



**Miguel Ribeiro Machado Bairrão**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Galgamento de estruturas portuárias protegidas por um quebra-mar submerso**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,  
Doutora, FCT-UNL/LNEC

Co-orientador: Maria Teresa Leal Gonçalves Veloso dos Reis,  
Doutora, LNEC

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Doutora Maria Graça Neves  
Arguente: Prof. Doutor João Gouveia Leal  
Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

“Copyright” Miguel Ribeiro Machado Bairrão, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à Dr.<sup>a</sup> Maria da Graça Neves pelo seu apoio, total dedicação, ensinamentos cruciais e simpatia com que sempre me recebeu durante este último semestre do meu curso, que foi imprescindível para realizar a minha dissertação.

À Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Reis pelos seus ensinamentos, apoio e tempo dedicado durante a execução desta dissertação.

Ao Eng.<sup>o</sup> Jorge Gadelho por todo o material e apoio fornecido.

À Andreia Filipe por todo o apoio dado durante o período de desenvolvimento da presente dissertação.

À minha família que me apoiou muito e auxiliou no desenvolvimento da minha dissertação.

Agradecer aos meus amigos, especialmente ao Licínio Cruz e ao Miguel Saraiva, pelo interesse e ajuda prestada.

Aos colegas e amigos do LNEC, nomeadamente ao Eng.<sup>o</sup> João Inverno, Eng.<sup>o</sup> João Dias e Joana Rodrigues, pela ajuda, auxílio e apoio prestados.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por todos os meios disponibilizados, organização e apoio prestado.

Por fim, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) pela disponibilização dos materiais necessários para a realização desta dissertação.

# Resumo

O principal objetivo desta dissertação é estudar o fenômeno do galgamento em estruturas marítimas protegidas por quebra-mares submersos. Em particular, pretende-se otimizar a geometria de um quebra-mar submerso situado a barlamar de uma estrutura portuária na qual se pretende minimizar o galgamento.

A estrutura marítima em estudo é o molhe norte do Porto de Leixões, em frente ao qual já existe um quebra-mar submerso na zona da cabeça. Pretende-se estender a zona protegida pelo quebra-mar submerso e para tal é necessário estudar qual a melhor geometria para o quebra-mar submerso.

Para estudar a influência da geometria do quebra-mar submerso no galgamento do molhe norte, utilizou-se o modelo numérico IH-2VOF. Para tal, simularam-se três condições de agitação regular que diferem somente na altura de onda. Foram simulados casos para sete geometrias que diferem da configuração original do molhe norte do Porto de Leixões somente em três características geométricas: a distância entre o quebra-mar submerso e a estrutura portuária, a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a sua largura de coroamento. A utilização destas três características foi baseada na existência de estudos que concluem que os parâmetros geométricos referidos são os que têm mais influência no galgamento da estrutura marítima.

Com a realização deste estudo, para as condições de agitação consideradas, verificou-se que as características geométricas com maior impacto na redução do galgamento no molhe norte do Porto de Leixões são: o aumento da distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte do Porto de Leixões e o aumento da cota de coroamento do quebra-mar submerso. O caudal médio galgado para as condições de agitação em estudo reduziu-se de um valor máximo de 0.71 l/s/m para 0.02 l/s/m em duas das configurações testadas, ou seja, uma redução de 97%.

**Palavras-chave:** galgamento, quebra-mar submerso, modelo numérico IH-2VOF, distância entre o quebra-mar submerso e a estrutura portuária, cota de coroamento.



# Abstract

The main goal of this dissertation is to study the overtopping phenomenon in maritime structures which are protected by submerged breakwaters. In particular, the study aims to investigate the optimization of the geometry of a submerged breakwater in order to reduce overtopping of the structure protected by it.

The maritime structure featured in this study is the northern breakwater of the port of Leixões, which already has a submerged breakwater near its entrance. The study proposes to extend the protected zone by the submerged breakwater, but in order to do so, it is desirable to optimize the geometry of the submerged breakwater to reduce the overtopping of the main breakwater as much as possible.

To study the influence of the submerged breakwater geometry on the overtopping in the maritime structure the IH-2VOF model is used. To do so, three different regular wave conditions were studied, changing only the wave height. Seven different geometries for the submerged breakwater were considered, all of them starting from the first one, which represents the geometry which already exists. The different geometries differ from the first one in three geometric characteristics: the distance between the submerged breakwater and the main breakwater, the submerged breakwater crest level and width. The choice of these three characteristics was based on existing studies which conclude that these three characteristics are those that have a greater impact on the overtopping of the main breakwater.

With this study, and for the wave conditions considered, it was verified that the geometry characteristics that have greatest impact on reducing the overtopping over the main breakwater of the port of Leixões were the increase of the distance between the submerged breakwater and the main breakwater and the increase of the submerged breakwater crest level. The mean overtopping discharge for the wave conditions considered in this study was reduced from a maximum value of 0.71 l/s/m to 0.02 l/s/m in two of the tested configurations, meaning 97% of reduction.

**Keywords:** wave overtopping, submerged breakwater, IH-2VOF numerical model, distance between the breakwater and the main structure, crest level.



# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Motivação e enquadramento do tema .....	1
1.2.	Objetivos .....	1
1.3.	Plano de trabalhos.....	2
1.4.	Estrutura da dissertação.....	2
2.	Interação de ondas com um quebra-mar.....	3
2.1.	Agitação marítima.....	3
2.1.1.	<i>Introdução</i> .....	3
2.1.4.	<i>Teoria linear de ondas</i> .....	6
2.2.	Quebra-mares .....	8
2.2.1.	<i>Introdução</i> .....	8
2.2.2.	<i>Interação onda-estrutura (fenómenos físicos)</i> .....	10
2.3.	Galgamento .....	14
3.	Modelo numérico .....	17
3.1.	Considerações gerais.....	17
3.2.	Formulação matemática .....	17
3.2.1.	<i>Equações governativas do escoamento</i> .....	17
3.2.2.	<i>Equações governativas do escoamento em meios porosos</i> .....	18
3.2.3.	<i>Condições iniciais e de fronteira</i> .....	19
3.2.4.	<i>Método de captura da superfície livre: Volume Of Fluid - VOF</i> .....	20
3.2.5.	<i>Esquema de discretização do domínio computacional</i> .....	21
3.3.	Geração da malha e parâmetros de cada manto .....	22
3.4.	Ficheiros de entrada.....	24
3.5.	Cálculo do galgamento .....	25
4.	Caso de estudo.....	27
4.1.	Considerações gerais.....	27
4.2.	Condições de agitação marítima local.....	28
4.3.	Configurações geométricas do quebra-mar submerso.....	30
5.	Apresentação e análise de resultados .....	33
5.1.	Considerações gerais.....	33
5.2.	Análise de sensibilidade .....	33
5.3.	Condições das simulações.....	36
5.3.1.	<i>Condições de agitação</i> .....	36
5.3.2.	<i>Domínio de cálculo e malhas</i> .....	37
5.3.3.	<i>Características dos mantos</i> .....	39
5.3.4.	<i>Resultados do modelo</i> .....	41

5.4. Resultados .....	42
6. Considerações finais e desenvolvimentos futuros .....	57
Bibliografia .....	59
Anexo A .....	63
Anexo B .....	65

# Índice de figuras

Figura 1.1: Exemplo de um quebra-mar (Porto da Nazaré, 2014).....	1
Figura 2.1: Diferentes tipos de onda consoante o seu período e a força restabeecedora (adaptado de Pérez, 2011).....	3
Figura 2.2: Influência da ação do campo gravítico da Lua e do Sol sobre as marés: a azul representa-se a altura da maré (adaptado de <a href="http://www.hidrografico.pt">www.hidrografico.pt</a> ). ....	4
Figura 2.3: Onda e algumas das suas características. ....	5
Figura 2.4: Equações da celeridade para diferentes zonas de propagação (adaptado de USACE, 2006). ....	6
Figura 2.5: Teorias de ondas a utilizar consoante as características da onda e a profundidade (adaptada de Long, 1976). ....	7
Figura 2.6: Representação esquemática de perfis transversais dos quatro tipos de quebra-mares (Lopes, 2013). ....	9
Figura 2.7: Perfil tipo de um quebra-mar de estrutura mista.....	9
Figura 2.8: Perfil tipo de um quebra-mar de taludes submerso. ....	9
Figura 2.9: Exemplos de tipos de blocos existentes em estruturas marítimas. ....	10
Figura 2.10: Sequência de imagens para observação do fenómeno de reflexão de ondas num quebra-mar.....	11
Figura 2.11: Tipos de rebentação de ondas (adaptada de Pullen <i>et al.</i> , 2007). ....	12
Figura 2.12: Sequência de imagens para observação do fenómeno de transmissão. ....	13
Figura 2.13: Espriamento e refluxo (adaptado de USACE, 2006). ....	14
Figura 2.14: Galgamento do molhe norte do Porto de Leixões no dia 20 de fevereiro de 2014. ....	14
Figura 3.1: Média de volume realizada pelo VARANS através do RANS. ....	18
Figura 3.2: Definição do tipo de célula e esquema computacional IH-2VOF. ....	21
Figura 3.3: Sistema de eixos. ....	21
Figura 3.4: Exemplo de uma janela do programa CORAL.....	22
Figura 3.5: Cálculo do galgamento com base nos resultados do IH-2VOF.....	26
Figura 4.1: Vista de norte do molhe norte do Porto de Leixões (11/03/2014). ....	27
Figura 4.2: Vista Sudeste do molhe norte do Porto de Leixões (20/02/2014). ....	27
Figura 4.3: Esquema da geometria do caso de estudo à escala do protótipo. ....	28
Figura 4.4: Direções predominantes da ondulação marítima (valores da boia de Leixões entre os anos de 1993 e 2003) (adaptado de Lopes, 2013).....	28
Figura 4.5: Configuração 1 (escala 1/60). ....	31
Figura 4.6: Configuração 2 (escala 1/60). ....	31
Figura 4.7: Configuração 3 (escala 1/60). ....	31
Figura 4.8: Configuração 4 (escala 1/60). ....	31
Figura 4.9: Configuração 5 (escala 1/60). ....	31
Figura 4.10: Configuração 6 (escala 1/60). ....	32

Figura 4.11: Configuração 7 (escala 1/60).....	32
Figura 5.1: Relação entre o caudal médio galgado e a altura de onda do modelo para $T=3.10$ s e profundidade, $h$ , junto ao gerador, de 0.35 m.....	34
Figura 5.2: Relação entre o caudal médio galgado e o período de onda para $H=0.142$ m e profundidade, $h$ , junto ao gerador de 0.35 m.....	34
Figura 5.3: Relação entre o caudal médio galgado e a porosidade do manto de tetrápodes para $H=0.167$ m, $T=3.10$ s e $h=0.35$ m.....	35
Figura 5.4: Relação entre o caudal médio galgado e o refinamento da malha no modelo para $H=0.174$ m e $T=2.635$ s, para malhas de $660 \times 70$ e de $1320 \times 141$ células nas direções $x$ e $y$ .....	36
Figura 5.5: Domínio e discretização da malha.....	37
Figura 5.6: Refinamento da malha utilizada no muro cortina do molhe norte. ....	38
Figura 5.7: Qualidade da malha. ....	39
Figura 5.8: Designação de cada manto. ....	40
Figura 5.9: Posição das sondas. ....	42
Figura 5.10: Série temporal da elevação da superfície livre, $\eta$ , na sonda 4 para a configuração 1 com $H=0.150$ m.....	43
Figura 5.11: Caudal médio galgado, $Q$ , para cada uma das sete configurações e para as três alturas de onda, $H$ , analisadas. ....	44
Figura 5.12: Caudal médio galgado, $Q$ , para cada uma das sete configurações e para as três alturas de onda, $H$ , analisadas para valores de $Q$ entre 0.00 l/s/m e 0.10 l/s/m.....	44
Figura 5.13: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusivé) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 1 (escala vertical da estrutura alterada). ....	45
Figura 5.14: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusivé) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 2 (escala vertical da estrutura alterada). ....	45
Figura 5.15: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusivé) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 5 (escala vertical da estrutura alterada). ....	46
Figura 5.16: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda $H=0.133$ m. ....	47
Figura 5.17: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda $H=0.150$ m. ....	47
Figura 5.18: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda $H=0.167$ m. ....	48
Figura 5.19: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre num dado instante para as diferentes geometrias do quebra-mar submerso e com $H=0.150$ m e $T=2.582$ s.....	49
Figura 5.20: Posição das sondas na análise da influência da variação da geometria do quebra-mar submerso na variação da superfície livre e geometria da configuração 1. ....	50
Figura 5.21: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , da sonda 1 das configurações 1 (Config1) e 2 (Config2) para $H=0.150$ m. ....	50

Figura 5.22: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , da sonda 5 das configurações 1 (Config1) e 2 (Config2) para $H=0.150$ m. ....	50
Figura 5.23: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , da sonda 8 da configuração 1 (Config1) e 2 (Config2) para $H=0.150$ m. ....	51
Figura 5.24: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , na sonda 1 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para $H=0.133$ m. ....	52
Figura 5.25: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , na sonda 5 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para $H=0.133$ m. ....	52
Figura 5.26: Valores da elevação da superfície livre, $\eta$ , na sonda 8 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para $H=0.133$ m. ....	53
Figura 5.27: Diferença entre o caudal da configuração i e da configuração 1.....	53
Figura 5.28: Diferença entre o caudal da configuração i e da configuração 1 para valores de caudal compreendidos entre $-0.1 < Q_{\text{configi}} - Q_{\text{config1}} \text{ (l/s/m)} < 0.1$ .....	54



## Índice de tabelas

Tabela 2.1: Resumo dos autores que produziram fórmulas empíricas de galgamento (adaptado de Brito, 2007). .....	15
Tabela 2.2: Relação de escalas com base na semelhança de Froude (adaptado de Kortenhuis <i>et al.</i> , 2005). .....	16
Tabela 4.1: Número de registos para diferentes gamas de períodos ( $T$ ) e de alturas de onda ( $H$ ) (adaptado de Lopes, 2013). .....	29
Tabela 5.1: Malha das simulações e verificação das condições requeridas pelo modelo (seção 3.3). .....	38
Tabela 5.2: Valores recomendados para $\alpha$ e $\beta$ (adaptado de García, 2007). .....	40
Tabela 5.3: Valores dos parâmetros $n$ , $\alpha$ e $\beta$ , resultantes da calibração realizada por Gadelho <i>et al.</i> (2011) para as características dos mantos porosos. ....	41
Tabela 5.4: Valores dos parâmetros $D50$ e $\gamma$ utilizados para cada manto. ....	41
Tabela 5.5: Posição das sondas. ....	42
Tabela 5.6: Valores do caudal médio galgado, $Q$ (l/s/m), para cada uma das configurações e alturas de onda, $H$ . ....	43



## Lista de símbolos

$a$  – Variável em estudo; coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada;

$A_c$  – Amplitude de crista;

$A_o$  – Amplitude de onda;

$A_s$  – Amplitude de cava;

$b$  – Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada;

$c$  – Celeridade da onda; coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada;

$c_o$  – Celeridade da onda numa determinada posição;

$C_r$  – Coeficiente de reflexão;

$C_t$  – Coeficiente de transmissão;

$d$  – Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada;

$d\Delta x$  – Variação da dimensão da célula ao longo do domínio segundo a direção  $x$ ;

$d\Delta y$  – Variação da dimensão da célula ao longo do domínio segundo a direção  $y$ ;

$D$  – Dimensão característica do escoamento que se assume, na relação de Forchheimer generalizada, igual a  $D_{50}$ ;

$D_{50}$  – Diâmetro característico do material que constitui o meio poroso;

$f_s$  – Frequência de amostragem;

$F$  – Define o tipo de célula reconhecida pelo VOF (como sendo vazia, E, de superfície, S, ou interior, I);

$F_r$  – Número de Froude;

$F_{r,modelo}$  – Número de Froude no modelo;

$F_{r,protótipo}$  – Número de Froude no protótipo;

$g$  – Aceleração da gravidade;

$g_i$  – Componente da aceleração da gravidade;

$h$  – Profundidade;

$h_r$  – Profundidade relativa;

$H$  – Altura de onda;

$H_{médio}$  – Altura de onda média;

$H_d$  – Declividade da onda;

$H_i$  – Altura de onda incidente;

$H_r$  – Altura relativa;

$H_{refle}$  – Altura de onda refletida;

$H_s$  – Altura significativa de onda (Tabela 2.1);

$H_t$  – Altura de onda transmitida;

$I$  – Gradiente de pressão;

$l$  – Comprimento característico;

$L$  – Comprimento de onda;

$n$  – Porosidade;  
 $N_l$  – Escala geométrica;  
 $N_q$  – Escala do caudal;  
 $N_t$  – Escala do tempo;  
 $p$  – Campo de pressões;  
 $\bar{p}$  – Pressão média;  
 $p'$  – Variações de pressão;  
 $Q$  – Caudal médio de galgamento;  
 $R_c$  – Altura da estrutura acima do nível de repouso (Tabela 2.1);  
 $R_{max}$  – Espraçamento máximo (Tabela 2.1);  
 $t$  – Instante de tempo;  
 $t_{max}$  – Duração da série;  
 $T$  – Período de onda;  
 $u$  – Velocidade do escoamento; velocidade aparente do escoamento no meio poroso;  
 $\bar{u}$  – Componente x da velocidade média;  
 $u_i$  – Campo de velocidades instantâneas;  
 $\bar{u}_i$  – Velocidades médias;  
 $u_i'$  – Velocidades turbulentas;  
 $\bar{v}$  – Componente y da velocidade média;  
 $V$  – Volume de integração;  
 $V_a$  – Volume de ar de cada célula;  
 $V_c$  – Volume de fluido de cada célula;  
 $V_f$  – Volume do fluido que ocupa o volume de integração  $V$ ;  
 $x$  – Comprimento/distância na direção horizontal;  
 $y$  – Comprimento/distância na direção vertical;  
 $y_1$  – Limite inferior da lâmina de água que galga a estrutura;  
 $y_2$  – Limite superior da lâmina de água que galga a estrutura.

## Símbolos gregos

$\alpha$  – Coeficiente de atrito linear;

$\beta$  – Coeficiente de atrito não linear;

$\gamma$  – Coeficiente de massa adicionada;

$\Delta$  – Variação;

$\Delta t$  – Intervalo de tempo;

$\Delta y_{\text{máx}}$  – Dimensão máxima da célula segundo a direção x;

$\Delta y_{\text{mín}}$  – Dimensão mínima da célula segundo a direção y;

$\Delta x$  – Dimensão da célula segundo a direção x;

$\Delta y$  – Dimensão da célula segundo a direção y;

$\Delta x_1/\Delta x_2$  – Variação de dimensão na direção x da célula 1 para 2;

$\Delta y_1/\Delta y_2$  – Variação de dimensão na direção y da célula 1 para 2;

$\eta$  – Superfície livre da água;

$\theta$  – Ângulo que o fundo (ou a estrutura) faz com o plano horizontal;

$\lambda$  – Escala;

$\xi$  – Número de Iribarren;

$\pi$  – Constante de Arquimedes (valor aproximado de 3.142);

$\rho$  – Massa específica do fluido;

$\rho_c$  – Massa específica da mistura da célula;

$\bar{\tau}_{ij}$  – Tensor das tensões da viscosidade média;

$\nu$  – Viscosidade cinemática;

$\nu_t$  – Viscosidade cinemática de eddy.



## **Lista de abreviaturas e siglas**

COBRAS – Cornell Breaking Waves and Structure;  
Configi – Configuração i;  
FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia;  
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;  
JONSWAP – Joint North Sea Wave Project;  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;  
NR – Nível de Repouso da água;  
RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes;  
UNL – Universidade Nova de Lisboa;  
VARANS – Volume-Averaged the Reynolds Averaged Navier-Stokes;  
VOF – Volume Of Fluid;  
ZH – Zero Hidrográfico;  
2D – Bidimensional;  
3D – Tridimensional.



# 1. Introdução

## 1.1. Motivação e enquadramento do tema

Atualmente existem diversas soluções de estruturas marítimas, tais como quebra-mares (Figura 1.1) que, como o próprio nome indica, servem para reduzir a energia das ondas na zona por eles protegida. A energia das ondas é reduzida pela combinação entre a reflexão e dissipação das ondas nos quebra-mares, reduzindo assim parte da energia transmitida para a zona abrigada.



Figura 1.1: Exemplo de um quebra-mar (Porto da Nazaré, 2014).

Assim, a principal função de um quebra-mar é criar zonas de acalmia no acesso e no interior dos portos, para que se possam realizar as atividades associadas.

Os quebra-mares podem classificar-se, de acordo com a sua geometria, em quebra-mares de talude, verticais, mistos, etc. Quanto à sua cota de coroamento, podem ser emersos ou submersos, se esta está acima ou abaixo do nível do mar, respetivamente. Os quebra-mares submersos, que são alvo do presente estudo, são estruturas que foram usadas tradicionalmente para reduzir a erosão costeira. São normalmente construídos como quebra-mares de talude com cotas de coroamento inferiores ao nível de repouso da água.

Nesta dissertação será estudada uma aplicação de um quebra-mar submerso diferente do usual, já que, o objetivo da estrutura não é proteger a costa da erosão, mas sim proteger outra estrutura marítima, um quebra-mar de talude. Esta proteção é, neste caso, essencial porque o quebra-mar de talude que irá proteger tem sofrido queda de blocos do manto principal.

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é estudar o fenómeno do galgamento numa estrutura marítima protegida por um quebra-mar submerso. Em particular, pretende-se otimizar a geometria do quebra-mar submerso situado a barlar de uma estrutura portuária da costa portuguesa, o molhe norte do Porto de Leixões, no que ao galgamento se refere, utilizando resultados de ensaios em

modelo físico reduzido realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e do modelo numérico IH-2VOF (2012).

### **1.3. Plano de trabalhos**

A otimização da geometria do quebra-mar submerso que protege o molhe norte do Porto de Leixões é feita recorrendo a: resultados de ensaios em modelo físico já realizados na FEUP para cinco configurações distintas do quebra-mar submerso; e modelação numérica, com o modelo IH-2VOF, que é um modelo numérico bidimensional baseado na resolução das equações de Navier-Stokes (RANS). Os resultados do modelo numérico permitem ampliar os casos já estudados em modelo físico, quer em termos de geometria, quer em termos de condições de agitação.

O plano de trabalhos incluiu:

- Estudo dos fenómenos envolvidos na interação das ondas com quebra-mares de estrutura mista protegidos por quebra-mares submersos, em particular o galgamento;
- Aquisição dos conhecimentos no âmbito da modelação numérica e física dos fenómenos envolvidos, por intermédio de revisão bibliográfica, leitura de artigos, comunicações e livros, realização de cursos, etc.;
- Análise de resultados de galgamento de ensaios em modelo físico do molhe norte do Porto de Leixões, para diferentes geometrias do quebra-mar submerso que o protege;
- Aplicação do modelo IH-2VOF para o cálculo do galgamento do molhe norte do Porto de Leixões, para diferentes geometrias do quebra-mar submerso e diferentes condições de agitação;
- Estudo da influência dos parâmetros geométricos do quebra-mar submerso no galgamento do molhe norte do Porto de Leixões.

### **1.4. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. Após esta introdução (Capítulo 1), apresenta-se: uma análise teórica dos fenómenos físicos envolvidos na interação entre a agitação marítima e um quebra-mar de talude (Capítulo 2); uma breve descrição do modelo numérico utilizado (Capítulo 3); uma apresentação do caso de estudo incluindo uma caracterização geral do protótipo, das condições de agitação marítima local e dos estudos em modelo físico realizados anteriormente na FEUP (Capítulo 4); uma descrição da metodologia utilizada para realizar as simulações do modelo numérico e do trabalho envolvido no processamento de resultados, uma apresentação e análise de resultados do modelo numérico (Capítulo 5); e por último as conclusões do trabalho e possíveis desenvolvimentos futuros (Capítulo 6).

## 2. Interação de ondas com um quebra-mar

### 2.1. Agitação marítima

#### 2.1.1. Introdução

A agitação marítima é composta, essencialmente, por ondas de vento, isto é, ondas formadas pela transferência de energia do vento para a superfície do mar, na qual a força restabeecedora é a gravítica ou a tensão superficial. Na Figura 2.1 estão representados os diferentes tipos de ondas consoante o seu período e a força restabeecedora.

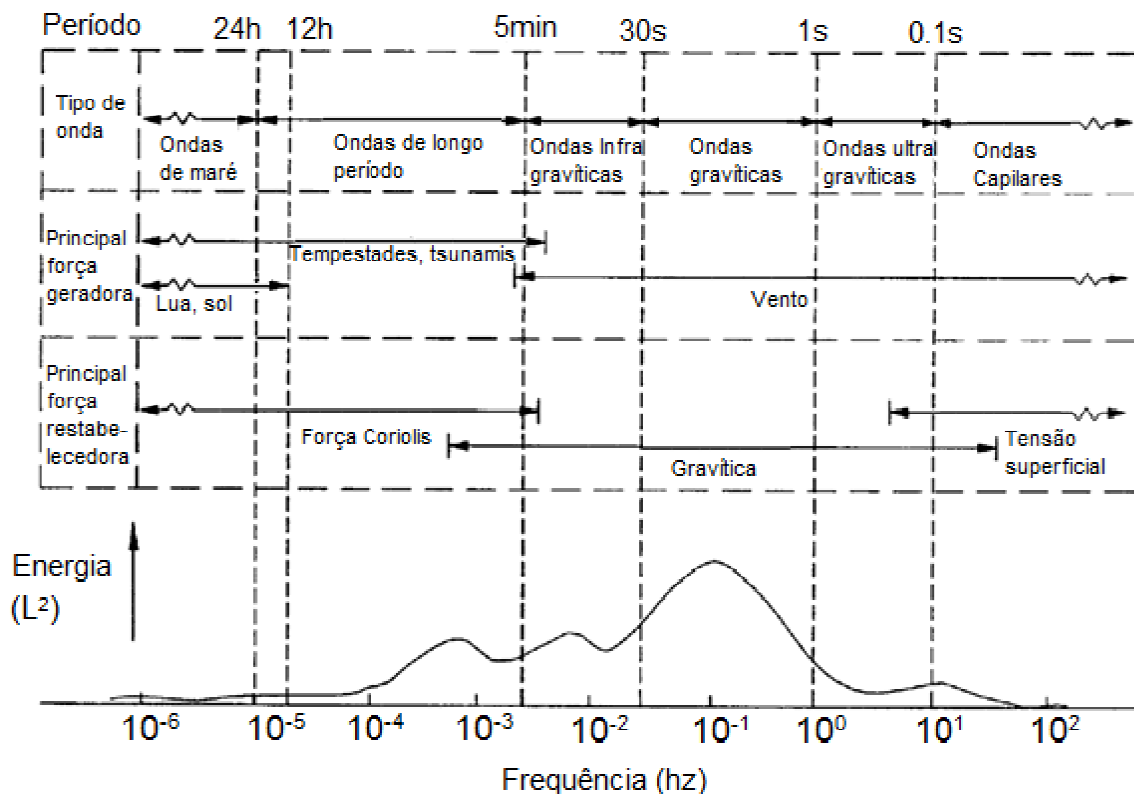


Figura 2.1: Diferentes tipos de onda consoante o seu período e a força restabeecedora (adaptado de Pérez, 2011).

O presente caso de estudo centra-se nas ondas gravíticas. Estas ondas são geradas pela força do vento, a principal força restabeecedora é a força gravítica e o seu período encontra-se no intervalo entre 1 s e 30 s.

Dentro das ondas de vento, utiliza-se a designação de **vaga** para as ondas próximas da sua zona de geração e a designação de **ondulação** para ondas longe da zona de geração.

#### 2.1.2. Maré

A profundidade num determinado ponto varia com o nível de maré. Esta variação leva a alterações das características das ondas, tais como a posição de rebentação ou o tipo de rebentação,

que por sua vez influenciam os fenômenos de interação das ondas com os quebra-mares. Assim, as marés são fenômenos muito importantes neste estudo.

As marés, também designadas por marés astronômicas, existem devido à ação do campo gravítico da Lua e do Sol na massa de água na Terra, em que a ação da Lua é predominante à do Sol. Quando a Lua e o Sol estão do mesmo lado em relação à Terra, ocorrem as chamadas marés vivas, provocadas pelo efeito conjunto do campo gravítico da Lua e do Sol (Figura 2.2, caso C).

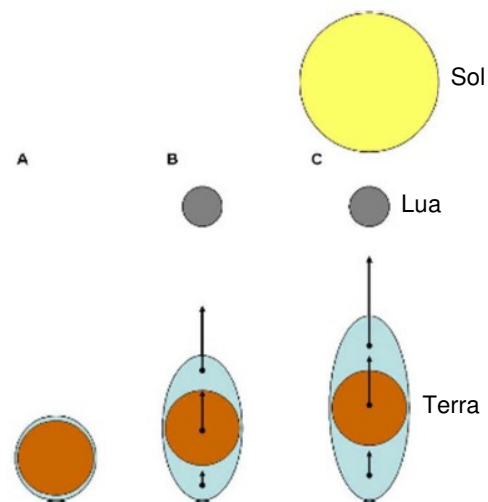


Figura 2.2: Influência da ação do campo gravítico da Lua e do Sol sobre as marés: a azul representa-se a altura da maré (adaptado de [www.hidrografico.pt](http://www.hidrografico.pt)).

Dá-se a designação de maré baixa ou **baixa-mar** quando a maré se encontra no seu nível mínimo e maré alta ou **preia-mar** quando se encontra no nível máximo de um ciclo de maré.

### 2.1.3. Características das ondas

Uma onda tem determinadas características que a definem, tais como:

- Período de onda ( $T$ ): Tempo que decorre entre a passagem de dois pontos idênticos da superfície livre, por exemplo, entre duas cavas ou duas cristas;
- Comprimento de onda ( $L$ ): Distância entre dois pontos idênticos sucessivos da superfície livre;
- Altura de onda ( $H$ ): Distância vertical entre a crista e a cava da onda;
- Amplitude da crista ( $A_c$ ): Distância vertical máxima entre o nível de repouso e a crista;
- Amplitude da cava ( $A_s$ ): Distância vertical máxima entre o nível de repouso e a cava;
- Amplitude de onda ( $A_o = H/2 = (A_s + A_c)/2$ );
- Profundidade ( $h$ ): Distância entre o nível de repouso da água e o fundo;
- Superfície livre da água ( $\eta$ ): Distância entre o nível de repouso da água e a superfície livre da mesma, num dado instante;
- Declividade da onda ( $H_d = H/L$ ): Quociente entre a altura da onda e o seu comprimento;

- Profundidade relativa ( $h_r = h/L$ ): Quociente entre a profundidade e o comprimento de onda;
- Altura relativa ( $H_r = H/h$ ): Quociente entre a altura da onda e a profundidade;
- Nível de Repouso (NR): Nível de água em repouso num determinado instante.

Na Figura 2.3 representam-se algumas das definições apresentadas.

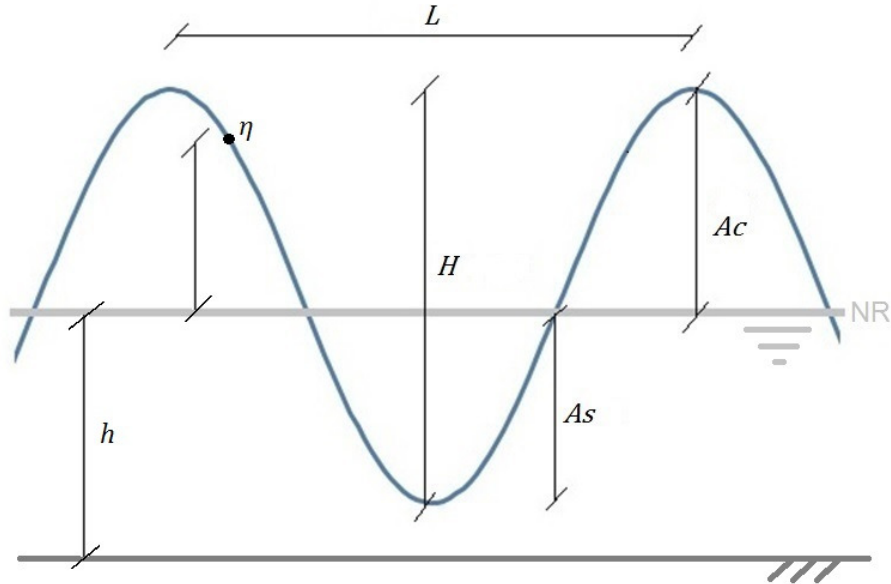


Figura 2.3: Onda e algumas das suas características.

A celeridade ( $c$ ) de uma onda é a velocidade com que esta se propaga e pode ser calculada de um modo geral através da seguinte equação:

$$c = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

Ainda é possível calcular a celeridade, considerando válida a teoria linear, utilizando a equação da dispersão dada por (USACE, 2006):

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (2.2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade. Esta equação pode ser simplificada para determinadas profundidades relativas, como se mostra na Figura 2.4. Nesta figura, apresentam-se três fórmulas para o cálculo da celeridade obtidas através da equação 2.2, para as diferentes profundidades,  $h$ .

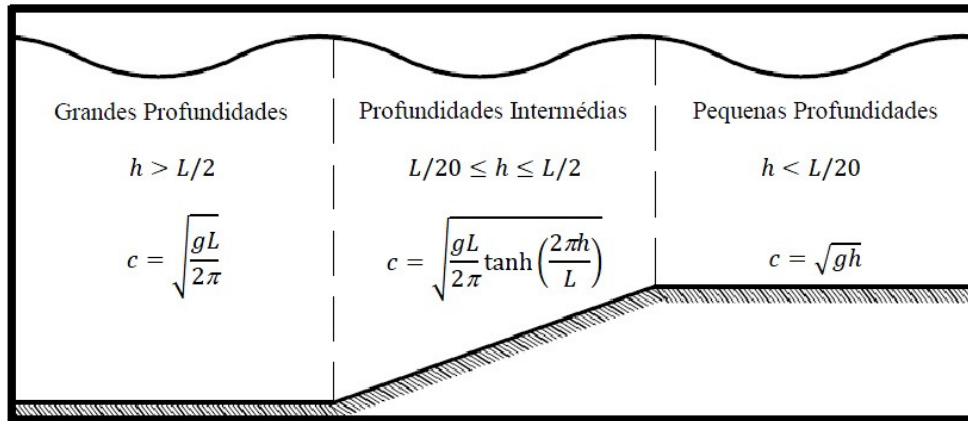


Figura 2.4: Equações da celeridade para diferentes zonas de propagação (adaptado de USACE, 2006).

#### 2.1.4. Teoria linear de ondas

A teoria linear de ondas, também designada de teoria de Airy, é baseada nas equações da conservação da massa e da quantidade de movimento e através de diversas simplificações (resumidas adiante) permite descrever o seu movimento (Pérez, 2011). Por outras palavras, permite obter a posição da superfície livre da água, o movimento das partículas, quer em termos de velocidade, quer em termos de trajetória, e a pressão hidrostática e dinâmica na coluna de água. A teoria linear de ondas é muito utilizada em problemas de hidráulica marítima, tais como a geração de ondas regulares e irregulares, quer em laboratório, quer em modelos numéricos.

Existem outras teorias que se podem aplicar para descrever as ondas e a sua aplicabilidade varia consoante as suas características (Pinto, 2001). Na Figura 2.5 é apresentado um gráfico que define a teoria de ondas a utilizar consoante as características da onda (altura,  $H$ , e período,  $T$ ) e a profundidade,  $h$ . Neste gráfico são apresentadas a teoria de Airy, que é linear, e as teorias de Stokes de 2ª e 3ª ordem e Cnoidal, que são não lineares. A teoria de Airy, também conhecida por teoria das ondas de pequena amplitude ou sinusoidais, é válida em grandes profundidades. À medida que as ondas se aproximam da costa sofrem o fenómeno de empolamento, adquirindo comportamentos e formas mais complexas, sendo necessário recorrer a teorias de onda com crescente grau de não linearidade, tais como Stokes de 2ª e 3ª ordem e Cnoidal.

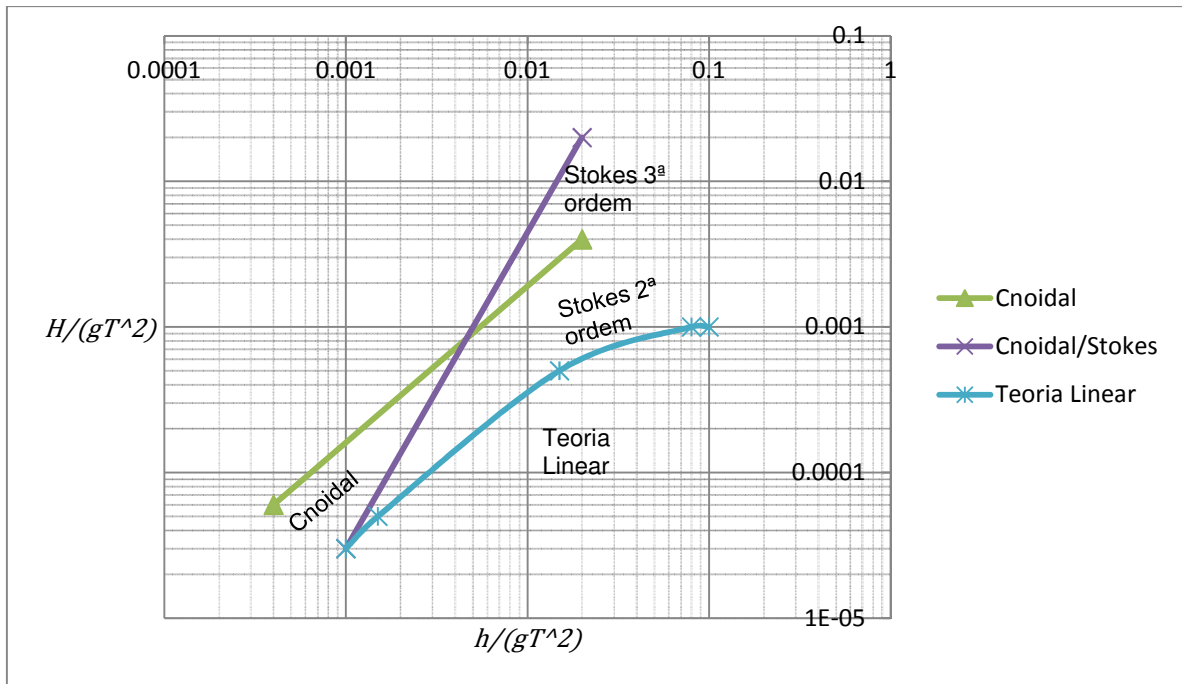


Figura 2.5: Teorias de ondas a utilizar consoante as características da onda e a profundidade (adaptada de Long, 1976).

Nesta dissertação, apenas foi utilizada a teoria linear de ondas. Segundo esta teoria, a superfície livre da água,  $\eta$ , descreve um movimento harmónico simples semelhante ao da Figura 2.3.

A teoria linear tem em conta sete **hipóteses simplificativas** (Pérez, 2011):

- **A profundidade é constante.** Tal hipótese pode causar erros até 20% em casos próximos da costa em que o declive do fundo é relativamente importante;
- **O meio é bidimensional (2D).** Não tem em conta os processos de transformação de ondas tridimensionais (3D), tais como a difração e a refração. Esta hipótese é válida para ondas longe da sua zona de geração (*ondulação*);
- **A forma das ondas é constante.** Na realidade a forma das ondas varia com a profundidade, exceto em grandes profundidades (ver Figura 2.4);
- **O fluido é incompressível.** Isto significa que a densidade se mantém constante; no entanto, no processo de rebentação as ondas são compostas por água e ar, sendo que o ar é um fluido compressível, resultando num fluido compressível e não sendo aplicável esta teoria no caso da rebentação;
- **O fluido é não viscoso.** Esta hipótese é válida fora da camada limite do fundo;
- **A tensão superficial da água é desprezável.** Na realidade as forças de tensão superficial não têm muita relevância quando comparadas com as forças gravíticas, mas no caso de modelos de escala reduzida pode ser um problema;
- **A declividade da onda é muito pequena.** Na prática, assume-se que é muito pequena se for inferior a 0.01.

$$\frac{H}{L} \ll 0.01 \quad (2.3)$$

## 2.2. Quebra-mares

### 2.2.1. Introdução

Os quebra-mares são estruturas construídas pelo Homem para criar zonas de abrigo à agitação marítima.

Existem diferentes formas de classificar os quebra-mares.

Relativamente à sua disposição em planta, se um quebra-mar se encontrar conectado com o terreno, designa-se por **quebra-mar enraizado**, caso contrário designa-se por **quebra-mar destacado**.

Relativamente ao galgamento, sempre que um quebra-mar é dimensionado com uma cota de coroamento que permita o galgamento da mesma, chama-se quebra-mar **galgável**; de outro modo designa-se por quebra-mar **não galgável**.

Quanto à cota de coroamento, se um quebra-mar possui uma cota de coroamento que é inferior ao previsível nível da água é designado por **quebra-mar submerso**; caso contrário designa-se por **quebra-mar emerso**.

Quanto ao seu perfil transversal, podemos distinguir quatro tipos de quebra-mares (Figura 2.6), nomeadamente:

- **Quebra-mares verticais:** estruturas de paramento vertical impermeáveis que refletem a energia da onda sem que ocorra rebentação. São estruturas robustas de modo a suportar o impacto direto com a ondulação.
- **Quebra-mares de talude:** Possuem um perfil transversal semelhante a um trapézio e dissipam a maior parte da energia das ondas por atrito e percolação por meios porosos.
- **Quebra-mares mistos:** estruturas que têm um comportamento semelhante aos quebra-mares de talude até um determinado nível de maré, a partir do qual começam a ter um comportamento de quebra-mares verticais.
- **Quebra-mares de estrutura mista:** Comportamento semelhante aos quebra-mares de talude, possuindo no topo uma estrutura de dimensão considerável com o intuito de refletir a água que a atinge.

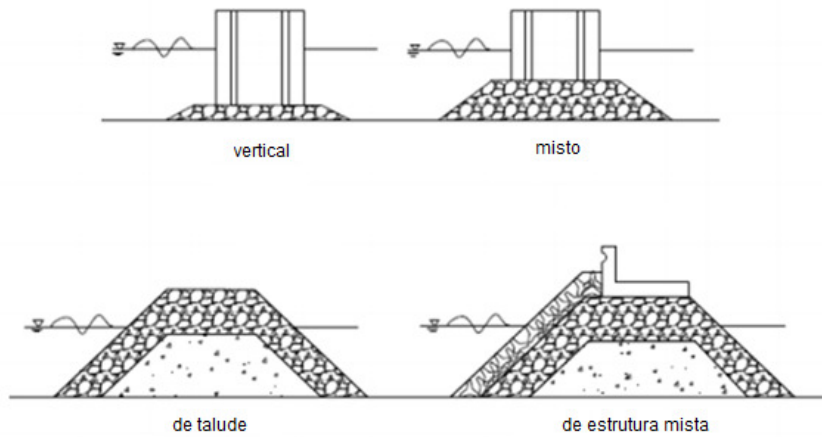


Figura 2.6: Representação esquemática de perfis transversais dos quatro tipos de quebra-mares (Lopes, 2013).

Esta dissertação, tal como referido, centra-se no estudo de quebra-mares de talude, especialmente de quebra-mares submersos. Segundo o *Coastal Engineering Manual Part IV.2* (USACE, 2006), um **quebra-mar** tem como objetivo proteger as entradas das bacias portuárias das ondas e correntes marítimas dissipando e ou refletindo a energia das mesmas. Um **quebra-mar submerso** tem como objetivo proteger a zona costeira da erosão e outras estruturas marítimas da agitação, reduzindo a altura e energia da onda incidente.

Na Figura 2.7 apresenta-se o perfil tipo de um quebra-mar de estrutura mista. Na Figura 2.8 apresenta-se um perfil tipo de um quebra-mar de taludes submerso, que é normalmente mais simples, sem muro cortina ou banqueteta.

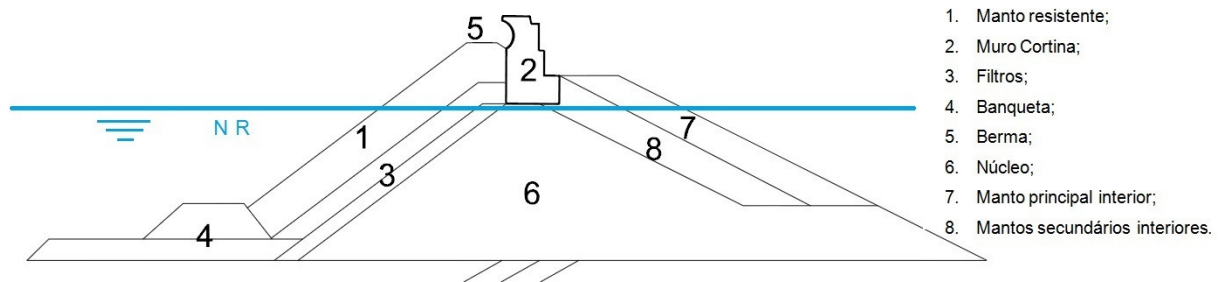


Figura 2.7: Perfil tipo de um quebra-mar de estrutura mista.

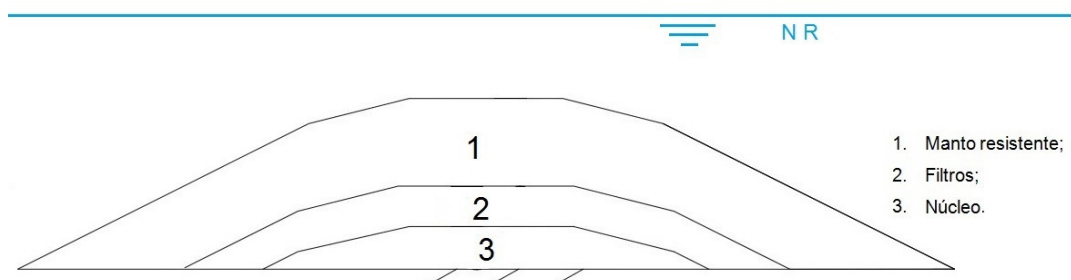


Figura 2.8: Perfil tipo de um quebra-mar de taludes submerso.

Os mantos resistentes e filtros dos quebra-mares de talude podem ser constituídos por enrocamento ou, caso o peso exigido pela agitação incidente seja muito elevado, por blocos artificiais de betão. Existem diversos tipos de blocos artificiais, como se mostra na Figura 2.9.

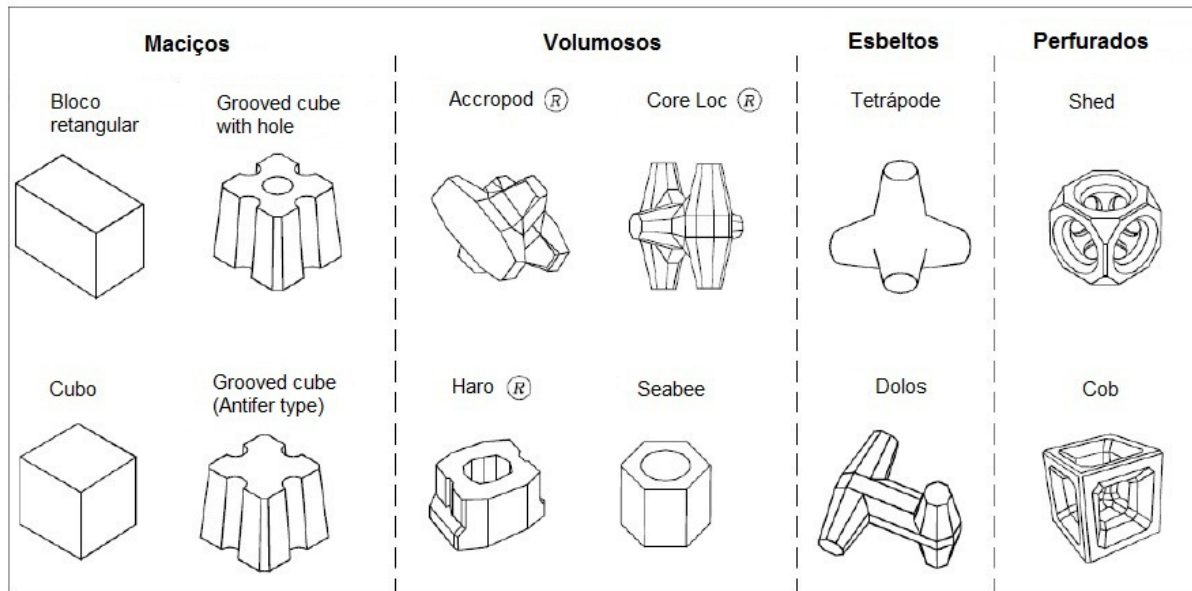


Figura 2.9: Exemplos de tipos de blocos existentes em estruturas marítimas.

## 2.2.2. Interação onda-estrutura (fenómenos físicos)

Quando uma onda atinge uma estrutura marítima podem ocorrer os seguintes fenómenos físicos: reflexão, transmissão e dissipação. A transmissão pode ocorrer através do manto, se este for poroso, e/ou por galgamento. A dissipação pode ocorrer através do meio poroso e/ou por rebentação no manto.

### 2.2.2.1. Reflexão

A reflexão é, na teoria linear de ondas, entendida como a soma de duas (ou mais) ondas, de igual período, que se propagam em sentidos opostos.

A reflexão tem um papel muito importante na acalmia no interior de portos e é determinante para garantir as suas condições de utilização, tendo também influência nas áreas costeiras envolventes.

Normalmente a reflexão é quantificada através do coeficiente de reflexão,  $C_r$ , dado por:

$$C_r = \frac{H_{refle}}{H_i} \quad (2.4)$$

onde  $H_i$  é a altura de onda incidente e  $H_{refle}$  é a altura de onda refletida.

Na Figura 2.10 é possível observar uma onda refletida pelo quebra-mar após a sua interação com o mesmo, através de uma sequência de imagens retiradas dos resultados do modelo numérico IH-2VOF. Para  $t=6.5$  s é visível a onda incidente a propagar-se na direção da estrutura. Para  $t=8.05$  s,

verifica-se que após a interação da onda com a estrutura é gerada uma onda refletida que se propaga em sentido oposto ao da incidente, encontrando-se aproximadamente no instante  $t=9.6$  s.

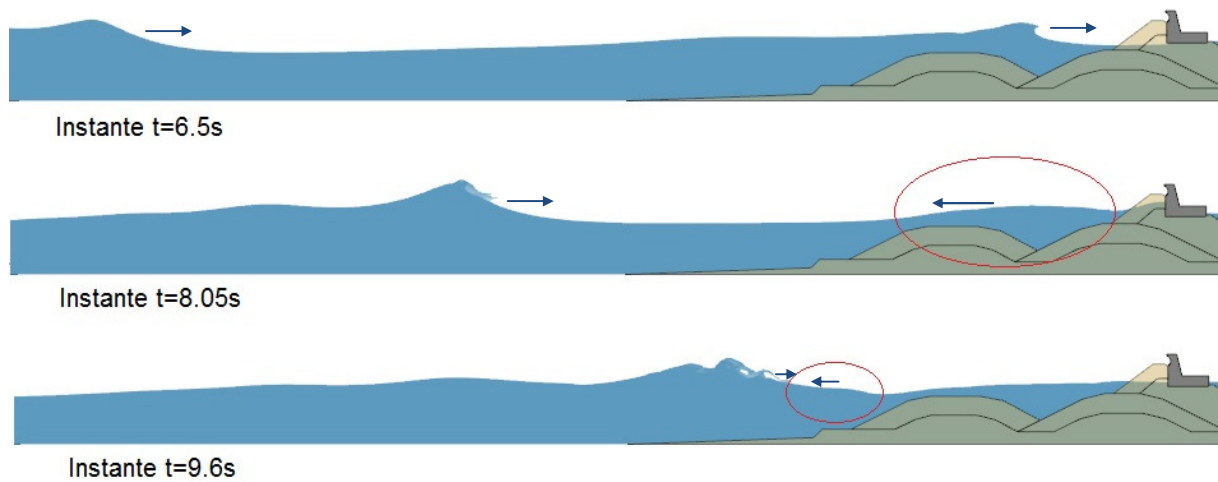


Figura 2.10: Sequência de imagens para observação do fenômeno de reflexão de ondas num quebra-mar.

O coeficiente de reflexão depende das características da estrutura, designadamente o ângulo do talude da estrutura com o plano horizontal,  $\theta$ , a rugosidade e a porosidade. O coeficiente de reflexão também depende das características da onda, tais como a sua altura, período e comprimento de onda.

O coeficiente de reflexão aumenta com o aumento do ângulo  $\theta$  e com a redução da rugosidade e da porosidade (PIANC, 2005, Lopes, 2013).

#### 2.2.2.2. Rebentação

A rebentação é um fenómeno que ocorre devido à redução da profundidade, em que a onda atinge uma declividade,  $H/L$ , limite a partir da qual instabiliza, ocorrendo rebentação.

Um parâmetro utilizado para caracterizar o tipo de rebentação das ondas é o número de Iribarren ( $\xi$ ) que pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\xi = \frac{\tan(\theta)}{\left(\frac{H}{L}\right)^{0.5}} \quad (2.5)$$

em que  $\theta$  é o ângulo que o fundo (ou a estrutura) faz com o plano horizontal e  $H$  e  $L$  são parâmetros de onda (ver secção 2.1.3).

Consoante o valor do número de Iribarren pode definir-se o tipo de rebentação das ondas, Figura 2.11 (USACE, 2006):

- **Rebentação Progressiva** (*Spilling*): caracterizada por uma rebentação de pequena intensidade que ocorre na crista da onda -  $\xi < 0.5$ ;
- **Rebentação Mergulhante** (*Plunging*): caracterizada por uma queda repentina da crista da onda -  $0.5 < \xi < 3.0$ ;
- **Rebentação Colapsante** (*Collapsing*): caracterizada por uma queda repentina da crista quando a onda atinge o talude acima do nível de repouso (NR) da água -  $3.0 < \xi < 3.5$ ;
- **Rebentação de fundo** (*Surging*): caracterizada por a crista não chegar a rebentar, apenas uma massa de água avança sobre o talude -  $\xi > 3.5$ .

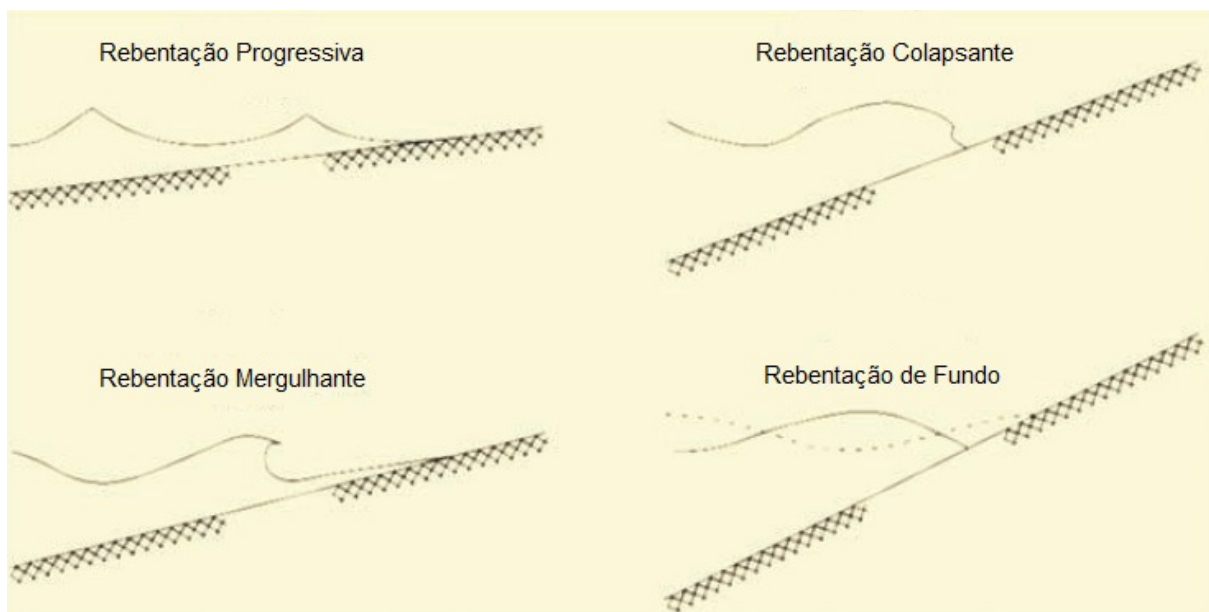


Figura 2.11: Tipos de rebentação de ondas (adaptada de Pullen *et al.*, 2007).

Um fenómeno muito importante que ocorre na propagação das ondas em fundo de profundidade variável é o **empolamento**. O empolamento ocorre devido à redução da profundidade, existindo um aumento na altura de onda ( $H$ ) e uma redução no comprimento de onda ( $L$ ), mantendo-se sempre constante o período de onda ( $T$ ).

### 2.2.2.3. Transmissão

A transmissão corresponde à energia que atinge a parte de sotamar da estrutura e pode ocorrer pela passagem de água sobre o coroamento da mesma (designado por galgamento) e/ou através da estrutura, pelo interior de camadas permeáveis. O galgamento, por ser o tema central desta dissertação, será tratado mais à frente, na secção 2.3.

A transmissão pode ser quantificada através de um coeficiente de transmissão ( $C_t$ ) dado pela seguinte equação:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (2.6)$$

onde  $H_t$  é a altura de onda transmitida e  $H_i$  é a altura de onda incidente.

Na Figura 2.12 é possível verificar uma ligeira subida do nível da água a sotamar da estrutura devida à transmissão de água pelo meio permeável e também por galgamento de uma parcela de água.

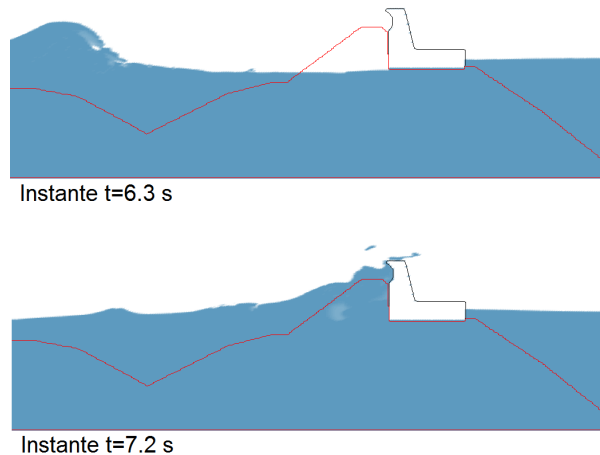


Figura 2.12: Sequência de imagens para observação do fenómeno de transmissão.

A transmissão pode variar significativamente com as características das ondas (já que estas fazem alterar a reflexão e a dissipação), com a profundidade e com a composição e configuração geométrica das estruturas marítimas (USACE, 2006).

#### 2.2.2.4. Dissipação

A dissipação da energia das ondas pode ocorrer de diversas maneiras, sendo as mais comuns as devidas à redução de profundidade, provocando a rebentação, e/ou pelo escoamento no interior da estrutura, quando esta é porosa. A dissipação leva a uma redução da energia, diminuindo assim a transmissão.

O fenómeno de rebentação já foi referido e explicado na secção 2.2.2.2, pelo que não será mencionado na presente secção.

A dissipação da energia pode ocorrer no interior das camadas porosas através de atrito entre o escoamento e os blocos que compõem as camadas porosas. O atrito provocado pelas camadas porosas aumenta com o aumento da rugosidade dos blocos e com a redução da permeabilidade da camada ou manto poroso.

## 2.3. Galgamento

O **galgamento** de uma estrutura ocorre quando, por ação da agitação marítima, a água transpõe o coroamento da estrutura. Está diretamente relacionado com o **espraiamento** (*run-up*), dado pela altura máxima atingida pela onda acima do nível de repouso da água (Figura 2.13). Assim, se o espraiamento for superior à cota de coroamento da estrutura existe galgamento. A altura mínima atingida pela onda abaixo do nível de repouso é designada por **refluxo** (*run-down*) (USACE, 2006).

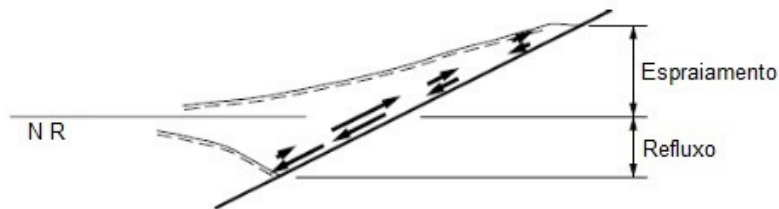


Figura 2.13: Espraiamento e refluxo (adaptado de USACE, 2006).

O espraiamento depende da altura da onda, do seu período e da interação da onda incidente com a onda refletida pela estrutura. Depende ainda das características da estrutura, tais como a inclinação, rugosidade, permeabilidade e porosidade (USACE, 2006). O galgamento depende das mesmas características que o espraiamento, mas, para além destas, depende de outras, tais como, a existência ou não de um muro cortina no coroamento, que pode reduzir significativamente o galgamento.

O galgamento tem especial importância neste estudo, pois é o parâmetro que se pretende minimizar utilizando diferentes geometrias de um quebra-mar submerso localizado a barlar da estrutura marítima sobre a qual ocorre galgamento. Para além disso, é também o parâmetro que define a cota de coroamento das estruturas de proteção marítima como os quebra-mares.

O galgamento é usualmente avaliado por um caudal médio que galga a estrutura por metro linear da mesma. A Figura 2.14 apresenta um exemplo de galgamento do molhe norte do Porto de Leixões, caso de estudo desta dissertação.



Figura 2.14: Galgamento do molhe norte do Porto de Leixões no dia 20 de fevereiro de 2014.

Existem diversas fórmulas empíricas, propostas por diversos autores, para calcular o galgamento consoante as características da estrutura marítima. A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos autores e da aplicabilidade de algumas delas.

Tabela 2.1: Resumo dos autores que produziram fórmulas empíricas de galgamento (adaptado de Brito, 2007).

Autor	Estrutura
Owen (1980) Owen (1982)	Estruturas de talude impermeável, liso ou rugoso, com berma, com ondas irregulares
Bradbury e Allsop (1988)	Estruturas de talude impermeável, com enrocamento, e muro cortina
Aminti e Franco (1988)	Estruturas de talude impermeável, com rocha, tetrápodos ou cubos e muro-cortina
Ahrens e Heimbaugh (1988)	7 tipos diferentes de estruturas de defesa marítima/revestimento
Pedersen e Burchartch (1992)	Estruturas de talude impermeável de enrocamento, com muro-cortina
Franco et al. (1994)	Estruturas de parede vertical, com ou sem perfuração frontal. $0,9 \leq \left( \frac{R_c}{H_s} \right) \leq 2,2$
Van der Meer e Janssen (1995)	Estruturas de taludes Impermeáveis, lisos, rugosos, contínuos e com berma
Pedersen (1996)	Estruturas de taludes permeáveis de enrocamento com muro cortina
Hedges e Reis (1998)	Taludes Impermeáveis, lisos, rugosos, contínuos e com berma
Hebsgaard et al. (1998)	Estruturas de enrocamento, com ou sem superestrutura e com camada de dolos ou pedra arredondada
Schuttrumpf et al. (2001)	Taludes lisos e impermeáveis 1:6 $(R_c = 0 \text{ e } R_c > R_{\max})$

Como se pode verificar, nenhuma destas formulações é aplicável ao caso de uma estrutura protegida por um quebra-mar submerso. Assim, não existe atualmente nenhuma fórmula que se

adeque ao caso de estudo desta dissertação, por ser um caso complexo que envolve duas estruturas simultaneamente.

Assim, as ferramentas de cálculo de galgamento existentes na atualidade que são aplicáveis a este caso de estudo reduzem-se apenas à modelação física e à modelação numérica.

A modelação numérica, por ser a ferramenta utilizada nesta dissertação, será descrita no capítulo 3.

Relativamente à modelação física, esta corresponde a reproduzir o caso de estudo a uma escala reduzida. Para tal é necessário aplicar leis de escala, de modo a transformar as ações reais em ações equivalentes a aplicar ao modelo e a extrapolar os resultados experimentais obtidos no modelo para a escala real, ou seja, o modelo e o protótipo devem comportar-se de forma tão semelhante quanto possível, pelo menos no que se refere aos principais fenómenos a reproduzir. Pretende-se que o modelo e o protótipo sejam dinamicamente semelhantes, ou seja, que haja semelhança de forças. Isto significa que partículas homólogas do modelo e do protótipo são atuadas por forças com a mesma direção e sentido e com módulos proporcionais. Note-se que como a propagação das ondas e, conseqüente, o galgamento, é um fenómeno que depende essencialmente da gravidade, há semelhança dinâmica quando se verifica a igualdade do valor do número de Froude no modelo e no protótipo, o que se designa por semelhança de Froude (HYDRALABIII, 2007). Contudo, ao assumir esta semelhança, existem forças que não são contempladas, tais como as forças viscosas ou a tensão superficial.

A semelhança de Froude descreve-se pela seguinte equação:

$$\lambda F_r = \frac{F_{r,modelo}}{F_{r,protótipo}} = 1 \quad (2.7)$$

em que  $\lambda$  é a escala,  $F_r$  o número de Froude e  $F_{r,modelo}$  e  $F_{r,protótipo}$  são o número de Froude do modelo e do protótipo, respetivamente. O número de Froude pode ser obtido pela seguinte equação:

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gl}} \quad (2.8)$$

em que  $u$  é a velocidade do escoamento,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $l$  é um comprimento característico.

Com base na semelhança de Froude é possível obter as escalas de diferentes parâmetros com base numa escala geométrica,  $N_l$ , isto é, na razão entre um comprimento no protótipo e no modelo. A Tabela 2.2 apresenta as escalas do tempo,  $N_t$ , e do caudal,  $N_q$ , resultantes da aplicação da semelhança de Froude.

Tabela 2.2: Relação de escalas com base na semelhança de Froude (adaptado de Kortenhaus *et al.*, 2005).

Parâmetro	Unidade	Escala
Comprimento	(m)	$N_l$
Tempo	(s)	$N_t = \sqrt{N_l}$
Caudal	(m <sup>3</sup> /s/m)	$N_q = N_l^{1.5}$

## 3. Modelo numérico

### 3.1. Considerações gerais

Neste capítulo serão apresentados, de forma resumida, os fundamentos do modelo numérico utilizado, IH-2VOF. Para além disso serão também explicadas as restrições e o funcionamento do programa que gera a malha de entrada com a geometria do caso a modelar, CORAL.

O modelo numérico IH-2VOF foi desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria com base no modelo original COBRAS (Cornell Breaking Waves and Structure) que, por sua vez, foi desenvolvido na Universidade de Cornell especificamente para tratar do fenómeno da rebentação e ter em conta as estruturas porosas (Lin e Liu, 1998).

O IH-2VOF é um modelo numérico bidimensional no plano longitudinal e vertical que resolve as equações RANS na vertical (Le Méhauté, 1976) utilizando o método de diferenças finitas.

A formulação matemática de base do modelo pode ser dividida em duas partes: a primeira referente ao movimento do fluido e a segunda referente ao movimento do fluido em meios porosos.

É importante referir que o modelo define automaticamente o passo de tempo que utiliza em cada iteração, variando ao longo da corrida consoante o número de Courant. O número de Courant (Courant *et al.*, 1967) é um parâmetro adimensional que relaciona o passo de tempo de cálculo com o tempo característico com que uma determinada parcela de fluido transita ao longo do volume de controlo.

### 3.2. Formulação matemática

#### 3.2.1. Equações governativas do escoamento

O modelo IH-2VOF baseia-se nas equações RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que advêm das equações clássicas de Navier-Stokes para um fluido contínuo, incompressível, homogéneo e viscoso (García, 2007) em que o campo de velocidades instantâneas,  $u_i$  e o campo de pressões,  $p$ , podem ser decompostos em duas parcelas, uma relativa às velocidades e pressões médias ( $\bar{u}_i$  e  $\bar{p}$ , respetivamente) e outra às flutuações turbulentas de velocidades e pressão ( $u_i'$  e  $p'$ , respetivamente):

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3.1)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (3.2)$$

em que  $i$  toma o valor de 1 e 2 para um escoamento bidimensional. Assim as equações RANS podem ser descritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

em que  $\rho$  é a densidade do fluido,  $g_i$  é a componente aceleração da gravidade,  $\bar{\tau}_{ij}$  é o tensor das tensões médias viscosas,  $t$  o tempo e  $x$  o comprimento/distância.

### 3.2.2. Equações governativas do escoamento em meios porosos

O modelo IH-2VOF assume que as equações RANS juntamente com um modelo de turbulência apropriado, neste caso o modelo  $k - \varepsilon$  (Rodi, 1980; Lin e Liu, 1998), podem descrever o escoamento num meio poroso. Dada a complexidade dos meios porosos não é viável a aplicação direta das equações de Reynolds aos escoamentos nesse meio. Assim, o modelo resolve as equações através da integração num volume de controlo no meio poroso, considerando o meio como um meio contínuo e com um volume maior que a dimensão dos poros, mas mais pequeno que o comprimento característico da escala do escoamento, ver Figura 3.1 e Hsu *et al.* (2002), reduzindo assim o tempo de cálculo. Por outras palavras, o escoamento no interior de meios porosos é obtido resolvendo as equações Volume-Averaged RANS (VARANS).

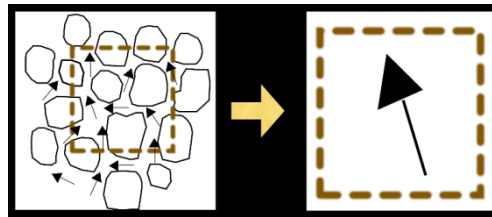


Figura 3.1: Média de volume realizada pelo VARANS através do RANS.

As equações VARANS são assim obtidas pela integração das equações RANS num determinado volume. A média volúmica de uma determinada variável em estudo “ $a$ ” pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a dV \quad (3.5)$$

em que “ $\langle \rangle$ ” significa a média volúmica intrínseca,  $V_f$  é o volume do fluido que ocupa o volume de integração  $V$  e  $\langle a \rangle$  é a magnitude média.

Como equação de fecho das equações VARANS no modelo IH-2VOF é utilizada a relação de Forchheimer, generalizada para escoamentos não estacionários ou variáveis (Hsu *et al.*, 2002).

A relação de Forchheimer generalizada pode ser expressa pela seguinte equação (Van Gent, 1995):

$$I = a u + b u |u| + c \frac{\partial u}{\partial t} + d u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.6)$$

onde  $I$  é o gradiente de pressão,  $u$  a velocidade aparente do escoamento no meio poroso e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes dimensionais que podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gD^2} \text{ (s/m)} \quad (3.7)$$

$$b = \beta \frac{1-n}{n^3} \frac{v}{gD^2} \text{ (s}^2\text{/m}^2\text{)} \quad (3.8)$$

$$c = \frac{1 + \gamma \frac{1-n}{n}}{ng} \text{ (s}^2\text{/m)} \quad (3.9)$$

$$d = \frac{1}{n^2 g} \text{ (m}^{-1}\text{/s}^{-2}\text{)} \quad (3.10)$$

onde  $n$ ,  $g$ ,  $v$  e  $D$  são a porosidade, a aceleração da gravidade, a viscosidade cinemática e uma dimensão característica do escoamento, respetivamente. Esta dimensão assume-se igual ao diâmetro característico do material que constitui o meio poroso,  $D_{50}$  (Hsu *et al.*, 2002). Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes adimensionais de atrito linear e não-linear, pois estão associados às parcelas linear e não linear da relação de Forchheimer, respetivamente. Estes coeficientes dependem das características do meio poroso, como a granulometria, forma e orientação das partículas, entre outras, e como tal, devem ser determinados empiricamente (Van Gent, 1995). No entanto, vários autores sugerem valores para estes coeficientes com base em trabalhos experimentais (Lara *et al.*, 2006).

O coeficiente de massa adicionada,  $\gamma$ , está associado à energia extra que é necessária para acelerar um determinado volume de água num meio poroso, sugerindo uma maior massa no mesmo volume. Van Gent (1994) recomenda a utilização do valor 0.34 para este coeficiente.

Uma descrição detalhada do modelo e das equações de Reynolds pode ser encontrada em Lara *et al.* (2006).

### 3.2.3. Condições iniciais e de fronteira

Como condições iniciais o modelo considera que as velocidades são nulas e as pressões iguais à pressão hidrostática.

Quanto às condições de fronteira, estas podem ser divididas em fronteiras sólidas e superfície livre.

O modelo considera dois tipos de condições nas fronteiras sólidas: uma sem deslizamento e a outra com deslizamento na direção paralela à superfície do sólido. No caso dos escoamentos turbulentos, o modelo permite ainda considerar um perfil logarítmico de velocidades.

A superfície livre no modelo IH-2VOF tem inicialmente pressão nula e tensão nula. Em relação ao campo de turbulência é considerado um valor inicial não nulo para  $k$  e  $\varepsilon$  (IH-2VOF, 2012).

As fronteiras laterais do domínio podem ser fechadas ou abertas. Quando fechada, comporta-se como uma fronteira sólida com as características atrás descritas; quando aberta, o seu comportamento é descrito de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + c_0 \frac{\partial a}{\partial x} = 0 \quad (3.11)$$

em que  $a$  representa a variável em estudo ( $\bar{u}$ ,  $\bar{p}$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$ , etc.) e  $c_0$  é a celeridade da onda na posição considerada, ou seja, impõe-se uma condição de deslizamento livre.

### 3.2.3.1. Geração de onda

O modelo IH-2VOF possui duas formas de gerar a onda no domínio: o batedor estático e o batedor dinâmico (Torres-Freyermuth *et al.*, 2010 e Lara *et al.*, 2011). Assim, no caso do batedor estático, definem-se, na zona de geração, a série temporal da superfície livre,  $\eta$ , e a série temporal das duas componentes, horizontal e vertical, da velocidade em cada um dos pontos da fronteira. O batedor dinâmico replica um batedor existente no laboratório, provocando uma ação dinâmica semelhante à dos batedores do tipo pistão.

No decorrer deste trabalho foi utilizado o método do batedor estático. Este método consiste em introduzir na fronteira do domínio de cálculo o campo de velocidades e a posição da superfície livre, gerando, assim, um sistema de ondas unidirecional. Deste modo, o domínio de cálculo do modelo pode ser equiparado a um canal de ensaios em modelo físico equipado com um batedor.

### 3.2.4. Método de captura da superfície livre: Volume Of Fluid - VOF

O modelo IH-2VOF utiliza um método de volume de fluido (VOF) apresentado por Hirt e Nichols (1981) para seguir a superfície livre. Este método consiste em identificar a posição da superfície livre através das variações de volume de água de cada célula. O modelo identifica os seguintes tipos de células: vazia (empty, E), de superfície (surface, S) ou interior (interior, I), Figura 3.2, consoante o valor da função do VOF definida por:

$$F = \frac{\rho_c}{\rho} \quad (3.12)$$

com:

$$\rho_c = \frac{\rho V_c}{V_c + V_a} \quad (3.13)$$

em que  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\rho_c$  é a massa específica da mistura da célula,  $V_c$  é o volume de fluido da célula e  $V_a$  o volume de ar no interior da célula.  $F$  toma os valores de 1, 0 ou um valor entre 0 e 1 respetivamente para células com escoamento, vazias ou de superfície.

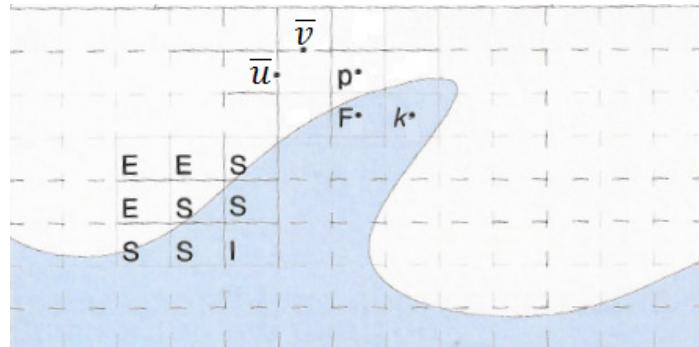


Figura 3.2: Definição do tipo de célula e esquema computacional IH-2VOF.

A introdução desta função nas equações da conservação da massa é feita da seguinte maneira:

$$\rho_c(x, y, t) = F(x, y, t) \rho \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} F) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} F) = 0 \quad (3.15)$$

em que  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  são as componentes da velocidade média segundo x e y respetivamente.

### 3.2.5. Esquema de discretização do domínio computacional

O domínio computacional do modelo IH-2VOF é discretizado por células retangulares e pode ser dividido em subzonas com diferentes discretizações, possibilitando o estudo mais detalhado em zonas específicas.

Os eixos definidos pelo modelo são o eixo x, na direção horizontal, da esquerda para a direita, e o eixo y, na direção vertical, de baixo para cima (ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Sistema de eixos.

As quantidades escalares (por exemplo  $p$ ,  $\varepsilon$ ,  $F$ ,  $k$ ) são definidas no centro da célula, enquanto as quantidades vetoriais (por exemplo  $\bar{u}$ ) são definidas nas faces das células. A componente horizontal ( $\bar{u}$ ) e vertical ( $\bar{v}$ ) da velocidade média é definida na face esquerda e superior de cada célula, respetivamente, como se pode ver na Figura 3.2.

### 3.3. Geração da malha e parâmetros de cada manto

A malha é gerada por um programa executado em paralelo com o modelo numérico, designado por CORAL. Através deste programa é definida a geometria do caso a estudar, a malha e as características dos meios porosos e dos obstáculos. Na Figura 3.4 apresenta-se um exemplo de janela do programa CORAL, onde se podem distinguir quatro zonas:

- Zona 1, referente à representação gráfica da geometria e da malha gerada;
- Zona 2, que permite alterar a visualização, através do *zoom* e outras opções de visualização;
- Zona 3, onde se define a dimensão do domínio numérico e as características da malha;
- Zona 4, onde se define a geometria, incluindo os meios porosos e os obstáculos, e ainda o nível da água em repouso.

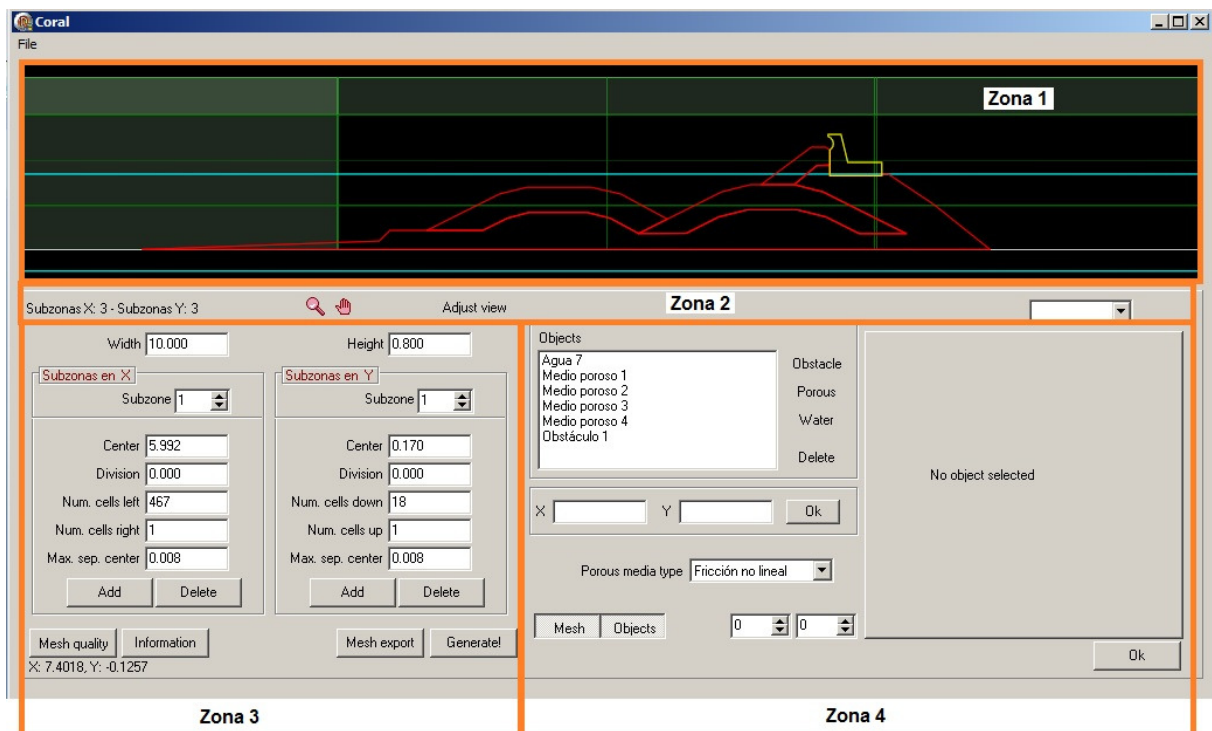


Figura 3.4: Exemplo de uma janela do programa CORAL.

Para a geração da malha, o primeiro passo é definir as dimensões do domínio, isto é, a sua largura e altura. Utilizando o programa CORAL, inserem-se na zona 3 (ver Figura 3.4) os valores nas caixas correspondentes, seleciona-se o botão “Generate!” e o domínio é definido.

Após a definição do domínio é necessário definir a geometria, recorrendo à zona 4 da interface do CORAL. Nesta zona é possível definir a geometria dos meios porosos, dos meios impermeáveis ou obstáculos e o nível da água em repouso através de polígonos unidos por pontos com as coordenadas desejadas.

Nos obstáculos e na superfície livre é apenas necessário definir a geometria, enquanto nos meios porosos é necessário definir, para além da geometria, cinco parâmetros:

- Porosidade ( $n$ ): definida pela razão entre o volume de poros e o volume total de uma amostra;
- Coeficiente de atrito linear ( $\alpha$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de atrito não linear ( $\beta$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de massa adicionada ( $\gamma$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Diâmetro nominal ( $D_{50}$ ): Diâmetro característico do material que constitui o meio.

O programa CORAL gera malhas ortogonais uniformes ou não uniformes, dependendo do desejado. É aconselhado utilizar malhas não uniformes quando se pretenda reduzir o número total de células e, ao mesmo tempo, manter a precisão desejada na zona de interesse do estudo. Ao utilizar uma malha não uniforme deve-se garantir todos os critérios referidos no manual IH-2VOF (2012), tais como:

- A variação de dimensão de duas células adjacentes deve ser inferior a 10% em ambas as direções;
- O rácio entre a dimensão de uma célula na direção  $x$  e na direção  $y$  deve ser superior a 1 e inferior a 5 ( $1 < Aspect Ratio < 5$ ).

Para evitar o fenómeno designado por falsa rebentação:

- Devem ser consideradas pelo menos 10 células na direção  $y$  por altura de onda a modelar. Para além disso, devem ser consideradas pelo menos 100 células na direção  $x$  por comprimento de onda considerado;
- A largura de uma célula ( $\Delta x$ ) não deve ser superior a 2.5 vezes a sua altura ( $\Delta y$ ) ( $Aspect Ratio < 2.5$ );
- As variações de dimensão da célula numa determinada direção devem ser inferiores a 5%. Tal pode ser garantido por:  $\Delta x_1 / \Delta x_2 < 0.05$  e  $\Delta y_1 / \Delta y_2 < 0.05$ .

Para verificar a qualidade da malha, o CORAL permite consultar a “Mesh quality”, clicando na respetiva caixa. Para tal, o CORAL apresenta dois gráficos, um para cada um dos eixos, representando a dimensão das células da malha e a sua variação ao longo do respetivo eixo. Se não for respeitada a última condição descrita anteriormente, isto é, se não se verificar:  $\Delta^2 x < 0.05$  e  $\Delta^2 y < 0.05$ , aparece nestes gráficos uma linha vermelha.

Na definição da malha é necessário um cuidado adicional com as células atribuídas a cada camada porosa: é sempre necessário verificar que todas as células interiores da estrutura fazem parte de alguma das camadas porosas. Caso contrário, o escoamento na célula não segue as equações do meio poroso e não é calculado corretamente. Para isso basta clicar na última caixa da zona 2 e seleccionar o “Noc” no caso dos obstáculos e o “Npc” no caso das camadas porosas. Relativamente ao nível médio da água, também se deve verificar que este coincide com um ponto da malha, podendo para tal consultar na mesma caixa o “VOF”.

### 3.4. Ficheiros de entrada

Para a execução do modelo IH-2VOF é necessário introduzir vários ficheiros de dados:

- Input: onde são definidos diferentes parâmetros de entrada;
- Malha1.dat e mesh.mes: que contêm toda a informação referente à malha e são gerados e exportados a partir do CORAL, já descrito no ponto anterior;
- eta\_ext.dat, v\_ext.dat, u\_ext.dat e info\_ext.dat: que contêm informação sobre a onda a gerar e são gerados pelo programa Gui\_Generación.

O “input” é o ficheiro de entrada que contém a informação geral referente à malha, obstáculos, meios porosos, condições iniciais e de fronteira. No Anexo B apresenta-se um exemplo do ficheiro “input”.

O ficheiro “input” está dividido em diferentes secções, das quais se destaca:

1. **Parâmetros numéricos:** São definidos parâmetros tais como o passo inicial de tempo, a duração da corrida, o passo de tempo com que se pretende gravar os ficheiros de resultados e o tipo de fronteira que se pretende.
2. **Parâmetros do fluido:** Inclui parâmetros como a densidade do fluido e a intensidade da força gravítica.
3. **Parâmetros da onda:** São definidos apenas alguns parâmetros da onda (sendo os restantes definidos através de outro ficheiro descrito mais à frente, o Gui-Genération), como a profundidade na zona de geração das ondas, se se considera absorção das ondas refletidas no batedor e o tipo de gerador de ondas.
4. **Ficheiros de saída (“output”):** Define-se a posição das sondas, os tipos de ficheiros que se pretende que o programa guarde e ainda o número total de células da malha utilizada.
5. **Modelo de turbulência:** Define-se se não se considera modelo de turbulência ou se se considera um modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  e os parâmetros referentes ao modelo.
6. **Reflexão nas fronteiras:** Define o tipo de reflexão em cada uma das fronteiras.
7. **Método de rastreio da superfície livre:** Define o método de rastreio da superfície livre.
8. **Parâmetros de controlo de reinício:** Permite, se necessário, recomeçar uma corrida no ponto de paragem.

A definição das características da onda incidente gerada pelo batedor no modelo IH-2VOF é obtida pelo programa Gui-Genération através da definição teórica das características de onda e do batedor.

Relativamente às ondas, é necessário definir primeiramente o tipo de onda (regular, irregular ou solitária). No caso de ser regular é necessário definir as seguintes características:

- Altura de onda,  $H$ ;
- Período de onda,  $T$ ;
- Profundidade na zona de geração,  $h$ ;
- Duração da série,  $t_{max}$ ;
- Frequência de amostragem,  $f_s$  (valor base de 30 Hz);
- Fase (valor base de  $3\pi/2$ );

Para os casos de agitação irregular ou solitária é necessário definir outros parâmetros que não serão abordados no âmbito desta dissertação. Este estudo centrou-se em casos de agitação regular, por permitir de forma mais fácil estudar a influência das características da agitação no galgamento, que é o objetivo do estudo.

Relativamente ao batedor é necessário definir primeiramente o tipo de batedor (estático ou dinâmico, ver secção 3.2.3.1). No caso de ser estático é ainda necessário definir as seguintes características:

- Profundidade na zona de geração,  $h$ ;
- O tempo inicial de suavização da agitação;
- A teoria de onda a utilizar (ver secção 2.1.4).

### 3.5. Cálculo do galgamento

No cálculo do caudal médio galgado recorre-se, primeiramente, a uma integração das velocidades entre dois pontos para obter o caudal instantâneo. De seguida, realiza-se uma integração do caudal instantâneo (resultante da primeira integração) entre o intervalo de tempo em que se pretende calcular o galgamento. Por fim, divide-se o resultado pelo intervalo de tempo considerado e obtém-se o caudal médio galgado.

Assim sendo, o caudal médio galgado pode ser obtido, através dos resultados do modelo IH-2VOF, recorrendo à seguinte equação (García, 2007):

$$Q = \frac{1}{\Delta t} \iint_{y_1}^{y_2} u(x, y, t) dy dt \quad (3.16)$$

em que  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em que se pretende calcular o galgamento e  $y_1$  e  $y_2$  são os limites inferior e superior da lâmina de água que galga a estrutura num dado instante de tempo, respetivamente, como mostra a Figura 3.5, e  $u$  a velocidade no ponto da malha considerado e nesse instante de tempo.

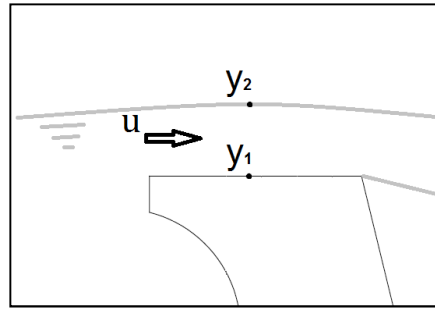


Figura 3.5: Cálculo do galgamento com base nos resultados do IH-2VOF.

Note-se que o programa IH-2VOF permite obter a informação do campo de velocidades nos pontos da malha e da posição da superfície livre em cada passo de tempo,  $t$ . Assim, o caudal médio galgado pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$Q = \frac{1}{\Delta t} \sum_{t=0}^{\Delta t} \left[ \int_{y_1}^{y_2} u(x, y, t) dy \right] dt \quad (3.17)$$

## 4. Caso de estudo

### 4.1. Considerações gerais

O caso de estudo desta dissertação, tal como foi referido na seção 1.2, é o molhe norte do Porto de Leixões, (Figura 4.1 e Figura 4.2) construído em meados do século XIX. O Porto de Leixões, localizado no litoral norte de Portugal, é, hoje em dia, o segundo maior porto artificial de Portugal, representando cerca de 25% do comércio internacional português com cerca de 17 186 222 toneladas de mercadorias movimentadas em 2013 ([www.apdl.pt](http://www.apdl.pt)).



Figura 4.1: Vista de norte do molhe norte do Porto de Leixões (11/03/2014).



Figura 4.2: Vista Sudeste do molhe norte do Porto de Leixões (20/02/2014).

O molhe tem sido alvo de diversos estudos na tentativa de resolver problemas derivados do elevado número de dias em que ocorre galgamento e da sua deficiente estabilidade, patente no elevado número de tetrápodes fabricados e substituídos (ver Anexo A).

O objetivo principal do presente estudo incide na análise do galgamento do molhe norte do Porto de Leixões, quando sujeito a condições de agitação caracterizadas por elevadas alturas de onda, casos não abordados em estudos anteriores (Gadelho *et al.*, 2011) e para diferentes geometrias de um quebra-mar submerso a situar a barlamar do mesmo. Na Figura 4.3 apresenta-se

um esquema do caso de estudo, em que à esquerda está representado o quebra-mar submerso e à direita o molhe norte do Porto de Leixões.

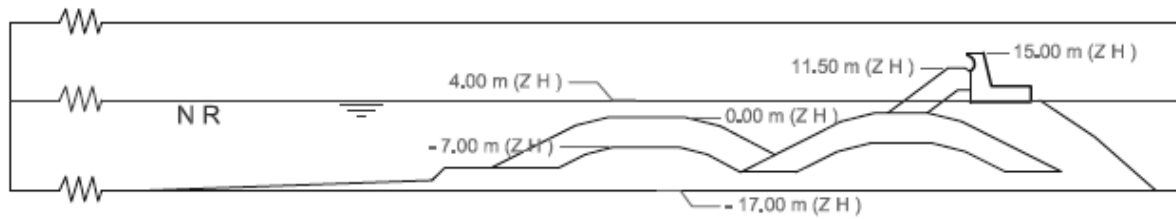


Figura 4.3: Esquema da geometria do caso de estudo à escala do protótipo.

Note-se que o molhe norte do Porto de Leixões possui um quebra-mar submerso apenas junto à cabeça e, neste estudo, pretende-se estender esse quebra-mar submerso para proteger também parte do tronco do molhe, de modo a reduzir o galgamento mantendo a estabilidade. É ainda importante referir que o molhe norte possui aproximadamente 1.7 km de extensão na sua totalidade.

Neste capítulo vão ser apresentadas de forma sucinta as condições de agitação marítima local e os estudos em modelo físico realizados anteriormente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e que foram utilizados para calibrar o modelo numérico aplicado nesta dissertação (Gadelho *et al.*, 2011).

## 4.2. Condições de agitação marítima local

O molhe norte do Porto de Leixões encontra-se numa zona de forte agitação marítima, com a ocorrência de elevadas alturas de onda ( $H$ ) e períodos ( $T$ ). Para caracterizar a agitação marítima é necessário dispor de um elevado número de anos de dados. Na proximidade do Porto de Leixões existe uma boia ondógrafo, à batimétrica de -83 m(ZH), que regista os valores da agitação desde 1993. Na Figura 4.4 e na Tabela 4.1, retiradas de Lopes (2013), está apresentada a direção da ondulação predominante e o número de registos para diferentes gamas de períodos ( $T$ ) e alturas de onda ( $H$ ), respetivamente, obtidos com base nos dados medidos entre 1993 e 2003.

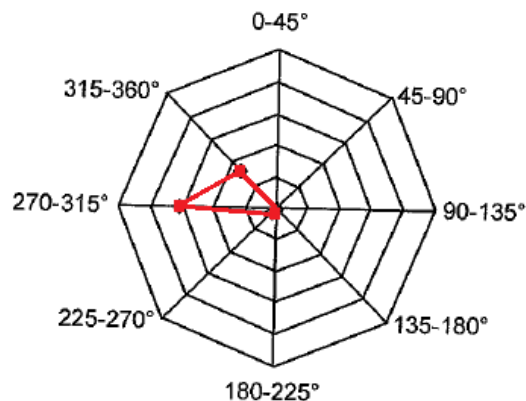


Figura 4.4: Direções predominantes da ondulação marítima (valores da boia de Leixões entre os anos de 1993 e 2003) (adaptado de Lopes, 2013).

Como podemos concluir da Figura 4.4, as direções predominantes da ondulação estão compreendidas entre oeste e noroeste. Da análise da Tabela 4.1 podemos verificar que existem 214

ocorrências de ondas com alturas maiores que 5 m e com períodos entre os 15 s e os 20 s, o que correspondente a 1.1% dos dias do ano. Esta é a gama de valores de  $T$  e de  $H$  que foram simuladas no presente estudo, podendo constatar-se que ocorrem, em média, 4 dias por ano, sendo, por isto, relevante para o estudo do galgamento do molhe norte do Porto de Leixões.

Tabela 4.1: Número de registos para diferentes gamas de períodos ( $T$ ) e de alturas de onda ( $H$ ) (adaptado de Lopes, 2013).

Data 1993-2003			
Período de onda (s)	Altura de onda (m)	Nº Registos	% Total
4 a 6	$H < 2.5$	857	4.6%
	$2.5 < H < 5$	0	0.0%
	$H > 5$	0	0.0%
6 a 7	$H < 2.5$	1959	10.4%
	$2.5 < H < 5$	0	0.0%
	$H > 5$	0	0.0%
7 a 8	$H < 2.5$	2422	12.9%
	$2.5 < H < 5$	128	0.7%
	$H > 5$	0	0.0%
8 a 10	$H < 2.5$	4649	24.7%
	$2.5 < H < 5$	908	4.8%
	$H > 5$	3	0.0%
10 a 12.5	$H < 2.5$	3044	16.2%
	$2.5 < H < 5$	2169	11.5%
	$H > 5$	290	1.5%
12.5 a 15	$H < 2.5$	273	1.5%
	$2.5 < H < 5$	1072	5.7%
	$H > 5$	710	3.8%
15 a 20	$H < 2.5$	16	0.1%
	$2.5 < H < 5$	93	0.5%
	$H > 5$	214	1.1%
Total		18815	

Analisando as condições de agitação dos ensaios em modelo físico realizados na FEUP (Lopes, 2013), verifica-se que os períodos de onda variaram entre 13 s e 24 s e as alturas de onda entre 4 m e 10 m. Nestes ensaios não foram consideradas as mesmas condições de agitação para as diferentes geometrias (ver secção 4.3), tornando difícil a comparação do galgamento.

Nos estudos em modelo numérico realizados anteriormente para este caso (Neves *et al.*, 2013), foram utilizadas três condições diferentes de agitação para todas as geometrias simuladas. As condições de agitação tinham um período compreendido entre 15 s e 20 s e uma altura de onda superior a 5 m, o que corresponde à mesma gama de valores utilizada nesta dissertação, que por sua vez corresponde a 1.1% dos dias do ano. Dos resultados apresentados verificou-se que, para a altura de onda simulada, igual a 7 m, não existia galgamento para o menor período de onda simulado, de 16

s, o que sugeria que se deveriam considerar valores superiores de altura de onda para obter galgamento não nulo.

Assim, neste estudo adotaram-se condições de agitação complementares às apresentadas em Neves *et al.* (2013), correspondentes ao maior período de onda simulado, mas com alturas de onda superiores às simuladas anteriormente.

### 4.3. Configurações geométricas do quebra-mar submerso

Para aprofundar o conhecimento acerca do comportamento hidrodinâmico na vizinhança do quebra-mar submerso e melhorar e otimizar o seu dimensionamento, realizaram-se ensaios bidimensionais na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Esses ensaios vêm sendo complementados com a aplicação de modelos numéricos e é nesse âmbito que se enquadra a presente dissertação.

Os ensaios em modelo físico decorreram num canal construído no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. Destes ensaios resultaram os dados que serviram, numa fase inicial, para calibrar o modelo numérico IH-2VOF. Ensaíram-se diferentes configurações do quebra-mar submerso e diferentes condições de agitação incidente à escala geométrica 1/60.

As geometrias estudadas nos ensaios em modelo físico foram:

- **Configuração 1:** Corresponde à configuração original do molhe norte do Porto de Leixões, com cota de coroamento a +0.00 m(ZH), Figura 4.5. Note-se que a configuração apresentada na Figura 4.5 corresponde à Figura 4.3 na escala do modelo;
- **Configuração 2:** Corresponde à subida da cota de coroamento do quebra-mar submerso para +2.00 m(ZH), Figura 4.6;
- **Configuração 3:** Corresponde ao aumento de 50% da distância entre quebra-mares em relação à configuração original, Figura 4.7;
- **Configuração 4:** Corresponde ao aumento de 50% da largura do quebra-mar submerso em relação à configuração original, Figura 4.8.

No presente estudo foram consideradas estas 4 configurações ensaiadas na FEUP e ainda mais três configurações:

- **Configuração 5:** Corresponde a uma redução de 25% da distância entre quebra-mares em relação à configuração original, Figura 4.9;
- **Configuração 6:** Corresponde ao aumento de 50% da distância entre quebra-mares e a um aumento da cota de coroamento do quebra-mar submerso para +2.00 m(ZH), ambos em relação à configuração original, Figura 4.10;
- **Configuração 7:** Corresponde ao aumento de 50% da distância entre quebra-mares e a um aumento de 50% da largura do quebra-mar submerso, ambos em relação à configuração original, Figura 4.11.

As dimensões indicadas nas figuras que se seguem são referentes ao sistema de eixos apresentado na Figura 3.3, em metros, apresentando-se, a vermelho, as variações de geometria face à configuração 1, que está representada com a cor preta.

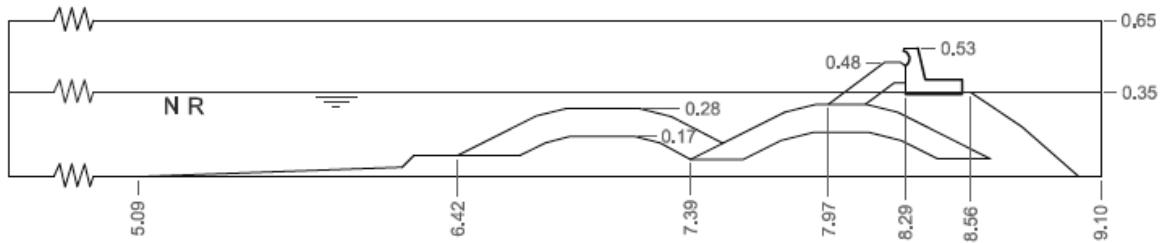


Figura 4.5: **Configuração 1** (escala 1/60).

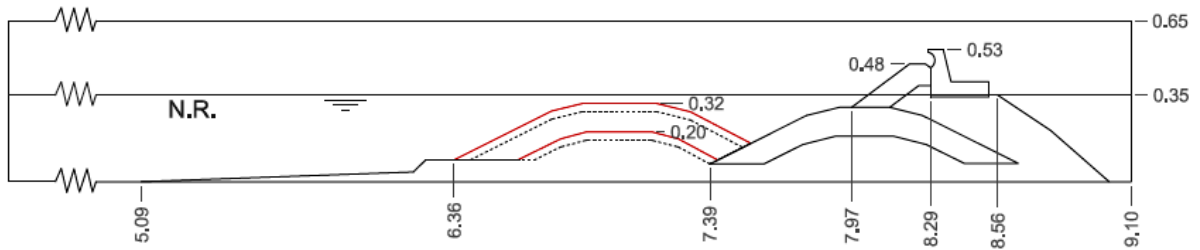


Figura 4.6: **Configuração 2** (escala 1/60).

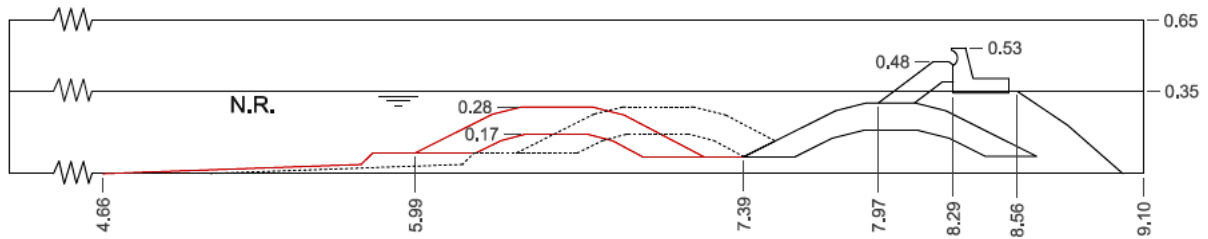


Figura 4.7: **Configuração 3** (escala 1/60).

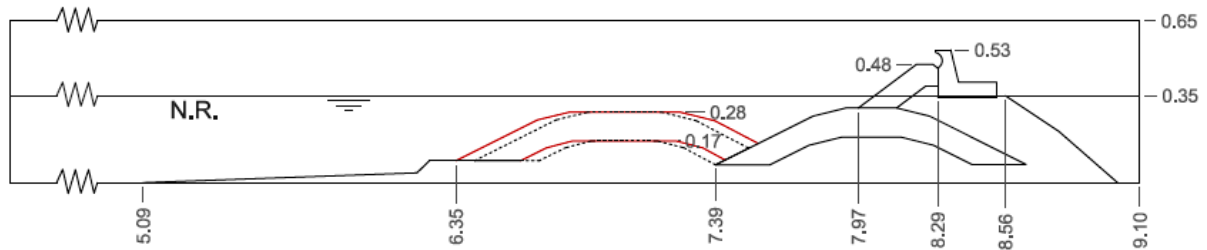


Figura 4.8: **Configuração 4** (escala 1/60).

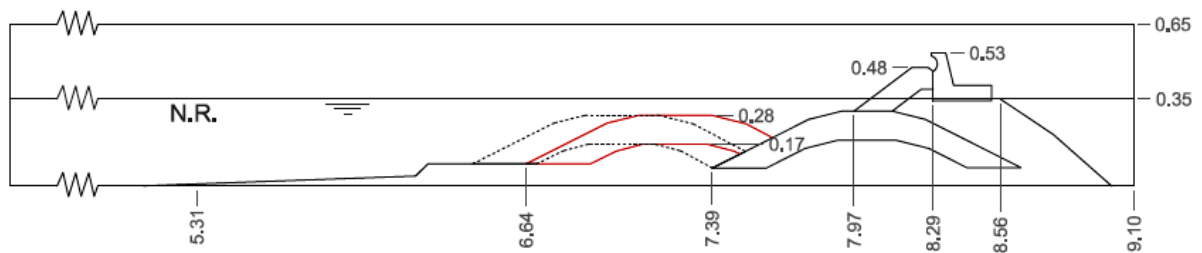


Figura 4.9: **Configuração 5** (escala 1/60).

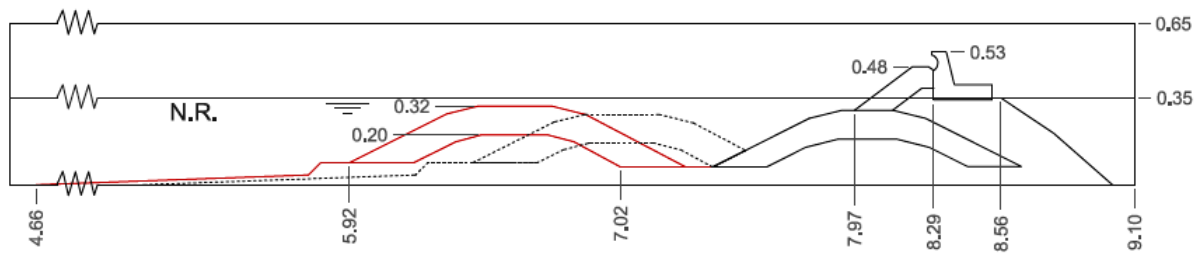


Figura 4.10: **Configuração 6** (escala 1/60).

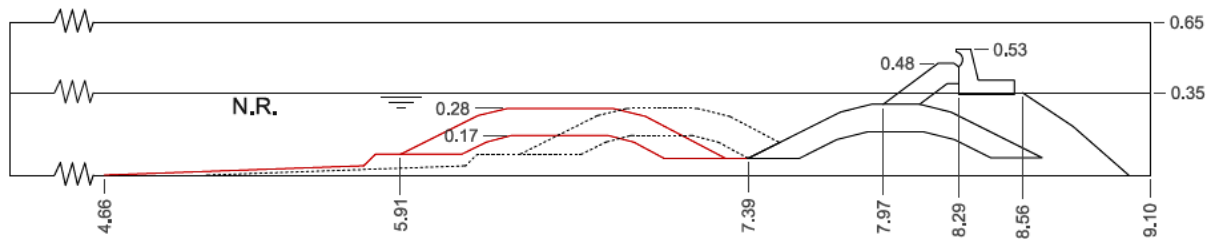


Figura 4.11: **Configuração 7** (escala 1/60).

Os ensaios realizados na FEUP centraram-se essencialmente na análise da estabilidade do quebra-mar e na medição de velocidades do escoamento. No entanto, foram realizados alguns ensaios com medição de galgamento. A campanha de ensaios de galgamento considerou essencialmente um nível de maré +4.0 m(ZH), ondulação regular e irregular (espectro JONSWAP) e três períodos,  $T$ , diferentes, de 16 s, 20 s e 24 s (em que  $T$  representa o período das ondas regulares ou o período de pico do espectro JONSWAP). O espectro JONSWAP é um espectro empírico, desenvolvido tendo como base o estudo de dados de registos de onda obtidos no mar do Norte, e representa estados de mar de *fetch* e duração limitados, sendo muito utilizado em estudos em modelo físico. As alturas de onda regulares variaram de 6.0 m a 12.0 m, enquanto as alturas de onda significativas variaram entre 4.0 m e 7.0 m (todos estes valores se referem às dimensões em protótipo).

Para as condições de agitação e para as configurações ensaiadas, a configuração 3 foi a que levou a menores valores de caudal médio galgado (Neves *et al.*, 2013), inferior a 0.3 l/s/m (valores de protótipo). No entanto, como foi referido anteriormente, as condições de agitação variaram entre configurações, não sendo possível tirar conclusões definitivas da comparação efetuada.

## 5. Apresentação e análise de resultados

### 5.1. Considerações gerais

Neste capítulo, após uma análise sucinta da influência da variação das condições de agitação e da porosidade do manto de tetrápodes no caudal médio galgado, serão apresentados as condições de agitação simuladas nesta dissertação e os resultados obtidos das simulações com o modelo numérico para as sete configurações do quebra-mar submerso. Proceder-se-á a uma discussão posterior dos mesmos. Todos os cálculos são efetuados à escala 1/60, ou seja, à escala do modelo físico da FEUP, a não ser que seja referido o contrário.

### 5.2. Análise de sensibilidade

No âmbito desta dissertação, e para a configuração 1 do quebra-mar submerso do Porto de Leixões (Figura 4.5), estudou-se a variação do caudal médio galgado com a variação da altura de onda, do período de onda, da porosidade do manto de tetrápodes (CP4) e ainda do refinamento da malha. O objetivo desta análise de sensibilidade é estudar a influência de algumas características da agitação e da geometria da estrutura no valor do caudal médio galgado no caso do quebra-mar norte do Porto de Leixões, que possui um quebra-mar submerso a barlar, que altera a agitação que atinge a estrutura e, conseqüentemente, altera o galgamento.

Para tal efetuaram-se cálculos com a profundidade junto ao gerador,  $h$ , de 0.35 m, correspondente no protótipo ao nível de maré de +4.00 m(ZH). Para esse estudo de sensibilidade foram simuladas ondas regulares. Os parâmetros característicos dos mantos utilizados nesta análise de sensibilidade são os que se apresentam na secção 5.3.3.

Para escolher as condições de agitação a simular, iniciou-se por estudar a influência das condições de agitação incidente,  $H$  e  $T$ , no galgamento.

Para estudar a influência da variação da altura de onda na fronteira de entrada do modelo,  $H$ , no caudal médio galgado,  $Q$ , efetuou-se um cálculo de 30 s de simulação com uma agitação incidente com um período,  $T=3.10$  s, correspondente a 24 s no protótipo, e cinco valores de altura de onda,  $H=0.125$  m, 0.142 m, 0.155 m, 0.160 m e 0.167 m, correspondentes no protótipo a 7.5 m, 8.5 m, 9.3 m, 9.6 m e 10.0 m, respetivamente. Os resultados são os que se apresentam na Figura 5.1.

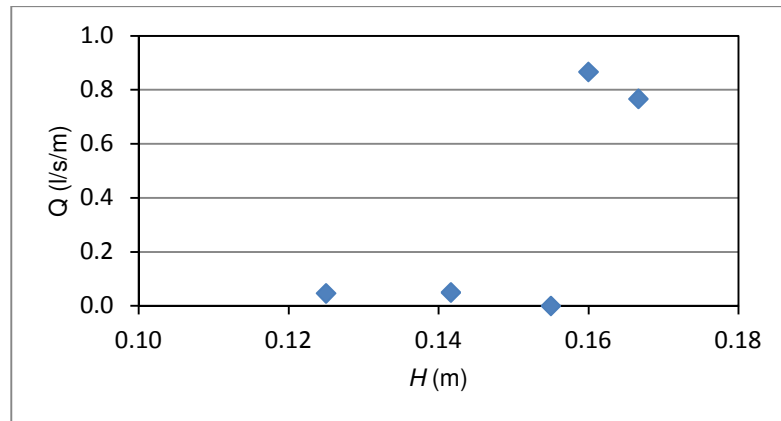


Figura 5.1: Relação entre o caudal médio galgado e a altura de onda do modelo para  $T=3.10$  s e profundidade,  $h$ , junto ao gerador, de 0.35 m.

Observando a figura anterior, podemos verificar que, de uma maneira geral, o resultado não foi como esperado no caso de um quebra-mar de talude, já que com o aumento da altura de onda esperar-se-ia que o caudal que galga a estrutura também aumentasse, verificando-se um aumento brusco de caudal,  $Q$ , entre a onda de altura  $H=0.155$  m e  $H=0.160$  m. Estas diferenças nos valores de  $Q$  podem estar relacionadas com alterações da reflexão, e da dissipação por rebentação da onda incidente quando atinge a estrutura após sofrer alterações ao propagar-se sobre o quebra-mar submerso. Quando a altura de onda passou de 0.142 m para 0.155 m verificou-se uma descida no caudal médio galgado. Este resultado ocorreu devido à onda refletida pela estrutura, que provocou uma redução da altura da onda total junto ao molhe norte e consequente redução do galgamento.

Voltou a verificar-se uma descida no caudal médio galgado com o aumento da altura de onda de 0.160 m para 0.167 m. Neste caso, ocorreu rebentação antes de a onda atingir a estrutura, resultando numa dissipação de energia que levou à redução do caudal que galgou a estrutura.

Para estudar a influência da variação do período de onda,  $T$ , no caudal médio galgado,  $Q$ , efetuou-se um cálculo de 30 s de simulação com uma agitação na fronteira de entrada do modelo com uma altura de onda,  $H=0.142$  m, 7.5 m no protótipo, e três períodos,  $T=2.06$  s, 2.58 s e 3.10 s, correspondente a 16 s, 20 s e 24 s no protótipo. Os resultados são os que se apresentam na Figura 5.2.

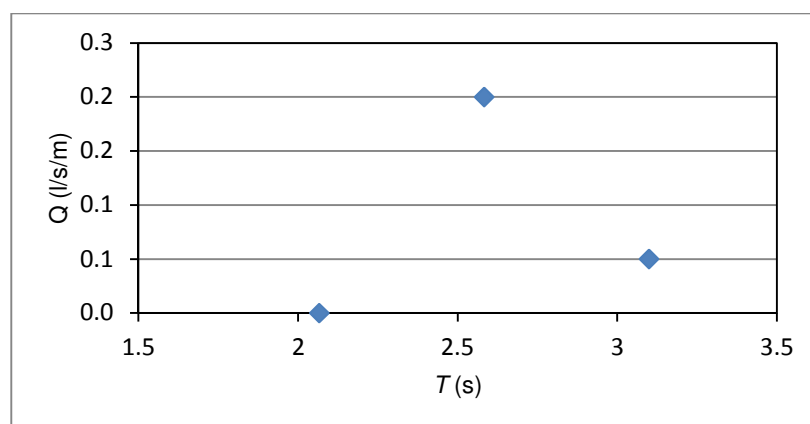


Figura 5.2: Relação entre o caudal médio galgado e o período de onda para  $H=0.142$  m e profundidade,  $h$ , junto ao gerador de 0.35 m.

Observando a figura anterior podemos verificar que também não ocorreu um aumento do caudal que galga a estrutura com o aumento do período da onda, como seria de esperar no caso de um quebra-mar de talude. Mas não se verifica este aumento, mais uma vez, devido à interação da onda com os dois quebra-mares, em particular do fenómeno de reflexão e dissipação da onda incidente na estrutura para as condições definidas.

Para estudar a influência da variação da porosidade,  $n$ , do manto de tetrápodes no caudal médio galgado,  $Q$ , efetuou-se um cálculo de 30 s de simulação com uma agitação com  $H=0.167$  m e  $T=3.10$  s, para três valores de  $n$  de 40, 50 e 60%. Os resultados são os que se apresentam na Figura 5.3. Este estudo foi efetuado para o manto de tetrápodes, já que será a sua porosidade que, em princípio, afetará mais diretamente o galgamento neste molhe.

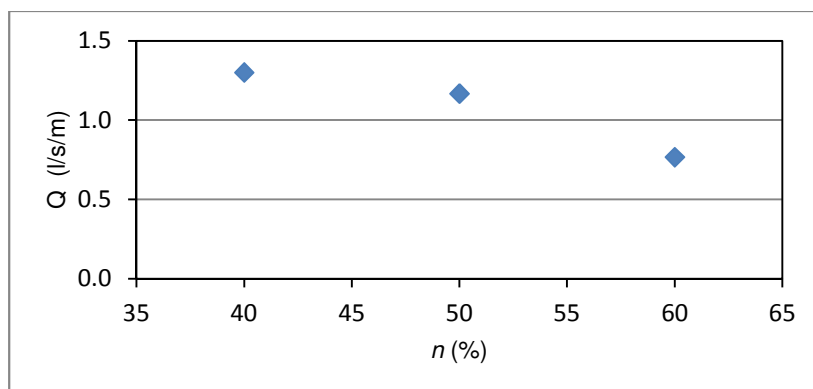


Figura 5.3: Relação entre o caudal médio galgado e a porosidade do manto de tetrápodes para  $H=0.167$  m,  $T=3.10$  s e  $h=0.35$  m.

Na figura anterior é possível verificar que, com o aumento da porosidade do manto de tetrápodes, para as condições definidas, existe uma descida do caudal que galga a estrutura, tal como seria de esperar.

Relativamente ao estudo da influência do refinamento da malha no valor de caudal médio que galga a estrutura marítima,  $Q$ , foi considerada uma simulação, com uma duração de 100 s, e uma ondulação regular com uma altura de onda,  $H=0.174$  m e um período,  $T=2.635$  s. Utilizaram-se duas malhas com o número de células nas direções  $x$  e  $y$ , respetivamente, de  $660 \times 70$  e  $1320 \times 141$ . Os resultados são apresentados na Figura 5.4.

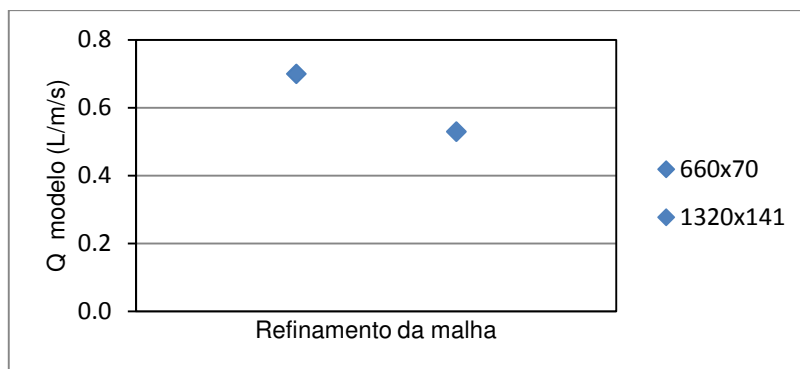


Figura 5.4: Relação entre o caudal médio galgado e o refinamento da malha no modelo para  $H=0.174$  m e  $T=2.635$  s, para malhas de 660x70 e de 1320x141 células nas direções x e y.

Na Figura 5.4 é visível a influência do refinamento da malha nos valores de caudal que galgam a estrutura, obtendo-se cerca de 20% de diferença no resultado do galgamento com um acréscimo do número de células de aproximadamente 4 vezes. Para o refinamento de malha superior (1320x141), obteve-se um valor de galgamento inferior, o que significa que, com uma malha menos refinada, em princípio, se estaria do lado da segurança. Note-se que a corrida demorou cerca de 17 horas na malha 660x70 e cerca de 72 horas na malha 1320x141, pelo que se torna inviável, em termos de tempo (para as máquinas informáticas disponíveis para a realização desta dissertação) proceder a um refinamento da malha muito superior a 1320x141.

### 5.3. Condições das simulações

#### 5.3.1. Condições de agitação

Para analisar a influência das diferentes geometrias no fenómeno do galgamento foram consideradas três condições de agitação regular para cada uma das sete configurações do quebramar submerso apresentadas (ver seção 4.3). Essas condições diferem somente na altura de onda, mantendo-se os restantes parâmetros semelhantes. Assim, simularam-se ondas com:

- Alturas de onda,  $H$ , de 0.133 m, 0.150 m e 0.167 m;
- Período de onda,  $T$ , de 2.58 s;
- Profundidade junto ao batedor,  $h$ , de 0.35 m.

À escala real, as condições de agitação marítima correspondem a:

- Alturas de onda,  $H$ , de 8 m, 9 m e 10 m;
- Período de onda,  $T$ , de 20 s;
- Profundidade,  $h$ , de 21 m.

Para a geração da agitação foi considerado um batedor estático, com um início suavizado de 5 s e recorreu-se à teoria linear. Geraram-se ondas para uma duração de simulação,  $t_{max} = 150$  s.

### 5.3.2. Domínio de cálculo e malhas

O domínio de cálculo para as simulações efetuadas com o modelo IH-2VOF é retangular, com 0.65 m de altura e 9.1 m de comprimento e inclui uma zona de pelo menos 4.66 m entre o início do domínio e o início da estrutura.

Este domínio foi descrito através de uma malha de diferenças finitas com uma zona em x e três zonas em y (indicadas na Figura 5.5). Foram consideradas três zonas segundo y, de forma a reduzir o número de células nas zonas em que não era necessário uma precisão tão elevada, e apenas uma zona, com o número mínimo de células, na direcção x, respeitando todas as regras de geração de malha referidas na secção 3.3.

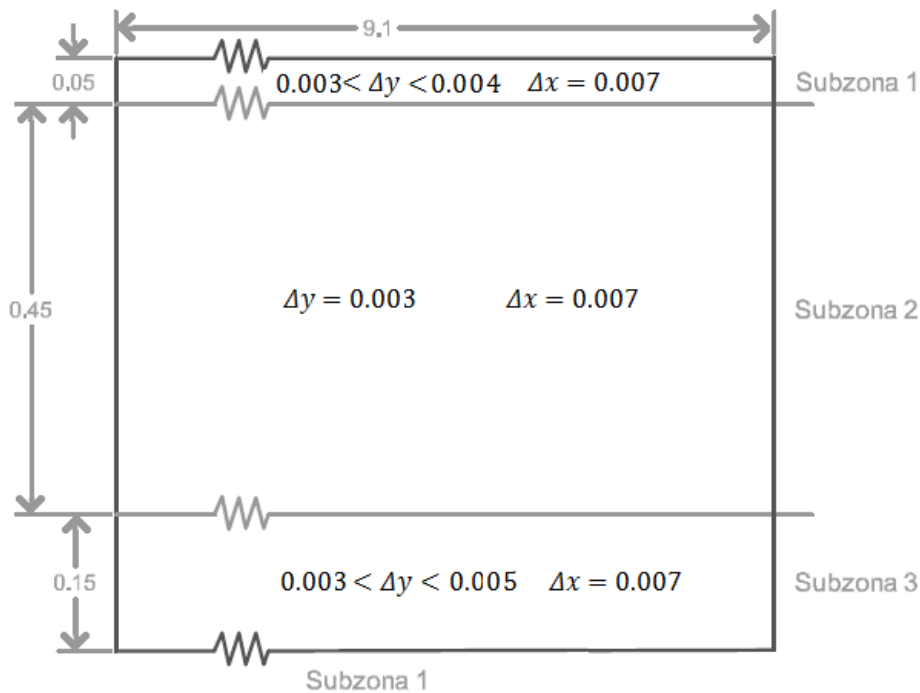


Figura 5.5: Domínio e discretização da malha.

A malha utilizada no caso em estudo possui, ao longo de todo o domínio, um total de 1301x201 células nas direcções x e y, respetivamente, resultando num total de 261501 células.

As dimensões das células segundo x e y ( $\Delta x$  e  $\Delta y$ , respetivamente) verificam as condições apresentadas na secção 3.3. Na Figura 5.6 apresenta-se um exemplo da discretização da malha na zona do muro cortina.

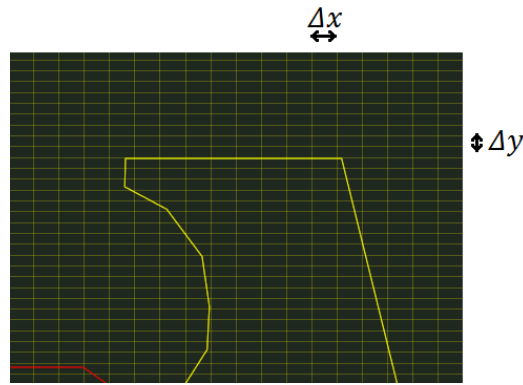


Figura 5.6: Refinamento da malha utilizada no muro cortina do molhe norte.

Na Tabela 5.1 e na Figura 5.7 apresenta-se a malha e as verificações necessárias referidas na secção 3.3 para o caso de uma onda com  $H=0.133$  m,  $T=2.58$  s e  $L=4.61$  m para  $h=0.35$  m.

Tabela 5.1: Malha das simulações e verificação das condições requeridas pelo modelo (secção 3.3).

Direção	X	Y		
Subzona	1	1	2	3
Comprimento da subzona (m)	9.1	0.051	0.450	0.149
Dimensão da célula maior na direção considerada	0.007	0.004	0.003	0.005
Nº células mínimo/ unidade de comprimento	142	250	333	200
Nº células mínimo por comprimento ou altura de onda respetivamente	655	33	44	26
<i>Aspect Ratio</i> mínimo ( $\Delta x/\Delta y_{\text{máx}}$ )	1.40			
<i>Aspect Ratio</i> máximo ( $\Delta x/\Delta y_{\text{mín}}$ )	2.33			

Através do número mínimo de células por unidade de comprimento (ver Tabela 5.1) é possível calcular o número mínimo de células por comprimento de onda no caso da direção x e por altura de onda no caso da direção y. Estes valores são muito importantes para a eficácia da malha ser elevada: no caso da direção x interessa saber quantas células existem para descrever a onda utilizada e por isso deve ser comparada com o comprimento de onda; um raciocínio semelhante pode ser feito na direção y. O *Aspect Ratio* também é um parâmetro importante, para evitar que a malha se torne demasiadamente retangular, resultando em erros como o fenómeno de falsa rebentação referido na secção 3.3.

A Figura 5.7 apresenta as dimensões da malha em x e em y e foi diretamente retirada do programa CORAL. Estas dimensões são necessárias para avaliar as condições da secção 3.3. Nesta figura está apresentado, a preto, a dimensão de cada célula na respetiva direção x e y e a verde a derivada desse valor, que corresponde à variação da dimensão da célula ao longo do domínio,  $d\Delta x$  e  $d\Delta y$ . Note-se que a linha a preto ficaria vermelha caso a variação da dimensão das células x e y fosse demasiado brusca. No eixo das abcissas destes gráficos encontra-se ainda representada a coordenada segundo x e y, e, em parênteses, o número da célula correspondente.

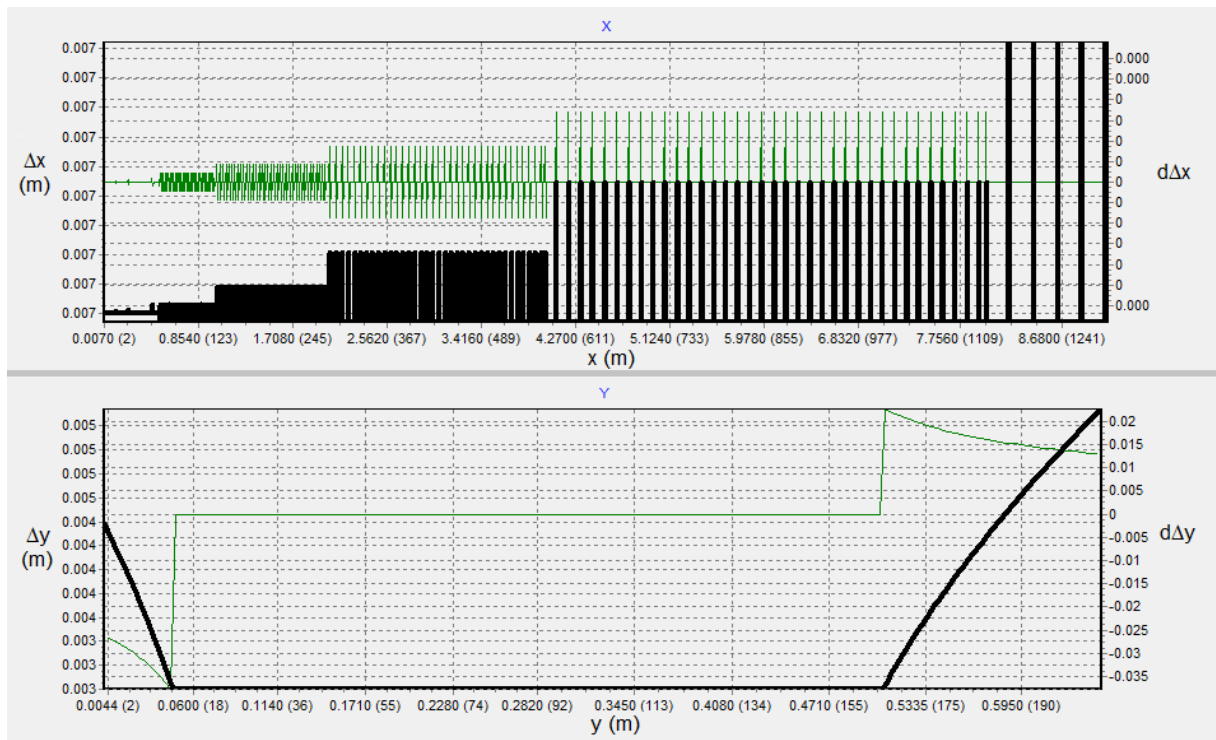


Figura 5.7: Qualidade da malha.

### 5.3.3. Características dos mantos

Como referido na secção 3.3, existem diversos parâmetros utilizados no modelo para caracterizar os mantos porosos da estrutura e que devem ser definidos diretamente no gerador de malha CORAL.

Relativamente aos coeficientes empíricos  $\alpha$  e  $\beta$ , existem diversos valores sugeridos na literatura, tal como se pode ver na Tabela 2.1.

Tabela 5.2: Valores recomendados para  $\alpha$  e  $\beta$  (adaptado de García, 2007).

Autor	Tipo de ensaios	$\alpha$	$\beta$
Engelund (1953) (análise experimental)	Escoamento turbulento e laminar através de areias de diferentes morfologias. $D_{50} < 0.001\text{m}$	780-1500	1.8-3.6
Vidal <i>et al.</i> (1988) (análise experimental)	Transmissão de onda solitária através de um quebra-mar vertical poroso.	1100	0.81
Van Gent (1995) (análise experimental)	Escoamento estacionário e oscilatório através de material granular de diferentes morfologias. $0.0202\text{m} < D_{50} < 0.061\text{m}$	1000	1.1
Burcharth e Andersen (1995) (análise experimental)	Escoamento estacionário e oscilatório, turbulento e não turbulento através de material granular de diferentes morfologias.	250-10000	0.5-1.1
Liu <i>et al.</i> (2000) (modelo RANS)	Escoamento estacionário através de um quebra-mar poroso.	200	1.1
Lynett <i>et al.</i> (2000) (modelo Boussinesq)	Interação de ondas com reduzida dispersão e reduzida não linearidade com diferentes tipologias de quebra-mares porosos.	1100-1800	0.55-1.1
Lara (2002) (modelo RANS)	Rotura sobre o leito poroso. $0.019\text{m} < D_{50} < 0.039\text{m}$	200	0.2
Requejo <i>et al.</i> (2002) (modelo potencial)	Escoamentos estacionários e oscilatórios através de quebra-mares verticais porosos.	100	1.1
Hsu <i>et al.</i> (2002) (modelo RANS)	Interação de ondas regulares num quebra-mar de talude.	200	1.1
García (2005) (modelo RANS)	Interação de ondas regulares e irregulares em quebra-mares destacados porosos.	1000	0.8-1.2

Estes valores são um bom ponto de partida na realização de uma calibração do modelo.

Para além destes parâmetros devem ainda ser definidos os valores de mais três parâmetros, referidos na secção 3.3:  $n$ ,  $\gamma$  e  $D_{50}$ . Assim sendo, no total, é necessário atribuir valores a cinco parâmetros para cada manto da estrutura em estudo. Para a determinação desses valores é preciso efetuar uma calibração do modelo. No caso de estudo desta dissertação, a calibração foi realizada anteriormente (Gadelho *et al.*, 2011), com base na comparação dos resultados do modelo com os resultados dos ensaios em modelo físico efetuados na FEUP. Os valores resultantes da calibração são os apresentados na Tabela 5.3, utilizando a designação dos mantos apresentada na Figura 5.8.

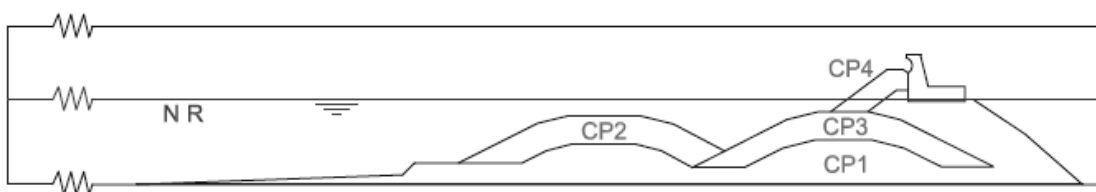


Figura 5.8: Designação de cada manto.

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros  $n$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , resultantes da calibração realizada por Gadelho *et al.* (2011) para as características dos mantos porosos.

Designação Manto	$n$ (%)	$\alpha$	$\beta$
CP1 - Brita	25	200	1.1
CP2 - Cubos	55	1000	0.5
CP3 - Cubos	55	200	0.5
CP4 - Tetrápodes	60	200	1.5

Em relação aos valores do diâmetro nominal,  $D_{50}$ , e do coeficiente de massa adicionada,  $\gamma$ , foram considerados os valores de referência do modelo físico e o valor genérico dado na bibliografia, respetivamente. Os valores considerados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Valores dos parâmetros  $D_{50}$  e  $\gamma$  utilizados para cada manto.

Designação Manto	$D_{50}$ (mm)	$\gamma$
CP1 - Brita	56	0.34
CP2 - Cubos	56	
CP3 - Cubos	43	
CP4 - Tetrápodes	22	

#### 5.3.4. Resultados do modelo

As simulações efetuadas no âmbito da presente dissertação foram realizadas para as configurações e as condições de agitação indicadas nas seções 4.3 e 5.3.1, respetivamente. Os resultados de interesse para o estudo são as séries temporais de superfície livre em vários pontos do domínio e ainda os perfis de velocidade em pontos selecionados no coroamento do muro cortina do molhe norte. Estes resultados são obtidos em pontos escolhidos do domínio, aqui denominados por sondas numéricas.

Relativamente à posição das sondas, foram colocadas 15 sondas numéricas, que são apresentadas na Figura 5.9, indicando-se as distâncias de cada sonda ao sistema de eixos com origem no canto inferior esquerdo do domínio.

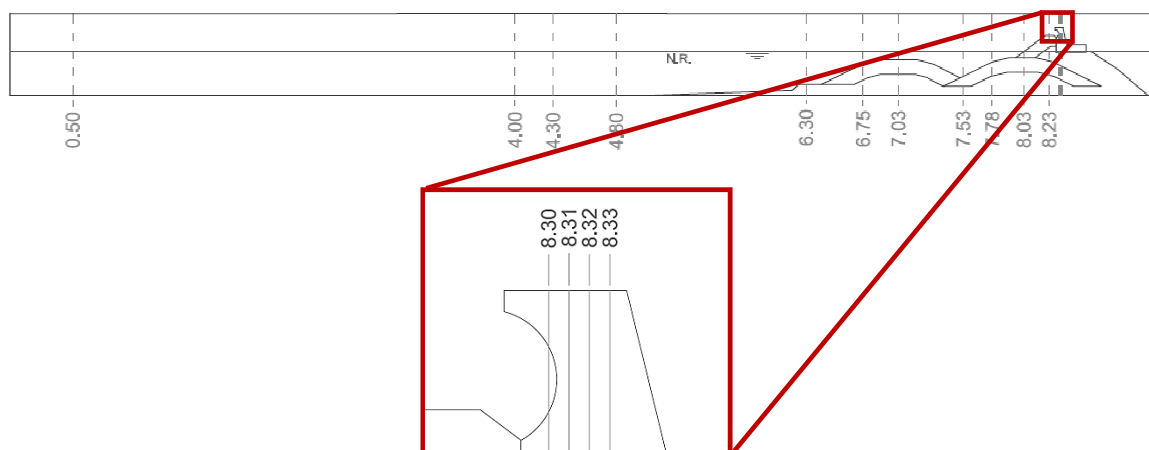


Figura 5.9: Posição das sondas.

Foi atribuído um número a cada uma das sondas, por ordem crescente a partir da origem, tal como pode ser observado na Tabela 5.5. O galgamento médio obtido pelo programa IH-2VOF é calculado com base nos valores de velocidade em cada uma das sondas pretendidas. Neste caso foram consideradas quatro sondas no coroamento do molhe norte do Porto de Leixões (ver Figura 5.9, parte ampliada).

Tabela 5.5: Posição das sondas.

Sonda N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distância x (m)	0.50	4.00	4.30	4.80	6.30	6.75	7.03	7.53	7.78	8.03	8.23	8.30	8.31	8.32	8.33

## 5.4. Resultados

Após as simulações de todos os casos, analisaram-se os resultados obtidos.

Primeiramente analisaram-se as séries temporais da superfície livre,  $\eta$ , nas primeiras 11 sondas (inclusivé) em todas as corridas para determinar o tempo necessário de estabilização do modelo, isto é, onde o efeito da reflexão da onda na estrutura atingia todo o canal, o que ocorreu por volta dos 75 s. Na Figura 5.10 apresenta-se, para a configuração 1 e para  $H=0.150$  m, um exemplo da série temporal da elevação da superfície livre obtida na sonda 4, onde se pode verificar a estabilização da configuração da superfície livre a partir dos 75 s aproximadamente.

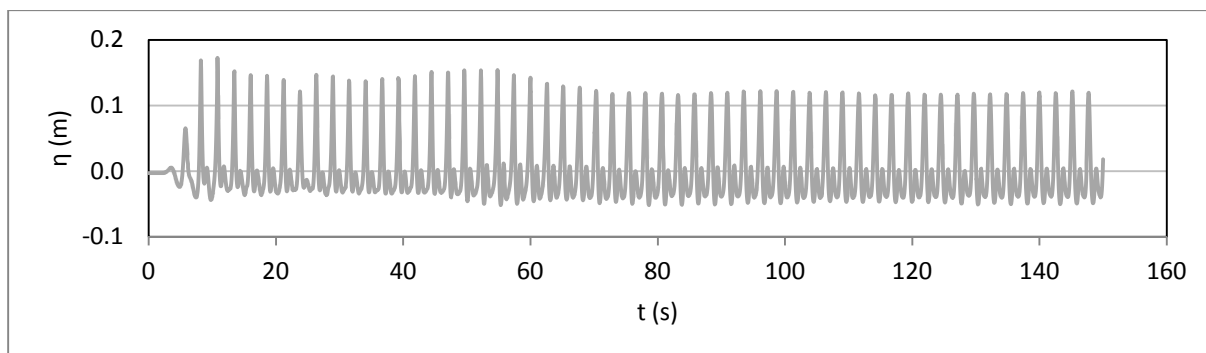


Figura 5.10: Série temporal da elevação da superfície livre,  $\eta$ , na sonda 4 para a configuração 1 com  $H=0.150$  m.

Deste modo definiu-se o intervalo de tempo em que se calculou o galgamento e procedeu-se ao tratamento e análise de resultados entre  $80.236 < t \text{ (s)} < 149.95$ . Este intervalo corresponde a um número múltiplo do período de onda,  $T$ , onde se considerou as condições de agitação estabilizadas, e corresponde a 27 ondas.

Neste intervalo de tempo, e com base na série temporal da elevação da superfície livre nas sondas 12 a 15 e na série temporal da velocidade, calculou-se o caudal médio galgado (ver secção 3.5).

Na Tabela 5.6 apresentam-se os valores do caudal médio galgado obtidos para cada configuração e cada condição de agitação. Na Figura 5.11 apresentam-se graficamente os respetivos valores.

Tabela 5.6: Valores do caudal médio galgado,  $Q$  (l/s/m), para cada uma das configurações e alturas de onda,  $H$ .

Configuração $H$ (m)	1	2	3	4	5	6	7
0.133	0.08	0.00	0.03	0.09	0.07	0.00	0.00
0.150	0.71	0.00	0.00	0.38	0.39	0.02	0.06
0.167	0.00	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00

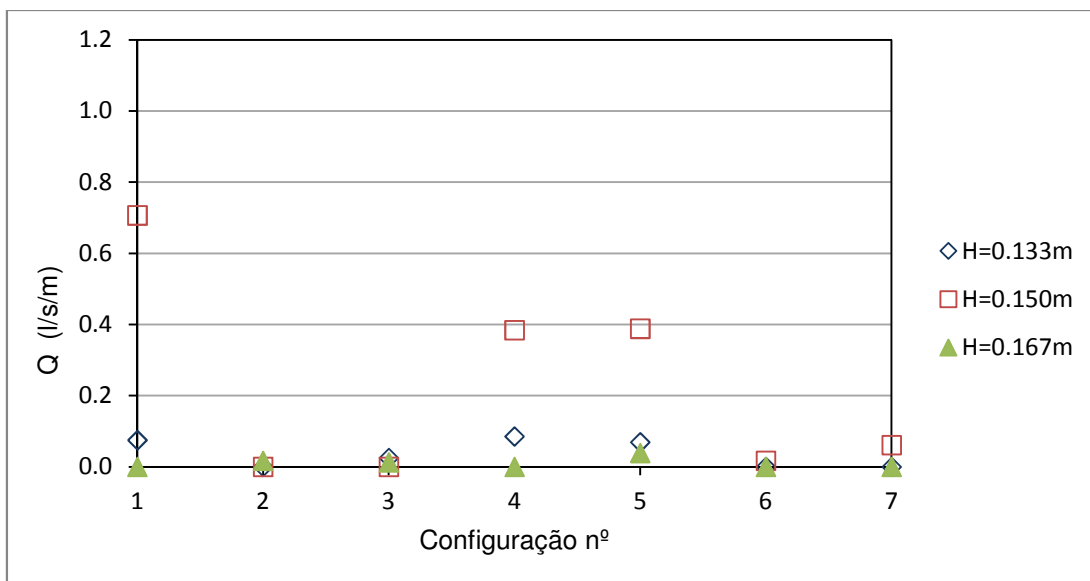


Figura 5.11: Caudal médio galgado,  $Q$ , para cada uma das sete configurações e para as três alturas de onda,  $H$ , analisadas.

Através da Figura 5.11 podemos concluir que, para as condições de geometria da estrutura e de agitação consideradas neste estudo, a altura de onda que provoca maior galgamento é  $H = 0.150$  m. As configurações em que ocorreram maiores galgamentos foram as configurações 1, 4 e 5, com  $Q > 0.3$  l/s/m. Nas restantes configurações o caudal nunca excedeu 0.1 l/s/m.

Para analisar melhor o que sucedeu relativamente aos menores valores de caudal médio galgado, apresentam-se na Figura 5.12 os resultados para  $Q < 0.1$  l/s/m.

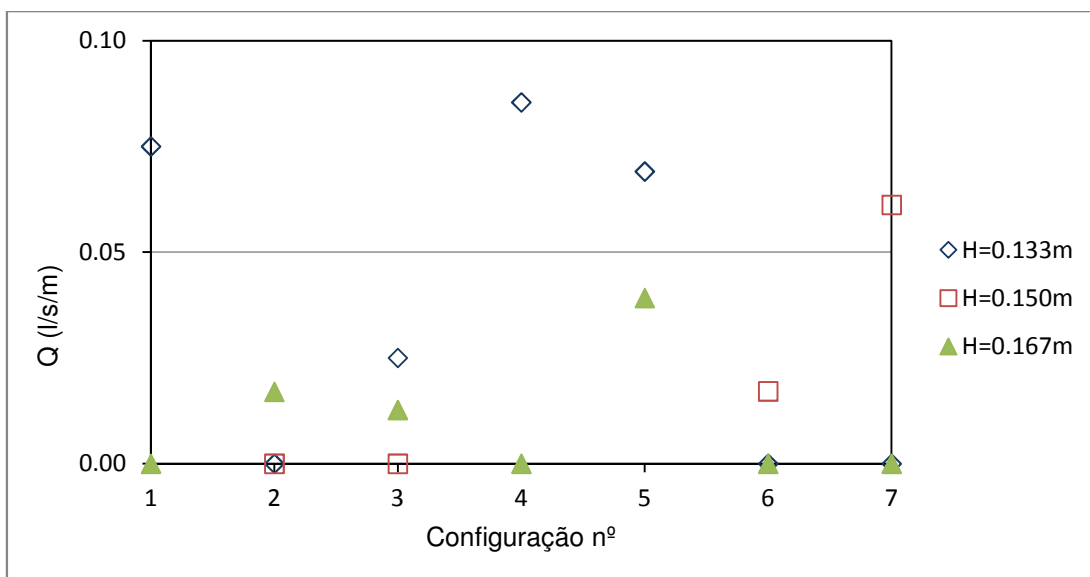


Figura 5.12: Caudal médio galgado,  $Q$ , para cada uma das sete configurações e para as três alturas de onda,  $H$ , analisadas para valores de  $Q$  entre 0.00 l/s/m e 0.10 l/s/m.

Na Figura 5.12 é visível que as configurações que, de forma global, apresentaram maior eficiência a reduzir o caudal que galga o molho norte do Porto de Leixões são a 2 e a 6, com  $Q < 0.02$  l/s/m, seguidas da configuração 3. Comparando estes resultados com os apresentados em Neves *et al.* (2013), verifica-se que, de facto, existem dois parâmetros com maior influência na

redução do galgamento: a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte.

Analisando apenas o galgamento, as configurações 2, 3 e 6 serão as melhores opções para reduzir o galgamento para as condições em estudo no molhe norte. No entanto, a configuração 6, ao estar a uma maior distância do molhe norte e ao ter uma cota mais elevada, levará a um aumento do material necessário à sua construção e, como tal, acarretará um maior custo.

Para complementar a análise dos resultados de galgamento apresentados anteriormente, na Figura 5.11 e Figura 5.12, são apresentados, na Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15, os valores médios da altura de onda nas onze sondas numéricas e no período de tempo em análise,  $H_{médio}$ , para as configurações 1, 2 e 5 e para os diferentes valores de altura de onda incidente,  $H$ , simuladas de forma a permitir avaliar a eficiência do quebra-mar submerso a reduzir a altura de onda que atinge o molhe norte (secção 5.3.1.). A geometria apresentada nestas figuras sofreu uma translação e mudança de escala em relação ao eixo vertical,  $y$ , para se poder analisar a posição, em  $x$ , das sondas sem perder legibilidade na leitura dos valores de  $H_{médio}$ .

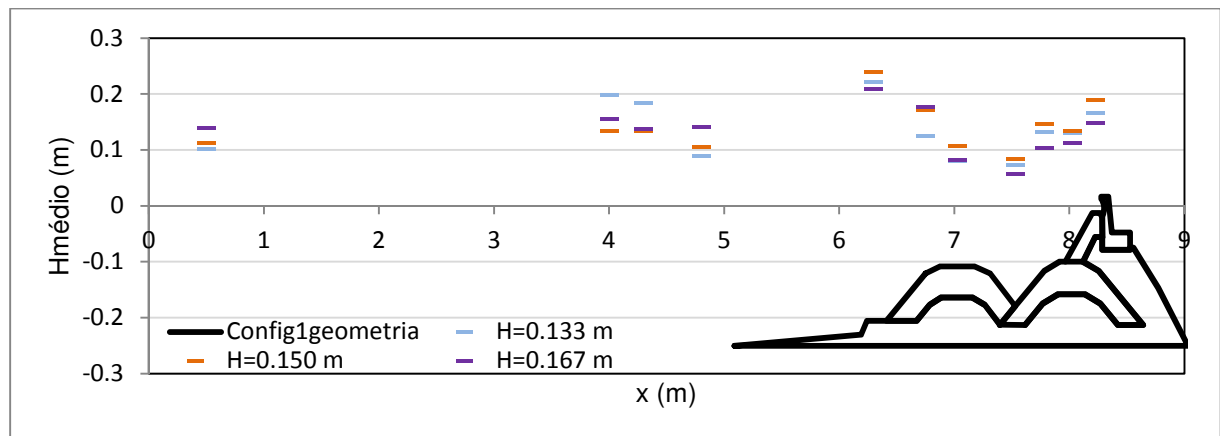


Figura 5.13: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusivé) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 1 (escala vertical da estrutura alterada).

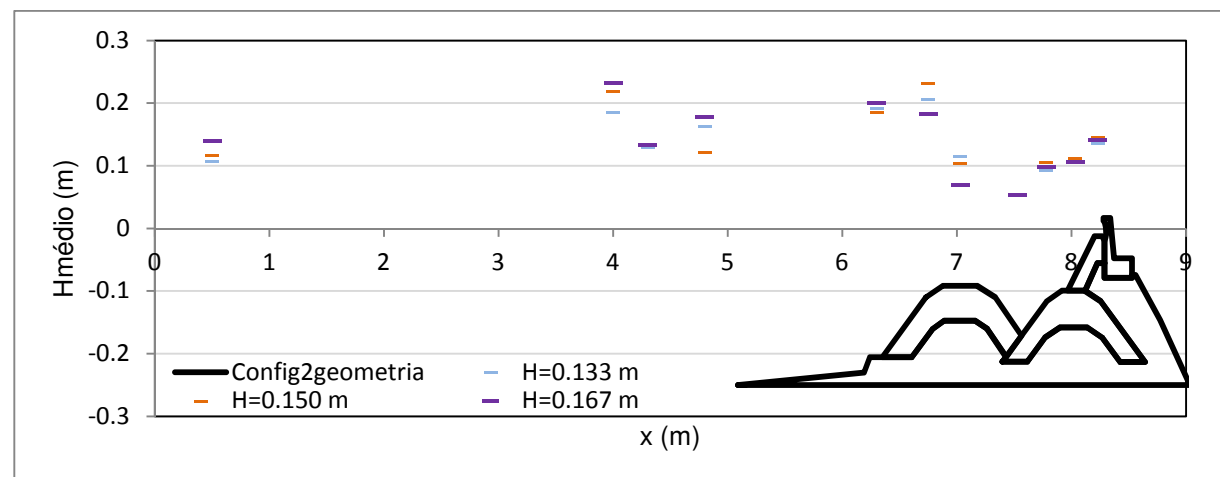


Figura 5.14: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusivé) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 2 (escala vertical da estrutura alterada).

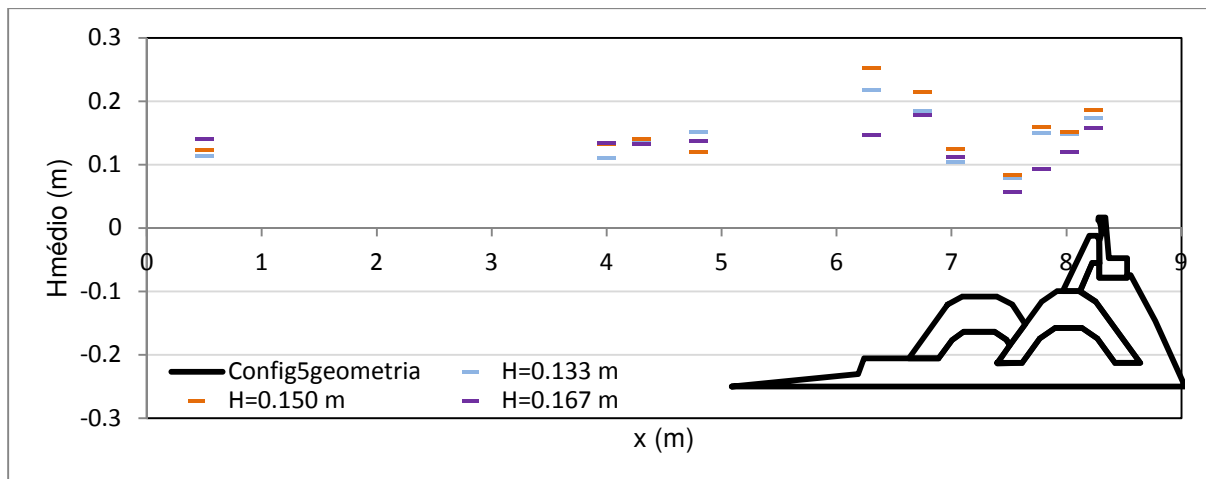


Figura 5.15: Valores de altura de onda média nas sondas 1 a 11 (inclusive) para as diferentes alturas de onda incidente, configuração 5 (escala vertical da estrutura alterada).

Da análise da Figura 5.13 e da Figura 5.15 é visível que, para as configurações 1 e 5, é para  $H=0.150$  m que a altura de onda média na proximidade do muro cortina apresenta o maior valor ( $H_{\text{médio}} \sim 0.19$  m). Foi precisamente para estas configurações e este valor de altura de onda incidente que se obtiveram os maiores valores do caudal médio galgado (ver Figura 5.11). Já para a configuração 2, Figura 5.14, o  $H_{\text{médio}}$  na proximidade do muro cortina é mais reduzido, da ordem de 0.14 m, o que provavelmente tem influência no reduzido valor de caudal observado para esta configuração, Figura 5.11.

Note-se que, de uma maneira geral, para as configurações 1 e 5, foi para a onda incidente  $H=0.150$  m que se obtiveram os maiores valores de altura de onda média nas sondas próximas do quebra-mar submerso e do molhe norte, observando-se o empolamento da onda nestas zonas (ver secção 2.2.2.2). Já na configuração 2, em geral o maior valor de  $H_{\text{médio}}$  na proximidade das estruturas foi obtido para  $H=0.167$  m.

Para completar esta análise, apresentam-se, nas figuras seguintes, imagens instantâneas da superfície livre obtidas pelo modelo IH-2VOF correspondentes a cada uma das alturas de onda incidente simuladas e para a configuração 1.

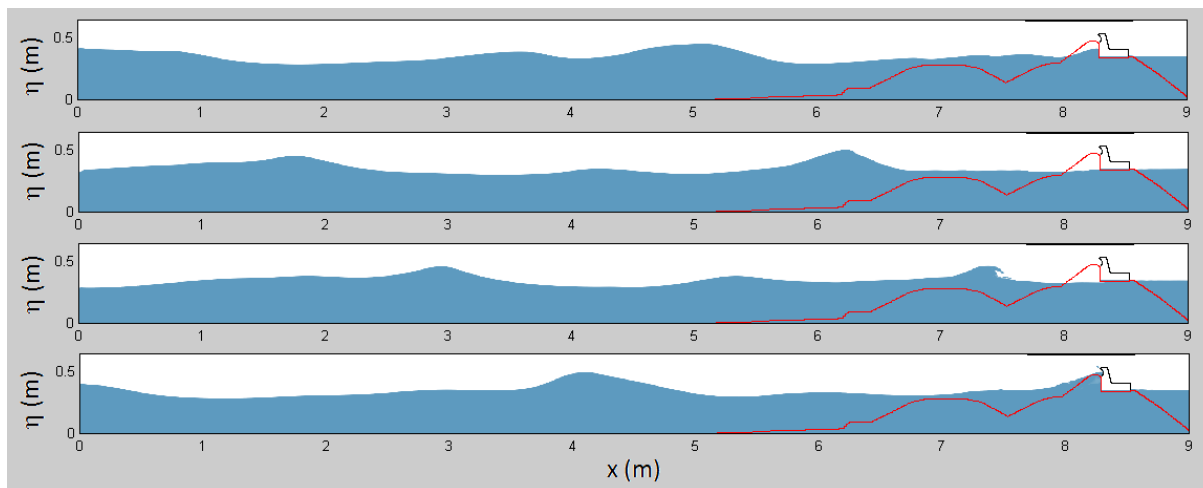


Figura 5.16: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda  $H=0.133$  m.

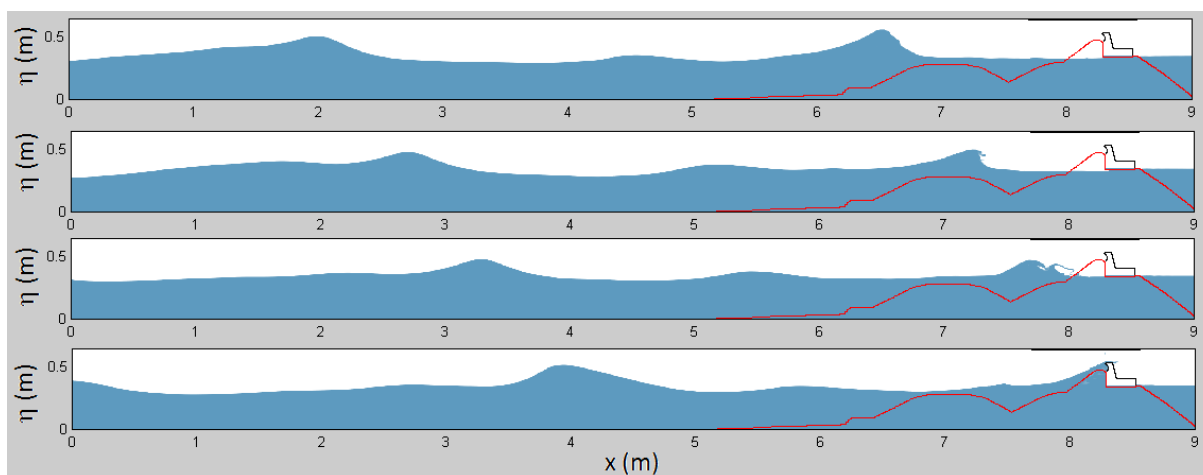


Figura 5.17: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda  $H=0.150$  m.

Na Figura 5.16 e Figura 5.17 é visível a ocorrência de rebentação da onda sobre o quebra-mar submerso, havendo uma dissipação de energia da onda antes da mesma atingir o molhe norte do Porto de Leixões. Para estes dois casos, com alturas de onda incidentes de 0.133 m e 0.150 m, apresentam um comportamento relativamente semelhante, ao contrário do que acontece com o caso de altura de onda incidente maior, Figura 5.18, onde é visível a ocorrência de rebentação em duas zonas antes da onda atingir o molhe norte do Porto de Leixões. Uma ocorre antes de atingir o quebra-mar submerso e a outra sobre o mesmo, fazendo com que no caso com  $H=0.167$ m, haja maior dissipação de energia do que nos restantes casos estudados para esta configuração.

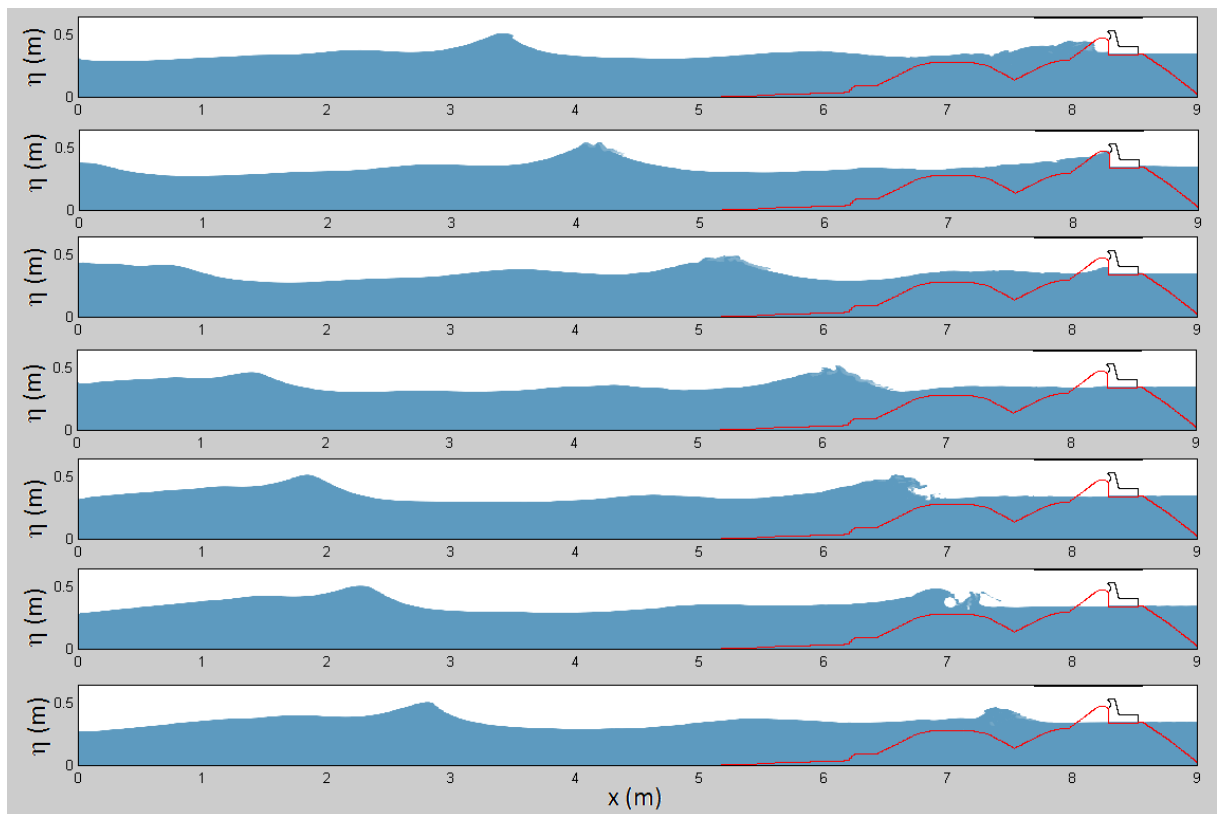


Figura 5.18: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre em diferentes instantes para a configuração 1 e para a altura de onda  $H=0.167$  m.

De modo a relacionar o galgamento do molhe norte do Porto de Leixões com a distância entre o ponto onde ocorre a rebentação da onda e o mesmo, foram analisados os resultados instantâneos obtidos pelo modelo numérico IH-2VOF para cada uma das 7 configurações simuladas. Para tal foi considerada uma altura de onda incidente de  $H=0.150$  m com  $T=2.582$  s. Na Figura 5.19 está apresentado o número da configuração no seu lado direito, cujas características geométricas se encontram definidas na secção 4.3.

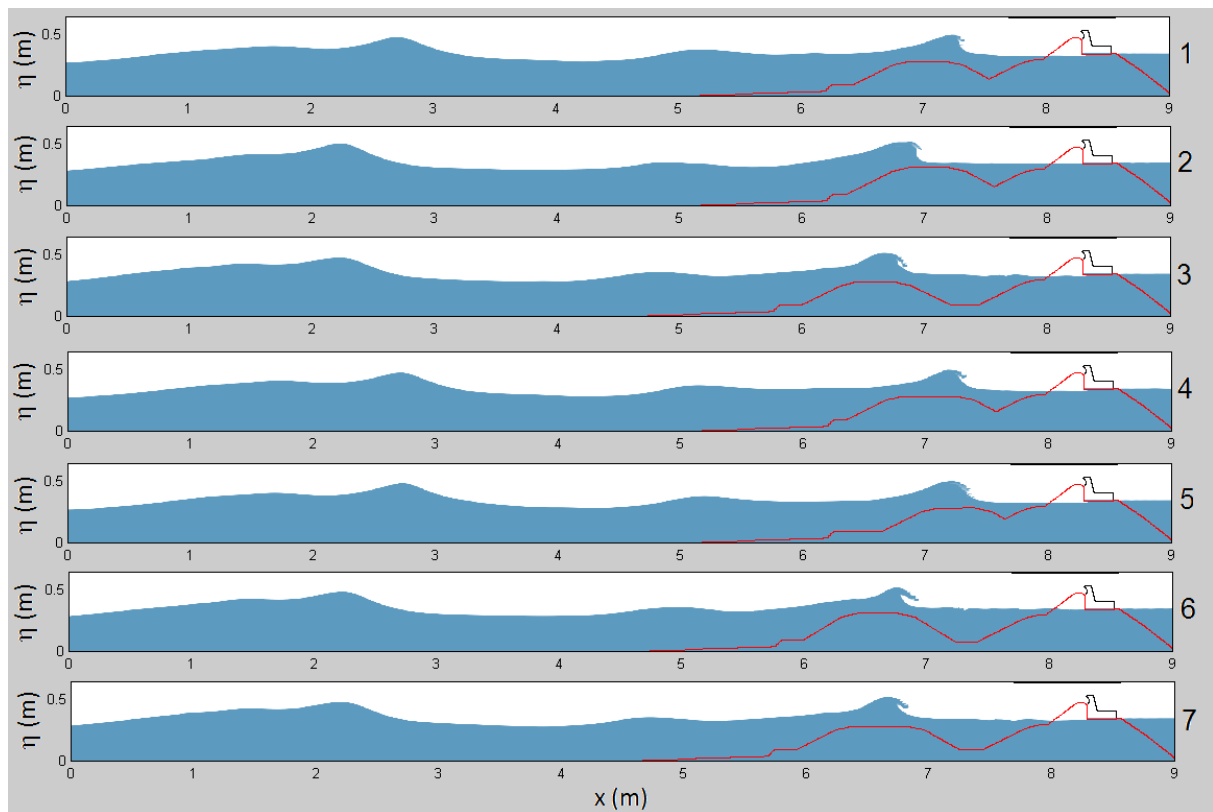


Figura 5.19: Resultados do modelo IH-2VOF: superfície livre num dado instante para as diferentes geometrias do quebra-mar submerso e com  $H=0.150$  m e  $T=2.582$  s.

Através da análise da Figura 5.19 é perceptível que, nas configurações 2, 3, 6 e 7, ocorreu rebentação numa zona mais distante do molhe norte do Porto de Leixões que nas restantes. Note-se que as configurações 1, 4 e 5 foram as que tiveram maior galgamento do molhe norte, ou seja, parece existir uma grande influência da distância entre a rebentação e o molhe norte do Porto de Leixões e o respetivo galgamento no mesmo. Tal seria de esperar, pois nestes casos existe uma maior zona de dissipação de energia da onda e por isso a onda que atinge o molhe Norte é menos energética, levando a um menor galgamento.

É de notar ainda que a rebentação da onda ocorre a uma mesma distância do molhe norte, mas em locais diferentes do quebra-mar submerso em algumas configurações com a mesma cota de coroamento. Este é o caso das configurações 2 e 6, onde a onda rebenta aproximadamente à mesma coordenada  $x$  mas que corresponde a um local diferente do quebra-mar submerso, o que sugere uma grande influência da interação entre a onda e as duas estruturas, o quebra-mar submerso e o molhe norte, especialmente da reflexão, no local de rebentação da onda.

Note-se que, para as condições de agitação e geometrias consideradas, o tipo de rebentação esperada (ver secção 2.2.2.2) é mergulhante. Da análise dos resultados do modelo, e como se pode observar na Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19, a rebentação que ocorre sobre o quebra-mar submerso é efetivamente mergulhante em todos os casos de agitação simulados.

De modo a relacionar a variação da geometria do quebra-mar submerso com a variação da superfície livre da onda nas proximidades do molhe norte do Porto de Leixões, que por sua vez pode influenciar o galgamento deste molhe, foram comparados também resultados da superfície livre em

algumas sondas para determinadas configurações simuladas, de forma a perceber quais são as diferenças mais significativas e posteriormente comparar com o galgamento ocorrido no molhe norte do Porto de Leixões. Foram realizadas comparações da superfície livre nas sondas 1, 5 e 8 (ver Figura 5.20) entre a configuração 1 e 2 para  $H=0.150$  m e entre a configuração 2 e 4 para  $H=0.133$  m.

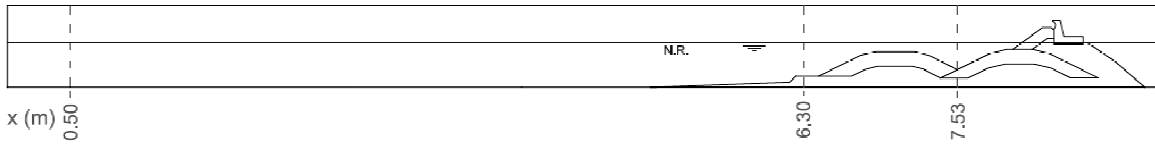


Figura 5.20: Posição das sondas na análise da influência da variação da geometria do quebra-mar submerso na variação da superfície livre e geometria da configuração 1.

Assim, na Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 são apresentados os resultados referentes às sondas 1, 5 e 8, respetivamente, para a configuração 1 e 2.

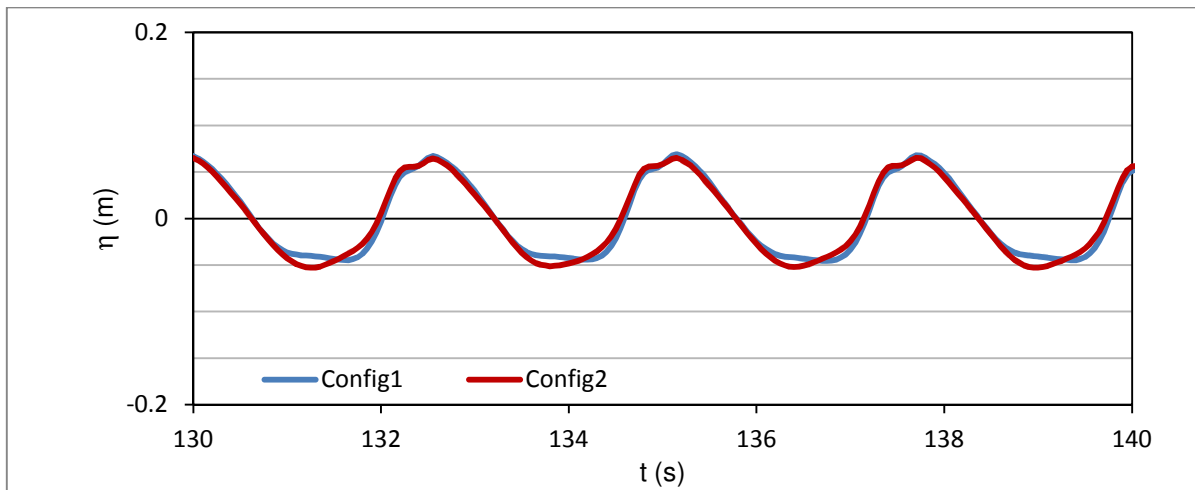


Figura 5.21: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , da sonda 1 das configurações 1 (Config1) e 2 (Config2) para  $H=0.150$  m.

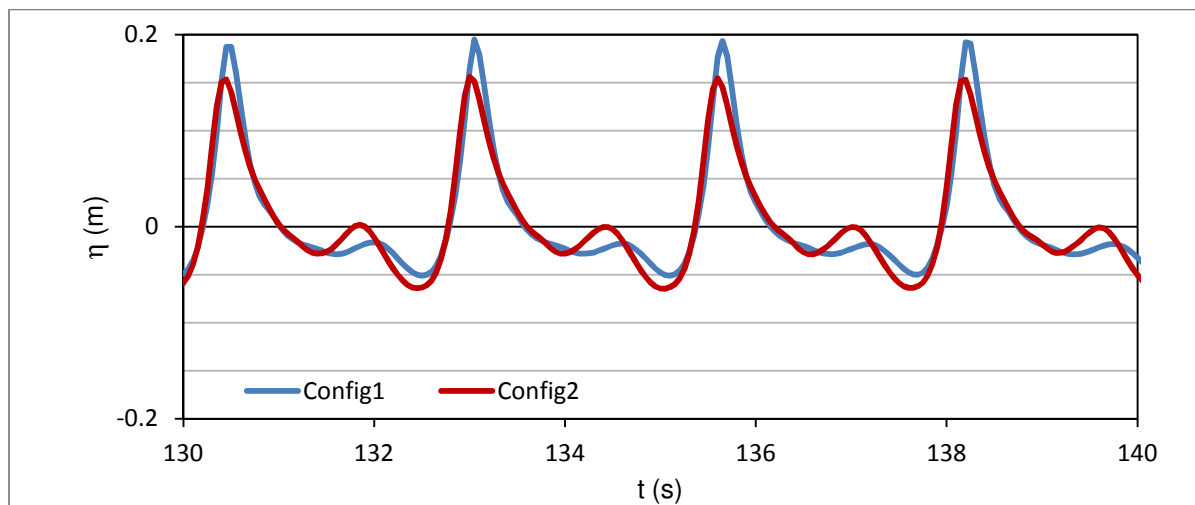


Figura 5.22: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , da sonda 5 das configurações 1 (Config1) e 2 (Config2) para  $H=0.150$  m.

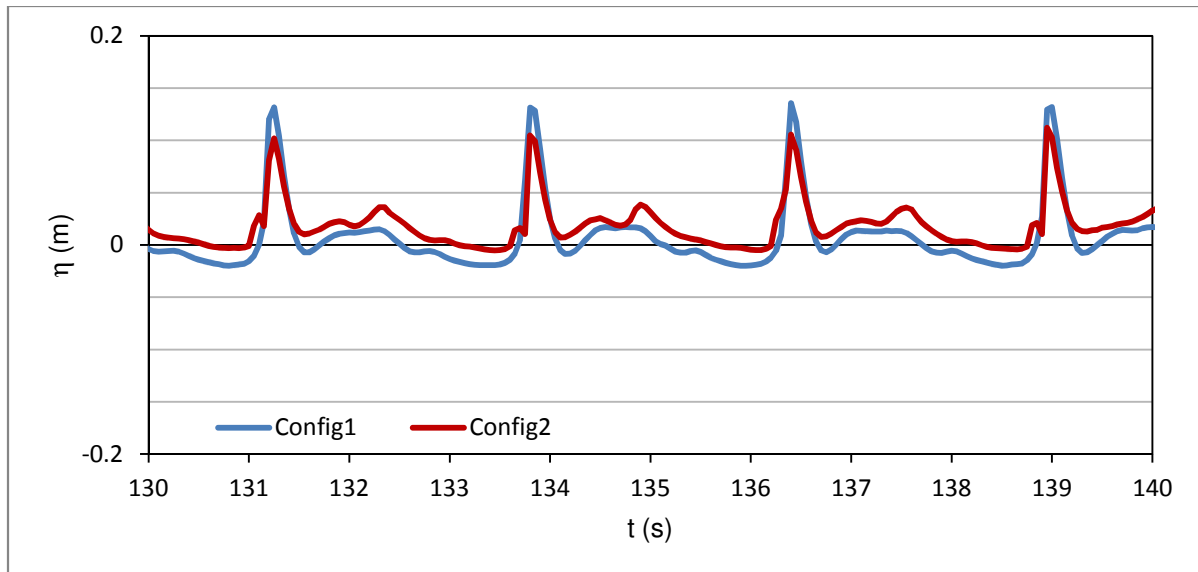


Figura 5.23: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , da sonda 8 da configuração 1 (Config1) e 2 (Config2) para  $H=0.150$  m.

Observando a Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 é visível que, para a configuração 2, houve uma redução na amplitude da onda na sonda 5, isto é, antes do quebra-mar submerso, relativamente à configuração 1. Os resultados obtidos parecem sugerir que esta foi uma das razões pela qual a configuração 2 conseguiu reduzir mais eficientemente, face à configuração 1, o galgamento do molhe norte do Porto de Leixões para  $H=0.150$  m. Isto pode ser devido à grande interação entre as duas estruturas, essencialmente em fenómenos de reflexão, levando a uma alteração da posição em que a onda refletida pelo quebra-mar encontra a onda incidente (ver, por exemplo, Figura 2.10) e, conseqüentemente, modificando as características da onda.

Para confirmar este fato, na Figura 5.24, Figura 5.25 e Figura 5.26 comparam-se os resultados de elevação da superfície livre da configuração 2 com a 4 para  $H=0.133$  m, para as mesmas sondas 1, 5 e 8.

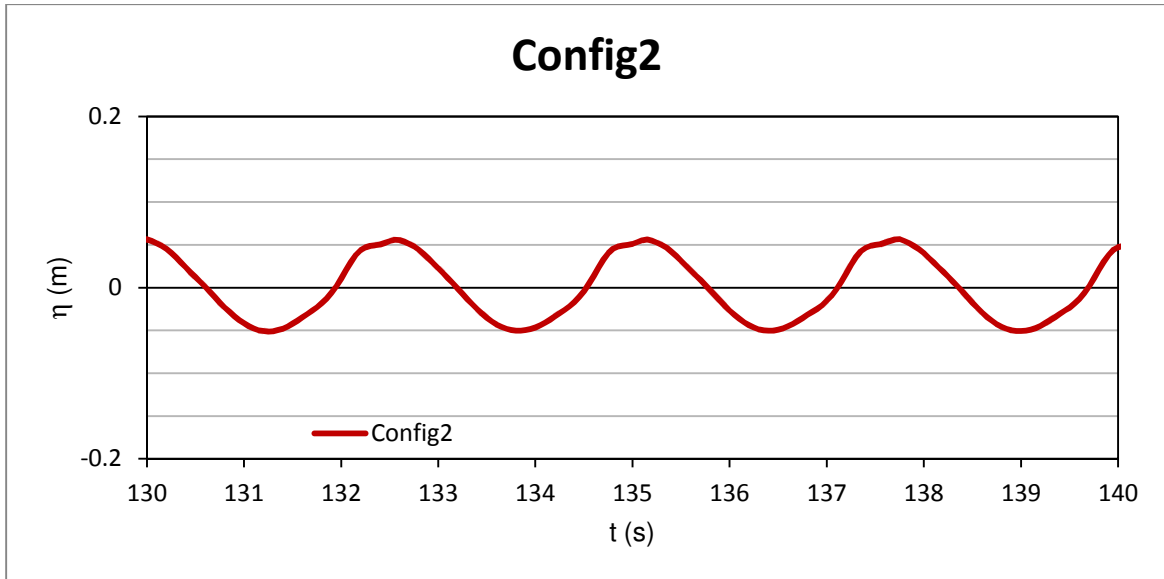


Figura 5.24: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , na sonda 1 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para  $H=0.133$  m.

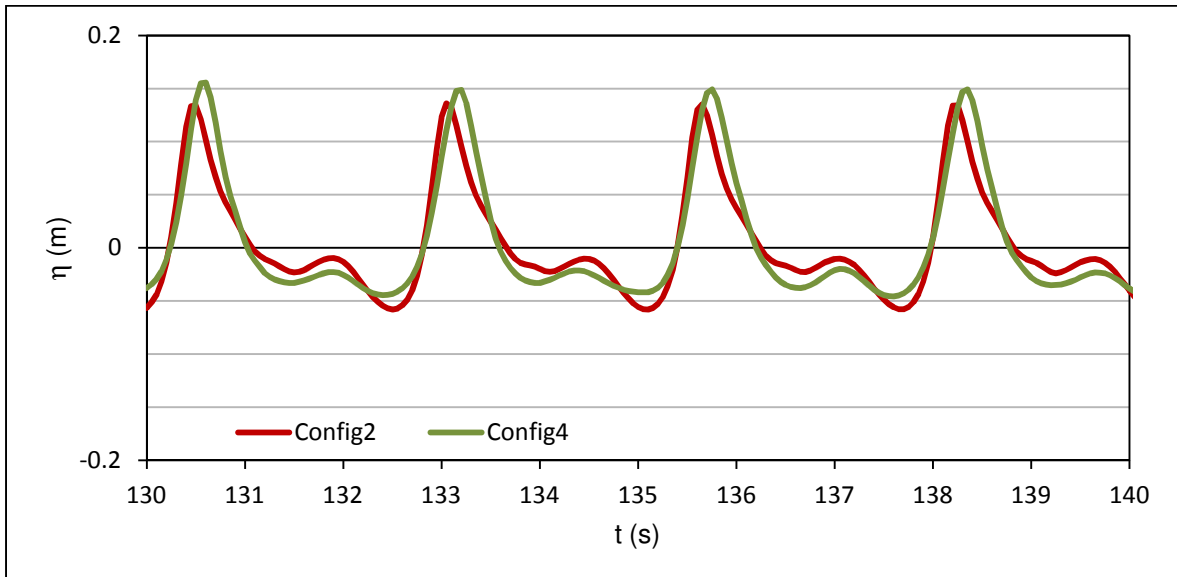


Figura 5.25: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , na sonda 5 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para  $H=0.133$  m.

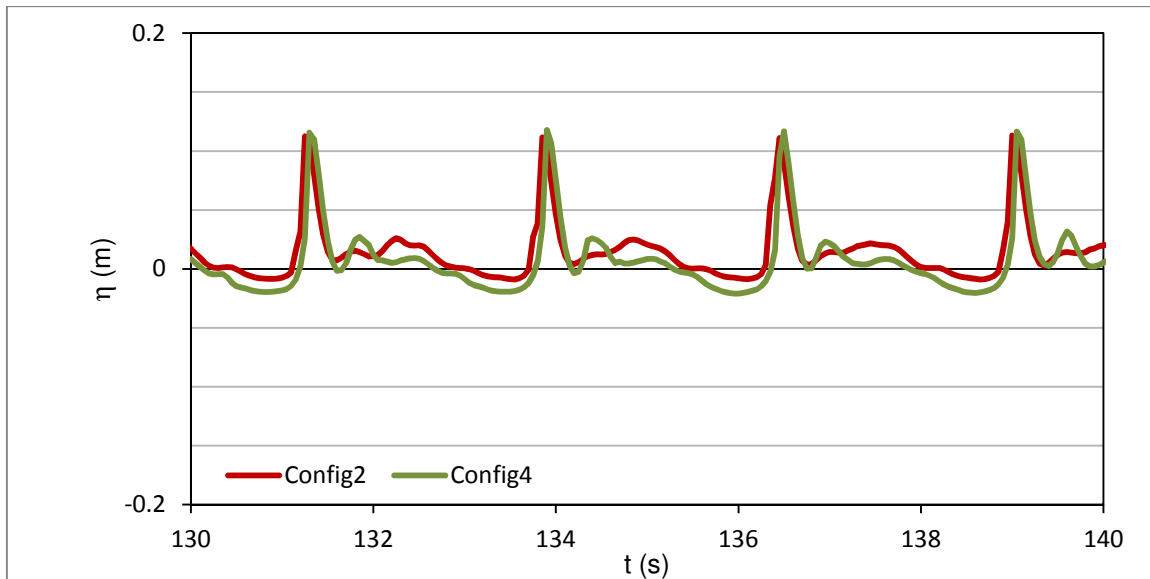


Figura 5.26: Valores da elevação da superfície livre,  $\eta$ , na sonda 8 das configurações 2 (Config2) e 4 (Config4) para  $H=0.133$  m.

Da análise destas figuras é possível visualizar o mesmo tipo de comportamento que ocorreu na comparação da configuração 2 relativamente à configuração 1, só que com uma redução menos significativa da amplitude da crista após a passagem pelo quebra-mar submerso (sonda 8). Tal resultado reforça a ideia de que os valores de caudal médio galgado no molhe norte do Porto de Leixões foram mais reduzidos nas configurações cuja geometria possibilitou uma maior redução da altura da onda junto ao molhe.

Por fim é apresentada uma análise comparativa do caudal médio galgado pelas diferentes configurações e a configuração atual, configuração 1, Figura 5.27, através da diferença entre o caudal médio galgado, para cada condição de agitação incidente ( $H=0.133$  m,  $H=0.150$  m e  $H=0.167$  m) da configuração  $i$  (com  $i$  a variar entre 1 e 7) e da configuração 1.

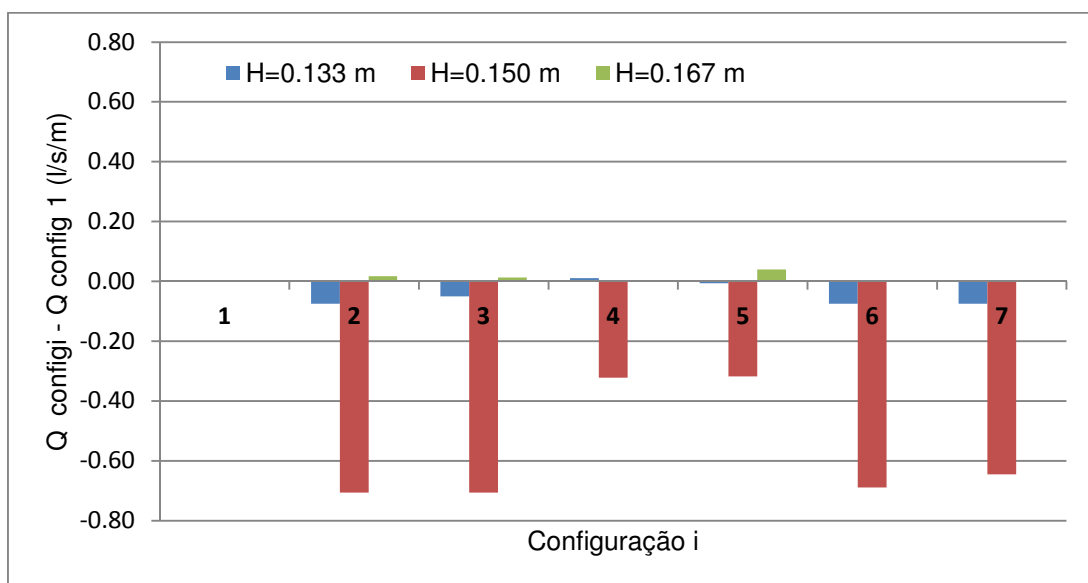


Figura 5.27: Diferença entre o caudal da configuração  $i$  e da configuração 1.

Para avaliar o que ocorreu para caudais de menor valor são apresentados, na Figura 5.28, os resultados para  $-0.1 < (Q \text{ configi} - Q \text{ config1}) \text{ (l/s/m)} < 0.1$ :

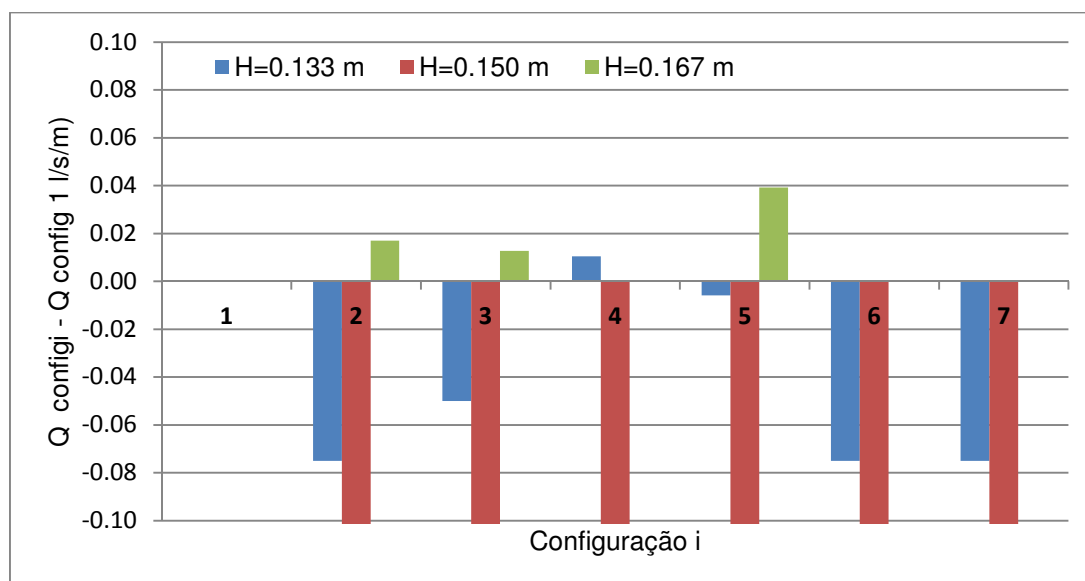


Figura 5.28: Diferença entre o caudal da configuração i e da configuração 1 para valores de caudal compreendidos entre  $-0.1 < Q \text{ configi} - Q \text{ config1} \text{ (l/s/m)} < 0.1$ .

Através da análise da Figura 5.27 e Figura 5.28 é possível verificar quais foram as configurações para as quais se obtiveram galgamentos médios superiores ou inferiores à configuração 1, estando situados, respetivamente, acima ou abaixo do eixo das abcissas.

Como se pode observar, o caso com  $H=0.150 \text{ m}$  é aquele para a qual há maior redução do valor de  $Q$  para todas as configurações, especialmente para as configurações 2, 3, 6 e 7. Já para  $H=0.167 \text{ m}$ , as configurações 2, 3 e 5 levaram a um aumento do valor de  $Q$ , embora pequeno no caso das configurações 2 e 3. Para  $H=0.133 \text{ m}$  apenas a configuração 4 levou a um aumento de  $Q$ .

Assim, analisando globalmente o galgamento para as condições de agitação simuladas, as configurações 6 e 7 foram as que apresentaram melhores resultados, reduzindo o caudal para as três condições de agitação em estudo, embora os caudais obtidos com a configuração 6 sejam inferiores aos da 7. As configurações 2 e 3 também levaram a uma redução considerável do galgamento para duas das condições de agitação testadas e, embora levem a um aumento do caudal galgado para  $H=0.167 \text{ m}$ , o valor obtido não é elevado. A configuração 6, que globalmente conduziu aos menores valores de  $Q$ , corresponde a juntar as características geométricas das configurações 2 e 3. Assim, podemos concluir que a distância entre estruturas e a cota de coroamento são as características geométricas do quebra-mar submerso que mais influenciam na redução do caudal médio galgado do molhe norte do Porto de Leixões, seguida da largura do coramento.

A Figura 5.27 e Figura 5.28 permitem visualizar qual foi a configuração que melhor conseguiu minimizar o galgamento que se tem com a configuração 1, mas é necessário consultar as Figura 5.11 e Figura 5.12 para retirar conclusões mais detalhadas. Tome-se o exemplo das configurações 2 e 6. Observando a Figura 5.27, a configuração 6 parece ser a melhor, mas ao analisar os valores reais de

galgamento apresentados na Figura 5.12 podemos verificar que os galgamentos sofridos são da mesma ordem de grandeza e, portanto, ambas são semelhantes no que toca a reduzir o galgamento.

Assim, de forma global, todas as configurações levaram à redução dos maiores valores de galgamento obtidos para a configuração 1 e para  $H=0.150$  m. O valor máximo do caudal médio galgado para as três condições de agitação em estudo reduziu-se de um valor máximo de  $0.71$  l/s/m para a configuração 1 para  $0.02$  l/s/m em duas das configurações testadas (configurações 2 e 6), ou seja, uma redução de 97%.

O fato de se ter, neste caso, a interação entre a agitação incidente e uma estrutura complexa, composta por dois quebra-mares, torna o estudo da influência da geometria do quebra-mar submerso no galgamento do molhe Norte bastante complexa. Por exemplo, se analisarmos os resultados da configuração 4, ocorreu uma redução do caudal médio que galga o molhe norte do Porto de Leixões, em relação à configuração 1, para a altura de onda  $H=0.150$  m, mas não para  $H=0.133$  m. Se observarmos a geometria da configuração 4 (ver secção 4.3), verificamos que possui uma largura de coroamento 50% superior à da configuração 1. Este aumento de largura, *à priori* e de um ponto de vista teórico e para um quebra-mar submerso isolado, levaria a uma maior dissipação de energia. Tal não se verificou para a altura de onda  $H=0.133$  m, que provocou um galgamento superior no molhe norte do Porto de Leixões que na configuração 1, devido à grande influência da interação entre as ondas e as estruturas, quer o quebra-mar submerso, quer o molhe norte, alterando as condições de agitação junto ao molhe e, conseqüentemente, o seu galgamento.



## 6. Considerações finais e desenvolvimentos futuros

O principal objetivo desta dissertação é estudar o fenómeno do galgamento em estruturas marítimas protegidas por um quebra-mar submerso. Em particular, pretende-se otimizar a geometria de um quebra-mar submerso situado a barlar de uma estrutura portuária, o molhe norte do Porto de Leixões, na qual se pretende minimizar o galgamento.

Para tal, foi utilizado o modelo numérico IH-2VOF que resolve as equações RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes). As simulações foram realizadas recorrendo-se à escala geométrica 1/60, que corresponde à escala dos ensaios em modelo físico realizados anteriormente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para este caso de estudo. As condições de agitação estudadas no âmbito desta dissertação pretendem alargar o âmbito das condições ensaiadas em modelo físico, estudando-se condições extremas de agitação marítima, com alturas de onda e períodos elevados.

Primeiramente foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo, no que se refere ao caudal médio galgado, à variação de algumas características da agitação incidente, dos mantos do molhe e da malha. Posteriormente foi estudada a influência de diferentes geometrias do quebra-mar submerso no galgamento do molhe norte.

Relativamente à análise de sensibilidade, analisou-se a influência da altura de onda e do período de onda no galgamento no molhe norte do Porto de Leixões. Para além disso, foi também analisada a influência da porosidade do manto de tetrápodes e do refinamento da malha no galgamento do molhe norte do Porto de Leixões. Da análise de sensibilidade do modelo verificou-se que o galgamento da estrutura não aumentava necessariamente com o aumento de altura ou do período de onda, dependendo de fenómenos de interação entre as ondas e as duas estruturas, que são complexos. Relativamente à porosidade do manto de tetrápodes, verifica-se que ocorreu uma redução de galgamento com a redução da porosidade. No entanto, dado que se simulou um pequeno número de casos, devem ser analisados mais casos para confirmar tal afirmação. No caso do refinamento da malha notou-se que existe uma influência da mesma na precisão dos resultados obtidos, em que para um aumento de cerca de 4 vezes do número de células da malha obteve-se uma diferença no caudal que galga a estrutura de aproximadamente 20%.

Para analisar a influência da geometria do quebra-mar submerso no galgamento do molhe norte do Porto de Leixões foram consideradas três condições de agitação do tipo regular, com alturas de onda de 8 m, 9 m e 10 m, e com um período de 20 s. Simularam-se sete configurações da geometria do quebra-mar submerso, que diferem da configuração original do quebra-mar que atualmente protege a cabeça do molhe norte do Porto de Leixões somente em três características geométricas: a distância entre o quebra-mar submerso e a estrutura portuária, a cota de coroamento do quebra-mar submerso e a sua largura de coroamento.

Da análise das sete configurações concluiu-se que o parâmetro que mais influencia tem na redução do galgamento é o aumento da cota de coroamento do quebra-mar submerso e o aumento da distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte do Porto de Leixões. O valor mais elevado de galgamento foi obtido para a configuração 1, a atual, para uma altura de onda de 9 m no protótipo. As configurações onde se aumentou a cota de coroamento e onde além do aumento da cota de

coroamento se aumentou a distância entre quebra-mares em 50% foram as que obtiveram os valores de galgamento mais reduzidos para as alturas de onda de 9 e 10 m, respetivamente. A altura de onda de 9 m foi a que provocou, em geral, maiores galgamentos do molhe norte do Porto de Leixões. Para a altura de onda de 10 m, ocorria rebentação antes de se atingir o quebra-mar submerso, dissipando-se assim muita da energia da onda, levando a uma redução do galgamento.

Foi verificado que, quanto mais distante do molhe norte do Porto de Leixões se dá a rebentação, menor é o galgamento resultante. Para além disto, verificou-se uma maior redução do galgamento do molhe norte nas configurações em que a presença do quebra-mar submerso levava a uma redução maior da altura de onda média na proximidade do muro cortina.

Analisando o estudo realizado de uma maneira global, para estruturas compostas por um quebra-mar submerso a proteger outra estrutura marítima e relativamente ao fenómeno de galgamento, não foi encontrada uma relação entre a altura de onda e o galgamento provocado na estrutura marítima (molhe norte do Porto de Leixões), pelo que se deve proceder à realização de o maior número possível de casos com diferentes condições de agitação para analisar o galgamento em estruturas deste género.

Dada a variabilidade de resultados e a dependência das condições locais sugere-se a utilização de modelos numéricos e físicos, tal como foi utilizado neste caso, como forma de otimizar o dimensionamento de soluções deste tipo na proteção de portos e da orla costeira.

Para desenvolvimentos futuros, propõe-se a realização de simulações com outras condições de agitação para as configurações que levaram aos melhores resultados, de modo a analisar qual delas será a melhor solução para reduzir o galgamento. É ainda proposto um estudo mais detalhado sobre a influência dos dois parâmetros geométricos para os quais se obteve a maior redução do galgamento no molhe norte do Porto de Leixões: a distância entre o quebra-mar submerso e o molhe norte do Porto de Leixões e a cota de coroamento do quebra-mar submerso. Para além dos parâmetros geométricos considerados neste estudo é proposto o estudo de influência da inclinação do talude e da porosidade do quebra-mar submerso no galgamento da estrutura principal.

## Bibliografia

Brito, S. F. (2007), *Estudo do galgamento em estruturas marítimas*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. (1967), "On the partial difference equations of mathematical physics", *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 11 (2), pp. 215-234, MR 0213764, Zbl 0145.40402.

Gadelho, J. F., Neves, M. G., Reis, M. T., Pinto, F. T. e Lopes, H. G. (2011), "Estudo da interacção entre quebra-mares destacados e obras portuárias com recurso a modelos numéricos". *Proc. 7<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Porto, 6 a 7 de outubro de 2011, PIANC Portugal.

García, R. G. (2007), *Análisis de la funcionalidad y estabilidad de obras marítimas mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones de Reynolds*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

HYDRALABIII Consortium (2007). Guidelines for Physical Model Testing of Breakwaters: Rubble Mound Breakwaters. HYDRALABIII Deliverable NA3.1-2, EC contract no. 022441 (RII3), agosto.

Hirt, C. W. e Nichols, B. D. (1981), "Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.

Hsu, T. J., Sakakiyama, T. e Liu, P. L. F. (2002), "A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater". *Coastal Engineering*, Vol. 46, pp. 25-50.

IH-2VOF (2012), *IH-2VOF Course*. IH Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidade de Cantábria (november 20<sup>th</sup>, 2012 – november 21<sup>st</sup>, 2012).

Kortenhaus, A., Van Der Meer, J. W., Burcharth, H. F., Geeraerts, J., Pullen, T., Ingrand, D. e Troch, P. (2005), *D40 report on conclusions of scale effects*. CLASH WP7 – Report.

Lara, J. L., García, N. e Losada, I. J. (2006), "RANS modeling applied to random wave interaction with submerged permeable structures". *Coastal Engineering*, Vol. 53 (5-6), pp. 395-417.

Lara, J. L., Jesus, M. D., Losada, I. J., Higuera, P., Ruju, A. E. e Maza, M. (2011), "Realistic wave generation using Navier-Stokes models". *Fifth International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (ACOMEN)*.

Le Méhauté, B. (1976), *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer Verlag.

Lin, P. Z. e Liu, P. L. F. (1998), "A numerical study of breaking waves in the surf zone". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 359, pp. 239-264.

Long, R. R. (1976), "An introduction to hydrodynamics in water waves, B. Le Mehaute". Springer, Berlin, 311. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 2 (4), (1978), pp. 409-410.

Lopes, H. G. (2013), *Experimental analysis of the interaction between waves and a rubble-mound breakwater protected by a detached breakwater, using video imagery techniques. The Port of Leixões Case*. Tese de Doutoramento, FEUP.

Neves, M. G., Gadelho, J., Reis, M. T., Lopes, H. G., Taveira Pinto, F. e Veloso-Gomes, F. (2013), "Determinação dos galgamentos utilizando o modelo numérico IH-2VOF para diferentes geometrias dos quebra-mares do porto de Leixões". *Proc. 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, 10 a 11 de outubro de 2013, PIANC Portugal.

Pérez, J. J. M. (2011), *Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas*. Publicação realizada pela Universidade de Cádiz.

PIANC (2005), *Catalogue of prefabricated elements*. Brussels, International Navigation Association, 2005.

Pinto, F. A. T. (2001), *Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas Proximidades de Quebramares Destacados sob a Acção da Agitação Marítima*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP.

Pullen, T. & Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H. & Van der Meer, J.W. (2007), *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.

Rodi, W. (1980), *Turbulence models and their application in hydraulics – a state-of-the-art review*. IAHR Publication.

Sawaragi, T. (1992), *Detached breakwaters*. Department of Civil Engineering, Osaka University.

Torres-Freyermuth, A., Lara, J. L. e Losada, I. J. (2010), "Numerical modelling of short- and long-wave transformation on barred beach". *Coastal Engineering*, Vol. 57, pp. 317-330.

USACE (2006), *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C. (6 volumes).

Van Gent, M. R. A. (1994), "The modeling of wave action on and in coastal structures". *Coastal Engineering*, Vol. 22, pp. 311-339.

Van Gent, M. R. A. (1995), *Wave interaction with permeable coastal structures*. Tese de Doutorado, Delft University Press.



# Anexo A

## FABRICO E COLOCAÇÃO DE TETRAPODES NO EXTERIOR DO QUEBRAMAR DE LEIXÕES \*

ANOS	FABRICO				COLOCAÇÃO				Depósito	Rejeitados	Observações	
	Início	Fim	Quantd.		Início	Fim	Quantid.					
1966/69	Nov/66	Dez/68	2 871		Maio/67	Abr/69	2 868		-	3	CONSTRUÇÃO DO TMFL. Os rejeitados foram incorporados no maciço da cabeceira.	
1971/72			1 000				1 000		-	-		
1973/74	Abr/73	Set/74	1 059				1 010		50	9	1ª RECONSTRUÇÃO DO QUEBRAMAR. Os 9 rejeitados foram colocados, a pagos, como enrocamento classificado em Setembro de 1979.	
1978/79	15-05-78	27-04-79	835		27-07-78	26-06-79	907		-	28	Foram colocados os 50 que tinham ficado em depósito. Os 28 rejeitados foram colocados, a pagos, como enrocamento classificado em Nov/79 (1), Dez/79 (17) e Junho/80 (10).	
1979/80	02-05-79	09-04-80	1 300		26-06-79	27-06-80	1 288		-	2	2ª RECONSTRUÇÃO DO QUEBRAMAR. Os 2 rejeitados foram incluídos na 2ª fase de betonagem do módulo 07 (Out/79).	
1984/85	18-08-84	12-04-85	410		11-01-85	31-06-85	310		100	10	A empreitada esteve suspensa entre 12-01-85 e 12-04-85. Os 10 tetrapodes rejeitados foram colocados, mas não pagos, ao próprio manto.	
1987/88	20-10-87	25-02-88	351		01-10-87	27-03-88	371		30	1	Foi rejeitado o tetrapode nº 82, que foi colocado no próprio manto (mód. 52), mas não pago.	
1990/91	24-07-90	14-12-90	337		21-07-90	11-04-91	366		50	1 + 2	Foi rejeitado o tetrapode nº 286, por resistência deficiente, que foi colocado no próprio manto, mas não foi pago nem substituído por nova unidade. Partiram-se os nºs 326, de 1689, e nº 78, de 1930, que foram substituídos, mas não pagos, por novas unidades. O nº 79, por estar pouco partido, foi colocado no próprio manto.	
1996/97	16-12-96	22-03-97	200		09-05-97	26-06-97	250		0	0	Foram colocados os tetrapodes existentes em estaleiro, pelo que o "stock" ficou em zero.	
2000/01	19-01-01	23-05-01	350		12-04-01	03-07-01	350		0	1	Foi rejeitado o tetrapode nº 212, por resistência deficiente, foi colocado no próprio manto mas não foi pago como tetrapode nem substituído por nova unidade.	
2003	03-04-03	02-09-03	450		03-06-03	06-10-03	450		0	20	Foram rejeitados os tetrapodes nºs 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 224, 226, 228 e 239, por apresentarem elevada fendação (balão com incorporação de cinzas); foram colocados no próprio manto mas não foram pagos como tetrapodes. Foi somente paga a colocação.	
2008/09	29-08-08	29-07-09	1 276		27-11-08	21-08-09	1 246		30	0		
			<b>Total =</b>	<b>10 499</b>				<b>Total =</b>	<b>10 426</b>	<b>Sacção transversal do manto de tetrapodes = 100 m2</b>		

\* Quadro retirado de CD fornecido pelo serviço de administração do Porto de Leixões durante a visita de estudo ao mesmo no dia 18 de fevereiro de 2014.



## Anexo B

### Exemplo de ficheiro de "input" do modelo IH-2VOF

DESTAQ

\$numparam

```
0.005,150,60.2,0.05      <==delt,twfin,prtdt,pltdt
0.3,1.0,6,3,1,1,1.0     <==alpha,beta,kl,kr,kt,kb,autot
0,0.3,0                  <==npack,con,dmpdt
1,0                      <==dtmax,ivid
1.0d-3,0.39             <==erriccg,fcvlim
1.0e-02,.false.         <==frctn,conserve
3000,.true.             <==cray,itmiccg,sym
50.0,50.0,.true.       <==MaxVelComp,SetVelToZero
```

\$end

\$fldparam

```
1.0e-06,0,0,0,-9.8,0,0,0.0 <==xnu,icyl,gx,gy,ui,vi
0.0d0,1.0                  <==utop,psat,rhof
0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.   <==uinf(1:4),vinf(1:4)
0.0,0.0,0.0,0.0          <==pbc(1:4)
```

\$end

\$wave parameter\$

```
1,0.35,6                  <==aa,h0,ncenter
```

\$output format\$

```
0,0,1,1301,1,201,1,1,1,1,0 <==ts,tf,ib,ie,jb,je,ix,iy,lout,nanim,nmean
15,0.5,4.0,4.3,4.8,6.3,6.75,7.03,7.53,7.78,8.03,8.23,8.3,8.31,8.32,8.33,0,10000,0.05
0,10000000000,0.05        <==tstart_a,tfinish_a,pretd_a
1,1000,1                  <== write_mode, number_lines, toreal4
1,1,1,0,0,0              <== write_f,write_u,write_w,write_p,write_k,write_vortex
```

\$turbulence model information\$

```
0                          <==ticf,eddycoef,kopen
```

\$boundary type\$

```
0,0,0,0,0                <==nweakref,nopen,islip,nrough,mirrort
```

\$sponge layer\$

```
0                          <==nsponge
```

\$free surface tracking method\$

```
1                          <==nfree
```

\$pollutant transport parameter\$

```
0                          <==npollutant
```

\$restart controlling parameter\$

```
0                          <==nrs
```

\$overtopping mass

0 <==novertop

\$Pressure\$

7.8,8.5,0.3,0.65

\$Run up\$

7.8,8.5,0.3,0.65

\$Envelopes\$

1

0,9.1,0,0.65,0,150,0.05 <==x\_env\_ini\_m, x\_env\_fin\_m, y\_env\_ini\_m,  
y\_env\_fin\_m,tb\_env,te\_env,dt\_env

\$Seaweed\$

0

2,1,2,1 <== xmin\_seaweed, xmax\_seaweed,yjmin\_seaweed, ymax\_seaweed

0.4,4600,2.9 <== alfa\_seaweed,beta\_seaweed,gama\_seaweed

5000,1,1 <== bb,NN,C\_d