Mase et al., 2013).

No Quadro B.1 do Anexo B apresenta-se, para a série de ensaios, os valores de altura de onda significativa,  $H_s$ , altura de onda significativa espectral,  $H_{m0}$ , período de pico,  $T_p$ , período de pico médio,  $T_m$ , e período de pico espectral,  $T_{m0}$ . Calculou-se ainda o parâmetro de rebentação,  $\xi$ , com base no ângulo da estrutura, na altura de onda significativa no pé do talude, sonda S3, e comprimento de onda ao largo,  $L_0$ .

### 5.3. Espraimento

Após se efetuar a análise temporal da série temporal da sonda S7, e terem sido obtidos os valores de espraimento (*run-up*), estes foram comparados em termos de  $R_{u2\%}$  medido nos ensaios em modelo físico com o espraimento previsto através de várias fórmulas empíricas, nomeadamente, Allsop et al., (1985), Van der Meer e Stam (1992), Bonakdar and Etemad-Shahidi (2011) e EurOtop (2018).

Os valores de espraimento obtidos tanto nos ensaios em modelo físico como na análise das fórmulas empíricas são apresentados no Quadro B.2, no Anexo B. Neste quadro indica-se o espraimento, em termos de  $R_{u2\%}$ , estimado através das equações que constam no Quadro 2.1, e o espraimento, em termos de  $R_{u2\%}$  e  $R_{u\text{ máx}}$ , obtido nos ensaios em modelo físico bidimensional. Calculou-se ainda o espraimento relativo, ( $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ ), quer para os valores de ensaio quer para os valores previstos.

Na Figura 5.3 e na Figura 5.4, apresentam-se os valores de espraimento, em termos de  $R_{u2\%}$ , para um período de pico,  $T_p$ , 14 s e dois níveis de maré: PM e NM, respetivamente, em função de  $H_{m0}$  ou  $H_s$  (dependendo da fórmula empírica a usar).

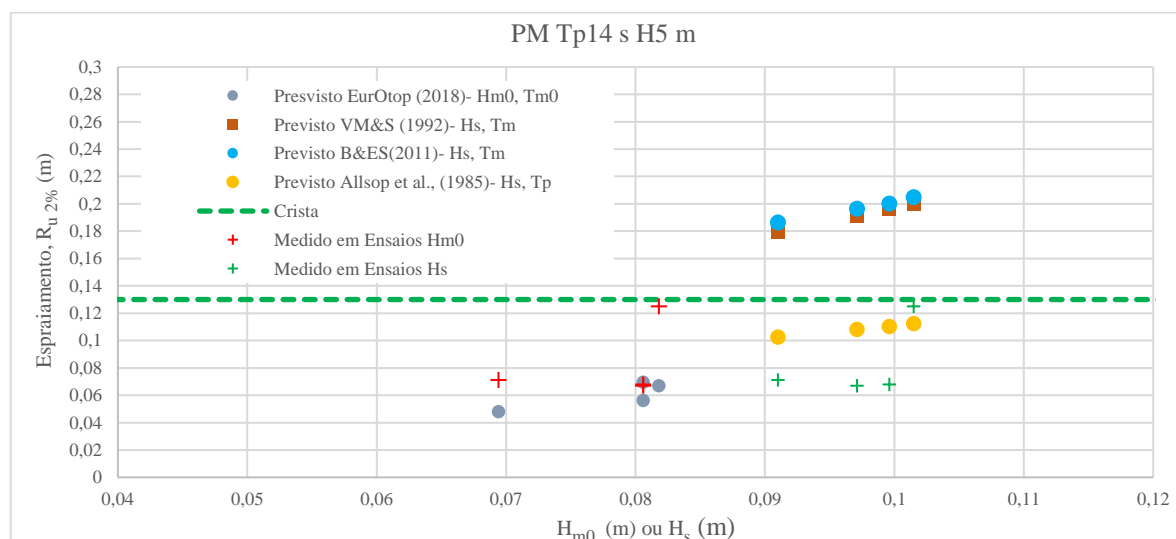


Figura 5.3 – Espraimento, em termos de  $R_{u\ 2\%}$ , medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para nível de PM e  $T_p=14$  s.

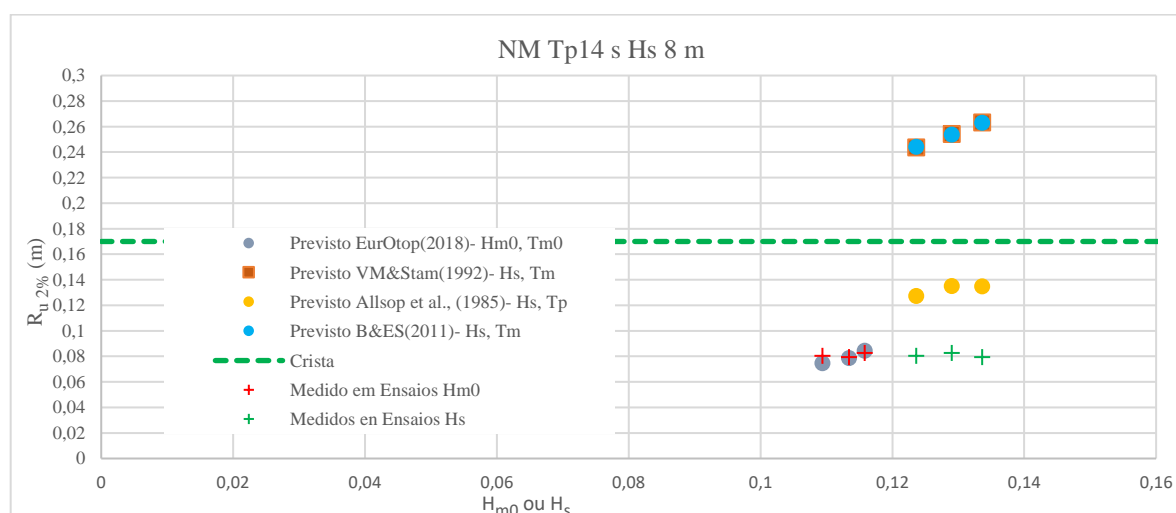


Figura 5.4 – Espraimento, em termos de  $R_{u\ 2\%}$ , medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para PM e  $T_p=16$  s.

Pela análise da Figura 5.3 e Figura 5.4 pode observar-se que para ambos os níveis de maré tanto os valores de  $R_{u\ 2\%}$  medidos nos ensaios como os estimados pelas fórmulas empíricas aumentam com o aumento de  $H_{m0}$  ou  $H_s$ . Os valores de espraimento previstos pelas fórmulas empíricas, que se baseiam nos valores de  $H_s$ , são superiores aos valores medidos nos ensaios como é o caso das formulações de Van der Meer e Stam (1992) e Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011), à exceção da fórmula proposta por Allsop et al., (1985). Já a fórmula empírica que se baseia em valores de  $H_{m0}$  apresenta estimativas bastante próximas dos resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido, sendo perceptível esta tendência em ambos os níveis de maré. A tendência visualizada para um período de pico,  $T_p=14$  s verifica-se para outros períodos de pico e níveis

de maré. No Anexo C, (Figura C.1 a Figura C.4) podem ser consultados os resultados correspondentes ao período de pico  $T_p = 14$  s, 16 s e 12 s para níveis de maré correspondentes a NM e PM.

Na Figura 5.5 e Figura 5.6 pode observar-se os valores de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$  em função de  $\xi_{m0}$ ,  $\xi_p$  ou  $\xi_m$  (dependendo também da fórmula empírica analisada), para um nível de PM e NM

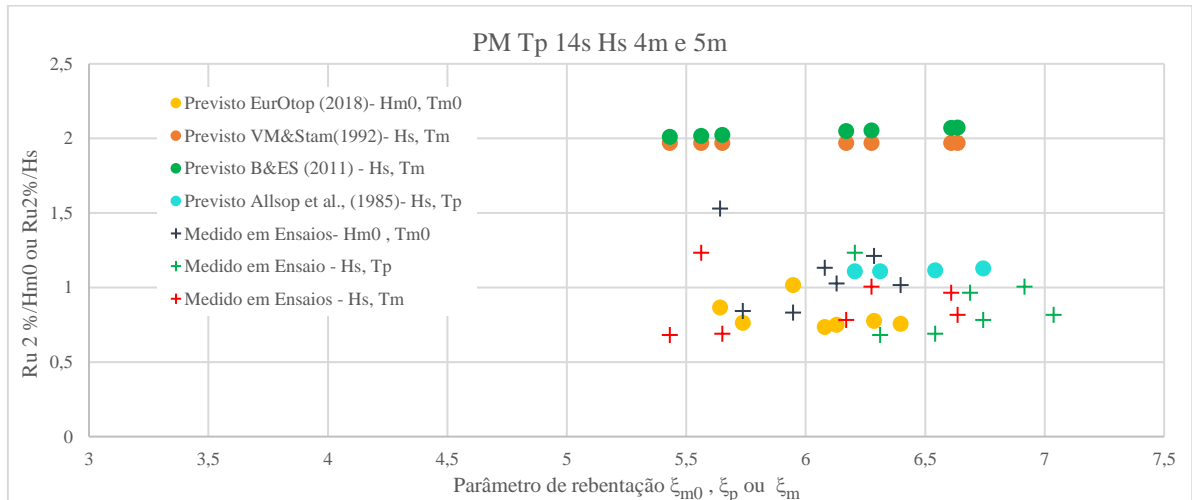


Figura 5.5 – Espreamento, em termos de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ , medido em ensaios e previstos por fórmulas empíricas em função de  $\xi_{m0}$ ,  $\xi_p$  ou  $\xi_m$ , para PM.

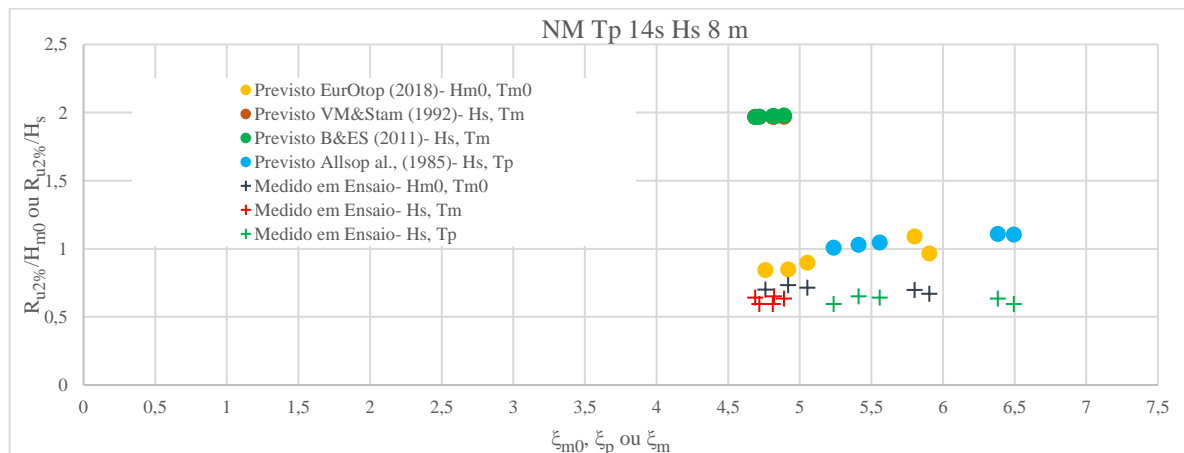


Figura 5.6 – Espreamento, em termos de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ , medido em ensaios e previstos por fórmulas empíricas em função de  $\xi_{m0}$ ,  $\xi_p$  ou  $\xi_m$ , para NM.

Analisando a Figura 5.5 e Figura 5.6 pode observar-se que para ambos os níveis de maré, os valores medidos nos ensaios ou previstos por fórmulas empíricas de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$  aumentam com o aumento do parâmetro de rebentação, ( $\xi_{m0}$ ,  $\xi_p$  ou  $\xi_m$ ), para a série das condições de teste. A fórmula empírica de Van der Meer e Stam (1992) e Bonakdar – Etemad-

Shahidi (2011) dão estimativas bastante superiores ao medido nos ensaios. Quanto à fórmula empírica proposta pelo por Allsop et al., (1985) e *EurOtop* (Van der Meer et al., 2018) apresentam estimativas mais próximas das obtidas nos ensaios.

Para cada fórmula empírica efetuou-se uma análise do espraimento previsto com o espraimento medido nos ensaios em modelo físico. Na Figura 5.7 e Figura 5.8 apresenta-se o espraimento previsto adimensional em função do espraimento medido nos ensaios, também em formato adimensional, para as seguintes fórmulas empíricas: *EurOtop* (2018) e Allsop et al., (2003), respetivamente. No Anexo D (Figura D.1 e Figura D.2) pode consultar-se o gráfico de comparação do espraimento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, em termos de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ , para as fórmulas de Van der Meer e Stam (1992) e Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011).

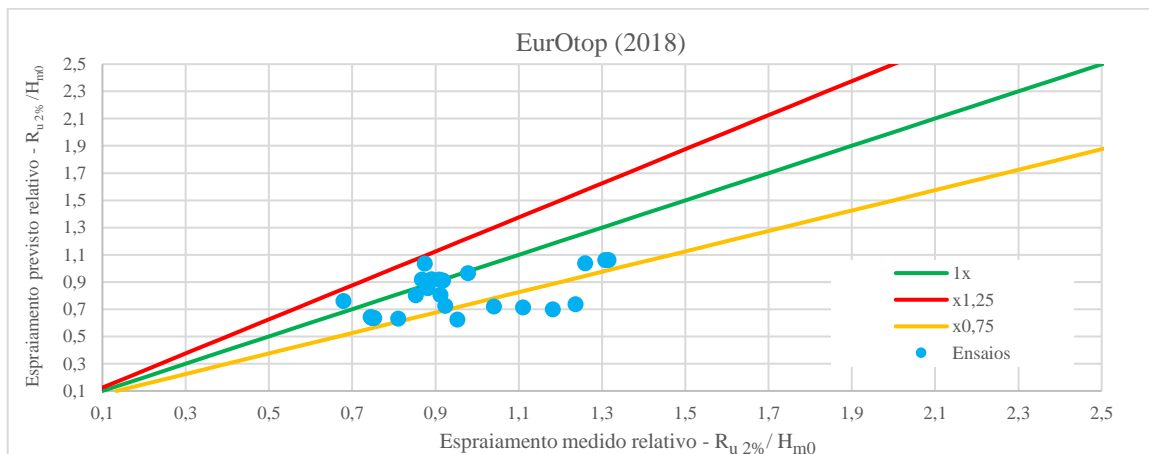


Figura 5.7 – Comparação do espraimento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para a fórmula proposta pelo EurOtop (2018).

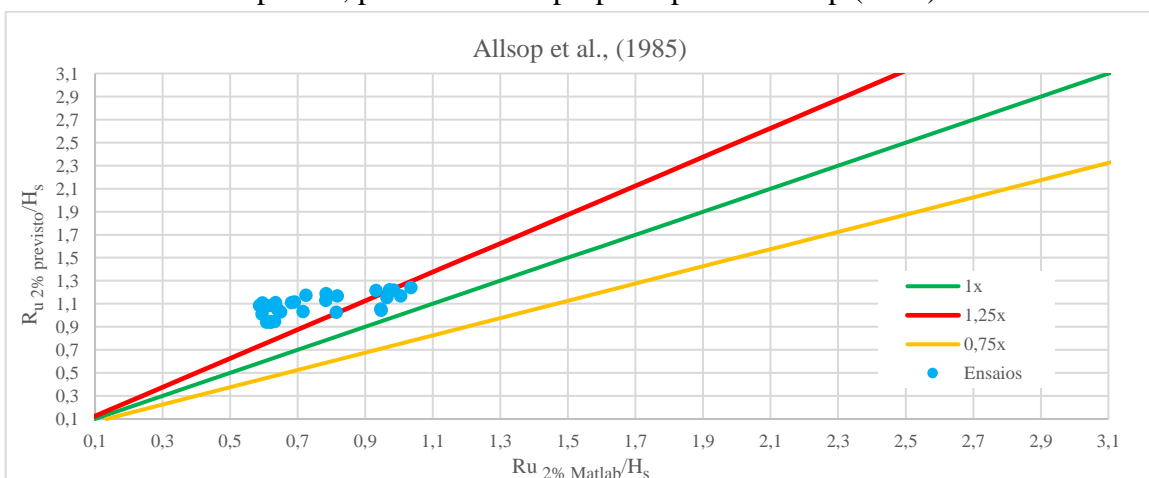


Figura 5.8 – Comparação do espraimento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, para a fórmula proposta por Allsop et al., (1985).

Na Figura 5.7 pode observar-se que a fórmula empírica proposta pelo EurOtop (2018) conduz a resultados da mesma ordem de grandeza aos obtidos em ensaios, estando estes compreendidos entre 0.75x e 1.25x dos valores empíricos. Apenas em cinco blocos de ensaios, realizados com  $T_p=12, 14$  e  $16$  s e associados a  $H_s=4, 5$  e  $8$  m, para níveis de PM e BM, os valores dos ensaios ficaram abaixo de 0.75 x dos valores empíricos fornecidos pela fórmula do EurOtop (2018). Já a fórmula proposta por Allsop et al., (1985), Figura 5.8, subestima todos os resultados de espraçamento obtidos em ensaios, sendo a maioria dos resultados dos ensaios da ordem de 1.25 x ou superior relativamente aos valores empíricos.

A fórmula empírica de Van der Meer e Stam (1992) e Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011), Anexo E, conduzem a uma relação duas vezes superior do espraçamento previsto em relação ao estimado nos ensaios.

Para a fórmula de Van der Meer e Stam (1992), o parâmetro de rebentação obtido enquadra-se no intervalo entre 3.1 e 7.5, pelo que, a fórmula utilizada apenas depende da altura de onda significativa, não dependendo assim de qualquer parâmetro geométrico. Dificilmente se consegue reproduzir um modelo de talude apenas baseado na altura de onda sem contar com a porosidade e a geometria da estrutura, uma vez que estes parâmetros têm grandes influências nos resultados obtidos, principalmente quando se trabalha em valores de modelo.

A formulação de Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011) foi desenvolvida a partir do conjunto de dados experimentais de Van der Meer e Stam (1992) para construir um modelo M5' de árvores de decisão, este modelo foi descoberto por Quinlan (1992) e a sua teoria desenvolvida por Wang and Witten (1997). Para estas formulações propostas pode-se observar correções nas equações, pelo que, tem em conta não só a altura de onda significativa como também a declividade do talude, daí se poder observar melhores resultados quando comparado os resultados obtidos através de Van der Meer e Stam (1992).

Da análise das várias fórmulas empíricas a do EurOtop (2018) é a que apresenta valores mais concordantes quando comparado com os valores obtidos nos ensaios em modelo físico, junto com a fórmula de Allsop et al., (1985).

#### **5.4. Análise dos Galgamentos**

Para a determinação dos galgamentos ocorridos ao longo dos diferentes ensaios, utilizaram-se as séries temporais obtidas na sonda S6, colocada no reservatório, e as obtidas na balança. A análise destes dados foi efetuada através de dois programas desenvolvidos em *Matlab* – galgamentos\_sonda e galgamentos\_balanca5 – cuja calibração é necessária.

É importante salientar que, em termos de galgamento ocorreram duas situações distintas nos diferentes ensaios efetuados:

- Ensaios com ocorrência de galgamento moderado, cujo volume de água não excedia o volume de reservatório da balança ( $0.4 \times 0.5 \times 0.3$ ), e por isso não houve a necessidade de retirar com a bomba qualquer água desse reservatório. Estes testes foram designados como testes sem descargas.
- Ensaios com ocorrência de galgamento muito significativo, cujo volume de água excedeu várias vezes o volume de reservatório da balança pelo que houve a necessidade de retirar por diferentes ocasiões a água desse reservatório. Tal era efetuado com o auxílio de uma bomba que transportava a água do reservatório colocado atrás da estrutura para um outro reservatório de maiores dimensões no exterior ao canal. Estes testes foram designados como testes com descargas.

Como referido, a utilização dos programas mencionados necessita de calibração prévia. Assim, essa calibração iniciou-se com a seleção de ensaios sem e com descargas, considerando neste último caso, no máximo a ocorrência de três descargas. No primeiro caso sem descargas foram selecionados ensaios com os três níveis de maré considerados: PM, NM e BM e com diversas características de onda. Já para o caso com descargas, foram selecionados ensaios para os níveis de preia-mar e nível médio.

Seguidamente aplicaram-se os programas *Matlab* e obtiveram-se os valores de volume total galgado, quer com base nos dados da sonda quer com base nos dados da balança. A comparação com os valores de referência obtidos permitiu acertar os parâmetros dos programas de modo a conseguir uma melhor aproximação entre os valores da sonda e da balança a esses valores de referência.

#### **5.4.1. Casos sem descarga**

Quadro 5.2 apresenta o volume de água obtido através da medição da altura de água, no reservatório e na sonda, e a pesagem da massa de água através da balança, para um nível de maré de PM.

Comparando os volumes obtidos através do reservatório e da balança numa primeira abordagem, pode observar-se que na grande maioria dos ensaios existe uma discrepância nos resultados obtidos pelos dois equipamentos e a situação de referência (reservatório). É importante notar que como se trata de ensaios com pouco galgamento, a altura de água no reservatório aonde foi medida é pequena pelo que poderá existir erro humano associado à leitura da régua o que justifica a grande diferença entre os valores medidos e os de referência. É de notar também, que neste bloco de ensaios, as medições através da régua foram realizadas no



reservatório grande, pelo que, existiu transporte de água do reservatório pequeno para o grande e que neste existe uma lâmina de água por *default*, o que pode influenciar a medição com a leitura da régua e consequentemente explicar a diferença de valores.

Ao analisar o erro relativo e o erro absoluto entre os dados adquiridos, pela balança e pela sonda, consegue-se ter uma melhor perceção da diferença, em percentagem, do volume total galgado e a diferença, em litros, do volume total galgados pelos diferentes equipamentos.

Quadro 5.2 – Ensaios seleccionados para cenário sem descarga, referente a PM.

Nome do Ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Reservatório	Balança	Sonda	Erro relativo: Balança e Sonda(%)	Erro absoluto: Balança e Sonda(l)
			Volume (l)	Volume (l)	Volume (l)		
Tp12 Hs5_1	1.697	0.1	16.06	10.99	7.49	31.90	3.51
Tp12 Hs5_2			19.29	8.14	7.57	7.04	0.57
Tp12 Hs5_3			6.41	6.52	6.25	4.17	0.27
Tp12 Hs5 rep1			0.0	5.70	3.71	35.04	2.00
Tp12 Hs5 rep2			12.84	6.15	4.04	34.30	2.11
Tp12 Hs5 rep3			0.0	4.55	2.37	48.01	2.19
Tp12 Hs5 rep4			6.41	5.38	4.06	24.53	1.32
Tp14 Hs4 _1	1.98	0.08	8.98	17.37	15.81	8.98	1.56
Tp14 Hs4 _2			-	18.97	18.08	4.68	0.89
Tp14 Hs4 rep1			25.74	21.05	19.22	8.70	1.83
Tp16 Hs4	2.263	0.08	25.74	20.20	17.36	14.07	2.84
Tp16 Hs4 rep1			19.29	18.29	15.02	17.89	3.27
Tp16 Hs4 rep2			16.06	14.46	13.26	8.27	1.20
Tp16 Hs4 rep3			6.41	3.85	4.48	16.33	0.63
Tp16 Hs4 rep4			19.29	14.68	12.94	11.85	1.74

Assim, do

Quadro 5.2, pode verificar-se que as tendências dos valores obtidos com os três métodos de medição de galgamentos são semelhantes ao longo dos diferentes ensaios. Verifica-se também que na maioria dos ensaios, os resultados obtidos pela sonda S6 estão bastante próximos daquilo que foi medido ao longo dos ensaios, pela balança, à exceção dos ensaios assinalados a amarelo, apresentando diferenças acima dos 30%. Tal normalmente está associado a valores de galgamento mais baixos, nos quais o desempenho da sonda é inferior. Percebe-se também que o volume total, medido através da balança, é superior aos valores obtidos pelas sondas, à exceção do ensaio realizado com Tp=16 s e associado a Hs=4 m rep3.

A Figura 5.9 apresenta a comparação do volume em função do tempo da sonda e da balança referentes ao ensaio realizado com Tp=14 s e associado a Hs=4 m rep1, e pode observar-se que os sinais dos dois equipamentos são muito parecidos apesar de, no entanto a sonda ter um atraso

no início da aquisição dos dados em relação à balança. Tal pode justificar a diferença entre os valores obtidos.

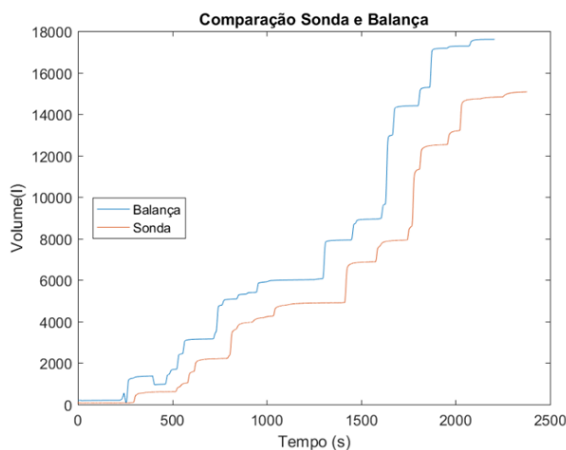


Figura 5.9 – Comparação entre Sonda e Balança no Ensaio  $T_p=14$  s  $H_s=4$  m rep1.

Nos ensaios relativos ao NM efetuaram-se as mesmas comparações que nos ensaios referentes ao nível de PM. O Quadro 5.3 apresenta o volume de água obtido através da medição da altura de água, no reservatório e na Sonda, e a pesagem da massa de água através da balança.

Quadro 5.3 – Ensaios selecionados para cenário sem descarga, referente a NM.

Nome do Ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Reservatório	Balança	Sonda	Erro relativo: Balança e Sonda (%)	Erro absoluto: Balança e Sonda (l)
			Volume (l)	Volume (l)	Volume (l)		
Tp12 Hs8	1.697	0.16	3	2.68	0.48	82.11	2.20
Tp12 Hs8 rep 1			8	1.62	1.49	7.89	0.13
Tp12 Hs8 rep 2			4	2.79	0.84	70.01	1.95
Tp12 Hs8 rep 3			3	2.73	0.52	80.81	2.20
Tp14 Hs8	1.98	0.16	11	11.73	7.96	32.15	3.77
Tp14 Hs8 rep 1			20	19.98	15.54	22.21	4.44
Tp14 Hs8 rep			19	19.80	18.56	6.09	1.21

Nos ensaios de NM, pode observar-se que os andamentos dos valores obtidos com os três métodos de medição são semelhantes, i.e., há um aumento. Além disso, verifica-se que os valores obtidos pela leitura da régua em comparação com os valores obtidos pela balança são próximos sendo maior a proximidade destes valores com o aumento do período para a mesma altura de onda. É de notar que neste bloco de ensaios, a medição da régua foi efetuada no reservatório atrás da estrutura, o que introduz menores erros de leitura. Sendo que os valores da leitura da régua no reservatório são bastante próximos aos valores obtidos pela balança, comprova-se que a balança dá valores realistas.

Também pode verificar-se, ao analisar os gráficos de comparação entre a balança e a sonda, obtidos pelo programa de *Matlab*, que os ensaios são muito distintos. Em todos os ensaios seleccionados a amarelo com erro relativo superior a 70%, verificou-se que o comportamento dos valores correspondentes à sonda não é o expectável existindo assim um erro proveniente do equipamento de aquisição. Notar que estes casos estão associados a valores muito baixos de galgamento onde o desempenho da sonda é pior. Já os comportamentos dos valores correspondentes à balança estão de acordo com o expectável.

A Figura 5.10 apresenta a comparação do volume em função do tempo obtidos pela balança e pela sonda no ensaio realizado com  $T_p=14$  s associado a  $H_s=8$  m, que apesar de ter um erro relativo superior a 30% pode observar-se que os sinais dos dois equipamentos são muito parecidos. Mais uma vez a sonda tem um atraso no início da aquisição dos dados em relação à balança, o que pode justificar a diferença entre os valores obtidos.

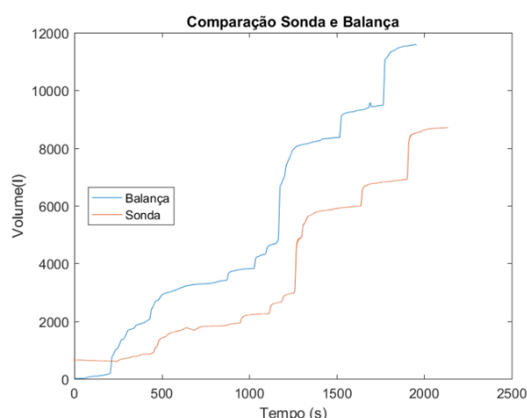


Figura 5.10 – Comparação entre sonda e balança no Ensaio  $T_p=14$  s  $H_s=8$  m.

Para os ensaios referentes ao nível BM, o Quadro 5.4 apresenta o volume de água obtido através da medição da altura de água, no reservatório e na sonda, e a pesagem da massa de água através da balança.

Quadro 5.4 – Ensaios seleccionados para cenário sem descarga, referente a BM.

Nome do Ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Reservatório	Balança	Sonda	Erro relativo: Balança e Sonda (%)	Erro absoluto: Balança e Sonda (l)
			Volume (l)	Volume (l)	Volume (l)		
Tp12 Hs8	1.697	0.16	0	0.16	0.16	4.94	0.01
Tp14 Hs8	1.98	0.16	0	0.70	0.64	8.92	0.06
Tp14 Hs8 rep1			0	0.58	0.54	7.68	0.04
Tp16 Hs8	2.263	0.16	6.41	1.63	0.66	59.65	0.97
Tp16 Hs8 rep1			0	1.55	0.52	66.24	1.03

Para o nível de BM, a amostra de ensaios é pequena comparando com os outros níveis de maré. Verificou-se que para este nível de maré, o volume de galgamento é pequeno, o que é expectável, dado que são ensaios com o nível de maré mais baixo. Em relação à leitura da régua no reservatório, é de esperar erros associados à leitura, devido ao facto de serem pequenos valores de caudal e de no reservatório existir sempre uma lâmina de água.

Para os ensaios assinalados a amarelo, observa-se pelos gráficos dos equipamentos, que existem várias anomalias tanto na sonda como na balança, por falha do equipamento, não existindo assim qualquer tipo de correlação. A Figura 5.11 apresenta as anomalias registadas pelos equipamentos referentes ao ensaio realizado com  $T_p=16$  s e associado a  $H_s=8$  m rep1.

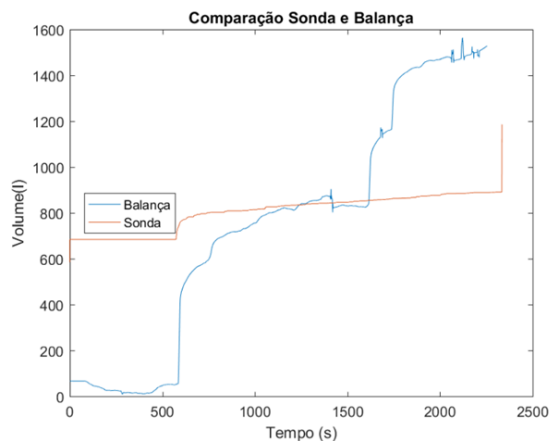


Figura 5.11 – Comparação entre Sonda e Balança no Ensaio  $T_p=16$  s  $H_s=8$  m rep1.

Em geral, conclui-se que quando os valores do volume de galgamento são muito baixos, quer a balança quer a sonda, apresentam maiores erros face às situações de referência. Quanto aos valores obtidos a partir da leitura da régua, pode-se concluir também que para volumes baixos esta técnica conduz a erros, devido ao facto de no próprio reservatório existir sempre uma lâmina de água. Assim entende-se que equipamentos como sonda e balança são mais adequados para ensaios com galgamentos maiores, associado normalmente a níveis de maré maiores bem com maiores períodos e alturas de onda.

#### 5.4.2. Casos com descargas

Para o segundo cenário, foram seleccionados ensaios com o máximo de três descargas, de modo a entender desempenho dos diferentes equipamentos de medição. Nestes ensaios, como existem descargas ao longo do tempo de ensaio, a água é transportada do reservatório situado no tardo da estrutura para um reservatório de maiores dimensões com forma de tronco trapezoidal. Assim, mede-se neste reservatório de maiores dimensões, a altura de água obtida em cada ensaio e, posteriormente, calculou-se o seu volume.

O Quadro 5.5 apresenta o volume de água obtido através da medição da altura de água, no reservatório e na Sonda, e a pesagem da massa de água através da balança, para um nível de PM.

Quadro 5.5 – Valores de caudal médio galgado medidos pela balança, pela sonda e no reservatório exterior, referente a um nível de PM.

Nome do ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Reservatório Exterior	Balança	Sonda	Erro relativo: Balança e Sonda (%)	Erro absoluto: Balança e Sonda (l)
			Volume (l)	Volume (l)	Volume (l)		
Tp12 Hs7	1.697	0.14	77.88	56.04	50.70	9.52	5.33
Tp12 Hs7 rep1			84.46	62.63	48.08	23.23	14.55
Tp12 Hs7 rep2			64.77	51.02	50.39	1.24	0.63
Tp12 Hs7 rep3			58.23	37.51	34.47	8.11	3.04
Tp14 Hs5_1	1.98	0.1	91.06	44.92	46.99	4.61	2.07
Tp14 Hs5_2			84.46	39.86	41.24	3.45	1.38
Tp14 Hs5 rep2			32.21	23.70	22.40	5.50	1.30
Tp14 Hs5 rep3			50.95	37.97	37.47	1.33	0.51
Tp16 Hs5	2.263	0.1	157.76	116.01	101.18	12.79	14.83
Tp16 Hs5 rep1			58.23	44.06	43.59	1.06	0.47
Tp16 Hs5 rep2			71.32	55.76	54.44	2.37	1.32

Pela análise do Quadro 5.5 pode verificar-se uma semelhança maior entre os volumes da balança e da sonda do que em relação ao volume calculado a partir da leitura da régua no reservatório exterior. Com efeito verifica-se que os valores medidos no reservatório exterior são consistentemente superiores aos da balança e sonda: Tal pode ser devido a um conjunto de fatores, que de seguida se aborda:

Problemas nas medições da sonda e balança:

– Perturbações na sonda e na balança devido a descargas da bomba: Como referido, nestes ensaios foi necessário fazer descargas com o auxílio de uma bomba. Como essa bomba se encontra dentro do reservatório interior, verificou-se que introduz algumas perturbações nas medições da sonda e da balança, contribuindo assim para as diferenças relativamente ao medido no reservatório exterior.

– Filtragem dos dados da sonda e balança: Como a presença de ruído nos sinais da sonda e da balança era em certos casos muito significativa (principalmente na sonda), tentou-se sempre filtrar esses sinais através da função *smoothdata*, com o programa *Matlab*. Ao fazer uma filtragem de dados, verifica-se que o volume galgado diminui, fazendo com que, em alguns casos, seja impossível obter a suavização do ruído que a sonda tem ao longo dos ensaios sem perder o caudal que realmente existiu na sua execução.

– Galgamentos simultâneos às descargas: nos casos com descargas, ocorriam descargas do reservatório colocado no tardo da estrutura, com o auxílio de uma bomba, para um reservatório de maiores dimensões, ( devido ao volume de galgamento ser elevado). Nestes ensaios verificou-se que durante a duração da descarga existiam galgamentos em simultâneo, isto é, enquanto se diminuía a altura de água no reservatório existia também galgamentos aumentando a altura de água. Se essas variações forem muito rápidas, a sonda poderá não ter sensibilidade para registar eventuais galgamentos durante o período de descarga, devido a estas variações, e, portanto, haver uma “pedra” no volume de galgamento medido face ao que realmente aconteceu.

Problemas na determinação do volume no reservatório exterior:

– Erros de leitura no reservatório exterior: Devido à forma do reservatório exterior, a leitura da água no reservatório exterior tem um erro associado.

– Determinação do volume no reservatório exterior: O volume de água no reservatório foi calculado considerando que as várias superfícies arredondadas nos cantos foram contabilizadas como superfícies retangulares, por simplificação.

Também pela análise do Quadro 5.5, verifica-se que os resultados obtidos pela sonda são bastante próximos aos medidos pela balança, ao longo dos ensaios. Com efeito, o erro, na maioria dos ensaios é, em média, na ordem dos 7%, à exceção dos ensaios assinalados a amarelo (erros de 23% e 12%). Isto permite concluir que para ensaios com maiores alturas de onda, onde o caudal galgado é maior, o erro diminui, pelo que a metodologia baseada na sonda poder ser considerada mais adequada para este tipo de ensaios.

Para os ensaios referentes a NM, o Quadro 5.6 apresenta o volume de água obtido através da medição da altura de água, no reservatório e na Sonda, e a pesagem da massa de água através da balança.

Quadro 5.6 – Ensaios seleccionados para cenário com descarga, referente a NM.

Nome do Ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Reservatório	Balança	Sonda	Erro relativo (%)	Erro absoluto: Balança e Sonda (l)
			Volume (l)	Volume (l)	Volume (l)		
Tp14 Hs8	1.98	0.16	64.77	51.63	46.62	9.71	5.01
Tp14 Hs8 rep1			58.23	35.07	23.98	31.62	11.09
Tp16 Hs8 rep1 V2	2.263	0.16	51.70	37.89	36.96	2.47	0.94
Tp16 Hs8 V2			71.32	32.45	23.06	28.93	9.39
Tp16 Hs8 rep2V2			51.70	31.49	30.96	1.66	0.52

Pela análise do Quadro 5.6, verifica-se que os resultados obtidos com a balança e a sonda estão bastante próximos em relação ao que foi medido ao longo dos ensaios (leitura da régua). A maioria dos ensaios apresenta erros aceitáveis à exceção dos ensaios assinalados a amarelo. Nestes ensaios obteve-se erros elevados, estando eles entre os 28 % e os 32 %.

A Figura 5.12 apresenta o gráfico de comparação entre a sonda e a balança referentes ao ensaio realizado com  $T_p=16$  s e associado a  $H_s=8$  m V2, onde apesar deste ensaio apresentar um erro relativo superior a 28% pode observar-se que os sinais dos dois equipamentos são muito semelhantes. No entanto, a sonda mostra ter um atraso no início da aquisição dos dados em relação à balança além de que o valor inicial não é zero o que pode justificar a diferença entre os valores obtidos. As razões das diferenças observadas já foram descritas anteriormente e aplicam-se também aqui.

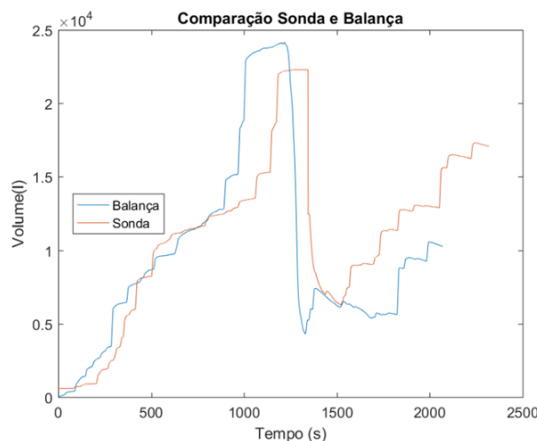


Figura 5.12 – Comparação dos valores de volume entre sonda e balança no ensaio  $T_p=16$  s  $H_s=8$  m V2.

Da análise deste grupo de ensaios, e através de observações visuais, não parece que existam galgamentos durante o funcionamento da bomba. No entanto, isso não significa que não existam galgamentos, mas sim que simplesmente não foram detetados pelo equipamento. Já nos ensaios com maiores galgamentos a bomba foi utilizada mais vezes, sendo possível, observar-se galgamentos durante o funcionamento desta.

A análise e tratamento dos dados permitiu avaliar o desempenho dos três tipos de medição. Da metodologia utilizada as medições com a balança são as mais fiáveis. As medições através da régua apenas são fiáveis nos blocos de ensaios sem descarga e NM, pois nestes ensaios a leitura foi feita diretamente no reservatório pequeno. Nos restantes ensaios a leitura da régua não é tão fiável pois existem vários problemas associados, principalmente quando os valores de galgamento são pequenos.

### 5.4.3. Comparação com fórmulas empíricas de galgamento

Nesta secção realiza-se uma análise comparativa dos resultados experimentais obtidos nos galgamentos com fórmulas empíricas existentes na literatura. O galgamento foi calculado com base no volume total obtido através dos registos da balança que se encontrava atrás da estrutura durante a execução dos ensaios.

Apesar da complexidade da estrutura analisada, o cálculo do caudal adimensional,  $q$ , foi comparado com os resultados de fórmulas empíricas existentes que constam no Quadro 2.2. Para o presente estudo de caso, os caudais médios galgados foram comparados com fórmulas empíricas que foram testadas para taludes permeáveis e inclinações acentuadas, como é o caso das fórmulas propostas por Van der Meer et al. (2018) e Pullen et al., (2007).

A fórmula empírica de Van der Meer et al., (2018) correspondem às fórmulas que constam no manual EurOtop (2018), assim comparou-se os caudais obtidos com os caudais previstos que constam nas equações desse manual. As Equações 5.1 e 5.2 representam as fórmulas propostas pelo manual EurOtop (2018), sendo que a equação 5.1 é definida para valores médios, enquanto, a equação 5.2 é definida para efeitos de dimensionamento. O coeficiente de rugosidade  $\gamma_f$ , considerado nestas equações é de 0.40 correspondendo a duas camadas de enrocamento e um núcleo permeável, já o coeficiente de influência da obliquidade das ondas relativamente à estrutura,  $\gamma_\beta$ , é igual a 1 devido ao facto de as ondas atingirem a estrutura perpendicularmente, não existindo assim obliquidade.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.09 \exp\left[-\left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0}\gamma_f\gamma_\beta}\right)^{1.3}\right] \quad (5.1)$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.1035 \exp\left[-\left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0}\gamma_f\gamma_\beta}\right)^{1.3}\right] \quad (5.2)$$

A Figura 5.13 apresenta a comparação dos caudais previstos pela fórmula da Equação 5.1 em função dos caudais obtidos nos ensaios. Pode verificar-se que em alguns ensaios existe uma relação linear entre os ensaios e a fórmula empírica. Com efeito, verifica-se que nalguns casos o caudal obtido nos ensaios é metade ao caudal previsto pela fórmula empírica, mas na grande maioria dos ensaios esta relação é 1/5 do valor estimado. Entende-se assim que a fórmula proposta pelo EurOtop (2018) subestima aos resultados obtidos nos ensaios.



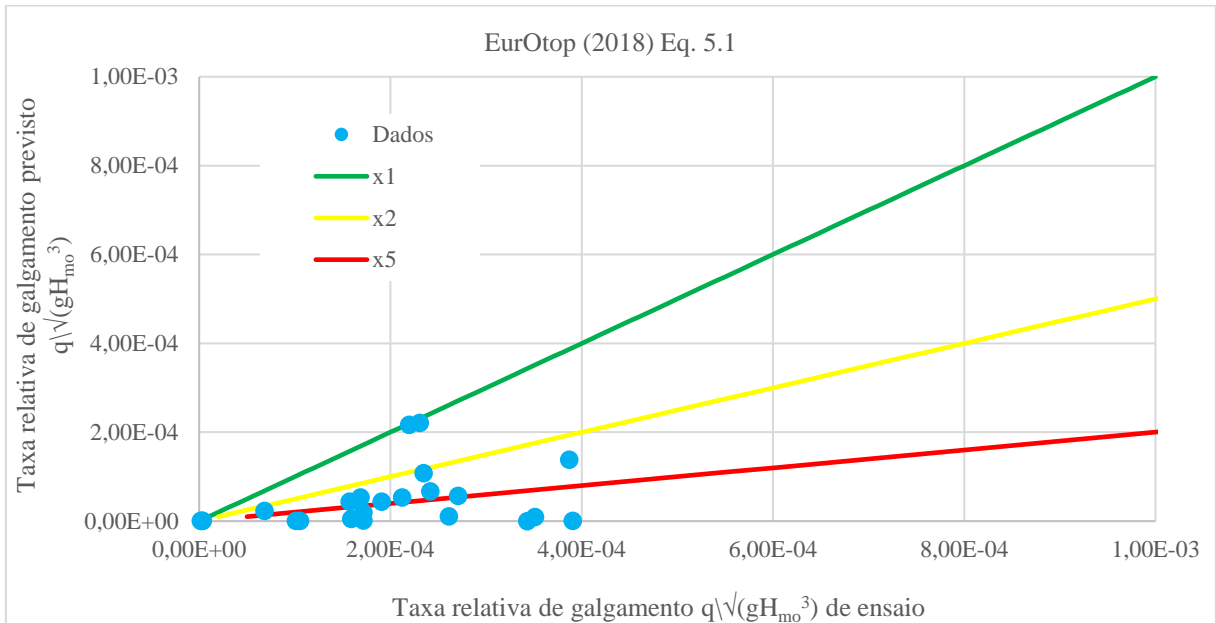


Figura 5.13 – Comparação dos caudais médios galgados previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (2018), a partir da Equação 5.1 com os medidos nos ensaios.

A Figura 5.14 apresenta a comparação dos caudais previstos pela fórmula da Equação 5.2 em função dos caudais obtidos nos ensaios. Pode-se observar que a amostra dos resultados se apresenta mais dispersa em relação à Figura 5.13 e que a fórmula empírica sobrestima claramente os resultados dos ensaios, foram realizados mais ensaios, mas optou-se por não representar esses resultados. Em alguns ensaios, verifica-se uma relação linear entre os caudais previstos e os caudais de ensaio, noutro pequeno conjunto de dados observa-se que o caudal obtido nos ensaios é metade ao caudal previsto pela fórmula empírica e noutros ensaios uma relação uma relação 1/5 do valor estimado.

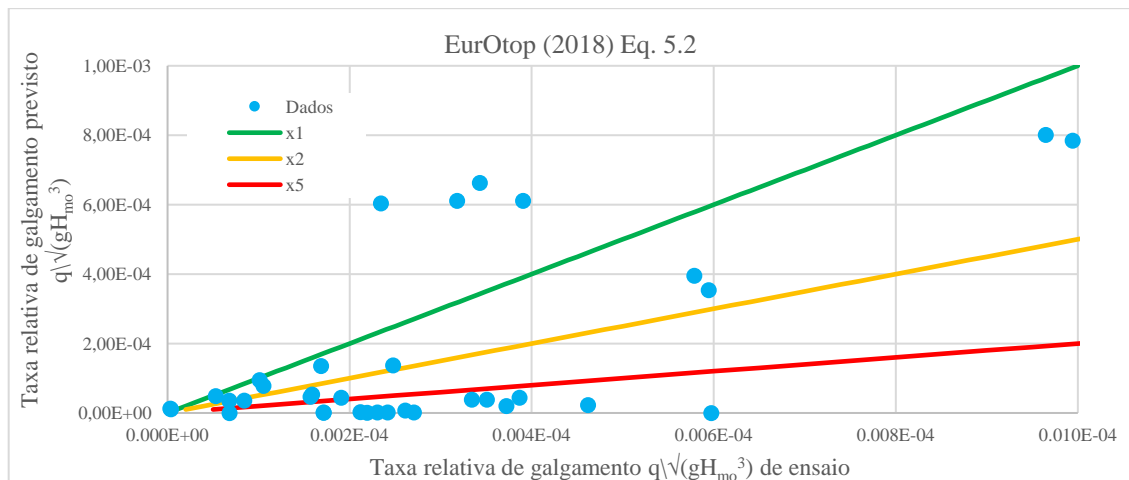


Figura 5.14 – Comparação dos caudais previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (2018), a partir da Equação 5.2. com os medidos nos ensaios.

A Figura 5.15 apresenta o gráfico de comparação dos caudais previstos pela Equação 5.3 formulada por Pullen et al., (2007) em função dos caudais obtidos nos ensaios. Os resultados obtidos por esta equação são parecidos com os obtidos pela equação 5.1 de Van der Meer et al. (2018), sendo inexistente uma relação linear dos caudais previstos com os caudais de ensaio, poucos ensaios têm uma relação duas vezes maior que o estimado e que a grande maioria dos resultados têm uma relação superior cinco vezes que o estimado. Claramente a formulação de Pullen et al., (2007) sobrestimam os valores de ensaios.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_f \gamma_\beta}\right) \quad (5.3)$$

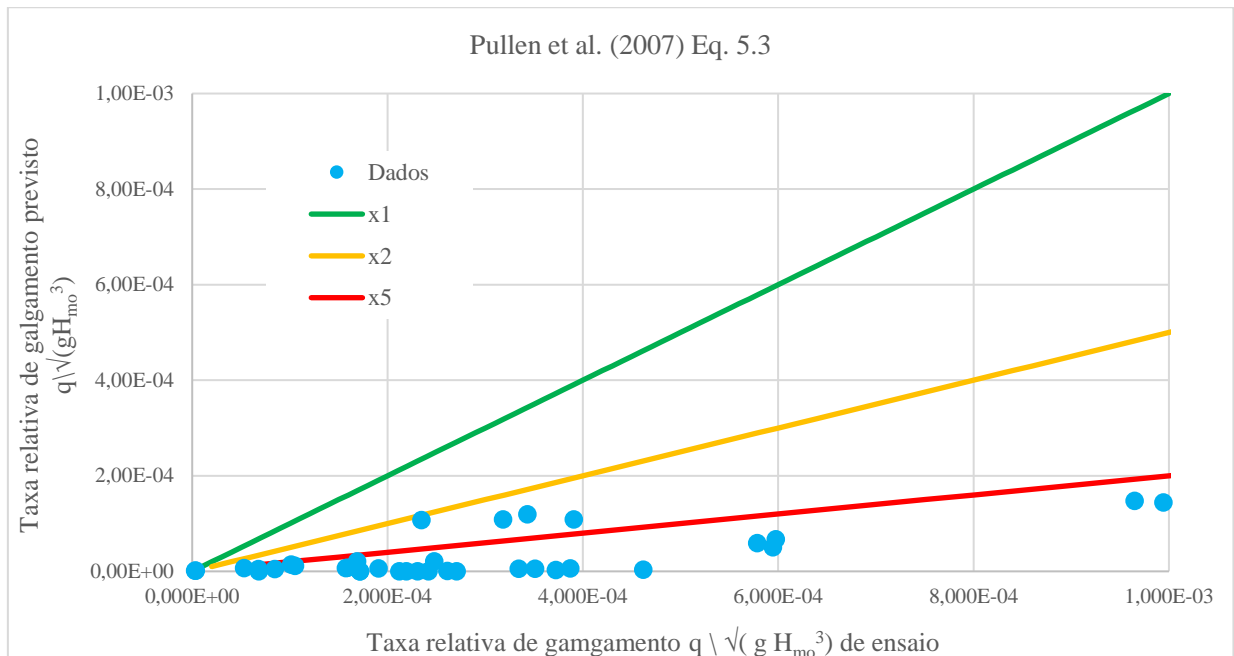


Figura 5.15 – Comparação dos caudais previstos pela fórmula proposta no manual EurOtop (Pullen et al., 2007) com os caudais observados nos ensaios, a partir da Equação 5.3.

Do exposto verifica-se que na maioria dos casos os valores das fórmulas testadas sobrestimam os valores medidos. As razões para estas diferenças podem dever-se aos efeitos de escala e de modelo. A porosidade reproduzida no talude tem grande influência no que diz respeito aos galgamentos, quanto menor a porosidade maior será o galgamento. Também existirá maior perda de carga com a diminuição da porosidade no modelo. A incorreta reprodução da permeabilidade do talude tem também influência no galgamento como também na estabilidade do manto de proteção. Estes efeitos podem ter maior influência quando se compara com fórmulas empíricas cujo modelo é idêntico, todavia foram desenvolvidos noutras instalações

experimentais. Os problemas associados à medição dos volumes individuais de galgamento também têm influência nos resultados obtidos.

A Figura 5.16 apresenta o galgamento relativo,  $q$ , em função de  $\sqrt{(gH_{m0}^3)}$  para um nível de maré de PM e para os vários períodos. Verifica-se que os valores de  $T_p=12$  s são valores muito pequenos em comparação com os valores de  $T_p=14$  s e  $T_p=16$  s, não se apresentando assim na mesma curva exponencial. Já os valores de  $T_p=14$  s e  $T_p=16$  s são bastante parecidos, ou seja, apresentam-se na mesma curva exponencial. Como seria expectável, para o mesmo nível de água o caudal relativo,  $q$ , aumenta com o valor de  $\sqrt{(gH_{m0}^3)}$  e, com o aumento do período de onda e altura de onda.

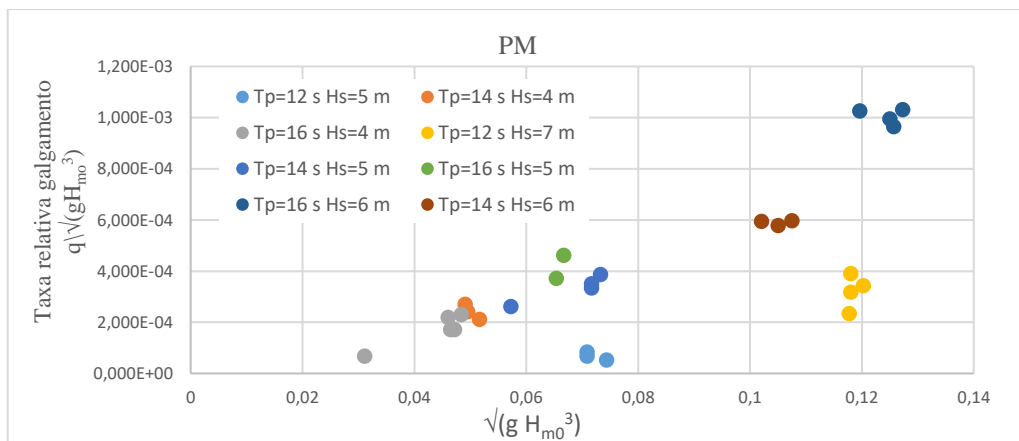


Figura 5.16 – Comparação do galgamento relativo,  $q/\sqrt{(g H_{m0}^3)}$  e  $\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ .

A Figura 5.17 apresenta um gráfico com as várias fórmulas empíricas analisadas e os respetivos limites de confiança da taxa relativa de galgamento em função ao bordo livre relativo. Pode observar-se que os resultados dos ensaios se encontram em grande parte dentro do intervalo de Pullen et al., (2007) e alguns dentro dos limites considerados pelo EurOtop (2018). Deste modo, constata-se que as fórmulas empíricas fornecem boas estimativas da taxa de galgamento medidas nos ensaios experimentais, com grande parte dos dados estarem dentro do intervalo de 90% de confiança, especialmente no que toca à fórmula proposta por Pullen et al., (2007).

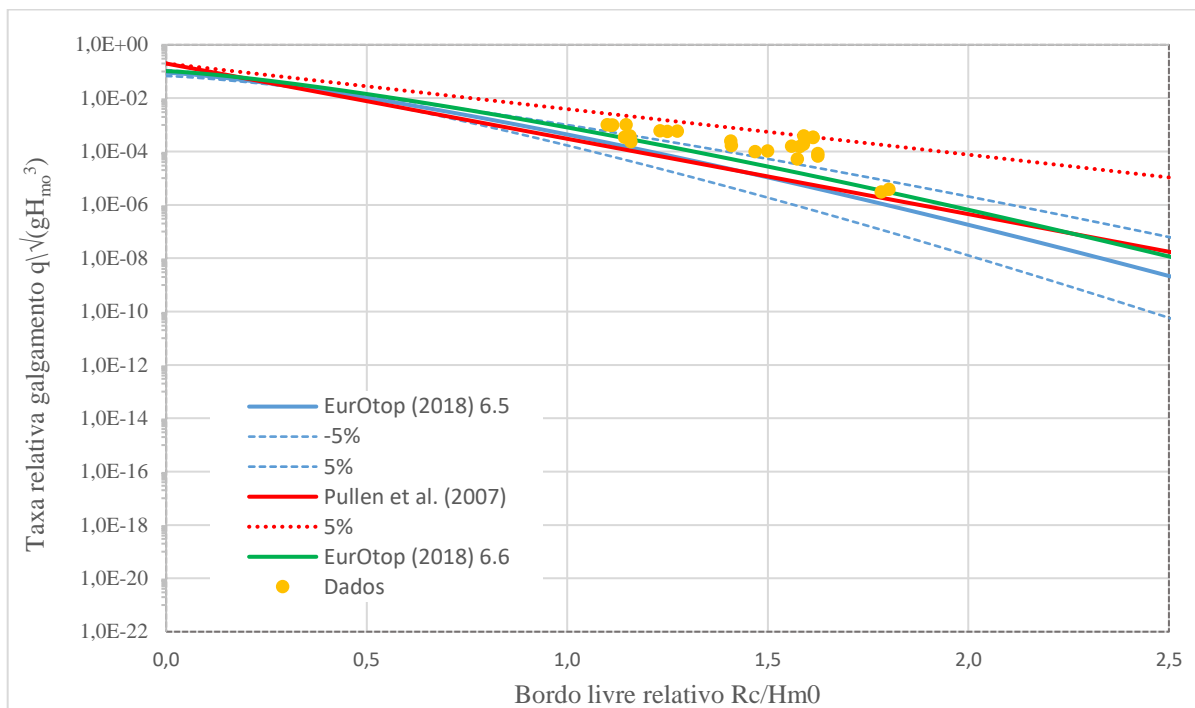


Figura 5.17 – Valores de caudal médio galgado relativo,  $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ , estimado e medido em relação ao bordo livre relativo,  $Rc/H_{m0}$ .

## 6. Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo o estudo do espraimento e do galgamento no porto da Ericeira, recorrendo à modelação física. O estudo focou-se na comparação de resultados, obtidos em ensaios físicos e previstos por fórmulas empíricas, da altura de espraimento que é excedida por 2% das ondas num estado de agitação,  $R_{u2\%}$ , da altura de espraimento adimensional,  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ , e da taxa relativa de galgamento  $q\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ . Para o estudo do galgamento, foram utilizadas três técnicas de medição com o intuito de avaliar a mais adequada a este tipo de estudos. Este estudo enquadra-se no trabalho em desenvolvimento de um sistema inovador de apoio à decisão do projeto de investigação BSafe4sea desenvolvido no LNEC (<http://bsafe4sea.lnec.pt/index.html>).

Os ensaios bidimensionais em modelo físico foram efetuados no canal de ondas COII do LNEC, aonde foi representada a secção transversal da zona cais do quebra-mar da Ericeira, bem como a batimetria de fundo. Considerou-se um conjunto de ondas e níveis de maré correspondentes a situações extremas e a cenários de alterações climáticas, nomeadamente alturas de onda significativa ( $H_s$ ) entre 4 e 8.5 m, períodos entre 12 e 16 s. Foram efetuadas medições de elevação da superfície livre, do espraimento na face do talude, de eventos de galgamento e do volume total galgado medido numa sonda e numa balança colocada no tardo da estrutura.

Para o processamento dos dados adquiridos, resultantes das diversas medições, foram utilizados *scripts* desenvolvidos em *Matlab*. Com estes *scripts*, foi possível produzir diversos gráficos com as séries temporais medidas em cada sonda resistiva, bem como os respetivos espectros. Através da análise espectral e temporal das sondas resistivas foi possível obter valores de altura significativa,  $H_s$ , da altura significativa espectral do estado de agitação,  $H_{m0}$ , do período médio,  $T_m$  e do período de pico,  $T_p$ .

Para a determinação dos galgamentos ocorridos ao longo dos diferentes ensaios, utilizaram-se as séries temporais obtidas na sonda colocada no reservatório e as medições obtidas na balança. Para a calibração dos programas utilizados considerou-se uma seleção de ensaios sem e com descargas; neste último caso, considerou-se a ocorrência de três descargas no máximo. O estudo comparativo entre os resultados obtidos através dos ensaios em laboratório e a aplicação de várias fórmulas empíricas permitiu retirar várias conclusões acerca do espraimento e do galgamento existentes no quebra-mar.

No que toca ao espraçamento,  $R_{u2\%}$ , conclui-se que tanto os resultados obtidos pelas fórmulas empíricas como os resultados obtidos em modelo físico aumentam com a altura de onda, em termos de  $H_{m0}$  e  $H_s$ . As fórmulas empíricas calculadas a partir da altura de onda significativa,  $H_s$ , apresentam valores superiores aos medidos nos ensaios, ao contrário das fórmulas calculadas a partir da altura de onda espectral,  $H_{m0}$ , que se aproximam bastante dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

Os valores adimensionais de espraçamento aumentam com o parâmetro de rebentação. As fórmulas que apresentam resultados mais próximos aos obtidos em ensaios dependem de  $H_{m0}$ ,  $T_{\mu0}$ ;  $H_s$  e  $T_p$ . Em suma, conclui-se que para as diferentes condições de ensaio efetuadas, as fórmulas empíricas que oferecem melhores resultados em comparação com os ensaios em modelo físico são as propostas por EurOtop (2018) e Allsop et al., (1985). Já as fórmulas de Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011) e Van der Meer e Stam (1992), por oferecerem valores de espraçamento bastante superiores aos obtidos nos ensaios conduzem a um sobredimensionamento da estrutura, pelo que não se apresentam adequadas ao caso de estudo, não sendo aconselhado o seu uso para estruturas similares.

Em relação à comparação da taxa relativa de galgamento,  $q\sqrt{(gH_{m0}^3)}$ , determinada através dos ensaios em modelo físico e da aplicação de fórmulas empíricas, verificou-se uma estimativa por defeito das fórmulas em relação aos valores medidos.

Quanto à metodologia a adotar para a quantificação do volume individual galgado em cada ensaio, verificou-se que existiam vários problemas relacionados com as medições na sonda e na balança, tais como perturbações ocorridas devidas a descargas da bomba, existência de ruído nos dados na sonda e da balança, ocorrência de galgamentos simultâneos às descargas efetuada durante os ensaios. Além disso, a medição dos volumes galgados que são armazenados no reservatório exterior apresentam algumas incertezas devido a erros de leitura e à simplificação efetuada no cálculo das áreas desse reservatório. A análise dos resultados permitiu concluir que as medições realizadas com a balança são as mais fiáveis, as medições através da régua apenas são fiáveis para uma seleção de ensaios sem descarga e a sonda apenas é considerada mais fiável em ensaios com maiores galgamentos.

Estes fatores podem ser determinantes no que diz respeito à exatidão na medição do volume de galgamento obtido nos ensaios de laboratório. Erros e efeitos de escala e de modelo também têm grande influência nos resultados obtidos em ensaios. Em suma conclui-se que o caudal obtido pelo modelo físico é inferior ao dado pelas fórmulas empíricas, sendo que estas fornecem valores por excesso.

A comparação das taxas de galgamento relativas e o bordo livre adimensional permitem concluir que grande parte dos ensaios se encontra dentro do intervalo de confiança de Pullen et al., (2007) e alguns dentro dos limites considerados pelo EurOtop (2018). Assim, estas fórmulas apresentam boas estimativas da taxa de galgamento medido em ensaio, em função do bordo livre adimensional. Como seria expectável, para o mesmo nível de água o caudal relativo,  $q$ , aumenta com o aumento de  $\sqrt{(gH_m0^3)}$ , com o aumento do período de onda e com a altura de onda.

Do trabalho desenvolvido, e como conclusões mais gerais, pode-se referir:

- A reprodução da secção transversal do quebra-mar cais à escala, a consideração de efeitos conjuntos como reflexão, rebentação, espraimento e galgamento bem como uma representação próxima da realidade do comportamento da estrutura são algumas grandes vantagens dos modelos físicos relativamente a outras ferramentas;
- Os modelos físicos reduzidos estão associados a algumas desvantagens, tais como, tempos de construção demorados, custos associados e necessidade de mão de obra especializada. A utilização destes modelos exige não só que os mesmos sejam cuidadosamente operados e construídos com equipamento adequado, bem como se exige uma correta interpretação dos seus resultados;
- Algumas das limitações detetadas aquando da exploração do modelo são a necessidade de equipamentos e *software* específicos, a calibração diária das sondas, possíveis erros humanos na operação dos ensaios, as falhas de equipamentos durante os ensaios e dificuldades em medir volumes de galgamento muito pequenos ou muito grandes;
- As fórmulas empíricas resultam dos resultados obtidos nos ensaios em modelo físico reduzido e também apresentam algumas limitações. A aplicabilidade das fórmulas é válida para as condições de ensaio em que foram desenvolvidas, ou seja, estas fórmulas foram testadas para condições específicas da onda e de nível de maré, considerando diferentes tipos de estrutura/geometria ou a não contabilização de fenómenos físicos como refração, reflexão e difração;
- Já as vantagens da aplicação de fórmulas empíricas na avaliação do espraimento e galgamento relacionam-se com a sua fácil utilização e baixo custo, permitindo também uma resposta rápida relativamente à utilização de modelos reduzidos.

Para trabalhos futuros, seria de interesse aplicar a metodologia utilizada nesta dissertação a outros perfis de quebra-mar, e diferentes portos, procurando, por um lado a sua validação e por outro clarificar algumas incertezas e dúvidas que restam do trabalho agora concluído, nomeadamente no que respeita ao cálculo do volume individual galgado. Também seria de interesse complementar o estudo desenvolvido, levando em conta outros fatores não contemplados aqui, tal como a incidência oblíqua da agitação marítima, que tem grande impacto no espraimento e galgamento em estruturas do tipo quebra-mar, através do desenvolvimento de ensaios tridimensionais.

## Referências Bibliográficas

- Allsop, N.W.H., Hawkes, P.J., Jackson, F.A., Franco, L., (1985). “Wave run-up on steep slopes- Model tests under random waves”, report Sr 2, Hydraulics Research, Wallingford, Oxfordshire.
- Antunes do Carmo, J. S., (2016). “Processos Físicos e Modelos Computacionais”. Coimbra, Portugal. ISBN 978 -989 -26 -1152-5.
- Antunes do Carmo, J. S., (2019). “Apontamentos das aulas de Engenharia Fluvial e Costeira”. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Bastos, M., A., S., (2017). “Utilização de ferramentas informáticas para apoio à avaliação do dano em modelo físico reduzido”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, p-137, Lisboa, Portugal.
- Bay, I., (2005). “Measurement and Analysis of Wave Overtopping”. PhD Thesis, Department of Civil Engineering University of Liverpool, p-346.
- Besley, P., (1999). “Wave Overtopping of Seawalls Design and Assessment Manual”. HR Wallingford, R&D technical report W178, Hydraulic Engineering Reports, Environmental Agency, Wallingford, p 1-36.
- Bonakdar, L., e Etemad-Shahidi, A., (2011). “Predicting wave run-up on rubble mound structures using M5 model tree”. Ocean Engineering, Vol. 38, nº1, p111-118, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.09.015.
- Brito, S., F., (2007). “Estudo do Galgamento em Estruturas Marítimas”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, p-76.
- Camenen, B., e Larson, M., (2007). “Predictive fórmulas for breaker depth index and breaker type” Journal of Coastal Research, 23(4), 1028-1041, West Palm Beach, Florida, ISSN 0749-0208.



- 
- Capitão, R., (2002). "Pacote de Software Geral para Tratamento e Geração de Agitação Marítima de Curto Prazo (SAM)". Seminário sobre Hidroinformática em Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1-20, 15-16 de novembro.
- CERC, (1984). "Shore Protection Manual". Coastal Engineering Research Center. Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi 39180, Vol 1, Pp 1-337.
- Ferraz, V.S.T., (2014). "Análise fotogramétrica de movimentos em modelos reduzidos de quebra-mares de taludes". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, p.83.
- Fortes, C.J., Reis, M.T., Neves, M.G., Silva, L.G., Capitão, R., Lemos, R., (2014). "A Modelação Física no Apoio ao Projeto de Obras Marítimas" LNEC- Construção Magazine nº62 (pp 26–30).
- Fortes, C.J.E.M., Santos, L.J., (2020). "MATLAB routines for overtopping analysis". Outubro, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Franco, L., de Gerloni, M., e Van der Meer, J., (1994). "Wave Overtopping at Vertical and Composite Breakwaters". Proceedings of the 24th International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, Vol. 1, pp. 1030-1045.
- Geeraerts, J., Troch, P., De Rouck, J., Verhaeghe, H., Bouma, J., J., (2006). "Wave overtopping at coastal structure: prediction tools and related hazard analysis". Journal of Cleaner Production, Vol. 15, pp1514-1521.
- Goda, Y., (2000). "Random Seas and design of maritime structures", 2<sup>nd</sup> edition, Vol. 15, World Scientific publishing, Singapore, ISBN 981-02-3256-X.
- GoogleEarth@ (2020) <https://earth.google.com/web/search/Ericeira/@38.96355079,-9.42168742,0.10142077a,636.77964967d,35y,9.83706364h,59.11869532t,0r/data=Cig iJgokCT0ZU-uGmkRAEajwCM0vk0RAGZBFwetoOSHAIXvc8LU6fyHA>. (página de internet.official, consultado em agosto de 2020.
- Hammeken Arana, A., (2017). "Wave Run-up on Beaches and Coastal Structures". PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Environmental and Geomatic Engineering at. University College London, United Kingdom, p. 367.

- 
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. e Walden, H., (1973). “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSAWP). Deut. Hydrog, Zeitschrift, Supp. A8, 12.
- Hunt, I., (1958). “Design of Seawalls and Breakwaters”. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1959, Vol. 85, Issue 3, p 123-152.
- Iribarren, C., Nogales, C., (1949). “Protection des Ports”. XVII International Navigation Congress, Lisbon, SII-4, p 31-80.
- Kortenhaus, A., Van Der Meer, J.W., Burcharth, H.F., Geeraerts, J., Pullen, T., Ingrand, D. & Troch, P., (2005). “CLASH D40: Report on Conclusions of Scale Effects”. Aalborg Universitetsforlag, Research Report, p 66.
- Lemos, R., (2019). “MATLAB routines for runup analysis”. Março, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Lemos, R., Silva, L.G., (2013). “LNEC experience in maritime hydraulics studies, scale models tests and recent damage assessment techniques.”, MedDays of coastal and port Engineering. Marselha, França, 22-24 de Maio.
- Losada, M. A., Giménez-Curto, L. A., (1981). “Flow Characteristics on Rough, Permeable Slopes Under Wave Action”, Coastal Engineering Vol. 4, p 187-206.
- MAMO (2011). “Modelling and Analysis of Marine Operations”, Recommended Practice, DNV-RP-H103, Det Norske Veritas As.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuada, T., Hedges, T., Reis, M. T., (2013). “Wave run-up and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water”. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. 2013.19:346-357 DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000199.
- Neves, P., Poseiro, P., Forte, C.J.E.M, Reis, M.T, Capitão, R., Antunes do Carmo, J.S, Raposeiro, P., Ferreira, J.C., (2013). "Aplicação da metodologia de avaliação do risco de inundação/galgamento na praia de São João da Caparica". 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, LNEC, Lisboa.
- Pedro, F. G. L., (2015). “ Utilização de Técnicas de Análise Fotogramétricas em Quebra-mares de Taludes”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, p-305, Lisboa, Portugal.

- 
- Perdersen, J., Burcharth, H. F., (1992). “Wave Forcers on Crown Walls”. Coastal Engineering Proceedings, pp. 1489-1502, n°23 ISSN: 2156-1028.
- Pierson, W.J., Moskowitz, L., (1963). “A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A Kitaigorodskii”. Journal of Geophysical Research, 69, 5181-5190.
- Pinheiro, L.V., (2019). “MATLAB routines for temporal and spectral analysis”. Janeiro, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Pita, C., (1985). “Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-mares de Talude”. Boletim de informação 37, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Poseiro, P., (2019). “Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment”. PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, p552.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J.W., (2007). “EurOtop. Wave Overtopping of Dea Defences and Related Structures: Assessment Manual” Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE.
- Quinlan, J. R., (1992). “Learning with continuous classes”. In proceedings of AI’92 (Adams and Sterbing. Eds.), World Scientific, p. 343-348.
- Quintela, A.C., (1998). “Hidráulica”. 6º Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, ISBN 972-31-0775-9.
- Robertson, B., Hall, K., Zytner, R. e Nistor, I., (2013). “Breaking waves: Review of characteristic relationships”. Coastal Engineering Journal, Vol. 55, No. 1, p.40, DOI: 10.1142/S0578563413500022.
- Rodrigues, E.J., (2011). "Galgamento de Estruturas Marítimas: Comparação de Ferramentas de Cálculo”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Setúbal, Setúbal, Portugal.
- Silva, R., M., (2014). “Caracterização de Estruturas Portuárias: Caso de Estudo- Ampliação do Terminal XXI, Sines”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 119, Lisboa, Portugal.

- 
- Silva, D.M.F., Fortes, C.J., Reis, M.T., Antunes do Carmo, J.S, Simões, A., Rodrigues, C., (2012). "Avaliação do galgamento de estruturas portuárias: porto de Ponta Delgada". Revista de Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Vol. 33, (pp 37–51).
- Thurman, H.V e Trujillo, A.P., (1999). "Essentials of Oceanography", 12<sup>th</sup> edition, Pearson, Boston, p. 634, ISBN 10: 0-134-07354-1; ISBN 13: 978-0-134-07354-5.
- Troch, P., (2005). "User Manual: Active Wave Absorption System.". Ghent University, Department of Civil Engineering, Belgium, p43.
- USACE (2008). "Costal Engineering Manual, (CEM)", Engineering Manual 1110-2-1100 (Part II-1). US Army Corps of Engineers, Washington D.C.
- USACE (2011a). "Costal Engineering Manual, (CEM)", Engineering Manual 1110-2- 1100 (Part VI-5), US Army Corps of Engineering, Washington D.C.
- USACE (2011b) "Costal Engineering Manual, (CEM)", Engineering Manual 1110-2- 1100 (Part VI-2), US Army Corps of Engineering, Washington D.C.
- Van der Meer, J. W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B., (2018). "EurOtop Manual on wave overtopping of sea defenses and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but worldwide application", Joint FCERM research programme, United Kingdom, Environment Agency, Netherlands.
- Van der Meer, J. W. e Stam, C. J., (1992) "Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 118, no. 5. American Society of Civil Engineers, p.534–550.
- Van der Meer, J. W. e Janssen, H., (1995) "Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments". Publication n°485, Delft Hydraulics.
- Veloso-Gomes, F., (1996). "Intervenções e estruturas de proteção costeira". Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Wang, Y., Witten, I. H., (1996). "Induction of Model Trees for Predicting Continuous Classes". Working paper 96/23, Department of Computer Science, The University of Waikato, Private Bag 3105, Hamilton, New Zealand.

Zózimo, A. C., Fortes, C. J., Pinheiro, L.V., (2020). “Validação do protótipo do sistema To-SEAlert para o porto da Ericeira. Depressões Elsa e Fabien”, in Proc. 6.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica/1.as Jornadas Luso-Espanholas de Hidrografia, 3 a 5 de novembro.

## Anexos

### Anexo A – Séries Temporais e espectrais do estado de agitação

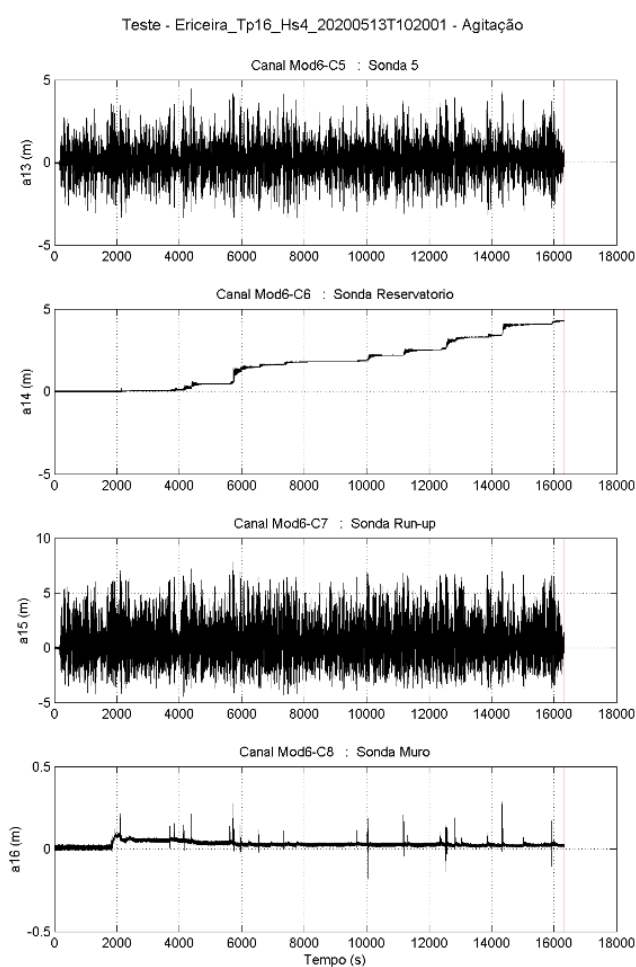


Figura A.1– Série temporal e de espectro durante o ensaio Tp16 s Hs4 m nas sondas S5, S6, S7 e S8.

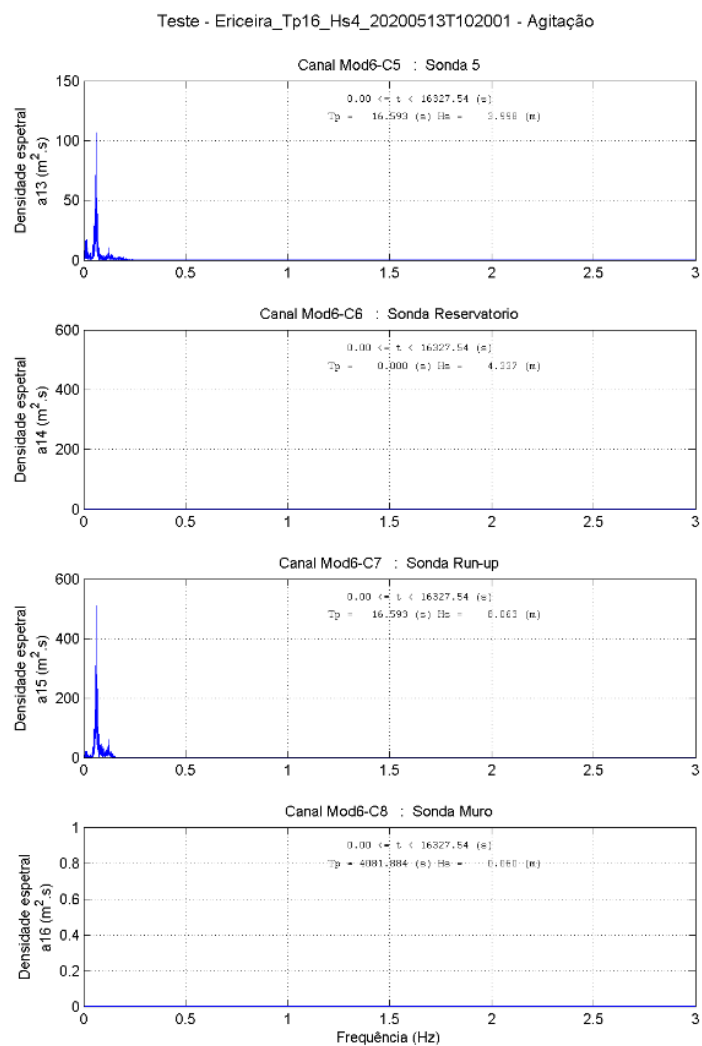


Figura A.2– Espectro da elevação da superfície livre do ensaio Tp16 Hs 4m para as sondas S5, S6, S7 e S8.





### Anexo C – Comparação do espreamento em função da altura de onda, $H_{m0}$ ou $H_s$ , dos valores estimados e observados.

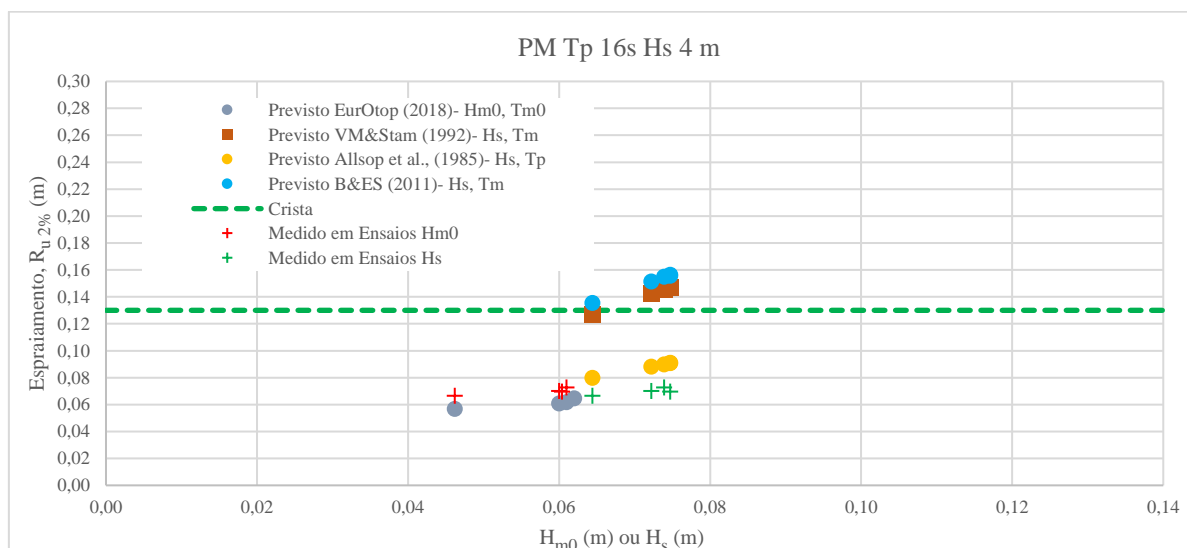


Figura C.1 – Espreamento em termos de  $R_u$  2%, medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas em função de  $H_{m0}$  ou  $H_s$ , para nível de NM, Tp14 s Hs 8 m.

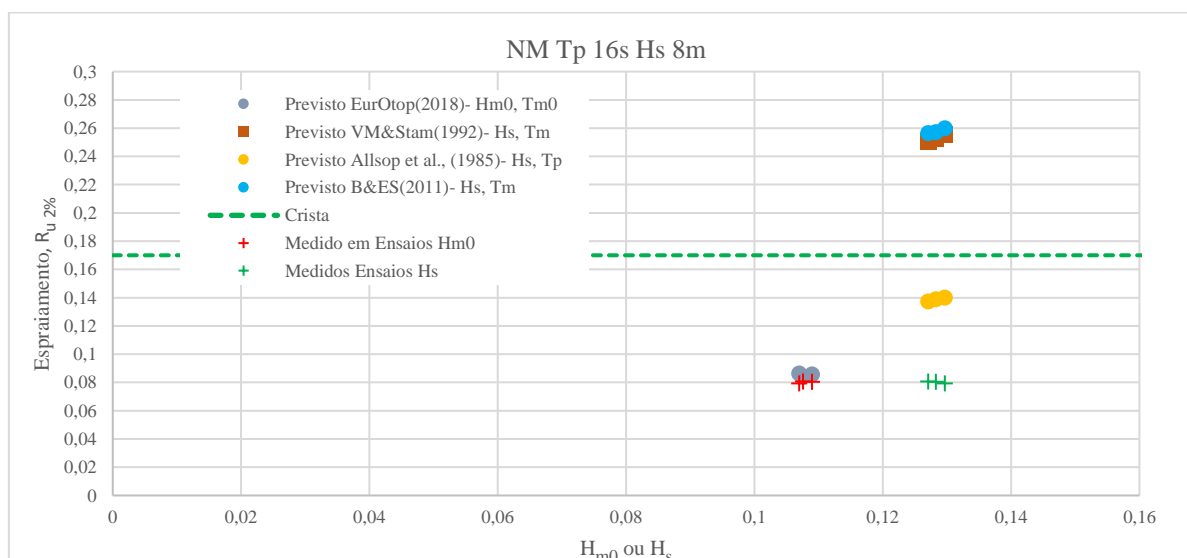


Figura C.2 – Espreamento em termos de  $R_u$  2%, medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas em função de  $H_{m0}$  ou  $H_s$ , para nível de NM, Tp16 s Hs 8 m.

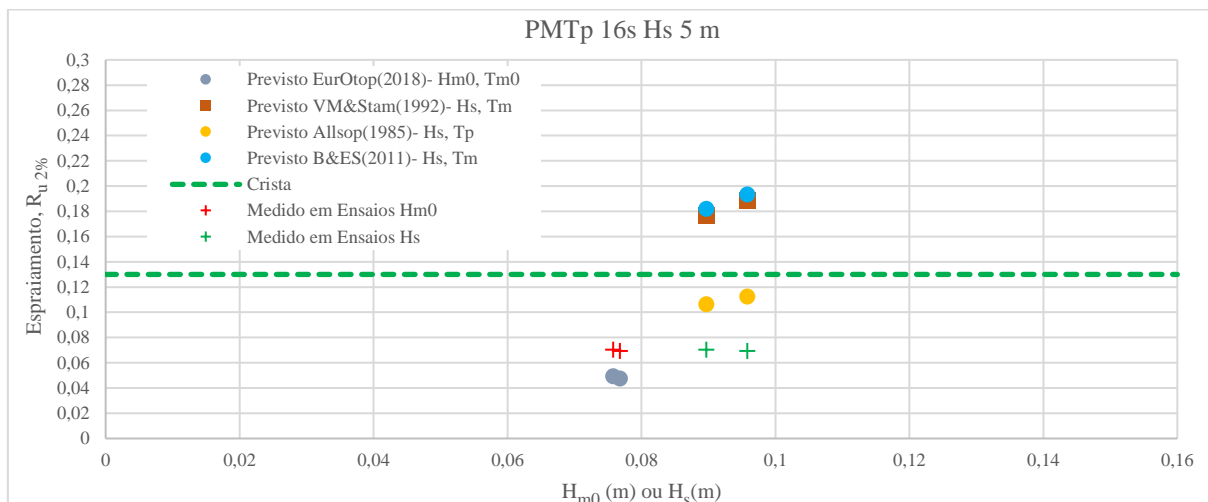


Figura C.3 – Espraimento em termos de  $R_u$  2%, medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas em função de  $H_{m0}$  ou  $H_s$ , para nível de PM, Tp16 s Hs 5 m.

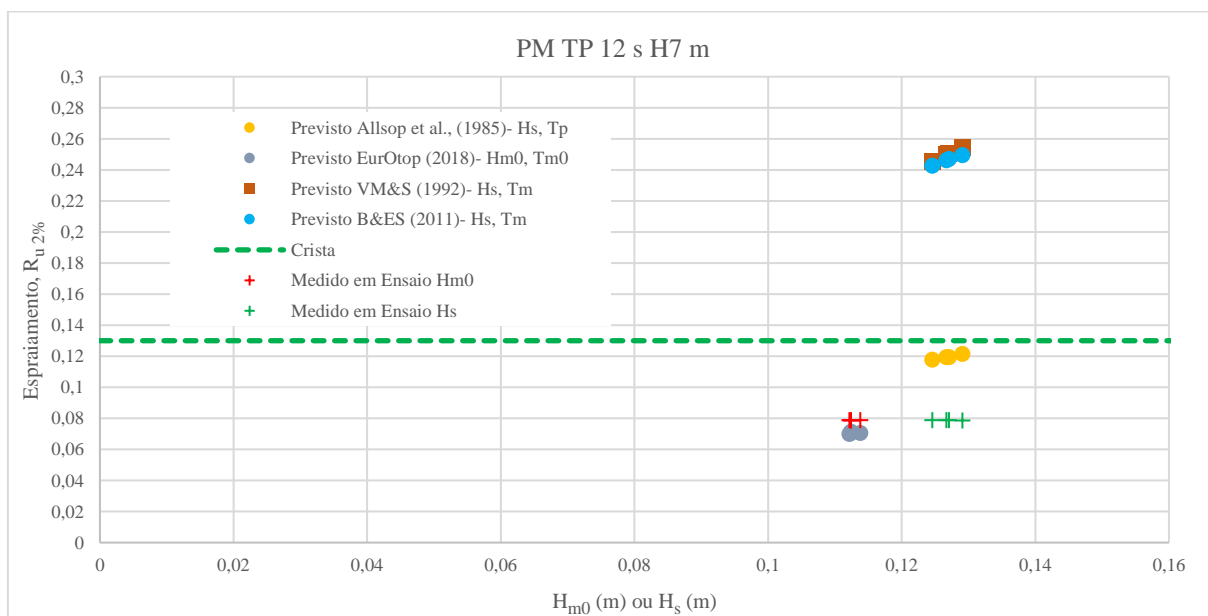


Figura C.4 – Espraimento em termos de  $R_u$  2%, medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas em função de  $H_{m0}$  ou  $H_s$ , para nível de PM, Tp12 s Hs 7 m.

## Anexo D – Comparação do espraçamento adimensional previsto em função do espraçamento adimensional observado.

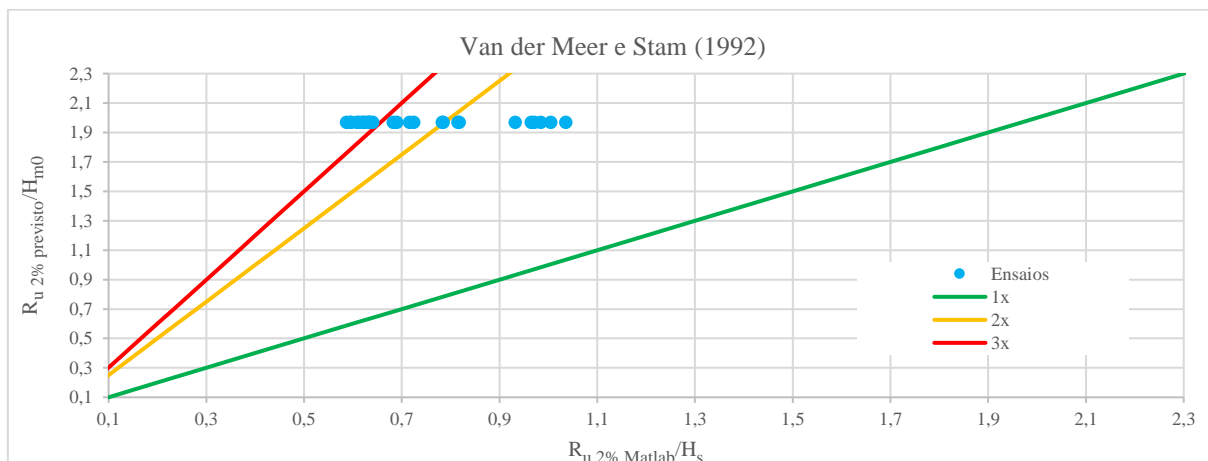


Figura D.1 – Comparação do espraçamento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, em termos de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$  para a fórmula proposta por van der Meer e Stam (1992).

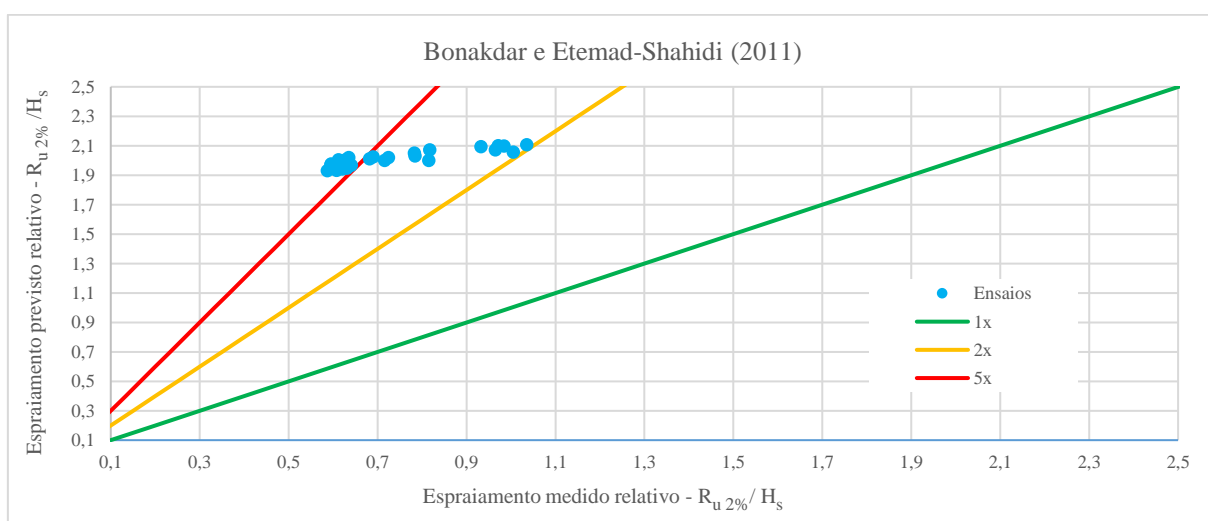


Figura D.2 – Comparação do espraçamento relativo medido em ensaios e previsto por fórmulas empíricas, em termos de  $R_{u2\%}/H_{m0}$  ou  $R_{u2\%}/H_s$ , para a fórmula proposta por Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011).