



Ruben Miguel Domingues Correia

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Modelação numérica da interação de ondas com uma estrutura de aproveitamento de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante

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

Orientador: Ana Cristina Santos Mendonça, Doutora, LNEC

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil
Vogal: Doutora Ana Cristina Santos Mendonça



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

“Copyright” Ruben Miguel Domingues Correia, 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 de 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

Em primeiro lugar, quero agradecer profundamente às minhas orientadoras, a Doutora Ana Cristina Santos Mendonça e a Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves. À Dra. Ana Mendonça, queria especialmente agradecer pela orientação diária, pela total dedicação, pelos conhecimentos transmitidos e pela enorme paciência demonstrada. À Prof. Graça, queria agradecer por todas as críticas construtivas, ensinamentos cruciais e simpatia com que sempre me recebeu.

Gostava de agradecer à minha família, que sempre me motivou para seguir o que eu gosto. Em especial, quero agradecer aos meus queridos pais, por todo o esforço que fizeram no sentido de eu ter a oportunidade de tirar um curso superior, e à minha prima Patrícia por toda ajuda prestada durante o decorrer do mesmo.

Quero agradecer à minha namorada Marta Geada, por toda a motivação durante o meu percurso universitário. Obrigado por me fazeres ver o futuro de uma forma diferente.

Obrigado aos meus amigos João Casquinho, Cláudia Fernandes e David Pinto por todos os bons momentos. Apesar de termos seguidos caminhos diferentes, a amizade continua sempre forte. Quero também agradecer a todos os amigos que fiz na faculdade, Miguel Teixeira, Licínio Cruz e Gonçalo Antunes, por todos os bons momentos e trabalhos juntos. Em especial, quero agradecer ao Guilherme Coelho, por todos os conselhos e ideias trocadas durante este período da minha vida. Aos meus colegas do LNEC, especialmente ao Eng^o João Dias, obrigado por todo o auxílio e apoio prestado.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, obrigado por todos os meios disponibilizados ao longo desta Dissertação.

Por fim, quero agradecer a todos os professores do departamento de engenharia civil da FCT/UNL, por todos os ensinamentos, conselhos e motivação.

Resumo

Esta Dissertação tem como principal objetivo estudar, com base no modelo numérico IH-2VOF, a interação da agitação marítima com uma estrutura de aproveitamento da energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) aberta. Este tipo de estrutura enquadra-se no grupo dispositivos de conversão de energia das ondas mais estudados atualmente, já que, a sua inclusão em estruturas marítimas, tais como quebra-mares, permite o aproveitamento de energia que, de outra forma, seria dissipada.

Especificamente, procura-se compreender o funcionamento da CAO, os fenómenos resultantes da interação onda/estrutura e a eficiência hidrodinâmica do dispositivo. Para tal, foi realizado um conjunto de simulações em modelo numérico, à escala reduzida (1:35) e à escala protótipo (1:1), utilizando condições de agitação marítima recorrentes na costa portuguesa.

Numa primeira fase, o modelo numérico IH-2VOF é calibrado e validado através da comparação entre os resultados numéricos e experimentais, obtidos em ensaios realizados recentemente num canal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Essa comparação centra-se nos valores de elevação de superfície livre e no cálculo dos fenómenos intrínsecos à CAO (fator de amplificação, *sloshing* e ângulo de fase). Para quantificar a aproximação de resultados, calcularam-se alguns parâmetros estatísticos, como o erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância. Numa segunda fase, realiza-se um estudo da hidrodinâmica e da geometria da CAO, visando obter a configuração geométrica associada com a máxima eficiência hidrodinâmica para as condições de agitação em estudo. São analisadas duas dimensões da estrutura: (i) o comprimento submerso da parede frontal; (ii) o comprimento da câmara interna.

No que respeita à calibração e validação do modelo IH-2VOF, verifica-se boa concordância entre resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre, com valores RMSE menores que 5% e níveis de concordância superiores a 91%. É ainda de realçar, que existe uma boa reprodução pelo método numérico de todos os fenómenos resultantes da interação onda/estrutura, verificados durante os ensaios experimentais. No estudo da otimização da geometria da CAO, verifica-se que existe uma maior amplificação da coluna de água quando a parede frontal está menos submersa e câmara interna é estreita. Menores comprimentos de submersão da parede frontal estão associados a menores velocidades, menor intensidade dos vórtices e menos reflexão das ondas incidentes. No entanto, o valores da geometria da CAO ótimos não devem ser estabelecidos tendo apenas em consideração o fator de amplificação, uma vez que existem exigências funcionais que devem ser respeitadas.

Palavras chave:

- CAO - Coluna de Água Oscilante.
- Modelação numérica.
- IH-2VOF.
- Calibração.
- Eficiência hidrodinâmica.
- Otimização geométrica.

Abstract

This work concerns the study, based on the numerical model IH-2VOF, of a Wave Energy Converter (WEC), specifically, a first generation Oscillating Water Column structure (OWC). These, fall within the group of WEC's that are currently most studied, being that, the inclusion of OWC's in maritime structures such as breakwaters, allows energy, that would otherwise be dissipated, to be converted into electricity.

Specifically, the study regards the interaction between the sea waves and the structure, the resulting phenomenons of that interaction and the hydrodynamic efficiency of the converter. To this end, a set of numerical simulations were conducted, considering both reduced scale model of 1:35 (model scale) and full scale model of 1:1 (prototype scale), considering the most prevalent sea wave conditions in the Portuguese coast.

Firstly, a calibration and validation process of the numerical model was carried out, comparing the numerical results with experimental results, obtained by physical model tests on a schematic OWC structure at the National Laboratory of Civil Engineering. This comparison was based on the free surface values and the calculation of the intrinsic phenomena of the OWC (amplification factor, *sloshing* and phase angle). Statistic parameters such as the root mean square error and the agreement index were used to qualify the approximation degree of the results. On a second analysis, a study of the hydrodynamic properties and the structural geometry is developed, looking to obtain the geometric configuration that is associated with the maximum hydrodynamic efficiency. Two structural dimensions are analysed: (i) the submersion length of the front wall; (ii) the width of the internal chamber.

Regarding the calibration and validation process, minor errors were obtained between the numerical and experimental free surface results, being that, the values of *RMSE* were always smaller than 5% and the agreement index always higher than 91%. It is established that all wave phenomena that results from the wave/structure interaction verified the experimental tests are reproduced in good agreement by the numerical model. In the geometrical study it appears that there is a higher amplification factor of the water column when the front wall is slightly submerged and the inner chamber is narrow. Minor submersion lengths of the front wall are associated with lower velocities, less intensity of the vortexes and less reflection of the incident waves. However, the optimum geometrical values, should not be established taking into account only the amplification factor, since there are functional requirements that must be met.

Keywords:

- OWC - Oscillating Water Column.
- Numerical Modelling.
- IH-2VOF.
- Calibration.
- Hydrodynamic efficiency.
- Geometrical optimization.

Índice de Matérias

Índice de Matérias	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Contexto Geral e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da Dissertação	2
1.4 Publicações	2
2 Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas: Coluna de Água Oscilante	3
2.1 Coluna de Água Oscilante	3
2.2 Otimização da geometria	8
3 Agitação marítima e interação onda-estrutura	11
3.1 Agitação Marítima	11
3.2 Interação onda/estrutura	16
3.2.1 Reflexão	16
3.2.2 Rebentação	17
3.2.3 Fator de Amplificação	18
3.2.4 Ângulo de fase	18
3.2.5 <i>Sloshing</i>	18
4 Modelo Numérico - IH-2VOF	21
4.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS	22
4.2 Volume de Fluido - VOF	23
4.3 Fronteiras sólidas	24
4.4 Discretização do domínio - CORAL	25
4.5 Ficheiro de Entrada - IH-2VOF	28

5	Modelação numérica de uma CAO	31
5.1	Ensaio em modelo físico	31
5.2	Calibração e validação do modelo numérico	34
5.2.1	Domínio numérico	35
5.2.2	Análise da altura de onda incidente	39
5.2.3	Análise de Convergência	43
5.2.4	Análise do modelo de turbulência	44
5.2.5	Validação do modelo numérico	46
5.3	Estudo da geométrica da CAO	51
5.3.1	Influência do período de onda na hidrodinâmica da CAO	54
5.3.2	Influência da variação de d/h na hidrodinâmica da CAO	57
5.3.3	Influência de d/h no fator de amplificação e frequência de ressonância para $B/h=1.33$	59
5.3.4	Influência de B/h no fator de amplificação e frequência de ressonância para $B/h=1.00$	63
6	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Desenvolvimentos Futuros	69
	Bibliografia	70
	Apêndices	73
	A	73
	B	87
	B.1 Ficheiro <i>Output</i> - CORAL	88
	B.2 Ficheiro <i>Input</i> - IH-2VOF	89
	C	93
	C.1 Calibração - Altura de onda	94
	C.2 Calibração - Convergência	99
	C.3 Calibração - Turbulência	102
	D	105
	E	109

Índice de Figuras

2.1	Esquema geral de uma CAO.	4
2.2	Corte vertical $A-A'$ na figura 2.1.	4
2.3	Sequência de conversão energética de uma CAO.	5
2.4	”Multiresonant OWC” (Brooke, 2003).	6
2.5	LIMPET (QUB, 2002).	6
2.6	Central do Pico (WavEC, 2015).	7
2.7	Central do Mutriku (MARINET, 2015).	8
2.8	Esquema geométrico da CAO	9
3.1	Classificação dos tipos de ondas, de acordo com o valor do período de onda, adaptado de Munk (1950). A curva está associada com a amplitude relativa.	12
3.2	Perfil longitudinal de uma onda regular (referencial espacial ou temporal)	13
3.3	Reflexão numa estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante.	17
3.4	Exemplo de sloshing de um líquido inserido num compartimento.	19
4.1	Esquema dos tipos de células interpretados pelo VOF, adaptado de IH Cantabria (2012).	25
4.2	Exemplo de um domínio numérico definido no CORAL, adaptado de IH Cantabria (2012).	26
4.3	Sub-zonas que constituem o domínio numérico gerado pelo CORAL, assim como os parâmetros que as definem.	27
4.4	Exemplo de parte de uma malha gerada pelo CORAL e introduzida no IH-2VOF, que contempla uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante.	28
5.1	Configuração do canal onde foram realizados os ensaios experimentais, com a estrutura e o equipamento de medição.	32
5.2	Fotografia do canal e de um dos ensaios realizados.	33
5.3	Discretização da malha do <i>Domínio I</i> , com as sub-zonas que a constituem.	36
5.4	Discretização da malha do <i>Domínio II</i> , com as sub-zonas que a constituem.	37
5.5	Malhas do <i>Domínio II</i>	38
5.6	Elevação da superfície livre na sonda junto à face exterior da parede frontal da CAO ($G5$).	40
5.7	Elevação da superfície livre na sonda intermédia da CAO ($G7$).	40
5.8	Ondas no intervalo de análise definido para o cálculo dos parâmetros estatísticos na sonda $G8$	41
5.9	Representação gráfica do $RMSE$ e ic para as diferentes alturas e malhas.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

5.10	Análise de convergência das malhas.	43
5.11	Elevação da superfície livre na sonda $G5$	45
5.12	Elevação da superfície livre na sonda $G7$	45
5.13	Validação do modelo numérico pela análise do ângulo de fase e do <i>sloshing</i>	46
5.14	Validação do modelo numérico pela análise do fator de amplificação.	47
5.15	$T = 0.89s$ - Instante de elevação máxima junto ao exterior da parede frontal.	47
5.16	$T = 0.89s$ - Instante de amplificação da CAO.	48
5.17	$T = 0.89s$ - Instante onde se verifica a interação entre um onda incidente e uma onda refletida pela parede frontal da estrutura.	48
5.18	$T = 0.89s$ - Instante em que se verifica rebentação no modelo IH-2VOF.	48
5.19	$T = 1.15s$ - Rebentação no exterior da CAO.	49
5.20	$T = 1.15s$ - Rebentação no interior da CAO.	50
5.21	$T = 1.60s$ - Rebentação no exterior da CAO.	50
5.22	$T = 1.60s$ - Rebentação no interior da CAO.	50
5.23	Configuração geométrica com $d/h = 0.3$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	52
5.24	Configuração geométrica com $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	52
5.25	Configuração geométrica com $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	53
5.26	Configuração geométrica com $d/h = 0.6$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	53
5.27	Configuração geométrica com $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.00$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	53
5.28	Configuração geométrica com $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.00$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	54
5.29	$T = 8.00s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	55
5.30	$T = 11.24s$ e $T = 13.08s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	56
5.31	$T = 6.80s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.3$ e $B/h = 1.33$ ou $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.33$	57
5.32	$T = 6.80s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$ ou $d/h = 0.6$ e $B/h = 1.33$	58
5.33	Variação do fator de amplificação com d/h e com o período de onda.	59
5.34	$T = 5.27s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	61
5.35	$T = 6.80s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	62
5.36	Variação do ângulo de fase com d/h e com o período de onda.	63
5.37	Variação do fator de amplificação com d/h , com B/h e com o período de onda.	64
5.38	$T = 9.46s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	65
C.1	Elevação da superfície livre na sonda $G3$	94
C.2	Elevação da superfície livre na sonda $G4$	94

C.3	Elevação da superfície livre na sonda $G6$	95
C.4	Elevação da superfície livre na sonda $G8$	95
C.5	Média da elevação da superfície livre das sondas $G6$, $G7$ e $G8$ (G_m).	95
C.6	Elevação da superfície livre na sonda $G3$	96
C.7	Elevação da superfície livre na sonda $G4$	97
C.8	Elevação da superfície livre na sonda $G5$	97
C.9	Elevação da superfície livre na sonda $G6$	97
C.10	Elevação da superfície livre na sonda $G7$	98
C.11	Elevação da superfície livre na sonda $G8$	98
C.12	Média da elevação da superfície livre das sondas $G6$, $G7$ e $G8$ (G_m).	98
C.13	Elevações da superfície livre na sonda $G3$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	99
C.14	Elevações da superfície livre na sonda $G4$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	99
C.15	Elevações da superfície livre na sonda $G5$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	100
C.16	Elevações da superfície livre na sonda $G6$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	100
C.17	Elevações da superfície livre na sonda $G7$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	100
C.18	Elevações da superfície livre na sonda $G8$, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	101
C.19	Média das elevações da superfície livre nas sonda $G6$, $G7$ e $G8$ (G_m), obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.	101
C.20	Elevações das superfícies livres na sonda $G3$	102
C.21	Elevações das superfícies livres na sonda $G4$	102
C.22	Elevações das superfícies livres na sonda $G6$	103
C.23	Elevações das superfícies livres na sonda $G8$	103
C.24	Média das elevações da superfície livre nas sonda $G6$, $G7$ e $G8$ (G_m).	103
D.1	$T = 5.27s$, $T = 6.80s$ e $T = 8.00s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	106
D.2	$T = 9.46s$, $T = 11.24s$ e $T = 13.08s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$	107
E.1	$T = 8.00s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	110
E.2	$T = 9.46s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	110
E.3	$T = 11.24s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	111
E.4	$T = 13.08s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.	111

Índice de Tabelas

2.1	Parâmetros geométricos das estruturas descritas	10
3.1	Tipos de rebentação consoante I_r (Battjes, 1974)	18
5.1	Distância ao batedor das sondas nos ensaios em modelo físico.	32
5.2	Condições de agitação testadas nos ensaios experimentais.	33
5.3	Critérios a cumprir para uma onda com $H = 0.038m$ e $T = 0.89s$	35
5.4	Espaçamentos das sub-zonas que constituem o <i>Domínio I</i>	36
5.5	Sub-zonas horizontais e espaçamentos em cada malha do <i>Domínio II</i>	37
5.6	Sub-zonas verticais e espaçamentos em cada malha do <i>Domínio II</i>	37
5.7	Frequências de amostragem, f_s , e tempos de simulação, $T_{sim.}$, para as condições de agitação testadas na fase de calibração e validação do modelo numérico.	39
5.8	Posição das sondas no modelo numérico, nos <i>Domínios I e II</i>	39
5.9	Parâmetros estatísticos que classificam a precisão da solução numérica obtida pela malha m_1 para a altura de onda de 0.038 metros.	41
5.10	Parâmetros estatísticos que classificam a precisão da solução numérica obtida pela malha m_1 para a altura de onda de 0.040 metros.	42
5.11	Condições de agitação testadas nas simulações à escala do protótipo.	51
5.12	Simulações realizadas para o estudo da geometria da CAO.	54
C.1	Parâmetros estatísticos relativos à malha m_2 e com altura de onda de 0.038 metros.	96
C.2	Parâmetros estatísticos relativos à malha m_2 e com altura de onda de 0.040 metros.	96
C.3	Parâmetros estatísticos relativos à malha m_3 e com altura de onda de 0.038 metros	99

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

Abreviaturas

- CAO - Coluna de Água Oscilante
FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia
ic - Índice de concordância
IH - Instituto Hidrográfico
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NR - Nível de repouso da superfície livre
OWC - Oscillating Water Column
RANS - *Reynolds Average Navier-Stokes Equations*
RMSE - *Root Mean Square Error*
kW - kilowatt
TW - terawatt
UNL - Universidade Nova de Lisboa
VOF - Volume of Fluid
WEC - *Wave Energy Center*
2D - Bidimensional
3D - Tridimensional

Índices e Operadores

- $\Delta()$ - Variação de grandezas físicas
 $D()$ - Derivada material
 $\partial()$ - Derivada parcial
 $()_{i \text{ ou } j}$ - Índice de direção espacial

Letras Latinas

- A_c - Amplitude da crista

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- A_o - Amplitude da onda
 A_s - Amplitude da cava
 B - Comprimento da câmara interna da CAO
 c - Velocidade de fase da onda
 c_g - Velocidade de grupo
 c_o - Velocidade da onda numa dada posição
 d - Submersão da parede frontal da CAO
 f_f - Frequência fundamental da CAO
 f_s - Frequência de amostragem no IH-2VOF
 f - Frequência
 F - Função do VOF
 g - Aceleração da gravidade
 h - Profundidade
 H - Altura de onda
 H_i - Altura da onda incidente
 H_m - Altura média
 H_{max} - Altura máxima
 H_s - Altura significativa
 L - Comprimento de onda
 L_x - Comprimento do domínio numérico
 L_y - Altura do domínio numérico
 m - Unidade de comprimento
 p - Campo de pressões
 \bar{p} - Pressão média
 p' - Variações turbulentas de pressão
 s - Unidade temporal
 t - Tempo ou instante temporal
 t_f - Duração de uma série de ondas
 T - Período de onda
 T_f - Período fundamental da CAO
 T_m - Período médio
 T_{max} - Período máximo
 T_p - Período de pico

T_s - Período de significativo

S - Área da secção transversal da CAO

$T_{sim.}$ - Tempo de simulação numérica

\mathbf{u} - Campo de velocidades

$u = u_x$ - Componente horizontal do campo de velocidades

\bar{u} - Velocidade média

u' - Variações turbulentas de velocidade

$v = u_y$ - Componente vertical do campo de velocidades

u_z - Componente perpendicular do campo de velocidades

V - Volume de integração

V_a - Volume de ar de cada célula

V_c - Volume de fluído de cada célula

x - Eixo horizontal do domínio

y - Eixo vertical do domínio

Letras Gregas

α - Ângulo que a parede frontal da CAO faz com a horizontal

Δt - Intervalo de tempo

Δx - Dimensão de uma célula segundo o eixo x

Δy - Dimensão de uma célula segundo o eixo y

η - Elevação da superfície livre

κ - Energia cinética turbulenta

ε - Dissipação da energia cinética turbulenta

ρ - Massa volúmica do fluído

ρ_c - Densidade de cada célula

τ_{ij} - Tensões tangenciais (tensões viscosas)

$\overline{\tau_{ij}}$ - Tensões tangenciais médias (tensões viscosas)

θ - Ângulo de fase

θ_i - Ângulo de incidência da onda

θ_r - Ângulo da onda refletida

ν_f - Viscosidade turbulenta

ξ - Declividade da onda

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto Geral e Motivação

Os níveis de consumo energético são uma das formas mais diretas para quantificar o progresso e prosperidade de uma sociedade (López et al., 2013). Aliadas aos avanços científicos e industriais, à escassez de formas de energias tradicionais (combustíveis fósseis) e ao contínuo aumento das necessidades energéticas, as energias renováveis surgem como a forma mais viável de garantir uma evolução sustentável.

A energia das ondas tem vindo a ser alvo de estudos cada vez mais aprofundados, por forma a atingir o potencial a si associado, estando este quantificado pelo valor de $1\ TW$ (Panicker, 1976). Comparando algumas das suas características com as das energias renováveis mais comuns (eólica e solar), verificam-se algumas vantagens: (i) as ondas viajam grandes distâncias com pouca perda de energia, ou seja, se a zona de geração for na região oeste do Atlântico estas viajam até à Europa com reduzida dissipação (Drew et al., 2009); (ii) a intensidade energética estimada por área do planeta apresenta valores de $2 - 3\ kW/m^2$, face aos $0.4 - 0.6\ kW/m^2$ da energia eólica e $0.1 - 0.2\ kW/m^2$ da energia solar; (iii) os conversores de energia das ondas conseguem produzir durante cerca de 90% do seu tempo de atividade, uma vez que existe sempre movimento nos oceanos, face aos 20% a 30% da energia eólica, que é muito condicionada pela necessidade de uma velocidade do vento considerável (López et al., 2013). Estes dispositivos podem ser utilizados em alto mar ou em zonas costeiras, com a particularidade de ser possível a sua inclusão em estruturas de proteção marítima (quebra-mares, etc.), exemplificando uma característica de multi-funcionalidade e de reduzido impacto ambiental (Falcão, 2010).

Apesar das estruturas de aproveitamento da energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) estarem já bastante estudadas, e existirem protótipos à escala real construídos, para que a energia proveniente das ondas possa vir a ser imposta em definitivo como uma tecnologia economicamente rentável e estruturalmente fiável, são necessários mais estudos focados no seu dimensionamento, na modelação da interação onda/estrutura, na otimização da geometria estrutural, na eficiência dos conversores de energia, na sua estabilidade a longo prazo, nos métodos construtivos e de instalação, e nos seus procedimentos de manutenção. Este trabalho incide sobre alguns dos tópicos acima mencionados, nomeadamente, aspetos de dimensionamento, na otimização da geometria estrutural e na modelação da interação onda/estrutura. Procura-se desta forma, contribuir para o conhecimento do funcionamento deste tipo de estruturas de aproveitamento da energia das ondas.

1.2 Objetivos

Este trabalho está inserido num projeto de investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): DITOWEC - *Development of an Integrated Tool for Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in Vertical Breakwaters* com a referência PTDC/ECM-HID/1719/2012 FCT, Portugal. Pretende-se estudar, com recurso a um modelo numérico, a interação da agitação com uma estrutura de aproveitamento de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante, não incluindo a simulação do ar. A primeira fase desta Dissertação, prende-se com a calibração e validação do modelo numérico IH-2VOF, verificando a fiabilidade da propagação da agitação marítima e a reprodução dos fenómenos associados com a interação entre as ondas e a CAO. Este processo tem como valores de referência, resultados obtidos em ensaios experimentais realizados num canal do LNEC, à escala 1:35. Após calibração, utiliza-se o modelo numérico para otimizar a geometria estrutural da CAO, nomeadamente as suas formas geométricas e as dimensões interiores da estrutura. Esta otimização visa proporcionar a maior amplificação da onda no interior da CAO, ou seja, o maior impulso de ar na turbina e conseqüente maior produção de energia elétrica.

1.3 Organização da Dissertação

A presente Dissertação desenvolve-se ao longo de seis Capítulos, o primeiro dos quais é a presente introdução. No segundo Capítulo são apresentadas algumas estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante já construídas, as suas características e problemas durante o seu tempo de funcionamento. São ainda definidos os parâmetros geométricos analisados ao longo desta dissertação. O terceiro Capítulo descreve os conceitos teóricos utilizados para quantificar a agitação marítima, assim como os fenómenos associados com a interação onda/estrutura, em particular para as CAO. A teoria de ondas utilizada é a Teoria Linear. O quarto Capítulo descreve de uma forma resumida o método numérico implementado no modelo IH-2VOF: as equações resolvidas numericamente, as características específicas do modelo, a definição da malha que discretiza o domínio numérico e alguns cuidados a ter na sua definição. No quinto Capítulo, é apresentado o caso de estudo desta Dissertação. Numa primeira parte é feita uma calibração e validação do modelo numérico IH-2VOF e numa segunda fase, após validado o programa, é realizado um estudo geométrico das dimensões da CAO que estão associadas à melhor eficiência hidrodinâmica da mesma. São ainda descritos os ensaios realizados em modelo físico num canal de ondas do LNEC. Finalmente, o sexto e último Capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho e alguns possíveis desenvolvimentos futuros.

1.4 Publicações

Esta dissertação contribuiu para o trabalho apresentado no artigo científico ”*Design and optimization of an oscillating water column wave energy converter* - A. Mendonça, L. Jalon, R. Correia, J. Dias, M.G. Neves and E. Didier”, apresentado na *SCACR2015 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, realizada entre 28 de Setembro e 1 de Outubro de 2015 em Florença, Itália.

O artigo referido é apresentado no Apêndice A.

Capítulo 2

Dispositivo de aproveitamento da energia das ondas: Coluna de Água Oscilante

Neste capítulo é apresentado em primeiro lugar, um resumo histórico do desenvolvimento dos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, em particular, os do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). De seguida, são identificadas algumas estruturas do tipo CAO já construídas, bem como os problemas que surgiram ou têm surgido durante o seu tempo de serviço. Por fim, é feita uma descrição do funcionamento das CAO e da forma como os parâmetros geométricos influenciam a interação entre as ondas incidentes e a estrutura.

Durante últimos anos, têm vindo a ser desenvolvidos e propostos vários dispositivos de conversão de energia das ondas. Estes podem ser classificados segundo múltiplos critérios: (i) tipo de construção, podendo ser flutuantes ou fixos ao fundo do mar; (ii) localização, sendo classificados de primeira geração, para implementação perto da costa, de segunda geração para profundidades entre 10 a 25 metros e de terceira geração para dispositivos ao largo; (iii) tamanho e disposição geométrica segundo a direção das ondas, onde os atenuadores (*attenuators*) e terminadores (*terminators*) são estruturas longas que funcionam em paralelo ou em perpendicular com a direção de propagação das ondas, respetivamente, e os absorsores pontuais (*point absorbers*), que extraem energia de agitação proveniente de qualquer direção, sendo estes de dimensões mais pequenas quando comparadas com o comprimento de onda incidente; (iv) princípio de funcionamento, onde existem as categorias de diferencial de pressão, galgamento e impactos. Uma explicação mais detalhada de cada classificação pode ser encontrada em Falcão (2010) e em López et al. (2013).

Dentro dos critérios de classificação indicados, as estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante analisadas nesta Dissertação são: de primeira geração, com construção fixa, de dimensões mais pequenas que o comprimento da onda incidente (*point absorber*) e, caracterizadas por funcionamento segundo diferencial de pressão da coluna de ar no seu interior.

2.1 Coluna de Água Oscilante

Dentro das várias tecnologias de conversão da energia das ondas, os dispositivos em Coluna de Água Oscilante constituem uma das opções mais populares atualmente. Estes materializam-se

CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

por uma estrutura oca e parcialmente submersa, que no seu interior se divide em duas partes: a parte submersa ou inferior, constituída pela coluna de água, e a parte emersa ou superior, constituída pela coluna de ar e onde está normalmente instalado o conjunto turbina/gerador de energia eléctrica. A figura 2.1 esquematiza uma CAO instalada em zona costeira.

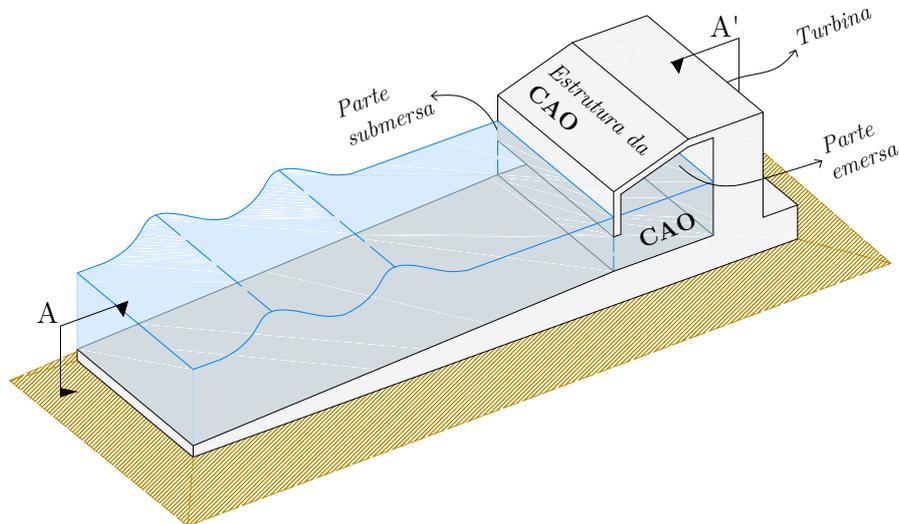


Figura 2.1: Esquema geral de uma CAO.

A câmara interna é caracterizada por ter as suas extremidades em ambientes distintos: a parte submersa possibilita a entrada ou saída livre da água e a parte emersa, promove a circulação de correntes de ar. O mecanismo associado à produção de energia caracteriza-se por um movimento em série, onde a agitação marítima incidente origina a oscilação da coluna de água no interior da estrutura e esta, por sua vez, impulsiona a coluna de ar, fazendo girar a turbina. Identificam-se dois sentidos de escoamento na turbina: o primeiro quando a coluna de água interior descreve um movimento ascendente, impulsionando o ar a passar pela mesma, e o segundo, quando a ação reestabeecedora da gravidade faz inverter o sentido do escoamento da coluna de água e o nível desta baixa, provocando uma depressão e conseqüente circulação do ar na direção contrária à anterior (figura 2.2).

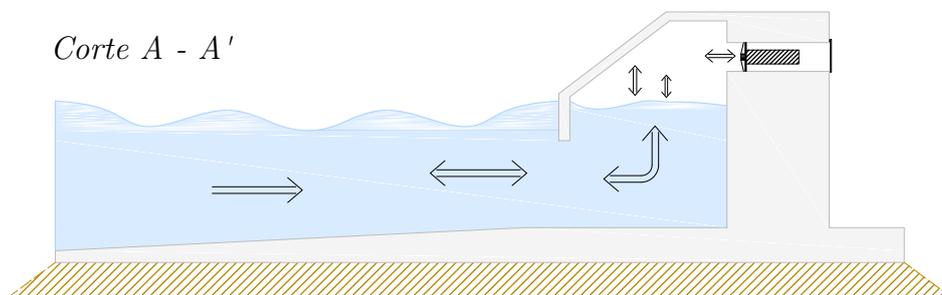


Figura 2.2: Corte vertical A-A' na figura 2.1.

Para aproveitar os dois sentidos de escoamento do ar na conduta, induzido pelo movimento oscilatório da água no interior da câmara, é normalmente utilizada a turbina do tipo *Wells*,

2.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

inventada por *Alan Arthur Wells*, e que possui a propriedade de movimentar o veio do gerador elétrico no mesmo sentido de rotação, independentemente do sentido de escoamento do ar.

As várias fases que constituem o processo de produção de energia elétrica através de energia das ondas, por meio de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante, são esquematizados na figura 2.3. A oscilação da coluna de água interna, induz a compressão do volume de ar acima, originando energia pneumática. As correntes de ar estabelecidas, ao passarem pela turbina, provocam a rotação desta, criando de energia mecânica. A fase final desta sequência, incide sobre a transformação da energia proveniente da rotação da turbina em energia elétrica, conseguindo-se esta por meio de um alternador.

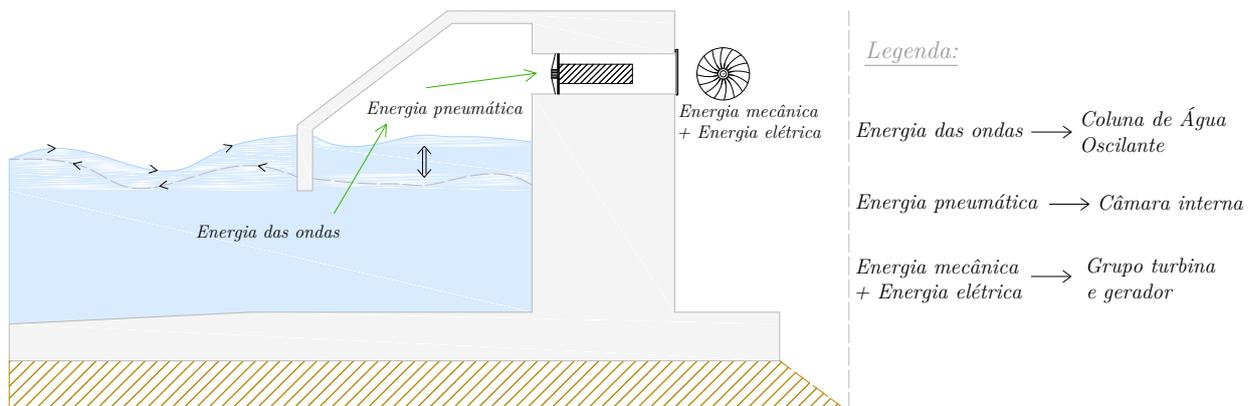
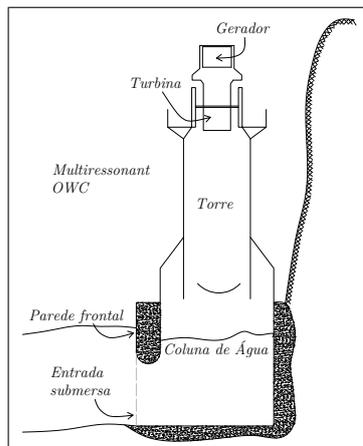


Figura 2.3: Sequência de conversão energética de uma CAO.

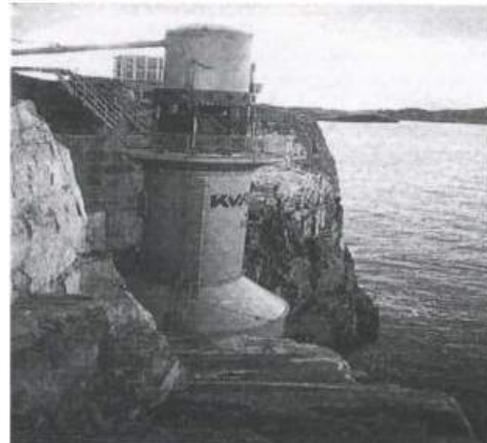
O primeiro nome que figura na área do aproveitamento da energia das ondas para o abastecimento de sistemas elétricos é o de *Yoshio Masuda*. Em meados da década de 60 do século **XX**, *Masuda* desenvolveu as primeiras boias de sinalização marítima alimentadas pela energia das ondas. De facto, esta foi a primeira tecnologia de Coluna de Água Oscilante, uma vez que o movimento de flutuação da boia origina a oscilação de uma coluna de água no seu interior (Setoguchi and Takao, 2006).

Como resultado da crise petrolífera de 1973, a energia das ondas surgiu nos programas de investigação e desenvolvimento de múltiplos países (Reino Unido, Irlanda, Portugal, Noruega, Suécia, Dinamarca, Japão, Estados Unidos da América, etc.). Mais concretamente a nível Europeu, a Noruega foi um dos primeiros países a avançar com a indústria da energia das ondas. Em 1985, foi construída uma estrutura de teste (em Coluna de Água Oscilante) na zona de *Toftestallen*, à qual estava associada uma capacidade de produção teórica de 500 kW. Este dispositivo, desenvolvido por *Kvaerner Burg* e denominado de "*Multiresonant OWC*" (sub-figuras 2.4a e 2.4b), materializou-se como uma estrutura em torre cilíndrica, de 18.6 metros de altura, 7.0 metros de diâmetro na base e 3.5 metros no topo. O sistema funcionou bem, contribuindo para o fornecimento energético da rede nacional (Brooke, 2003). Em 1988 a estrutura foi severamente danificada devido a uma tempestade, apresentando estragos significativos que conduziram à desativação da mesma. No entanto, de acordo com Brooke (2003), resultaram algumas lições valiosas deste projeto: (i) produção de energia elétrica de uma forma contínua e a uma escala considerável durante cerca de três anos; (ii) a rotura da estrutura deu-se na ligação entre a câmara de betão e a torre metálica (devido a fadiga), sugerindo que o uso de um único material poderia ter minimizado os danos.

CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE



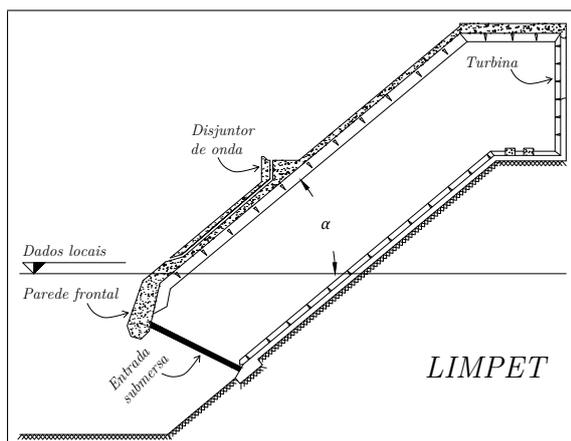
(a) Corte vertical (Brooke, 2003).



(b) Fotografia real (Brooke, 2003).

Figura 2.4: "Multirressonant OWC" (Brooke, 2003).

Nos anos seguintes foram construídas mais centrais piloto na Europa. São de salientar as centrais da ilha de *Islay* na Escócia (LIMPET) e da ilha do *Pico* nos Açores, Portugal. A LIMPET surgiu como a continuação natural do sucesso de um protótipo de 75 kW que esteve instalado na ilha entre 1991 e 1999. Durante este período de 8 anos o protótipo funcionou como um dispositivo de investigação, gerando um conjunto de informação que se viria a revelar bastante útil como valores de referência para comparações com estudos laboratoriais e numéricos. Os dados obtidos incidiam maioritariamente sobre a oscilação da coluna de água interna, os picos de eficiência energética e a degradação da estrutura. No ano 2000, foi então construída a central LIMPET (sub-figuras 2.5a e 2.5b), desenvolvida pela empresa *Wavegen* em cooperação com a *Queen's University Belfast*, sendo esta a primeira central de produção de eletricidade a entrar em serviço comercial.



(a) Corte vertical.



(b) Fotografia real.

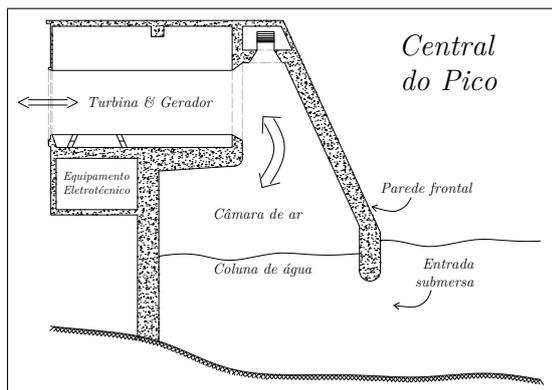
Figura 2.5: LIMPET (QUB, 2002).

À central LIMPET está associada uma potência de 500 kW, conseguida por três colunas de água e uma turbina. As três câmaras internas têm uma secção em planta quadrada com 6.0

2.1. COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

metros e perfazem um ângulo com a horizontal de 40.0 graus, procurando fornecer um caminho fácil para a água, que origine menos turbulência e consequentemente menos perda de energia (Webb et al., 2005). A profundidade na zona da parede frontal é de 6.0 metros e a submersão da parede frontal de 2.0 metros (QUB, 2002). A central, até 2010, já tinha trabalhado mais de 60 000 horas ligada à rede comercial (LIMPET, 2010).

A central europeia piloto na ilha do Pico foi construída procurando demonstrar a viabilidade energética de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante na rede de distribuição elétrica numa ilha pequena (sub-figuras 2.6a e 2.6b)¹.



(a) Secção vertical.



(b) Fotografia real.

Figura 2.6: Central do Pico (WavEC, 2015).

Esta foi dimensionada pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST) e é gerida e mantida pelo *Wave Energy Center* (WavEC) desde 2004. Encontra-se instalada numa zona com profundidades de 7.0 metros, a parede frontal perfaz um ângulo de 60.0 graus com a horizontal e está submersa 2.5 metros e o comprimento da câmara interna é de 10.0 metros. A sua construção iniciou-se em 1991 e terminou em 1999. Nesse mesmo ano iniciaram-se testes na central. Contudo, surgiram múltiplos problemas técnicos e agregando esses à falta de financiamento, o projeto esteve interrompido durante seis anos. Em 2005, foram realizados novos testes, revelando a persistência de limitações técnicas ao nível da estrutura original (turbina-gerador). No entanto, continuaram a ser feitos esforços por forma a melhorar a estação, promovendo mais horas de funcionamento, ou seja, mais produção de energia. Em 2010 introduziram-se melhoramentos, nomeadamente com a adição de um sistema de controlo automático que permitiu uma operação autónoma sem um operador *"in situ"*. Depois de testes bem sucedidos, a estrutura esteve com uma produção contínua entre Setembro e Dezembro de 2010, produzindo durante 1450 horas (Kelly, 2013). Resumidamente, a Central do Pico é reconhecida como uma das primeiras do seu tipo e escala. Apesar do seu tempo de serviço ser caracterizado por alguns períodos de interrupção, esta apresenta-se como uma central de investigação e estudo importante para desenvolvimentos futuros, tendo sido incluída na MARINET (*European Marine Renewable Infrastructure Network*)². O facto de estar construída desde 1999, num local caracterizado por incidência constante de forte agitação marítima, permite compreender a resposta temporal da estrutura de betão ao clima de agitação. Mais ainda, todos os problemas ligados à parte ele-

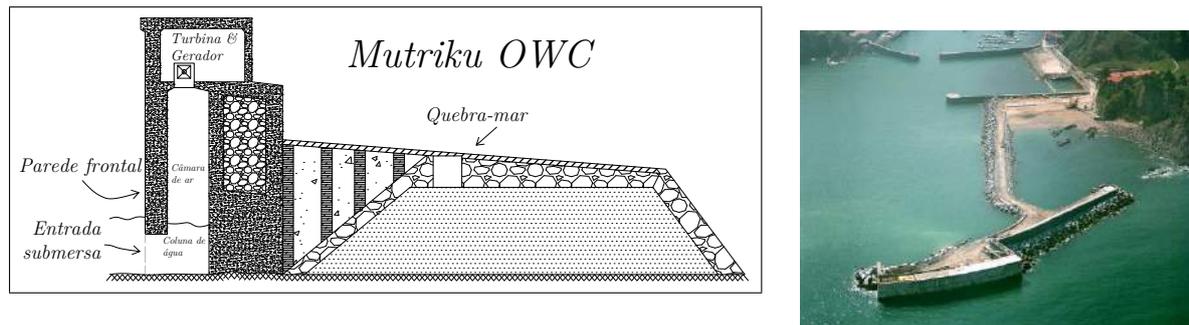
¹ver <http://www.save-pico-powerplant.org/>

²ver <http://www.fp7-marinet.eu/WavEC-wavec-pico-owc.html>

CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

trotécnica dos sistemas de controlo permitem uma melhor compreensão da forma como deve ser monitorizado o funcionamento do dispositivo (Kelly, 2013).

Ainda a título de exemplo, a primeira estação europeia de produção de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante construída num quebra-mar, foi em *Mutriku*, Espanha (sub-figuras 2.7a e 2.7b). Inaugurada em 2011, foi construída com o objetivo de produzir energia para 250 habitações. Integrada num quebra-mar com 440.0 metros, a estrutura é composta por 16 câmaras internas com uma turbina em cada. Cada câmara tem 4.5 metros de comprimento, 3.1 metros de profundidade submersa e 10.0 metros de altura total.



(a) Secção transversal - 1 Câmara da Central de Mutriku.

(b) Fotografia real.

Figura 2.7: Central do Mutriku (MARINET, 2015).

2.2 Otimização da geometria

A análise física da interação entre as estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante e a agitação marítima incidente traduz-se num problema claramente dinâmico, onde estão presentes as grandezas que caracterizam e quantificam o movimento oscilatório (Veer and Thorlen, 2008): velocidades, acelerações, frequências próprias, por exemplo. Pode-se desde já afirmar que a energia capturada será tanto maior quanto mais o período característico da agitação incidente se aproxima do período fundamental da coluna de água interna (fenómeno de ressonância). Para o cálculo aproximado da frequência própria da CAO, adotou-se uma fórmula adaptada do modelo de Evans and Porter (1995) e desenvolvida para Colunas de Água Oscilante em escala maior por Veer and Thorlen (2008). O modelo tem em consideração a área transversal da CAO e a profundidade de implantação (equação 2.1).

$$f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h + 0.41S^{1/2}}} \quad (2.1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, h a profundidade na entrada submersa da CAO e S a área em planta da câmara da CAO.

Tipicamente, as CAO de primeira geração apresentam geometrias quadriláteras, onde as dimensões mais estudadas e consideradas como cruciais no seu funcionamento e eficiência hidrodinâmica são: o comprimento e a altura da câmara interna, a profundidade submersa da parede frontal e o ângulo que a estrutura faz com a horizontal (Evans and Porter, 1995). Estas estão identificadas na figura 2.8.

A inclinação da parede frontal da estrutura deve ser analisada por forma a ter em conta os efeitos da reflexão e do galgamento. É claro que uma parede vertical será muito refletiva, por-

tanto, ao refletir a agitação incidente também se reflete a energia que esta transporta, não sendo essa transformada em energia elétrica. Uma parede com um ângulo muito reduzido, diminui a capacidade refletora da estrutura, no entanto, o risco de ocorrer o fenômeno de galgamento aumenta, e estando este efeito relacionado com a dissipação de energia das ondas, é algo a evitar. De acordo com Teixeira et al. (2013), a profundidade submersa da parede frontal influencia a amplificação da coluna de água interna, uma vez que maiores comprimentos de submersão estão associados com uma maior distância a percorrer por parte das partículas (mais dissipação de energia). Com uma maior área submersa de parede frontal, a capacidade refletora da estrutura é maior e portanto, ao refletir energia espera-se que com maior submersão se diminua a eficiência hidrodinâmica.

É ainda de referir que, apesar de menores comprimentos de submersão da parede frontal estarem associado a uma maior quantidade de energia útil, segundo a lógica anterior, este parâmetro geométrico tem que ser controlado por um valor mínimo de submersão, uma vez que se deve evitar a entrada de ar pela fronteira submersa quando o nível da maré atinge o seu mínimo.

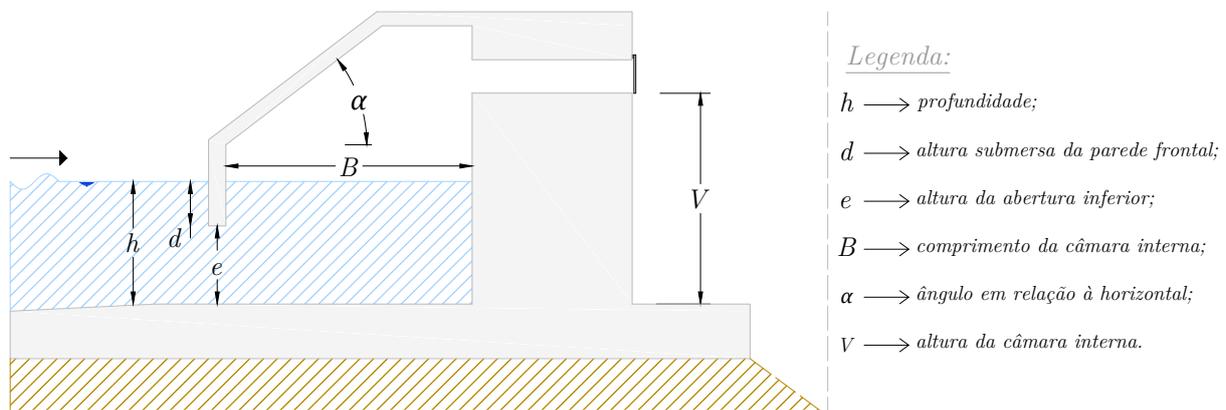


Figura 2.8: Esquema geométrico da CAO

Quanto ao comprimento da câmara interna, compreende-se que quanto mais estreita for, maior tenderá a ser a elevação da coluna de água. No entanto, para um valor muito pequeno, os efeitos não lineares do escoamento poderão conduzir a menos eficiência do dispositivo (Webb et al., 2005). A altura da câmara interna influencia o volume da coluna de ar. Apesar não ser óbvio de que forma este volume influencia a eficiência do dispositivo, este parâmetro também deve ser limitado a um valor mínimo, por forma a que não exista transmissão de água para a zona onde está instalada a turbina, quer devido a efeitos de oscilação da coluna de água, quer devido a efeitos da maré (Teixeira et al., 2013). É ainda de referir que, a profundidade da zona de implementação da estrutura deve ser suficiente, para que, não ocorra constantemente rebentação na parede frontal. O fenômeno de rebentação traduz a dissipação de grande parte da energia que as ondas transportam, portanto se existir rebentação grande parte da energia das ondas não é convertida.

No dimensionamento e otimização geométrica das estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante deve estar sempre presente o acoplamento entre a câmara interna e a turbina. Esta dependência é muito importante, uma vez que a eficiência separada de cada constituinte influencia o outro. Concretamente sobre a geometria da câmara, esta deve ser otimizada de forma

CAPÍTULO 2. DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS: COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

a que: (i) o fenómeno de ressonância ocorra para a agitação marítima com menor período de retorno na zona de implementação; (ii) se minimize os fenómenos de reflexão, galgamento, ou rebentação das ondas incidentes (energia não aproveitada); (iii) a parede frontal esteja sempre parcialmente submersa e não haja entrada de água para a turbina; (iv) a estrutura como um todo, seja capaz de resistir a condições extremas de agitação marítima e ação do vento (Teixeira et al., 2013).

A análise da geometria estrutural que maximiza a eficiência hidrodinâmica de uma CAO é feita pela relação da altura submersa da parede frontal com a profundidade (d/h) e pela relação entre o comprimento da câmara interna com a profundidade (B/h). Na tabela 2.1 são apresentados os valores dos parâmetros geométricos relativos a cada exemplo apresentado (LIMPET, Central do Pico, etc.).

Tabela 2.1: Parâmetros geométricos das estruturas descritas

Parâmetros Geométricos	h (m)	d (m)	B (m)	V (m)	α (°)	d/h (-)	B/h (-)
<i>Multiresonant OWC</i>	7.0	3.5	7.0	16.0	90.0	0.50	1.00
<i>LIMPET</i>	6.0	2.0	6.0	12.8	40.0	0.33	1.00
<i>Pico</i>	8.0	4.5	12.0	15.0	60.0	0.64	1.50
<i>Mutriku</i>	7.0	3.1	4.5	10.0	90.0	0.44	0.64

Capítulo 3

Agitação marítima e interação onda-estrutura

As ondas traduzem, em geral, uma variação de energia num meio físico previamente em estado de equilíbrio. Na natureza estas podem ser resultantes de diversos fenómenos e ocorrer em diversas formas.

Este capítulo contempla uma explicação geral das ondas marítimas; as suas possíveis origens, as suas características, a descrição da sua propagação e ainda, os tipos de ondas que podem ser utilizadas na produção de energia elétrica por meio de um dispositivo em Coluna de Água Oscilante. São também descritos os fenómenos envolvidos na interação onda/estrutura, como podem ser quantificados e de que a forma influenciam a eficiência do dispositivo.

3.1 Agitação Marítima

As ondas marítimas são a deformação da superfície livre do mar. Estas podem ser induzidas pela gravidade, por ventos ou terremotos. As ondas de marés são um exemplo de ondas geradas pela ação da gravidade, resultando da interação entre os campos gravitacionais da Lua e do Sol com as massas de água na Terra. Caracterizam-se por serem ondas de longo período, entre as 12 e 24 horas. A maré influencia o nível de água num dado local geográfico, afetando portanto o funcionamento das CAO de primeira geração. A diminuição da profundidade devido à alteração do nível da água pode estar ou não associada com a ocorrência de rebentação no local de implantação da estrutura e com a entrada de ar pela parte submersa da mesma. Portanto, o estudo geográfico relativo ao local de implantação das estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante de primeira geração deve ser definido tendo também em consideração a amplitude da maré (baixa amplitude).

O tipo de ondas que desperta maior interesse na área dos dispositivos de conversão de energia é o das ondas de vento (ondas de superfície ou de gravidade). A geração das ondas de vento dá-se pela transferência de energia do vento para a superfície do mar. Identificam-se três fatores críticos que influenciam as características das ondas geradas: a velocidade do vento, a duração da tempestade e o comprimento de água sobre a qual o vento atua (*fetch*). Às ondas na zona de geração dá-se o nome de *Vaga* e longe desta, após a sua propagação, o nome de *Ondulação* (*Swell*). Mais ainda, as ondas de vento são caracterizadas por terem períodos entre os 1 e 30 segundos, crescerem proporcionalmente com a intensidade da força de excitação (vento),

CAPÍTULO 3. AGITAÇÃO MARÍTIMA E INTERAÇÃO ONDA-ESTRUTURA

terem como força reestabelecadora do estado de equilíbrio a força da gravidade e como limite de propagação a rebentação, que dissipa a grande parte da energia que estas transportam. A sua atratividade ao nível da produção de energia elétrica deve-se a ocorrem com frequência e terem acopladas a si uma quantidade de energia considerável, podendo-se propagar desde a sua zona de geração até à costa sem grande perda de energia.

A figura 3.1 contém uma classificação dos tipos de ondas marítimas consoante algumas das suas características: a designação de cada tipo de onda, a força de excitação e o período/frequência da agitação.

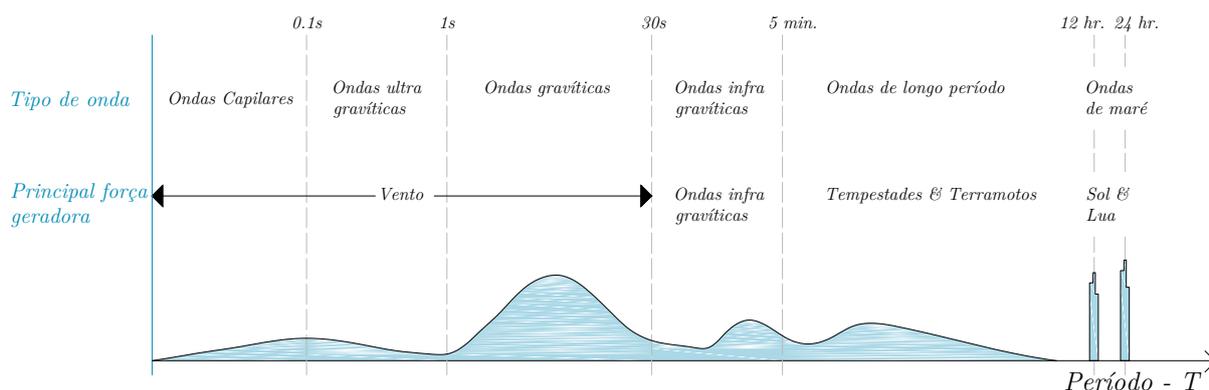


Figura 3.1: Classificação dos tipos de ondas, de acordo com o valor do período de onda, adaptado de Munk (1950). A curva está associada com a amplitude relativa.

Por forma a caracterizar e quantificar as ondas marítimas são definidos múltiplos parâmetros: de carácter geométrico, como a altura de onda, H , e o comprimento, L ; de carácter temporal, como o período de onda, T ; e parâmetros adimensionais como a declividade da onda, ξ . Na figura 3.2 identificam-se alguns desses parâmetros (Munk, 1950):

- (i) Elevação da superfície livre da água - η : Distância entre o nível de repouso da água e a superfície livre da mesma, num dado instante;
- (ii) Zero ascendente: Ponto de interceção entre a trajetória ascendente de elevação da superfície livre da onda e o nível da água em repouso (derivada positiva);
- (iii) Comprimento de onda - L : Distância entre dois pontos idênticos e sucessivos da superfície livre (por exemplo, entre dois zeros ascendentes);
- (iv) Período de onda - T : Intervalo de tempo entre a passagem de dois pontos idênticos e sucessivos da superfície livre (por exemplo, dois zeros ascendentes);
- (v) Crista: ponto mais alto da onda;
- (vi) Cava: ponto mais baixo da onda;
- (vii) Amplitude da crista - A_c : Distância vertical máxima entre o nível de repouso da superfície livre e a crista;
- (viii) Amplitude da cava - A_s : Distância vertical máxima entre o nível de repouso da superfície livre e a cava;
- (ix) Altura de onda - H : Distância vertical entre a crista e cava da onda;
- (x) Profundidade - h : Distância entre o nível da água e o fundo;

- (xi) Altura relativa - $H_{rel} = H/h$: Relação entre a altura da onda e a profundidade;
- (xii) Profundidade relativa - $h_{rel} = h/L$: Relação entre a profundidade e comprimento de onda;
- (xiii) Declividade da onda - $\xi = H/L$: Relação entre a altura de onda e o seu comprimento.

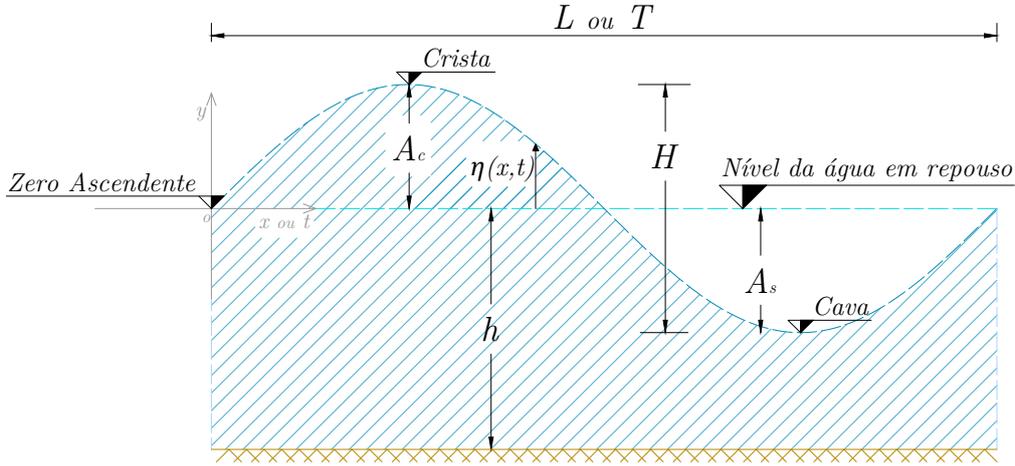


Figura 3.2: Perfil longitudinal de uma onda regular (referencial espacial ou temporal)

As ondas marítimas podem ser classificadas como ondas regulares ou irregulares. A agitação irregular engloba a maior parte das ondas reais, e é caracterizada por um movimento aleatório, onde uma onda pode apresentar características diferentes da onda anterior a si ou da onda seguinte. A análise deste tipo de agitação pode ser feita por duas metodologias: uma análise no domínio do tempo e/ou outra no domínio da frequência. A primeira traduz a classificação de um "comboio" de ondas irregulares segundo um conjunto de parâmetros estatísticos, a segunda segue uma análise espectral, incluindo o conceito de energia e que uma oscilação aleatória pode ser descrita como uma soma de onda regulares com alturas e períodos diferentes. Destas análises, resultam os conceitos de altura significativa, H_s , que traduz a média do um terço das ondas mais altas, o período significativo, T_s , que resulta da média dos períodos de cada onda associada com o cálculo da altura significativa, a altura e período médios, H_m e T_m , que são obtidos diretamente pela média das alturas e períodos de cada onda individual e a altura e período máximos, H_{max} e T_{max} , que traduzem os valores máximos atingidos nestas características durante o intervalo de análise e ainda o período de pico, T_p , associado à máxima energia do espectro (Liu and Frigaard, 2001).

Contrariamente às ondas irregulares, as ondas regulares são definidas por uma única altura de onda e um único período, que se mantêm constantes no tempo, tornando a sua análise e compreensão, de certa forma, mais intuitiva. A teoria mais utilizada na descrição de um estado de mar regular é a Teoria Linear de ondas, também referida como Teoria de *Airy*, desenvolvida por *George Biddell Airy* no século **XIX**. Esta descreve de uma forma linearizada a propagação de ondas de superfície num fluido homogéneo e baseia-se na equações da continuidade e da quantidade de movimento (Whitham, 1974):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{D(m \vec{u})}{Dt} = \vec{F} \end{cases} \quad (3.1)$$

A dedução da Teoria Linear de ondas por meio das equações 3.1 resulta da consideração de algumas hipóteses simplificativas: (i) admite-se que a propagação da onda pode ser descrita segundo uma função trigonométrica (sinusoidal); (ii) a altura relativa, H_{rel} , e a declividade da onda, ξ , devem ser muito pequenas ($H/h \ll 1$ e $H/L \ll 1$ - movimento de pequena amplitude ou linear); (iii) o fundo é horizontal e o nível médio da água não varia com a propagação das ondas; (iv) o fluido é incompressível, não-viscoso, irrotacional, bidimensional e o escoamento é potencial. Estas considerações têm consequências no que respeita aos resultados finais, nomeadamente: o facto de se admitir um fundo horizontal pode conduzir a erros consideráveis em zonas onde a profundidade começa a diminuir, justificando o facto desta teoria ser adequada para zonas de grande profundidade, onde o fundo não influencia a propagação da energia; a simplificação do espaço dimensional para duas dimensões ignora a interação da agitação com obstáculos na sua propagação, ou seja, não são contabilizados efeitos de difração ou refração das ondas.

Com estas simplificações, a elevação da superfície livre de uma onda ao longo da sua direção de propagação (x) e do tempo (t), é descrita pela seguinte expressão (Lamb, 1945):

$$\eta(x, t) = a \times \sin(k \times x - \omega \times t) \quad (3.2)$$

onde a é a amplitude oscilação ($H = 2a$ pois $a = A_c = A_s$); k é o número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.3)$$

e ω é a frequência angular de oscilação, que se relaciona com o período da onda por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.4)$$

Consequentemente, a velocidade de uma onda (celeridade), pode ser calculada pelo número de onda e pela frequência angular:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (3.5)$$

As ondas, dependendo da profundidade em que se propagam, tem propriedades dispersivas, ou seja, sofrem uma separação no espaço das várias componentes espectrais. A razão para tal, encontra-se, na dependência que existe entre a velocidade de fase e a frequência com a profundidade. A equação da dispersão (Lamb, 1945), permite definir a relação entre ω e k à medida que as ondas se propagam:

$$\omega^2 = g \times k \times \tanh(kh) \quad (3.6)$$

onde h traduz a profundidade (ver figura 3.2).

Um resultado importante da Teoria Linear é a definição de três zonas de propagação em função da profundidade e do comprimento de onda. Grandes profundidades, quando a profundidade é maior que o comprimento de onda ($h > \frac{L}{2}$ e a $\tanh(kh) \rightarrow 1$), pequenas profundidades, quando a profundidade é muito menor que o comprimento de onda ($h < \frac{L}{20}$ e a $\tanh(kh) \rightarrow kh$) e profundidades intermédias ($\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$). Partindo das equações 3.5 e 3.6, é possível calcular

a velocidade de fase da onda, c , em cada uma destas zonas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Grandes profundidades} \longrightarrow \omega^2 = g \times k \equiv \boxed{c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}} \\ \text{Pequenas profundidades} \longrightarrow \omega^2 = g \times k^2 \times h \equiv \boxed{c = \sqrt{gh}} \\ \text{Profundidades intermédias} \longrightarrow \omega^2 = g \times k \times \tanh(kh) \equiv \boxed{c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}} \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Do sistema acima apresentado concluí-se que, para pequenas profundidades, as ondas deixam de ser dispersivas e a sua velocidade torna-se independente das características das ondas, ou seja, é exclusivamente função da profundidade.

A velocidade de grupo é fundamental para compreender a propagação da energia das ondas. Devido à capacidade dispersiva, estas agrupam-se se tiverem frequências suficientemente próximas, propagando-se em grupos de ondas com a mesma velocidade e energia. A equação fundamental da velocidade de grupo, c_g , é a seguinte (Whitham, 1974):

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (3.8)$$

Substituindo a expressão da frequência angular (3.4) na equação da dispersão (3.6) e na equação 3.8, resolvendo-a tendo em conta as simplificações para zonas de grandes e pequenas profundidades, obtém-se as seguintes relações para a velocidade de grupo consoante a profundidade:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Grandes profundidades } c_g = 0.5 \times c \\ \text{Pequenas profundidades } c_g = c \\ \text{Profundidades intermédias } c_g = c \times \left[\frac{1}{2} + \frac{2kh}{2 \times \sinh(2kh)} \right] \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Note-se que, para grandes profundidades, a velocidade de grupo é metade da velocidade das ondas que constituem esse grupo e em pequenas profundidade a velocidade de fase é igual à velocidade de grupo.

Dentro da Teoria Linear, as trajetórias e o campo de velocidades das partículas podem ser calculados de acordo com as seguintes expressões (Whitham, 1974):

$$\text{Campo de deslocamentos: } \left\{ \begin{array}{l} x = -\frac{H}{2} \times \frac{\cosh(k \times (h + y))}{\sinh(kh)} \times \sin(kx - \omega t) \\ y = \frac{H}{2} \times \frac{\sinh(k \times (h + y))}{\sinh(kh)} \times \cos(kx - \omega t) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

$$\text{Campo de velocidades: } \left\{ \begin{array}{l} u = \frac{H}{2} \times \omega \times \frac{\cosh(k \times (h + y))}{\sinh(kh)} \times \cos(kx - \omega t) \\ v = \frac{H}{2} \times \omega \times \frac{\sinh(k \times (h + y))}{\sinh(kh)} \times \sin(kx - \omega t) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Estabelecidas as expressões matemáticas que permitem calcular as trajetórias e o campo de velocidades das partículas (Equações 3.10 e 3.11), é possível, em conjunto com a equação da dispersão (3.6), retirar algumas conclusões face à trajetória destas durante um ciclo de onda. Em grandes profundidades, onde as ondas não "sentem" o fundo, as partículas descrevem trajetórias perfeitamente circulares durante um ciclo de onda. Com diminuição da profundidade, a geometria da trajetória altera-se para uma elipse, sendo que já existe influência do fundo nas características da onda.

3.2 Interação onda/estrutura

Os principais fenómenos físicos que estão inerentes à interação entre as ondas e as estruturas marítimas, ou seja, que quantificam a forma como a energia do estado de mar interage com os objetos no seu caminho de propagação são: (i) a dissipação (perda de energia), que ocorre por rebentação ou devido ao escoamento em meio poroso; (ii) a transmissão (transferência de parte da energia), resultado do fenómeno de galgamento ou também do escoamento no meio poroso, (iii) a reflexão, que altera a direção de propagação da onda quando esta atinge obstáculos, podendo provocar aumento ou diminuição da altura da onda em frente à estrutura, consoante a fase de oscilação e a direção (ângulo) de incidência das ondas.

Especificamente no que respeita às estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante, a interação com a agitação marítima origina fenómenos de reflexão (estrutura não porosa), de rebentação, uma vez que é implementada em zonas de profundidades intermédias ou pequenas e ainda, alguns fenómenos intrínsecos à estrutura: (i) o *fator de amplificação*, que quantifica a amplificação da oscilação no interior da CAO; (ii) o *ângulo de fase*, que permite analisar a diferença entre a fase de oscilação junto ao exterior da parede frontal e no interior da câmara; (iii) o *sloshing*, que caracteriza a forma como oscila a superfície livre no interior da estrutura.

3.2.1 Reflexão

Nem toda a energia das ondas é dissipada quando elas atingem um obstáculo ou a linha de costa. Qualquer estrutura marítima produz, sobre a agitação incidente, um processo de reflexão cuja intensidade depende maioritariamente do poder dissipador da estrutura e das características da agitação marítima incidente. Uma parede vertical, tal como um quebra-mar vertical impermeável, pode refletir a ondulação de volta para o oceano, com pouca perda de energia. O ângulo da onda refletida será igual ao da onda incidente e nas condições de ondas perpendiculares à estrutura, a reflexão produz ondas estacionárias (figuras 3.3a e 3.3b). Na Teoria Linear de ondas, a reflexão é entendida como a soma de duas (ou mais) ondas, de igual período, que se propagam em sentidos opostos. A altura da onda estacionária, pode atingir no máximo, o dobro da altura da onda incidente. Normalmente, a reflexão é quantificada através do coeficiente, C_r , dado por (USACE, 2006):

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (3.12)$$

onde H_r é a altura de onda refletida e H_i é a altura de onda incidente. Tipicamente uma estrutura (obstáculo) é tanto mais refletiva quanto maior for o ângulo que parede frontal faz com a horizontal ($\alpha = 90^\circ$ por exemplo), quanto menor for a rugosidade da superfície e a porosidade do material que constitui a estrutura.

Para a quantificação do coeficiente de reflexão, C_r , existem alguns métodos, sendo que muitos deles são função do número de *Iribarren*, I_r . Este traduz uma grandeza adimensional que relaciona o declive da onda incidente com o da estrutura obstáculo, sendo calculado por (Battjes, 1974):

$$I_r = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_s}{L}}} \quad (3.13)$$

onde α é o ângulo entre o paramento frontal da estrutura e o plano horizontal (figura 2.5a), H_s a altura significativa da onda incidente e L o comprimento de onda da mesma. A título de exemplo, apresentam-se dois métodos de cálculo de C_r : o Método de *Seeling* (1983), equação 3.14, e o Método de *Zanuttigh e Van der Meer* (2006), equação 3.15 (USACE, 2006).

$$C_r = \frac{a I_r^2}{b + I_r^2} \quad (3.14)$$

$$C_r = \tanh(a I_r^b) \quad (3.15)$$

onde os valores a e b são coeficientes que dependem do fator de rugosidade da estrutura γ_r .

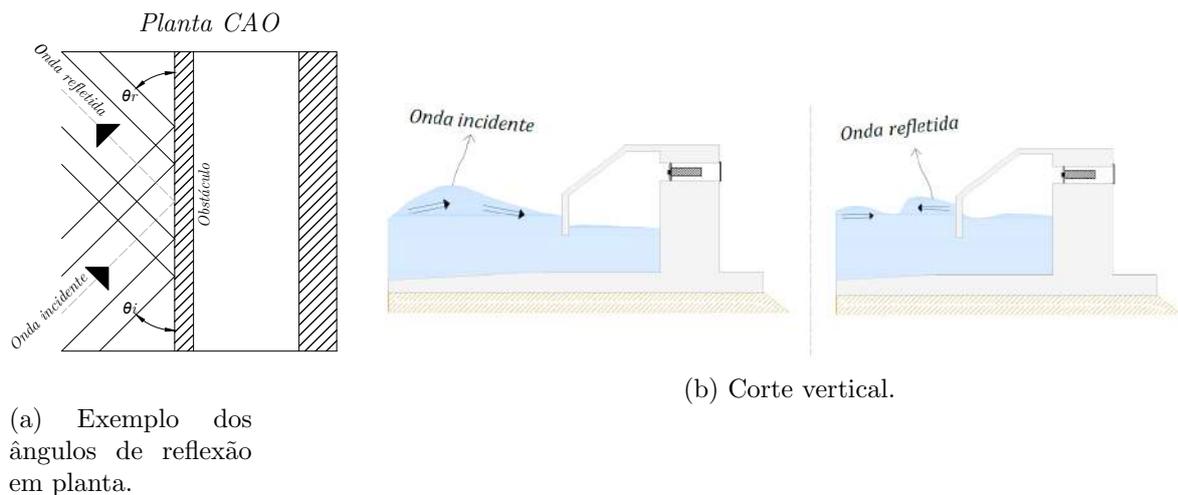


Figura 3.3: Reflexão numa estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante.

3.2.2 Rebentação

O fenómeno da rebentação é o que está mais associado com a dissipação da energia das ondas. Ao atingirem zonas de profundidade intermédia, as ondas começam a sentir o fundo, e portanto, a sua altura e o comprimento variam. Nomeadamente, a altura de onda tende a aumentar (empolamento) e o comprimento a diminuir (diminuição da velocidade). O empolamento é um fenómeno crucial para estudar a rebentação. Este traduz o aumento de altura e a diminuição do comprimento de onda devido à redução da profundidade, fazendo aumentar a declividade até que esta atinge o valor para o qual ocorre rebentação. Para definir o início da rebentação podem tomar-se os seguintes critérios: (i) a velocidade na crista excede a velocidade de propagação da onda; (ii) a superfície livre na zona frontal da onda assume a posição vertical.

O número de *Iribarren* (Equação 3.13) é utilizado também para quantificar o tipo de rebentação presente, uma vez que este (como já referido em 3.2.1) relaciona o declive da onda com o do obstáculo onde esta incide.

Tabela 3.1: Tipos de rebentação consoante I_r (Battjes, 1974)

Número de <i>Iribarren</i>	Tipo de rebentação
$I_r \leq 0.5$	Progressiva (<i>Spilling</i>)
$0.5 < I_r \leq 3.0$	Mergulhante (<i>Plunging</i>)
$3 < I_r \leq 3.5$	Colapsante (<i>Collapsing</i>)
$I_r > 3.5$	Rebentação de fundo (<i>Surging</i>)

3.2.3 Fator de Amplificação

O fator de amplificação, f_{amp} , traduz a variação da altura de onda no interior da CAO face à da onda incidente na estrutura. Este apresenta-se como a forma mais direta de quantificar a energia hidráulica útil, uma vez, quanto maior for a elevação da superfície livre na câmara interna (maior fator de amplificação), maior será o impulso na coluna de ar que fará girar a turbina. Assim, de um ponto de vista exclusivamente hidráulico, é possível estudar a geometria mais eficiente em termos de hidrodinâmica, consoante as características da agitação incidente. Para calcular o fator de amplificação, relaciona-se a altura média de oscilação na CAO, H_m , com a altura da onda incidente, H_i , obtendo um parâmetro adimensional (Teixeira et al., 2013):

$$f_{amp} = \frac{H_m}{H_i} \quad (3.16)$$

No entanto, por forma a normalizar os resultados obtidos, nesta dissertação foi considerada a altura da onda incidente como igual à da onda gerada no batedor.

3.2.4 Ângulo de fase

O ângulo de fase relaciona a fase de oscilação no exterior da parede frontal da CAO com a fase de oscilação da coluna de água interna. Este é importante na análise das forças que atuam na parede frontal da CAO. O facto da oscilação no exterior estar numa fase diferente da oscilação no interior, resulta no desequilíbrio de forças na parede frontal, sendo essa uma combinação de ações desfavorável em termos estruturais. O ângulo de fase pode ser calculado pela seguinte equação (Teixeira et al., 2013):

$$\theta = \frac{\Delta t \times 360}{T} \quad (3.17)$$

onde Δt é o desfasamento temporal entre a oscilação no exterior da parede frontal da CAO e a oscilação da coluna de água interna e T é o período da onda.

3.2.5 *Sloshing*

O *sloshing* é um fenómeno físico que se relaciona com a elevação da superfície livre de um fluido, inserido num compartimento fechado, quando este é sujeito a uma ação externa espontânea (Khezzar et al., 2011). Exemplos da ocorrência deste fenómeno podem ser encontrados nos

navios, em veículos rodados que transportam fluídos no seu tanque ou ainda em estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante. De acordo com Olsen (1976), o *sloshing* pode ser classificado em *sloshing* vertical ou *sloshing* rotacional, sendo que, a natureza do fenómeno é influenciada pela geometria do compartimento, pelas propriedades do fluído (viscosidade principalmente) e força de excitação. O *sloshing* vertical é um modo de oscilação bidimensional, que envolve apenas translação do fluído. O *sloshing* rotacional é um modo de oscilação tridimensional, que envolve a excitação do fluído segundo todos os graus de liberdade (translação e rotação), podendo até mesmo ocorrer separação de partículas do fluído (Olsen, 1976).

No âmbito das estruturas de Coluna de Água Oscilante, o modo de *sloshing* que ocorre com maior frequência é o rotacional. A incidência das ondas na estrutura, resulta na oscilação da coluna de água interna. O impulso da onda incidente origina a oscilação vertical da coluna de água e a vorticidade faz com que a superfície livre não se mantenha sempre horizontal durante o movimento oscilatório (figura 3.4). O *sloshing* pode ser representado por: (i) a diferença máxima entre a elevação da superfície livre junto à parede frontal da CAO e a elevação junto à parede traseira, ou seja, pelo declive máximo; (ii) por uma análise espectral, onde através do espectro de energia para vários pontos da superfície livre (da coluna de água interna), é possível compreender se a energia está apenas concentrada da frequência fundamental (equivalente ao período da onda incidente), não existindo *sloshing*, ou se, existem outras componentes do espectro onde nem todos os pontos têm energia, existindo *sloshing*; (iii) pelo parâmetro "s", onde "s" traduz de uma forma temporal, uma relação entre a oscilação em certos pontos dentro da câmara e a média de η nesses pontos (equação 3.18), identificando-se de seguida a média dos máximos obtidos pelo "s" (Teixeira et al., 2013).

$$s = \frac{\sqrt{\sum(\bar{\eta} - \eta_i)^2}}{N_i} \quad (3.18)$$

onde $\bar{\eta}$ é a média da elevação em todos os pontos, η_i é a elevação da superfície livre no ponto i e N_i é o número total de pontos considerados.

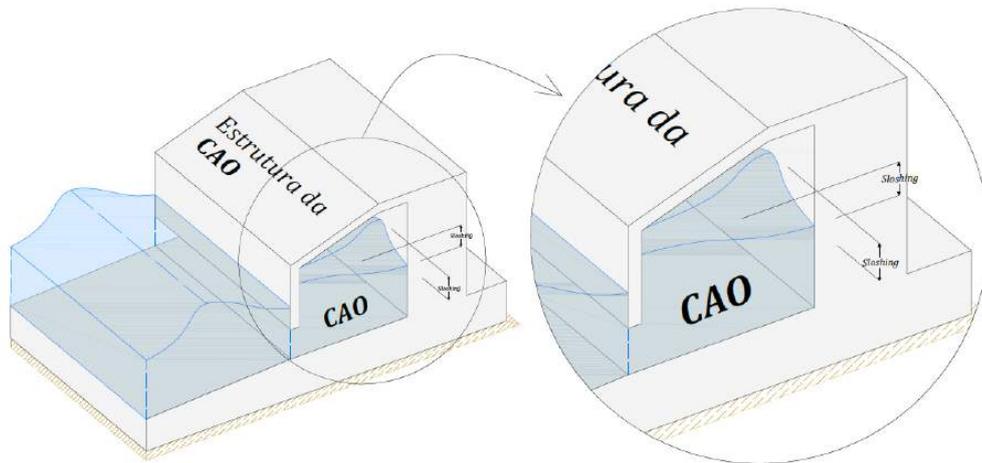


Figura 3.4: Exemplo de sloshing de um líquido inserido num compartimento.

Capítulo 4

Modelo Numérico - IH-2VOF

Esta Dissertação contempla a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* em valor médio, por meio do método numérico das diferenças finitas. Para tal, é utilizado um programa desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria (*IH-2VOF*) (Lara et al., 2011). Este é um modelo numérico bidimensional (2D), formando o plano *xoy* (direções longitudinal e vertical), que utiliza uma decomposição de *Reynolds* para os campos de velocidades e pressões, um modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ e a técnica de *Volume of Fluid* (VOF) para capturar o movimento da superfície livre. A implementação computacional das equações de Navier-Stokes tem como objetivo a determinação do campo de velocidade (\vec{u}) e do campo de pressões (p) num dado volume de controlo. São portanto tidas como incógnitas as componentes do vetor das velocidades $u_x(x, y, z, t)$, $u_y(x, y, z, t)$ e $u_z(x, y, z, t)$ e o valor das pressões $p(x, y, z, y, t)$, ou seja, quatro incógnitas, para as quais são necessárias quatro equações. Os princípios físicos considerados na derivação das quatro equações são: a conservação da massa e a conservação da quantidade de movimento. A equação da continuidade (conservação da massa) define-se por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0 \quad (4.1)$$

O segundo princípio, deriva da segunda lei de Newton, e considerando fluídos incompressíveis e isotrópicos, definem-se as três componentes espaciais da quantidade de movimento:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left[\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right] = \rho \times g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right] = \rho \times g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] = \rho \times g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Os termos do lado esquerdo da equação 4.2 traduzem as forças de inércia desenvolvidas pelo movimento do fluído e os termos do lado direito referem-se às forças aplicadas nas facetas do volume de controlo, nomeadamente a variação das tensões normais (pressões), a força gravitacional e as tensões tangenciais devidas à viscosidade.

Uma solução analítica para estas equações não existe, uma vez que estas são equações diferenciais parciais não-lineares, extremamente complexas e fortemente acopladas. Devido a tal, recorre-se a métodos numéricos tais como o utilizado no modelo IH-2VOF.

4.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS

As equações de Navier-Stokes em valor médio, em inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* (RANS), exprimem em função de uma média temporal¹, as equações do movimento de um fluido (Ferziger and Peric, 2002). Para um fluido contínuo, incompressível, homogêneo e viscoso, os seus campos de velocidades e pressões podem ser definidos em função da soma do seu valor médio num dado instante ($\bar{u}(x, y, z)$ e $\bar{p}(x, y, z)$), com uma parcela relativa às flutuações turbulentas ($u'(x, y, z, t)$ e $p'(x, y, z, t)$):

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = \bar{u}(x, y, z) + u'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) = \bar{p}(x, y, z) + p'(x, y, z, t) \end{cases} \quad (4.3)$$

Consequentemente, a substituição das grandezas físicas decompostas nas equações de *Navier-Stokes* (equações 4.1 e 4.2) permite obter as equações RANS, dadas por:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_x \bar{u}_x + \overline{u'_x u'_x})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}_y \bar{u}_x + \overline{u'_y u'_x})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{u}_z \bar{u}_x + \overline{u'_z u'_x})}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_x \bar{u}_y + \overline{u'_x u'_y})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}_y \bar{u}_y + \overline{u'_y u'_y})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{u}_z \bar{u}_y + \overline{u'_z u'_y})}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_y}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_x \bar{u}_z + \overline{u'_x u'_z})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}_y \bar{u}_z + \overline{u'_y u'_z})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{u}_z \bar{u}_z + \overline{u'_z u'_z})}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_z}{\partial z^2} \right] \end{cases} \quad (4.4)$$

As equações RANS podem ser apresentadas de uma forma mais compacta, onde $i = x, y$ e j são as direções espaciais segundo as quais está-se a decompor a quantidade de movimento (x ou y):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right] - \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \end{cases} \quad (4.5)$$

O modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ é definido pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{v_f}{\sigma_\kappa} + v \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] - (\overline{u'_i u'_j}) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{v_f}{\sigma_\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} v_f \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \end{cases} \quad (4.6)$$

onde σ_κ , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são coeficientes empíricos (IH Cantabria, 2012). Ao ativar a opção que considera o modelo $\kappa - \varepsilon$ na simulação, definem-se dois parâmetros iniciais: o *ticf* e o *eddycoef*.

¹Média temporal do campo de velocidades: $\bar{u}(x, y, z, t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x, y, z, t) dt$

O primeiro está associado a uma perturbação numérica no valor inicial de turbulência e o segundo com o valor da viscosidade turbulenta, ν_f .

Qualquer resolução (analítica ou numérica) de uma equação diferencial está ligada às condições iniciais e de fronteira do problema em análise. O IH-2VOF contempla, no que respeita condições às iniciais, a oscilação da superfície livre em repouso, ou seja, que as velocidades iniciais são nulas e a pressão é hidrostática. Quanto às condições de fronteira, estas podem ser divididas em fronteiras sólidas ou do domínio numérico. Nas primeiras, são consideradas as possibilidades de existir deslizamento, considerando que os valores médios das velocidades normal e tangencial à superfície são nulos ($\overline{u_n} = 0$ e $\overline{u_t} = 0$) ou de não existir deslizamento, ou seja, não existe velocidade perpendicular nem derivada da componente paralela da velocidade na direção normal ($\overline{u_n} = 0$ e $\frac{\partial \overline{u_t}}{\partial n} = 0$). As fronteiras laterais do domínio podem ser fechadas ou abertas. Quando fechada, comporta-se como uma fronteira sólida, com as características anteriormente mencionadas (fronteira refletora), quando aberta, o seu comportamento é descrito de acordo com a seguinte expressão:

$$\frac{\partial b}{\partial t} + c_0 \frac{\partial b}{\partial x} = 0 \quad (4.7)$$

onde b representa a variável a ser avaliada na fronteira ($\overline{u_n}$, $\overline{u_t}$, etc) e c_0 é a velocidade na dada posição (IH Cantabria, 2012). Desta forma, uma fronteira aberta permite que o escoamento avance para "fora" do domínio, traduzindo a equação 4.7 a continuidade. A velocidade é obtida pela equação da dispersão (equação 3.6) consoante o tipo de profundidade onde se encontra a fronteira.

O modelo IH-2VOF possui três formas de gerar a agitação marítima: por gerador interno de ondas, por batedor estático (condição de fronteira de *Dirichlet*) ou por batedor dinâmico (método da força virtual). Este trabalho contempla apenas a geração numérica de ondas por meio do batedor estático e portanto, os restantes tipos não serão desenvolvidos. A sua definição pode ser consultada em IH Cantabria (2012). Uma fronteira de *Dirichlet* define-se como uma zona do domínio onde são aplicados valores específicos às grandezas cinemáticas do problema, ou seja, o batedor estático impõe, em cada instante de tempo, um valor da elevação da superfície livre e das componentes do vetor das velocidades (Torres-Freyermuth et al., 2010). As grandezas cinemáticas impostas são calculadas através da Teoria Linear de ondas, nomeadamente, pelas equações 3.2, 3.10 e 3.11.

É ainda importante definir o conceito de absorção de ondas nas fronteiras do domínio, uma vez que este é um fator crucial na modelação. A absorção nas fronteiras permite evitar a reflexão da agitação marítima que na realidade não se verifica, ou seja, não deve existir reflexão numa fronteira domínio, que procura simular uma região de continuidade do sistema físico real. O método de absorção de ondas aplicado no modelo à fronteira de *Dirichlet* denomina-se método de absorção ativa e baseia-se na ideia de gerar uma onda inversa à que atinge a fronteira, por forma a que ambas se cancelem. A metodologia para determinar a onda incidente na fronteira, consiste em registar, na região do domínio próxima desta, as características da onda (Torres-Freyermuth et al., 2010).

4.2 Volume de Fluido - VOF

Para capturar o andamento da superfície livre, o IH-2VOF utiliza um método do volume de fluido (VOF). Este não calcula de forma exata a posição da superfície livre em cada instante,

mas identifica a variação da massa volumica da água face ao volume total de cada célula do domínio (Hirt and Nichols, 1981). São definidos três tipos de células: a célula vazia (*empty* - **E**), que apenas contém ar a preencher o seu sub-domínio; a célula de superfície (*surface* - **S**), que é preenchida por água e ar simulando então a posição da superfície livre; a célula de interior (*interior* - **I**), que é o oposto das células **E**, ou seja, preenchidas completamente por água (figura 4.1).

A função VOF ($F(x, y, t)$) define-se pela seguinte equação:

$$F = \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (4.8)$$

onde

$$\rho_c = \frac{\rho_f V_f}{V_f + V_a} \quad (4.9)$$

sendo, ρ_f a densidade da água, V_f o volume de água na célula e V_a o volume de ar na célula (IH Cantabria, 2012). Portanto, a função F , toma o valor unitário para células **I** ($\rho = \rho_f$) e é nula se o sub-domínio for classificado como vazio (**E**). Para valores entre zero e um, é definida a fração de fluido que ocupa a célula.

Defina a função F (equação 4.8) e escrevendo a equação da continuidade do escoamento (primeira equação do sistema 4.5) como dependente desta, obtém-se:

$$\rho_c(x, y, t) = F(x, y, t)\rho_f \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial F}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4.11)$$

4.3 Fronteiras sólidas

A definição de fronteiras sólidas com qualquer forma geométrica é feita à semelhança do VOF, utilizando um tratamento parcial das células. Este método consiste em modelar o sólido como um caso especial do fluido, mais especificamente, um fluido com densidade infinita. Introduzem-se então, as funções de abertura (escalares): θ_c , que representa a área de célula que não é ocupada por sólido, estando disponível para escoamento, e θ_r , o comprimento disponível pela fronteira da célula para circulação de água. São definidas três tipos de células: os elementos sólidos, onde a área total está preenchida por fluido de densidade infinita ($\rho \rightarrow \infty$) (*obstacle* - **O**), as células de fronteira fluido-sólido (*water - solid boundary* - **FA-O**) ou as células com circulação livre de água (*water domain* - **FA**) (figura 4.1).

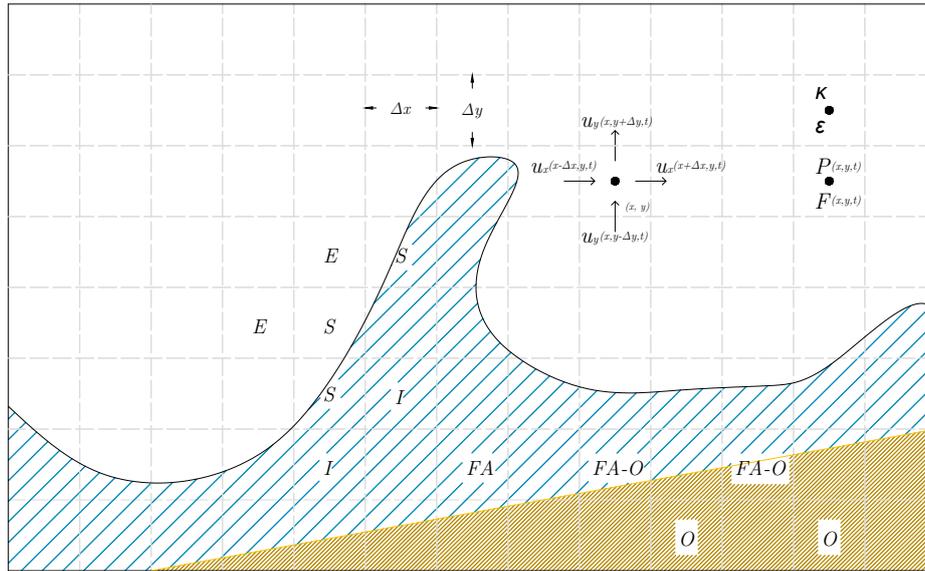


Figura 4.1: Esquema dos tipos de células interpretados pelo VOF, adaptado de IH Cantabria (2012).

4.4 Discretização do domínio - CORAL

Por forma a aplicar métodos numéricos na resolução de equações diferenciais parciais, é necessária uma discretização do domínio físico em análise. No caso do modelo IH-2VOF, esta discretização é conseguida pelo uso de células exclusivamente retangulares. Todas as grandezas escalares, pressão (P), grandezas relativas à turbulência (κ e ε) e a função VOF, são definidas no centro das células, enquanto as grandezas vectoriais, como o campo de velocidades, são estabelecidas nas faces de cada elemento da malha (figura 4.1).

Para a geração da malha computacional que estabelece o domínio resolvido pelo IH-2VOF, o Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria criou o CORAL, um gerador automático de malhas de diferenças finitas, com interface gráfica (*graphic user interface* - GUI). Todas as condições de fronteira do problema são aqui definidas, sendo possível criar várias geometrias para os obstáculos e definir materiais com diferentes porosidades, abrangendo a grande maioria das estruturas portuárias, como quebra-mares verticais em betão ou quebra-mares mistos com granulometria variável do núcleo para o contorno.

A criação da malha bidimensional de diferenças finitas é conseguida dividindo o domínio numérico em várias sub-zonas. Estas podem ser caracterizadas por células com dimensões diferentes. Uma vez definidas as características relevantes do domínio numérico, o CORAL produz um ficheiro de saída (*output*), que será posteriormente lido pelo IH-2VOF. O Apêndice B.1 apresenta um exemplo desse ficheiro.

O primeiro passo na criação de uma malha pelo CORAL é a definição do retângulo que delimita o domínio. Este é definido estabelecendo o seu comprimento, L_x , e altura, L_y (figura 4.2). Para tal, é necessário ter em consideração as características das ondas a propagar, nomeadamente, o comprimento do canal deve ser no mínimo uma vez e meia maior que o comprimento

de onda (IH Cantabria, 2012):

$$\frac{L_x}{L} \geq 1.5 \quad (4.12)$$

Um vez definido o domínio, o próximo passo é estabelecer as fronteiras sólidas e líquidas do problema. A sua geometria é conseguida por polígonos, introduzindo as coordenadas dos vértices que os definem. Na figura 4.2, estão exemplificadas essas fronteiras. Dentro dos sólidos, identificam-se dois tipos: os obstáculos (objetos impermeáveis) e os corpos porosos. Os primeiros, são utilizados para simular o fundo do mar, elementos de betão ou outro tipo de material impermeável, os segundos, como próprio nome indica, são utilizados para criar meios porosos, como por exemplo, o manto de um quebra-mar em talude. Quanto às fronteiras líquidas, estas são utilizadas para definir o nível inicial da superfície livre do problema.

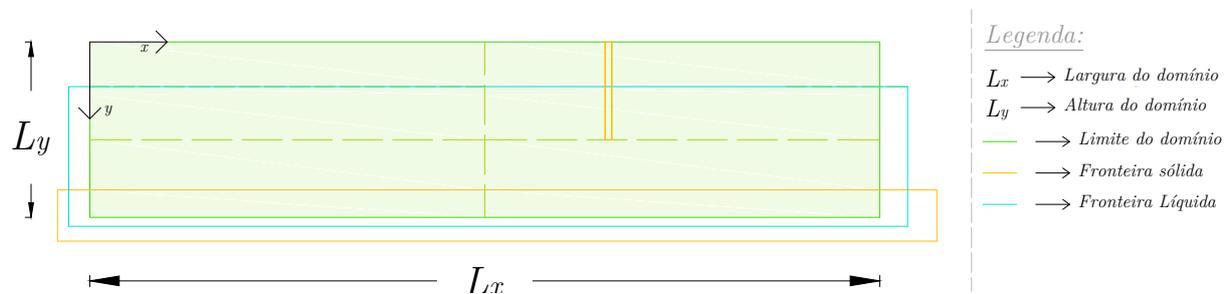


Figura 4.2: Exemplo de um domínio numérico definido no CORAL, adaptado de IH Cantabria (2012).

O último passo é a geração das células que discretizam o domínio, isto é, a geração da malha em si. O CORAL gera malhas ortogonais (xoy), podendo o espaçamento entre pontos ser uniforme ou não-uniforme. Segundo IH Cantabria (2012), é aconselhado o uso de malhas uniformes. No entanto, a outra possibilidade permite reduzir significativamente o tempo computacional, com aumento do espaçamento em zonas onde não é necessária grande precisão. A construção da malha é normalmente feita por um conjunto de "sub-zonas" (*submesh*), segundo ambas as direções ortogonais. Cada uma destas regiões do domínio, é definida por um centro de convergência ("center"), pelo número de células à esquerda e à direita do mesmo e o espaçamento mínimo ("min. sep. center"). Células adjacentes ao centro de convergência terão o espaçamento mínimo indicado. Para definir sub-zonas com espaçamento uniforme, o centro encontra-se no meio do sub-domínio e é definido o mesmo número de células para ambos os lados. Para gerar sub-zonas com espaçamento não-uniforme, o centro deve ser definido na região do sub-domínio em que é desejada mais discretização, sendo que, por limite mínimo, deve ser atribuída uma célula para cada lado do centro. O valor que define a separação entre sub-zonas, denomina-se "divisão" ("Division"). No caso da direção x , a divisão é a coordenada de início da sub-zona, na direção y , a coordenada do fim dessa. A figura 4.3 exemplifica uma malha gerada pelo CORAL, caracterizada por duas sub-zonas horizontais e duas verticais. Contempla também regiões com espaçamento uniforme (sub-zona 2 segundo x e 1 segundo y) e variável (sub-zona 1 segundo x e 2 segundo y).

4.4. DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO - CORAL

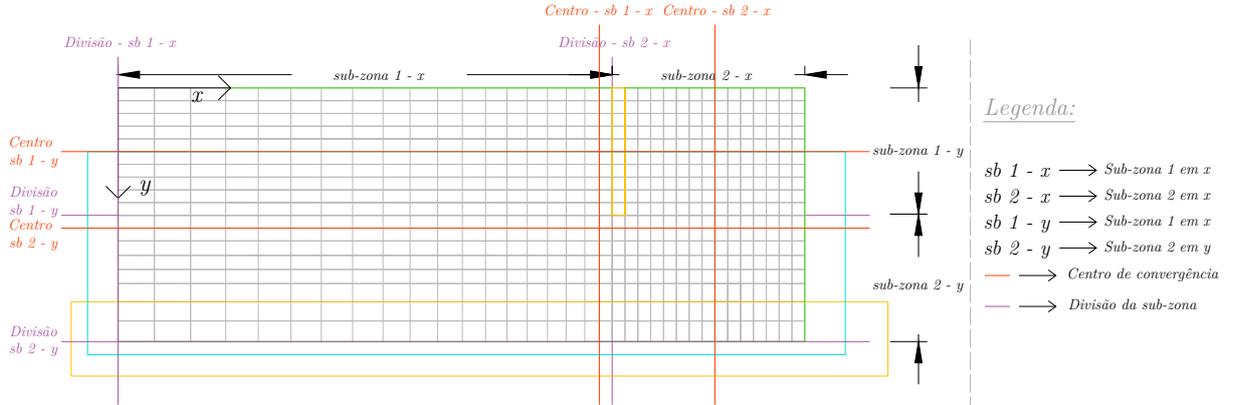


Figura 4.3: Sub-zonas que constituem o domínio numérico gerado pelo CORAL, assim como os parâmetros que as definem.

Para obter bons resultados com a aplicação do modelo IH-2VOF devem ser seguidos alguns critérios de espaçamento e posicionamento da malha, tanto para malhas uniformes como não-uniformes (IH Cantabria, 2012). Nomeadamente, para o espaçamento na direção vertical, Δy , é aconselhado que a divisão contemple um mínimo de 10 células por altura de onda, isto é:

$$\frac{H}{\Delta y} \geq 10 \quad (4.13)$$

Para o espaçamento horizontal, Δx , recomenda-se um valor entre as 100 e 150 células por comprimento de onda, L , isto é:

$$\frac{L}{\Delta x} \geq 100 \text{ a } 150 \quad (4.14)$$

Por forma a evitar o fenómeno numérico de "falsa rebentação", o espaçamento horizontal deve ser ainda limitado a duas vezes e meia do espaçamento vertical:

$$\Delta x \leq 2.5\Delta y \quad (4.15)$$

Deve-se procurar também que os pontos da malha coincidam com as fronteiras sólidas ou líquidas definidas, ou seja, iniciar células nos contornos desses elementos, conseguindo assim uma clara e correta definição das condições de fronteira. No âmbito das malhas não-uniformes (com tamanho das células variável), a variação das células numa dada direção deve ser inferior a 5%, isto é, entre as células 1 e 2 devem-se cumprir as seguintes condições:

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \leq 0.05 \quad \text{e} \quad \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} \leq 0.05 \quad (4.16)$$

É ainda de notar que o CORAL verifica se alguma das condições acima descritas foi violada em cada posição do domínio, fornecendo gráficos com a qualidade da malha. A figura 4.4 exemplifica uma malha gerada pelo CORAL e introduzida no IH-2VOF.

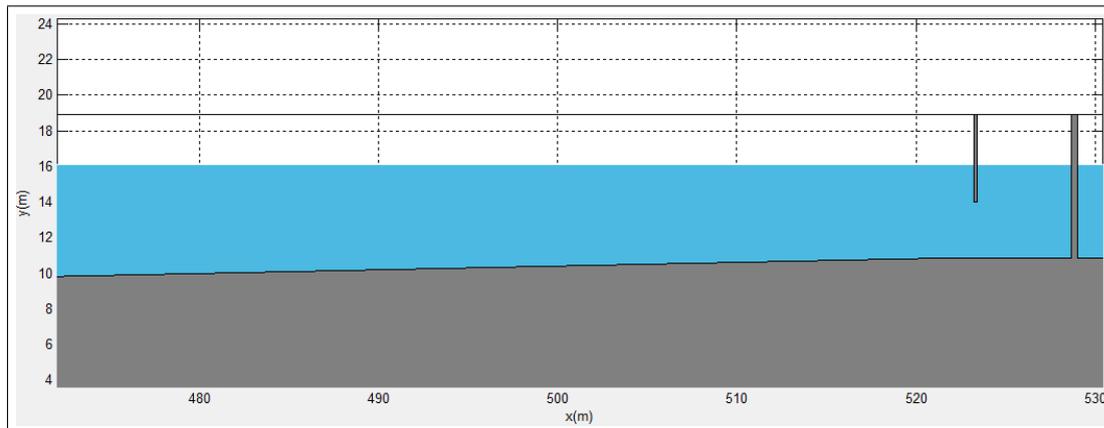


Figura 4.4: Exemplo de parte de uma malha gerada pelo CORAL e introduzida no IH-2VOF, que contempla uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante.

4.5 Ficheiro de Entrada - IH-2VOF

Qualquer programa numérico está dependente dos dados de entrada ("input"). O IH-2VOF possui múltiplos parâmetros que definem cada domínio numérico.

Em primeiro lugar é preciso introduzir a malha gerada pelo CORAL, ou seja, dar informação sobre o domínio numérico a resolver. Este ficheiro contém o número de divisões da malha segundo x e segundo y , as coordenadas de cada célula e os vértices dos polígonos que definem as fronteiras sólidas e líquidas do domínio (ficheiro "mesh.mes").

De seguida é necessário definir a agitação marítima incidente. Para criar uma série de ondas regulares, introduz-se: a altura de onda desejada (H , em metros); o período de onda (T , em segundos); o intervalo de tempo de geração ($length$, em segundos), ou seja, o número de ondas que são geradas; a frequência de amostragem (f_s , em Hertz), ou seja, o número de pontos que discretizam uma onda; o ângulo de fase e a teoria de ondas segundo a qual a geração é feita (Teoria linear, Stokes, etc.). Para além da geração de ondas, o programa permite ainda fazer a reconstrução da agitação, a partir de uma série temporal de elevação da superfície livre. Neste caso, é necessário introduzir um ficheiro que contém uma matriz de duas colunas, uma relativa ao tempo (em segundos) e outra com a elevação da superfície livre (em metros) (ficheiro ".dat").

Uma vez gerada a série de ondas, é necessário definir o tipo de batedor. Como já referido anteriormente, as simulações realizadas no IH-2VOF contemplaram apenas o uso do batedor estático, estabelecendo uma fronteira de *Direchlet*, onde são especificados os valores da elevação da superfície livre e as componentes do campo de velocidades ao longo do tempo.

Por fim, são necessários definir os parâmetros a simular, nomeadamente, o intervalo de tempo de simulação (*simulation length*, em segundos), $T_{sim.}$, o passo de tempo inicial (dt , em segundos)², a densidade do fluido (ρ , em quilograma metro cúbico), os tipos de fronteira do domínio, se refletora ou absorvente, a posição das sondas que registam a elevação da superfície livre e o campo de velocidades, a frequência de registo dessas grandezas durante um segundo (f_s em hertz), e ainda as soluções que são guardadas (VOF, campo de velocidades e pressões),

²O passo de tempo é definido em conformidade com o número de Courant para 2D: $C = \frac{u_x \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \Delta t}{\Delta y} \leq C_{max.}$, onde $C_{max.}$ depende do método numérico utilizado (Ferziger and Peric, 2002).

4.5. FICHEIRO DE ENTRADA - IH-2VOF

as áreas de registo do espraçamento (*run-up*) e pressões, e se é considerado ou não o modelo de turbulência. O Apêndice B.2 apresenta um exemplo do ficheiro *input* para o IH-2VOF.

Capítulo 5

Modelação numérica de uma CAO

Neste capítulo é apresentado explicitamente o caso de estudo desta dissertação, que corresponde à modelação numérica de uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante e à sua calibração através da comparação entre os resultados adquiridos por via experimental e os por via computacional. Especificamente, pretende-se concluir se a resposta de uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante quando solicitada por agitação marítima é reproduzida de forma coerente e correta pelo modelo numérico.

Tendo como referência resultados experimentais obtidos num canal de ondas do LNEC, realizou-se um estudo de calibração e validação dos resultados do modelo numérico, que visa confirmar o programa IH-2VOF como ferramenta fiável para o estudo da geometria da CAO que conduz a uma maior eficiência hidrodinâmica. O passo de calibração envolve uma comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos. Mais concretamente, são utilizados os parâmetros estatísticos do erro quadrático médio, do enviesamento e do índice de concordância para quantificar a precisão da série temporal da elevação da superfície livre obtida numericamente. É então estabelecida a dimensão da malha de diferenças finitas para a qual existe o melhor compromisso entre precisão dos resultados numéricos e esforço computacional (tempo de cálculo). No passo de validação é analisado o grau de concordância, para a malha escolhida, entre os resultados experimentais e numéricos, no que respeita os parâmetros que quantificam os fenómenos intrínsecos à CAO e que resultam da interação onda/estrutura: fator de amplificação; ângulo de fase; *sloshing*.

Uma vez validado o modelo IH-2VOF, este é utilizado para a determinação geometria da CAO que resulta numa maior eficiência hidrodinâmica do dispositivo. Pretende-se estudar quais os valores das relações de submersão, d/h , e de comprimento da câmara interna, B/h , que levam a uma otimização do fator de amplificação, com o qual se espera obter uma maior produção energética.

5.1 Ensaios em modelo físico

O caso de estudo desta dissertação refere-se a estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante integradas num quebra-mar vertical, visando aproveitar a energia das ondas incidentes para produção de eletricidade (projeto DITOWEC). No âmbito deste projeto foram realizados ensaios experimentais num canal de ondas do LNEC, no início de 2014, com o objetivo de simular a propagação de ondas em zonas costeiras e a sua interação com uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante. Especificamente, procurou-se obter resultados que permitissem o estudo das

CAPÍTULO 5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CAO

características hidrodinâmicas de uma CAO e que servissem como valores de referência para calibração e validação de modelos numéricos.

O canal de ondas do LNEC, onde se realizaram os ensaios, tem 50.0 metros de comprimento e aproximadamente 80.0 centímetros de largura. Nesse canal, foi colocado na sua extremidade final um modelo físico à escala 1:35 de uma CAO com geometria simplificada e câmara interna aberta. O domínio físico pode ser resumido em duas regiões: (i) a primeira (*Domínio I*), com um comprimento de 18.50 metros, que contém o batedor de ondas na sua extremidade inicial e mantém uma profundidade constante ao longo do canal, criando condições para que se consiga simular a propagação das ondas geradas e a sua adaptação ao fundo; (ii) a segunda (*Domínio II*), com um comprimento de 15.105 metros, que contém a estrutura da CAO na sua extremidade final e uma batimetria onde a profundidade diminui com declive constante, necessária para simular a aproximação das ondas à zona costeira (zona de implementação das CAO), ver figura 5.1.

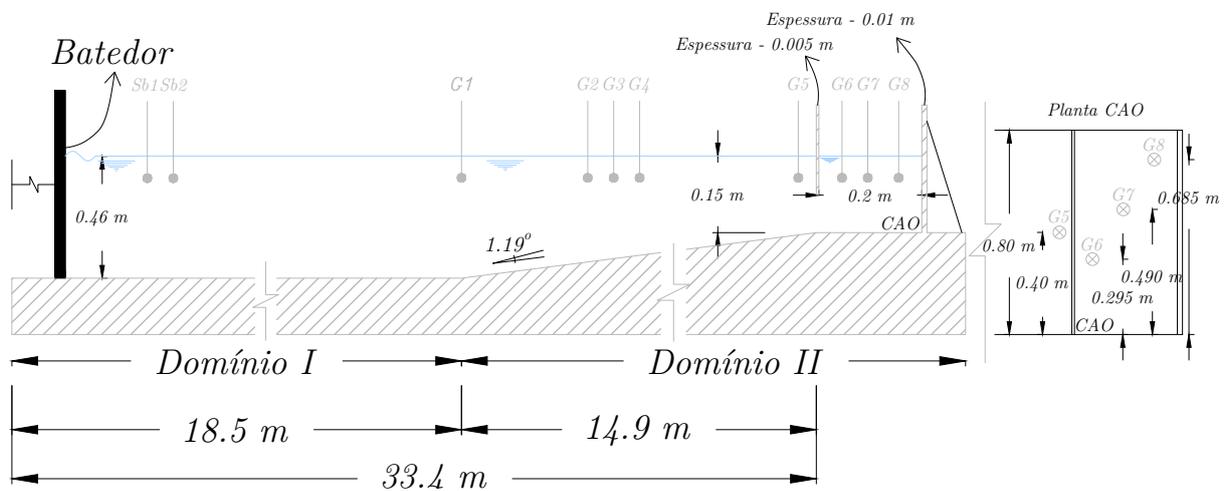


Figura 5.1: Configuração do canal onde foram realizados os ensaios experimentais, com a estrutura e o equipamento de medição.

Ao longo do canal estão dispostas sondas (em inglês *gauges*) que registam a elevação da superfície livre durante o intervalo de tempo em que decorre o ensaio. As duas primeiras (*Sb1* e *Sb2*) estão posicionadas a seguir ao batedor e próximas deste, sendo utilizadas para monitorizar as características das ondas geradas, ou seja, confirmar que a altura e o período dessa ondas estão de acordo com o pretendido. As sondas *G1*, *G2*, *G3* e *G4*, localizadas na rampa de declive constante, permitem estudar a transformação das ondas ao longo da sua propagação, ou seja, compreender se a interação com o fundo contribuí ou não de forma significativa para alterar as características das ondas geradas. Por fim, estão dispostas quatro sondas na zona da estrutura, a *G5*, junto à face exterior da parede frontal, recolhe informação sobre as ondas incidentes na estrutura e as sondas *G6*, *G7* e *G8*, posicionadas no interior da câmara, permitem medir a oscilação da coluna de água interna. A tabela 5.1 identifica a posição das sondas ao longo do canal.

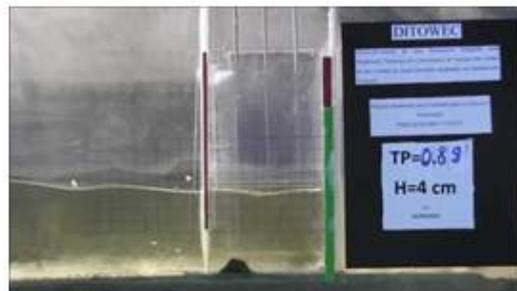
Tabela 5.1: Distância ao batedor das sondas nos ensaios em modelo físico.

Sonda	<i>Sb1</i>	<i>Sb2</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>	<i>G7</i>	<i>G8</i>
Δx^{G_i} (m)	3.10	3.30	18.50	30.00	30.30	30.75	33.37	33.44	33.50	33.56

As dimensões adotadas para a CAO foram definidas tendo em conta a ordem de grandeza das estruturas já construídas, em particular, as que são mencionadas na Secção 2.2. A geometria considerada como de base (*standard*), caracteriza-se por um comprimento da câmara interna de 0.20 metros (7.0 metros à escala do protótipo - 1:1), uma submersão da parede frontal de 0.075 metros (2.625 metros à escala 1:1) e espessuras da parede frontal e traseira de 0.005 e 0.01 metros, respetivamente (0.175 e 0.35 metros à escala 1:1), ver figura 5.1. É ainda importante referir que a profundidade de implantação da estrutura também se encontra dentro da gama de valores apresentados anteriormente. Na primeira zona do canal, a profundidade assume o valor de 0.46 metros (16.1 metros à escala 1:1), e na segunda zona, esta diminui de 0.46 até 0.15 metros junto à parede frontal da CAO (5.25 metros à escala 1:1). Esta diminuição dá-se ao longo de uma rampa com 14.9 metros de comprimento e uma inclinação constante de 1.19 graus. Os valores dos parâmetros geométricos submersão/profundidade (d/h) e comprimento/profundidade (B/h) são 0.5 e 1.33, respetivamente. A sub-figura 5.2a, mostra o canal de ondas do LNEC e a 5.2b, uma fotografia da secção da CAO implementada na extremidade final do canal.



(a) Canal de ondas do LNEC.



(b) Modelo da CAO implementado no canal.

Figura 5.2: Fotografia do canal e de um dos ensaios realizados.

Quanto às condições de agitação marítima testadas: (i) a altura de onda foi escolhida em conformidade com o valor médio de alturas das ondas incidentes na costa portuguesa e que, ao mesmo tempo, não causasse rebentação na proximidade da estrutura; (ii) para o período, foi testada uma gama dos períodos mais frequentes. Especificamente, foram geradas ondas com uma altura de 0.040 metros e períodos entre os 0.89 e os 2.20 segundos (à escala 1 : 35). Cada simulação foi realizada 8 vezes, para garantir repetibilidade e precisão dos resultados experimentais. A tabela 5.2 indica as simulações realizadas em laboratório.

Tabela 5.2: Condições de agitação testadas nos ensaios experimentais.

Simulação	Escala do Modelo (1 : 35)	
	T (s)	H (m)
1	0.89	0.040
2	1.15	0.040
3	1.35	0.040
4	1.60	0.040
5	1.90	0.040
6	2.21	0.040

5.2 Calibração e validação do modelo numérico

Uma vez que os métodos numéricos fornecem uma aproximação da solução exata, o conceito de erro está sempre associado à sua utilização. No caso particular da dinâmica de fluidos, a solução exata das equações do movimento não é conhecida, o que torna a avaliação do grau de exatidão de qualquer solução numérica mais complexa. Sendo assim e quando possível, uma forma de avaliar a qualidade dos resultados numéricos é a sua comparação com resultados experimentais. O IH-2VOF resolve as RANS em vários pontos do domínio, que são definidos pela dimensão da malha e que influenciam a precisão dos resultados. Para quantificar a precisão deste são feitas análises de convergência, onde se procura, com o aumento do grau de discretização do domínio numérico, compreender se existe ou não uma estabilização da solução obtida.

A avaliação da fiabilidade do modelo numérico IH-2VOF para simular este tipo de estruturas é feita em duas partes. A primeira, denominada fase de calibração, contempla três tipos de análises: (i) análise da altura de onda incidente reproduzidas nos ensaios, através da modelação de duas alturas de onda diferentes, onde se procura esclarecer para qual existe uma maior concordância entre a elevação da superfície livre obtida pelo modelo numérico e pelos ensaios experimentais; (ii) análise da influência da dimensão da malha, utilizando três malhas distintas para estudar a convergência do método e encontrar o melhor compromisso entre precisão e esforço computacional, sendo que, as malhas são caracterizadas por um aumento do grau da discretização do domínio numérico; (iii) análise da influência do modelo de turbulência, onde se verifica se ao ativar o modelo $\kappa - \varepsilon$ existe ou não melhoria dos resultados numéricos. Resumidamente, a parte de calibração prende-se com o estudo dos valores dos parâmetros a utilizar na entrada do IH-2VOF, ou seja, definir quais os valores que levam à melhor concordância entre os resultados numéricos e físicos. É ainda importante referir que durante a calibração foi apenas modelado $T = 0.89s$, uma vez que é o menor período entre todos os simulados.

A segunda parte do estudo do modelo numérico compreende a sua validação. Uma vez calibrados e estabelecidos os valores dos parâmetros de *input*, são comparados os resultados obtidos para os fenómenos intrínsecos da CAO (o fator de amplificação, o ângulo de fase e *sloshing*) pelos ensaios experimentais e pelo modelo numérico. Por fim, como passo final de validação, é feita uma comparação visual entre as imagens dos ensaios experimentais e as figuras obtidas pelo modelo numérico para a superfície livre.

Para quantificar a qualidade dos resultados do modelo numérico face aos do modelo físico, são utilizados os seguintes parâmetros estatísticos (Willmott et al., 1985):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (5.1)$$

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (5.2)$$

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|X_i - \bar{Y}|) + (|Y_i - \bar{Y}|)]^2} \quad (5.3)$$

onde n significa o número de amostras recolhidas, X_i o valor da grandeza física a comparar (solução numérica) e Y_i o valor da grandeza física de referência (resultados experimentais). A raiz do erro quadrático médio (em inglês *Root Mean Square Error - RMSE*) expressa a média da distância entre os valores de referência e os resultados obtidos pelo método em estudo, o

enviesamento (*bias*) permite perceber se estamos a subestimar ou sobrestimar os valores de referência e o índice de concordância (*ic*) quantifica a aproximação dos resultados em estudo, onde $ic = 0$ traduz a inexistência de concordância e $ic = 1$ uma concordância perfeita.

5.2.1 Domínio numérico

Tal como para o modelo físico, a modelação numérica foi realizada considerando a divisão do domínio total em duas partes: o *Domínio I* e o *Domínio II*. Esta divisão deve-se ao elevado esforço computacional que estaria associado à simulação completa. A primeira parte constitui a zona de profundidade constante do canal e destina-se exclusivamente à propagação das ondas geradas. A segunda parte contempla o domínio onde está instalada a CAO e onde existe uma diminuição da profundidade. A continuidade do escoamento entre esses dois domínios é conseguida por meio da opção de reconstrução de ondas, disponível no IH-2VOF, que permite colocar os resultados numéricos obtidos para a elevação da superfície livre final do primeiro domínio como a série de ondas a propagar no segundo.

Para descrever o *Domínio I* foi criada apenas uma malha computacional. Tratando-se de uma zona do canal com profundidade constante, não são de esperar grandes alterações nas características das ondas, ou seja, uma malha que respeite as recomendações definidas nas equações 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, traduzirá uma solução suficientemente precisa. Assim, no CORAL, definiu-se o *Domínio I* por 19 metros de comprimento e 0.62 de altura (figura 5.3). Foi considerada uma única sub-zona na direção horizontal, pois não existem obstáculos à propagação das ondas. Ao longo do eixo vertical, estabeleceram-se três sub-zonas: uma primeira que vai desde o limite superior do domínio até ao nível de repouso da superfície livre; uma segunda, entre o limite inferior da primeira e a coordenada $y = 0.14$ metros e uma terceira, que corresponde ao restante espaço do domínio. Esta divisão em três sub-zonas verticais justifica-se dada a recomendação de colocar pontos da malha coincidentes com o nível de repouso da superfície livre. Assim consegue-se: impor diretamente as condições iniciais do problema nos pontos da malha sem necessidade de interpolações; manter um espaçamento uniforme na região do domínio onde se espera a oscilação da superfície livre; reduzir a discretização em zonas não analisadas (fronteira sólida que define o fundo do canal).

Tendo em consideração o critério definido pela equação 4.14 e os períodos expostos na tabela 5.2, o período de 0.89 segundos é o que requer um espaçamento horizontal entre pontos da malha mais pequeno, pois é o que está associado a um menor comprimento de onda (1.2156 metros). Se o espaçamento da malha for definido em conformidade com as exigências associadas ao período de 0.89 segundos, também respeitará as exigências dos restantes. A tabela 5.3 resume os espaçamentos considerados em acordo com as relações aconselhadas no manual do modelo.

Tabela 5.3: Critérios a cumprir para uma onda com $H = 0.038m$ e $T = 0.89s$.

$T(s)$	$H(m)$	$L(m)$	$\Delta x_{max.}(m)$	$\Delta y_{max.}(m)$	$\Delta x \leq 2.5\Delta y(m)$
0.89	0.038	1.216	0.01	0.0038	0.01

Segundo a direção horizontal, adotou-se um espaçamento uniforme de 0.01 metros resultando em aproximadamente 122 elementos por comprimento de onda. Na direção vertical, a primeira sub-zona contempla uma variação do espaçamento entre 0.003 metros junto ao nível inicial da superfície livre e 0.0036 metros junto ao limite superior do domínio numérico. A segunda sub-zona divide de uma forma uniforme a direção vertical, com um espaçamento de 0.003 metros. Por

fim, a terceira sub-zona, discretiza com espaçamento variável a sua região, tendo os espaçamentos valores de 0.003 metros no limite inferior da segunda sub-zona e de 0.004 metros no limite inferior do domínio numérico total. Resumidamente, o domínio numérico é composto por 1900 células na horizontal e 177 na vertical. A figura 5.3 e a tabela 5.4 resumem o descrito neste parágrafo.

Tabela 5.4: Espaçamentos das sub-zonas que constituem o *Domínio I*.

direção x		direção y			
<i>sub-zona 1</i>	<i>sub-zona 1</i>	<i>sub-zona 2</i>	<i>sub-zona 3</i>		
$\Delta x(m)$	$\Delta y_{min}(m)$	$\Delta y_{max}(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta y_{min}(m)$	$\Delta y_{max}(m)$
0.010	0.003	0.004	0.003	0.003	0.004

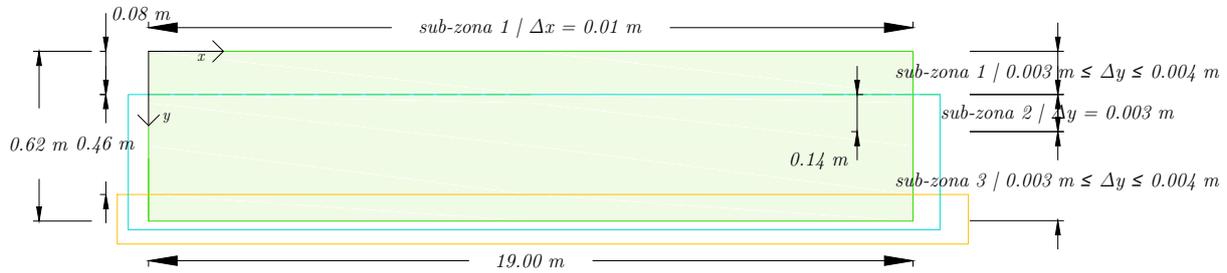


Figura 5.3: Discretização da malha do *Domínio I*, com as sub-zonas que a constituem.

Para simular numericamente a segunda parte do domínio, foram geradas três malhas distintas. A diferença entre estas encontra-se no número de células que discretizam a zona da CAO. A primeira malha (m_1) define um espaçamento na zona da CAO igual à espessura da parede frontal, a segunda (m_2) igual a metade da espessura e a terceira (m_3) igual a um quarto. Resumindo, existe um refinamento diferente das malhas na zona da CAO, o que permite estudar a convergência do método numérico com a dimensão da malha, o grau de precisão dos resultados e o esforço computacional envolvido em cada malha.

O domínio numérico tem $L_x = 15.70$ metros e $L_y = 0.54$ metros, e é comum a todas as malhas. Estabeleceram-se três sub-zonas em cada direção ortogonal. Segundo x , a primeira sub-zona define o domínio entre a origem e a coordenada 14.90 metros (fronteira exterior da parede frontal da CAO), conseguindo-se assim sobrepor os pontos da malha com o limite sólido; a segunda sub-zona discretiza a região da CAO, a câmara interna e as paredes frontal e traseira; a terceira sub-zona completa o domínio preenchendo o espaço entre o limite exterior da parede traseira da CAO e a fronteira do domínio numérico. Na vertical (segundo y), a divisão é semelhante à malha do *Domínio I*, com a exceção da segunda sub-zona, que contempla a região interna da CAO, ou seja, toda a altura entre o nível da superfície livre em repouso e a base da câmara interna (coordenada $y = 0.23m$). A figura 5.4 ilustra a divisão descrita.

A primeira sub-zona horizontal é definida por um espaçamento variável, com o seu valor mínimo a ser estabelecido junto à primeira fronteira sólida CAO. Para a malha m_1 , o espaçamento mínimo é equivalente à espessura da parede frontal ($0.005m$) e aumenta até atingir a fronteira do batedor onde toma o valor de 0.01 metros. Na segunda malha, a variação dá-se entre 0.0025 ($1/2$ da espessura da parede frontal) e 0.01 metros, e na a terceira malha, entre 0.00125 ($1/4$ da espessura da parede frontal) e 0.01 metros.

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

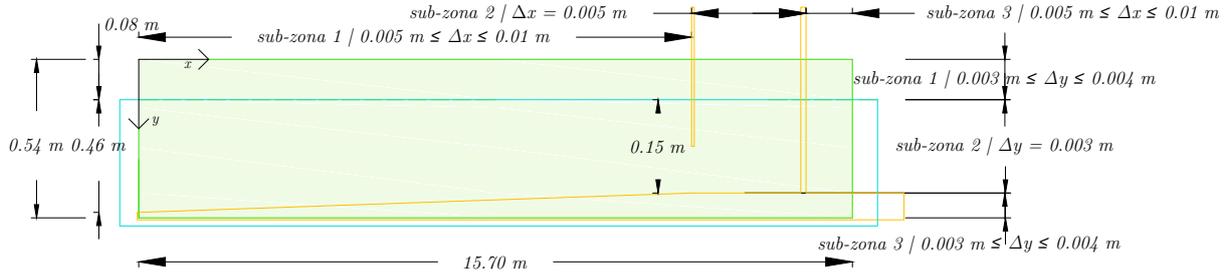


Figura 5.4: Discretização da malha do *Domínio II*, com as sub-zonas que a constituem.

A segunda zona horizontal tem um espaçamento constante por forma a manter o grau de precisão dentro da CAO. Para a m_1 , este é de 0.005 metros, para a m_2 de 0.0025 metros e na m_3 de 0.00125 metros. Por fim, a terceira sub-zona segundo x , define-se por um espaçamento variável, com início na dimensão das células da sub-zona 2 e variando até 0.01 metros na m_1 , 0.005 metros na m_2 e 0.002 metros na m_3 . No que respeita às sub-zonas verticais, o espaçamento mínimo foi limitado pela equação 4.13 na m_1 e pela dimensão mínima das células horizontais nas malhas m_2 e m_3 . A primeira sub-zona contempla um espaçamento não-uniforme, com a dimensão mínima imposta junta ao nível da superfície livre, e a variar até 0.004 metros na primeira malha, 0.003 metros na segunda e 0.002 metros na terceira. A segunda sub-zona divide o domínio de uma forma constante, com espaçamento igual à dimensão mínima estipulada para cada malha. A terceira sub-zona caracteriza-se por uma variação no espaçamento, que se inicia com a dimensão mínima e varia até 0.004 metros em m_1 e m_2 e até 0.003 metros em m_3 . As tabelas 5.5 e 5.6, resumem os espaçamentos descritos, sendo que a primeira contém informação sobre a divisão horizontal e a segunda sobre a vertical. Os esquemas na figura 5.5 explicitam o refinamento considerado. A discretização numérica do *Domínio II*, é conseguida por 347 985 células na m_1 , 460 075 células na m_2 e 1 117 584 células na m_3 .

Tabela 5.5: Sub-zonas horizontais e espaçamentos em cada malha do *Domínio II*.

Malhas	<i>sub-zona 1</i>		<i>sub-zona 2</i>	<i>sub-zona 3</i>	
	$\Delta x_{min.}(m)$	$\Delta x_{max.}(m)$	$\Delta x(m)$	$\Delta x_{min.}(m)$	$\Delta x_{max.}(m)$
m_1	0.005	0.01	0.005	0.005	0.01
m_2	0.0025	0.0075	0.0025	0.0025	0.005
m_3	0.00125	0.0025	0.00125	0.00125	0.002

Tabela 5.6: Sub-zonas verticais e espaçamentos em cada malha do *Domínio II*.

Malhas	<i>sub-zona 1</i>		<i>sub-zona 2</i>	<i>sub-zona 3</i>	
	$\Delta y_{min.}(m)$	$\Delta y_{max.}(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta y_{min.}(m)$	$\Delta y_{max.}(m)$
m_1	0.003	0.004	0.003	0.003	0.004
m_2	0.0025	0.003	0.0025	0.0025	0.004
m_3	0.00125	0.002	0.00125	0.00125	0.003

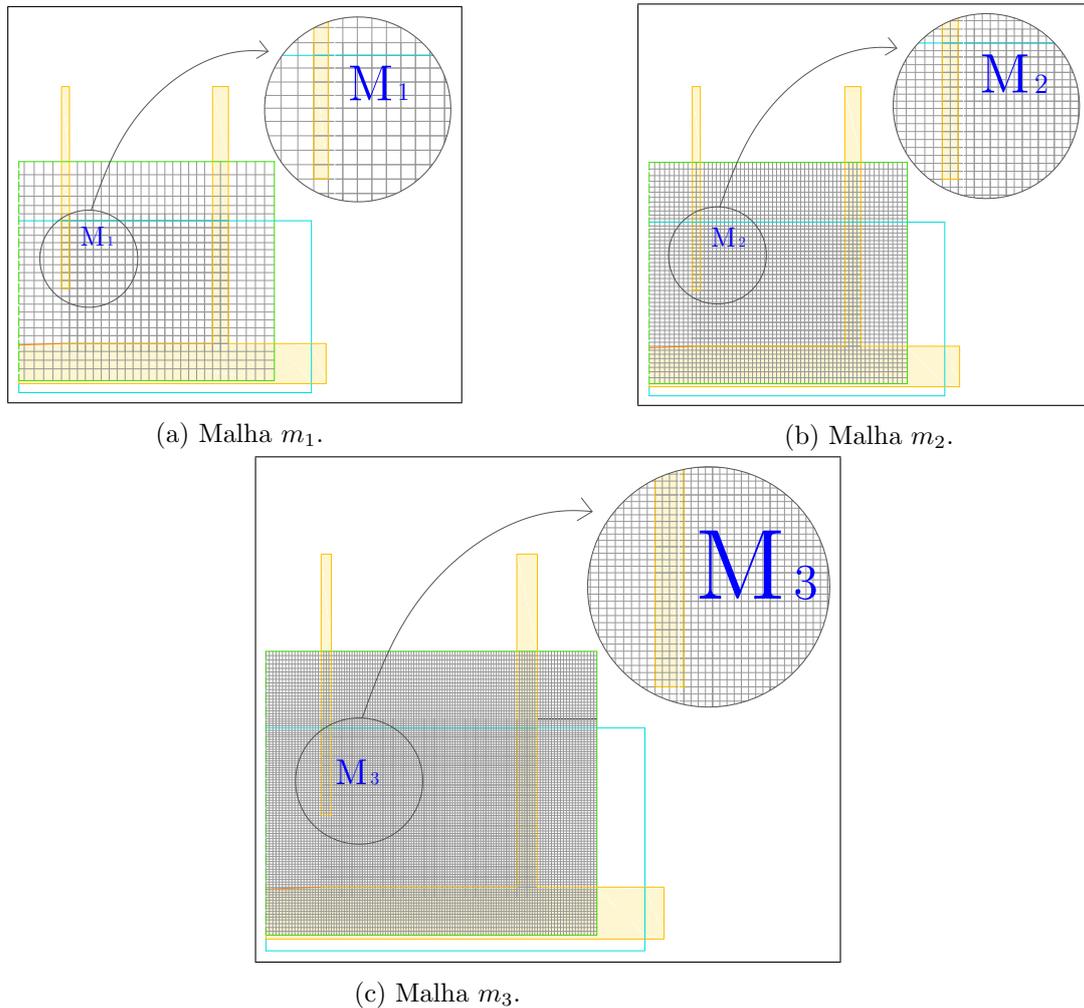


Figura 5.5: Malhas do *Domínio II*.

Uma vez estabelecidos os domínios numéricos definem-se os dados de entrada do IH-2VOF em conformidade com as características das ondas a propagar. Por forma a que a calibração do modelo numérico seja válida, todos os parâmetros numéricos têm que estar em conformidade com o que foi estabelecido e utilizado nos ensaios físicos. Portanto, as frequências de amostragem definidas no modelo numérico foram: 50 Hz para os períodos de 0.89, 1.35 e 2.21 segundos e de 25 Hz para os períodos de 1.15, 1.60 e 1.90 segundos, iguais às definidas nos ensaios experimentais. Estas foram consideradas tanto para a geração das ondas como para os resultados do modelo. No que respeita ao tempo de simulação, este foi calculado tendo em conta que se devem propagar até à CAO, no mínimo, 70 ondas, para que se estabeleça um regime de escoamento estável e se desenvolvam todos os fenómenos de interação onda/estrutura.

Sendo assim, calculou-se o comprimento de onda (equação 3.6), considerando como simplificação que a profundidade é constante em todo o canal, dividiu-se este pela dimensão total do canal, obtendo-se o número de ondas que é necessário gerar para que chegue pelo menos uma à extremidade final, somou-se o tempo que uma onda demora a chegar à CAO com 69 vezes o período, obtendo-se assim, o tempo necessário para que se propagarem 70 ondas. No entanto, é necessário ter em consideração que o IH-2VOF considera um tempo de "aquecimento" da simulação, para que no início (geração das ondas), a transição do estado hidrostático para o

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

hidrodinâmico não seja repentina. Em conformidade com o tempo de aquecimento do batedor experimental, foram considerados mais 10 segundos no modelo numérico. O tempo final de simulação é portanto, o tempo necessário para propagar 70 ondas até à CAO mais o tempo de aquecimento do modelo. A tabela 5.7 indica os valores considerados para as frequências de amostragem e o tempo de simulação, na fase de calibração e validação do modelo numérico, consoante as características de agitação testadas.

Tabela 5.7: Frequências de amostragem, f_s , e tempos de simulação, $T_{sim.}$, para as condições de agitação testadas na fase de calibração e validação do modelo numérico.

Simulação	1	2	3	4	5	6
f_s (H_z)	50	25	50	25	25	50
$T_{sim.}$ (s)	100	110	125	135	160	180

Por fim, é necessário definir a posição das sondas no modelo numérico. Nos ensaios experimentais existem sempre erros relacionados com o posicionamento das sondas, e no caso particular do canal em estudo, a posição destas foi ligeiramente alterada durante o decorrer dos ensaios, maioritariamente devido à propagação das ondas. Assim, para além de serem definidas no modelo numérico sondas correspondentes às posições teóricas dos ensaios em modelo físico, introduziram-se, adicionalmente, pontos de leitura próximos destas, para que se conseguisse obter a melhor concordância possível entre os resultados experimentais e numéricos. Na tabela 5.8 estão indicadas as posições de todas as sondas definidas no modelo numérico.

Tabela 5.8: Posição das sondas no modelo numérico, nos *Domínios I e II*.

		<i>Domínio I</i>				<i>Domínio II</i>						
		<i>Sb1</i>	<i>Sb2</i>	<i>G1</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	<i>G5</i>	<i>G6</i>	<i>G7</i>	<i>G8</i>
Δx (m)						11.46	11.76	12.21	14.83	14.91	14.98	15.04
						11.48	11.78	12.23	14.85	14.93	14.99	15.05
						11.49	11.79	12.24	14.86	14.94	15.00	15.06
		3.10	3.30	18.50	0.50	11.50	11.80	12.25	14.87	14.95	15.01	15.07
						11.51	11.81	12.26	14.88	14.96	15.02	15.08
						11.52	11.82	12.27	14.89	14.97	15.03	15.09
						11.54	11.84	12.29				15.10

5.2.2 Análise da altura de onda incidente

Apesar do deslocamento imposto no batedor durante os ensaios experimentais ser o necessário à geração de uma onda com 0.04 metros, a informação recolhida nas sondas *Sb1* e *Sb2* mostra que a altura de onda medida toma um valor próximo de 0.038 metros. Assim, procurou-se como primeiro passo de calibração, estabelecer qual das alturas de onda aproxima com maior exatidão os resultados experimentais obtidos ao longo de todo o canal.

Utilizando a primeira malha (m_1), foram feitas duas simulações, uma com altura de onda de 0.038 metros e outra de 0.040 metros. A figura 5.6 mostra os resultados obtidos por via experimental e numérica na sonda junto à face exterior da parede frontal da CAO (*G5*) e a figura 5.7 os resultados na sonda intermédia da CAO (*G7*). Exclusivamente pela análise dos

CAPÍTULO 5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CAO

gráficos não se pode determinar se uma altura de onda é mais próxima dos ensaios que outra, pelo que é necessário analisar os parâmetros estatísticos do *RMSE*, *bias* e *ic*. No entanto, de um forma geral, verifica-se uma boa concordância em relação à oscilação da superfície livre e às características das ondas (altura de onda e período de onda) entre o modelo físico e o numérico, sendo que a transformação das ondas junto à parede frontal da CAO é reproduzida de uma forma fiel pelo modelo numérico (figura 5.6), assim como a oscilação da coluna de água interna, na posição da sonda *G7* (figura 5.7).

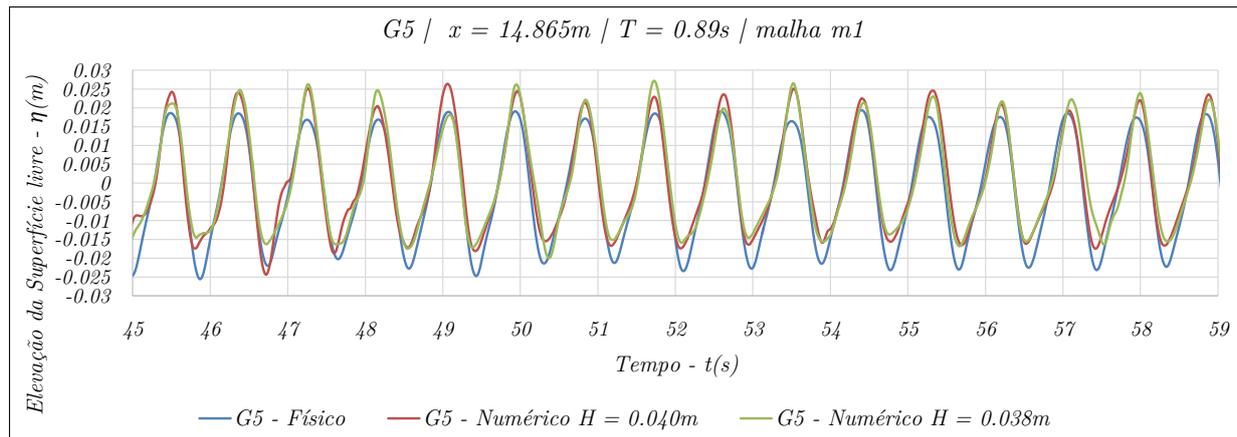


Figura 5.6: Elevação da superfície livre na sonda junto à face exterior da parede frontal da CAO (*G5*).

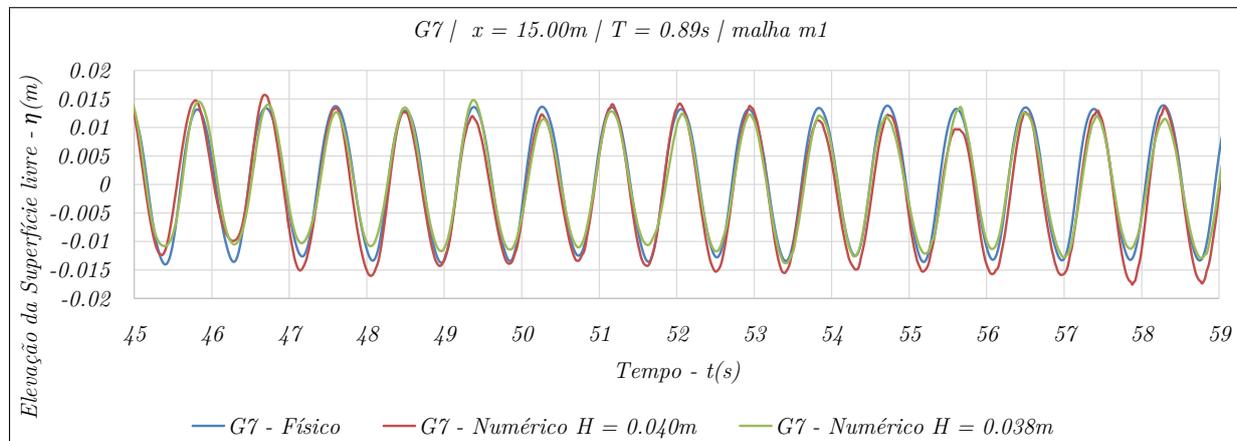


Figura 5.7: Elevação da superfície livre na sonda intermédia da CAO (*G7*).

A elevação da superfície livre nas restantes sondas, nomeadamente, na *G3*, na *G4*, na *G6* e na *G8* é apresentada no Apêndice C.1, onde se verifica novamente uma boa concordância dos resultados numéricos com os dos ensaios físicos.

Para calcular os parâmetros estatísticos (*RMSE*, *bias* e *ic*) que avaliam a precisão dos resultados numéricos, foi considerado, dentro do tempo de simulação, um intervalo de cálculo onde já se tenha estabelecido o equilíbrio dinâmico. Analisando a figura C.4, verifica-se que a estabilização da oscilação da superfície livre ocorre a partir dos 45 segundos. Para que a análise de precisão dos resultados numéricos seja representativa de todo o tempo de simulação, estabelece-

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

se que o intervalo temporal deve compreender a propagação de 15 ondas, analisando assim o intervalo até aos 59 segundos. O cálculo foi realizado entre zeros ascendentes, por forma a que todas as ondas analisadas sejam completas. Definiu-se o primeiro zero ascendente a seguir aos 45 segundos e o último zero antes do 59 segundos. A figura 5.8 ilustra as ondas da sonda G8 utilizadas.

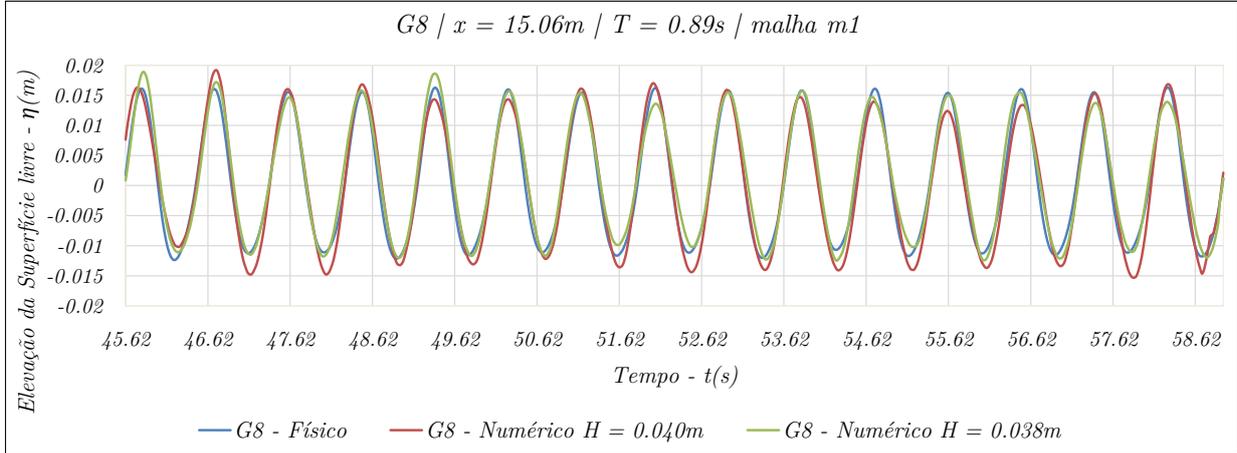


Figura 5.8: Ondas no intervalo de análise definido para o cálculo dos parâmetros estatísticos na sonda G8.

O cálculo dos parâmetros estatísticos resultou nos valores apresentados nas tabelas 5.9 e 5.10. Ambas as alturas testadas simulam com boa exatidão os valores experimentais, com o cálculo do *RMSE* a indicar erros menores que 6% em todas as sondas. Evidencia-se que, para as sondas longe da CAO, existe uma sub-estimação dos valores experimentais por parte da simulação com altura de 0.038 metros e uma sobre-estimação na simulação com altura de 0.040 metros. No entanto, considerando os valores obtidos para o *bias*, em módulo, observa-se que é sempre obtido um valor mais pequeno para a simulação com altura de onda de 0.038 metros, ou seja, existe uma menor diferença entre os resultados numéricos e os experimentais para esta altura. No que respeita ao índice de concordância, verifica-se que para as sondas G3, G4 e G8 existe maior concordância com a simulação que contempla a maior altura de onda, sendo que, para as restantes sondas, obtém-se mais precisão com a altura menor. Apesar do $H = 0.038m$ gerar a simulação com menor diferença entre os valores de elevação da superfície livre numéricos e experimentais, não é claro que seja essa a altura associada a uma maior aproximação dos ensaios, uma vez que os parâmetros *RMSE* e *ic* indicam menor erro com $H = 0.040m$ em algumas sondas. No entanto, é importante realçar que, para as sondas onde se verifica a ocorrência de fenómenos relacionados com a interação onda/estrutura, a altura de 0.038 metros fornece melhores resultados.

Tabela 5.9: Parâmetros estatísticos que classificam a precisão da solução numérica obtida pela malha m_1 para a altura de onda de 0.038 metros.

$H = 0.038 m$							
Sondas	$G3$	$G4$	$G5$	$G6$	$G7$	$G8$	G_m
<i>RMSE</i>	0.00283	0.00447	0.00420	0.00510	0.00282	0.00203	0.00197
<i>bias</i>	-0.00092	-0.00057	0.00313	0.00287	0.00223	0.00021	0.00042
<i>ic</i>	0.98465	0.97083	0.97469	0.85444	0.97701	0.98533	0.98566

CAPÍTULO 5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CAO

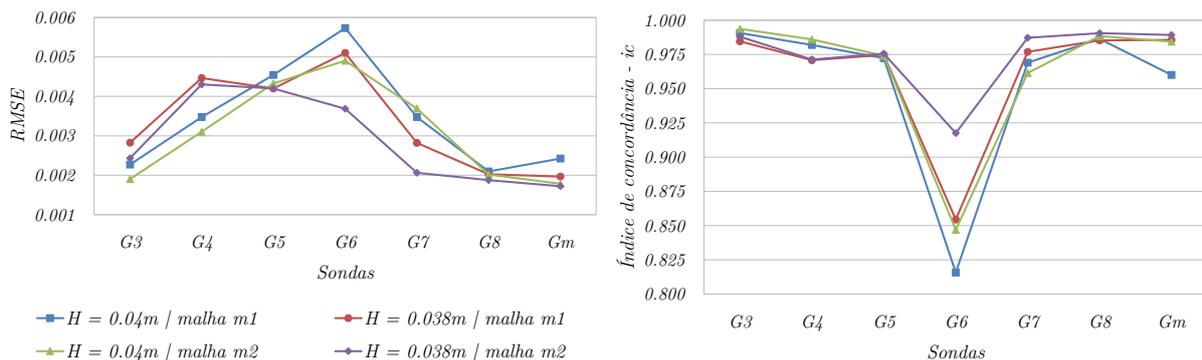
Tabela 5.10: Parâmetros estatísticos que classificam a precisão da solução numérica obtida pela malha m_1 para a altura de onda de 0.040 metros.

$$H = 0.040 \text{ m}$$

Sondas	$G3$	$G4$	$G5$	$G6$	$G7$	$G8$	G_m
$RMSE$	0.00227	0.00347	0.00454	0.00573	0.00347	0.00210	0.00342
$bias$	0.00096	0.00071	0.00337	-0.00352	-0.00275	-0.00219	-0.00247
ic	0.99069	0.98199	0.97230	0.81576	0.96909	0.98644	0.96014

Devido à incerteza que se mantém, após a análise das tabelas 5.9 e 5.10, sobre qual será a altura de onda que melhor aproxima a elevação da superfície livre experimental, decidiu-se simular novamente o domínio numérico, desta vez, com a segunda malha (m_2), procurando aumentar a precisão da solução e estabelecer uma melhoria dos resultados para uma das alturas de onda com o aumento da discretização do domínio.

De uma forma geral, a calibração da altura de onda incidente resume-se nas sub-figuras 5.9a e 5.9b, onde se verifica um aumento da precisão dos resultados numéricos quando se adota a malha m_2 . No caso do $RMSE$, os valores relativos à segunda malha estão sempre abaixo dos relativos à primeira e na análise do ic verifica-se sempre maior concordância para os resultados com a m_2 , isto é, valores de ic mais próximos da unidade. Confirma-se que a aproximação dos resultados físicos nas sondas $G3$ e $G4$ é melhor utilizando a altura de onda maior. No entanto, para as restantes sondas e para a média das sondas na CAO, a altura de 0.038 metros associa-se a resultados numéricos mais concordantes. Apesar da elevação da superfície livre não ser tão precisa nas sondas $G3$ e $G4$ para $H = 0.038m$, o valor de $RMSE$ continua a ser muito pequeno e o ic a traduzir uma excelente concordância (ver tabelas C.1 e C.2 do apêndice C.1). Os valores do enviesamento que resultam dos resultados numéricos quando se adota a malha m_2 estão também expostos nas tabelas C.1 e C.2, verificando-se que a altura de 0.038 metros continua a ter um módulo do $bias$ mais pequeno que o da de $H = 0.04m$ e que continua a subestimar os resultados experimentais nas sondas longe da CAO e a sobrestimar na $G5$ e nas do interior.



(a) Root Mean Square Error.

(b) Índice de concordância.

Figura 5.9: Representação gráfica do $RMSE$ e ic para as diferentes alturas e malhas.

É importante salientar que existe uma alteração significativa dos valores do $RMSE$ e ic na sonda $G6$. Verifica-se que existe um aumento do erro (sub-figura 5.9a) e uma quebra na concordância (sub-figura 5.9b). A justificação para tal assenta no facto da sonda $G6$ estar situada

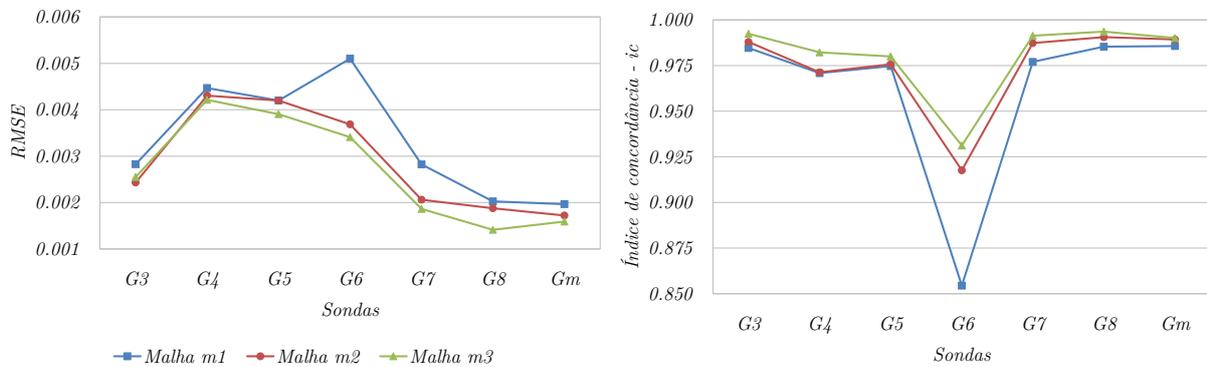
numa zona onde se verificam alguns fenómenos relacionados com a interação onda/estrutura (rebentação e a reflexão), que influenciam a exatidão do cálculo numérico e aumentam grau de dificuldade nas medições experimentais, levando a maiores discrepâncias entre eles.

Portanto, concluí-se que os resultados experimentais são reproduzidos de uma forma mais fiel se for utilizada a altura de onda incidente de 0.038 metros. A elevação da superfície livre associada a $H = 0.038m$ apresenta maior precisão especialmente na zona da CAO, onde se requer a melhor aproximação possível para o estudo da eficiência hidrodinâmica da estrutura. Os gráficos com a elevação da superfície livre em todas as sondas, quando se utiliza a malha m_2 , encontram-se no apêndice C.1 - figuras C.6, C.7, C.8, C.9, C.10, C.11 e C.12.

5.2.3 Análise de Convergência

A convergência dos resultados obtidos pelo IH-2VOF variando a dimensão da malha é analisada, tal como anteriormente, pelos parâmetros estatísticos $RMSE$ e ic . A utilização da elevação da superfície livre, $\eta(t)$, como grandeza base para o estudo da convergência tem como justificação o facto de esta ser a grandeza medida nos ensaios em modelo físico e se relacionar diretamente com o fator de amplificação da CAO. Utilizando 0.038 metros como altura da onda incidente, comparam-se os resultados de três simulações: uma com a malha m_1 , outra com a malha m_2 e uma terceira com a malha m_3 . Considera-se que existe convergência dos resultados numéricos quando o $RMSE$ e o ic não diferem muito entre duas simulações com malhas distintas.

Analisando as sub-figuras 5.10a e 5.10b, que apresentam os valores do $RMSE$ e ic em cada sonda e consoante a malha utilizada, verifica-se um aumento da concordância quando o grau de discretização do domínio numérico aumenta (de m_1 para m_3). Especialmente nas sondas da CAO, existe um ganho de precisão significativo com o refinamento da malha, sendo que este é mais evidente na sonda $G6$, onde o ic varia de 85.4% para 93.1%.



(a) Root Mean Square Error.

(b) Índice de concordância.

Figura 5.10: Análise de convergência das malhas.

Apesar da m_3 apresentar, em todas as sondas, um índice de concordância superior ao das outras duas malhas, o esforço computacional que está associado à sua utilização é significativamente mais elevado, concretamente, uma simulação à escala do modelo, demorou aproximadamente 6 dias a resolver numericamente o problema. Utilizando a malha m_2 , verificou-se que são apenas necessários, à escala do modelo, 2 dias de simulação, o que se traduz numa redução muito significativa de tempo de simulação. O elevado esforço computacional que está associado com a utilização da malha m_3 inviabiliza, de certa forma, a utilização da terceira malha para o estudo

da eficiência hidráulica da CAO. Especialmente porque a diferença entre os valores do índice de concordância da m_2 e o da m_3 é bastante baixa, tendo um valor máximo de 1.4% na sonda $G6$. A diferença no tempo de cálculo numérico tem por base o facto da terceira malha discretizar o domínio com 2.5 vezes mais células que a segunda¹.

Perante o descrito no parágrafo anterior, pode-se afirmar que a malha m_2 representa o melhor compromisso entre precisão e o esforço computacional, uma vez que o $RMSE$ e o índice de concordância não variam muito quando comparados com os da terceira malha. Na tabela C.3 do apêndice C.2, apresentam-se os valores dos parâmetros estatísticos calculados com os resultados numéricos obtidos pela malha m_3 , onde se verifica a tendência da simulação com altura de onda incidente de 0.038 metros subestimar a elevação da superfície livre nas sondas longe da CAO e sobrestimá-la nas sondas $G5$, $G6$, $G7$ e $G8$, o que também é um sinal de convergência. Nas figuras C.13, C.14, C.15, C.16, C.17, C.18, C.19 do mesmo apêndice, está exposta uma sobreposição das elevações da superfície livre obtidas experimentalmente e por via numérica, considerando todas as malhas mencionadas.

5.2.4 Análise do modelo de turbulência

Nesta secção procura-se compreender como os parâmetros do modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ influenciam os resultados da elevação da superfície livre de modo a obter uma melhor concordância destes com os resultados experimentais.

Estabelecidas a altura de onda incidente e a malha que define o domínio numérico, foram comparadas: (i) duas simulações com modelo de turbulência ativo, variando os parâmetros intrínsecos ao modelo $\kappa - \varepsilon$; (ii) uma simulação sem o modelo de turbulência. As elevações da superfície livre obtidas nessas simulações são comparadas entre si e com os resultados experimentais.

A primeira simulação com o modelo de turbulência ativo, caracteriza-se pela utilização dos parâmetros $ticf$ e $eddycoef$ ($ticf = 0.05$ e $eddycoef = 10^{-6}$) definidos por defeito no manual do IH-2VOF.

Na segunda simulação procurou-se aumentar a intensidade da parcela de turbulência, utilizando $ticf = 0.5$ e $eddycoef = 5$.

Analisando as figuras 5.11 e 5.12, que apresentam as séries temporais da elevação da superfície livre nas sondas $G5$ e $G7$ obtidas pelos ensaios experimentais e pelo IH-2VOF, com e sem modelo de turbulência, verifica-se que não existem diferenças significativas entre os resultados obtidos. Os resultados de elevação da superfície livre obtidos com as três simulações numéricas apresentam concordância com os valores obtidos em modelo físico, uma vez que seguem o mesmo andamento e as ondas têm características muito próximas. Comparando apenas os resultados numéricos obtidos pelo IH-2VOF sem modelo de turbulência com os do IH-2VOF com os parâmetros de turbulência por defeito, pode-se afirmar que parece não existir um impacto significativo do modelo de turbulência na elevação da superfície livre. No entanto, comparando os resultados entre as duas simulações com o modelo de turbulência, verifica-se que não existe qualquer diferença entre elas, as séries temporais da elevação da superfície livre estão completamente sobrepostas. Este resultado motivou uma pesquisa sobre o modelo de turbulência do IH-2VOF. Assim, comunicou-se à entidade que desenvolve o IH-2VOF (IH Cantabria) os resultados obtidos.

¹As simulações foram realizadas num computador com o seguinte *hardware* de processamento: Processador Intel(R) Core (TM) i7-2600K CPU @ 3.4 GHz e 4Gb de memória RAM.

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

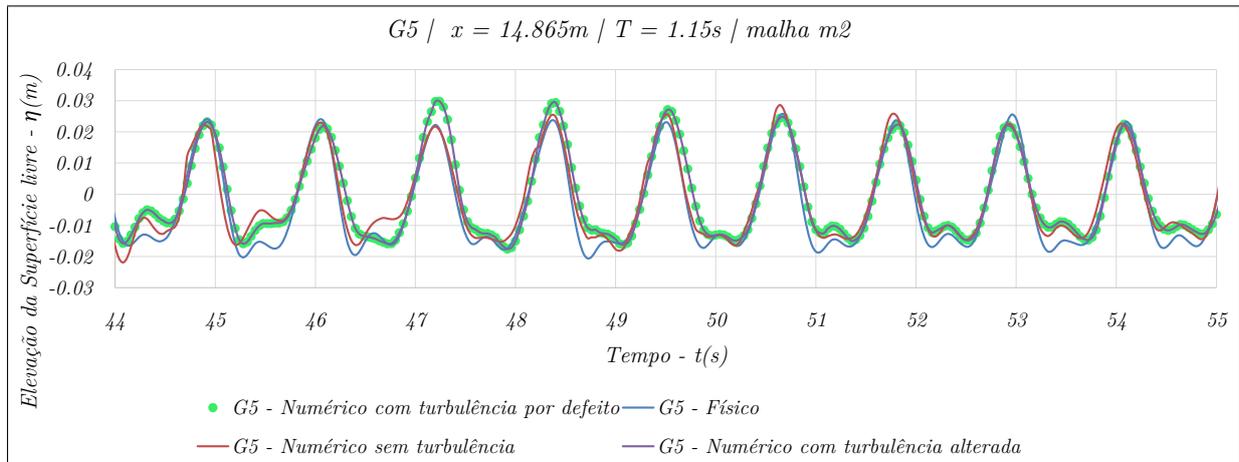


Figura 5.11: Elevação da superfície livre na sonda G5.

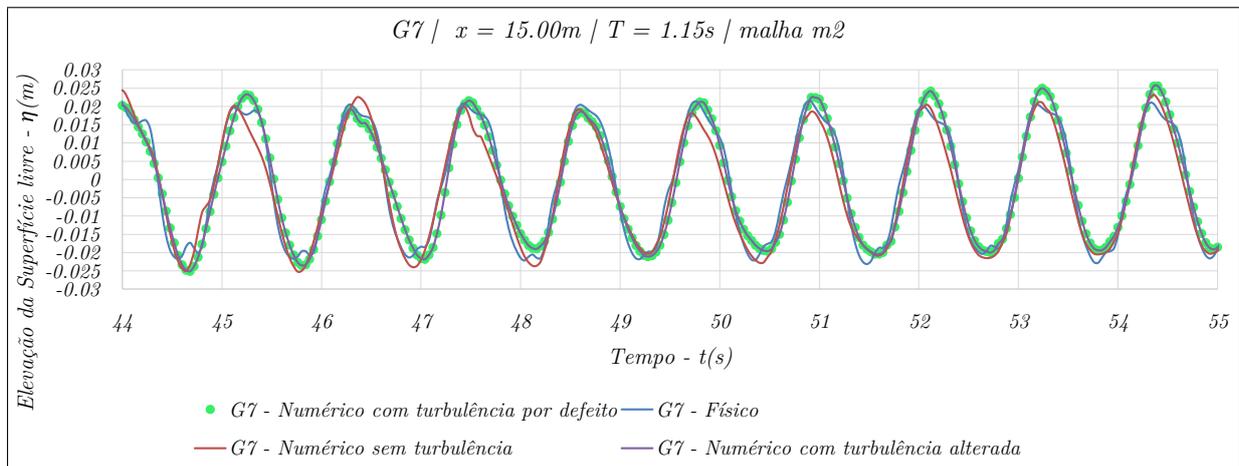


Figura 5.12: Elevação da superfície livre na sonda G7.

Segundos os autores os vórtices aparecem devido à presença do obstáculo e não ativando a turbulência pode resultar em discrepâncias no tamanho dos vórtices e na separação do escoamento atrás da parede vertical. No entanto, não são esperadas diferenças significativas em simulações bidimensionais. As diferenças serão maiores em simulações 3D devido à turbulência ser um fenómeno tridimensional.

No caso da CAO em estudo, apesar do escoamento ser turbulento, constata-se, pelo facto de não existir uma grande diferença entre os resultados numéricos das elevações da superfície livre com e sem modelo de turbulência, que o movimento de entrada e saída de água da CAO é o fenómeno principal, sobrepondo-se aos efeitos da turbulência. Assim, conclui-se que, a turbulência não é o maior responsável pela dissipação de energia no sistema.

Desta forma, decidiu-se não sobrecarregar o modelo numérico com o modelo de turbulência e desenvolver os estudos de relação geometria/fator de amplificação sem essa opção ativa.

No entanto, é necessário ter em consideração que a turbulência é um processo dissipativo, isto é, à partida, incluindo o modelo de turbulência numa simulação, o campo de velocidades pode ter tendência a reduzir-se/atenuar-se e zonas onde temos rebentação, poderá deixar de haver ou alterar-se o tipo desta. É ainda importante ter em consideração que se o modelo de

turbulência não estiver ativado, apenas a viscosidade laminar atua sobre o escoamento.

As elevações da superfície livre nas restantes sondas, incluindo as simulações com e sem modelo de turbulência, são expostas nas figuras C.20, C.21, C.22, C.23 e C.24 do apêndice C.3.

5.2.5 Validação do modelo numérico

Após a calibração do modelo numérico, ou seja, estabelecidas a altura de onda incidente, a malha de discretização do domínio numérico e a consideração ou não do modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ nas simulações pelo IH-2VOF, é necessário verificar se os parâmetros de análise da eficiência hidrodinâmica da CAO obtidos com o modelo numérico reproduzem de forma coerente os que são obtidos pelos resultados experimentais.

Nas figuras 5.13a e 5.13b apresenta-se uma comparação de resultados para o ângulo de fase e *sloshing*, obtidos em modelo físico e em modelo numérico, verificando-se que existe uma boa concordância entre ambos os modelos. A diferença de fase de oscilação entre o exterior da parede frontal e o interior da CAO é reproduzida da mesma forma, sendo que, para o menor período de onda (0.89s) está associado o maior ângulo de fase. Tanto os modelos numéricos como os ensaios experimentais mostram uma diminuição do ângulo de fase à medida que o período de onda aumenta. Quanto ao *sloshing*, é importante analisá-lo pois este caracteriza a forma como varia a superfície livre interior durante a movimento oscilatório. Uma reprodução precisa do *sloshing* valida, de certa forma, o estudo das envolventes da superfície livre. Mais uma vez existe concordância entre o modelo físico e o numérico.

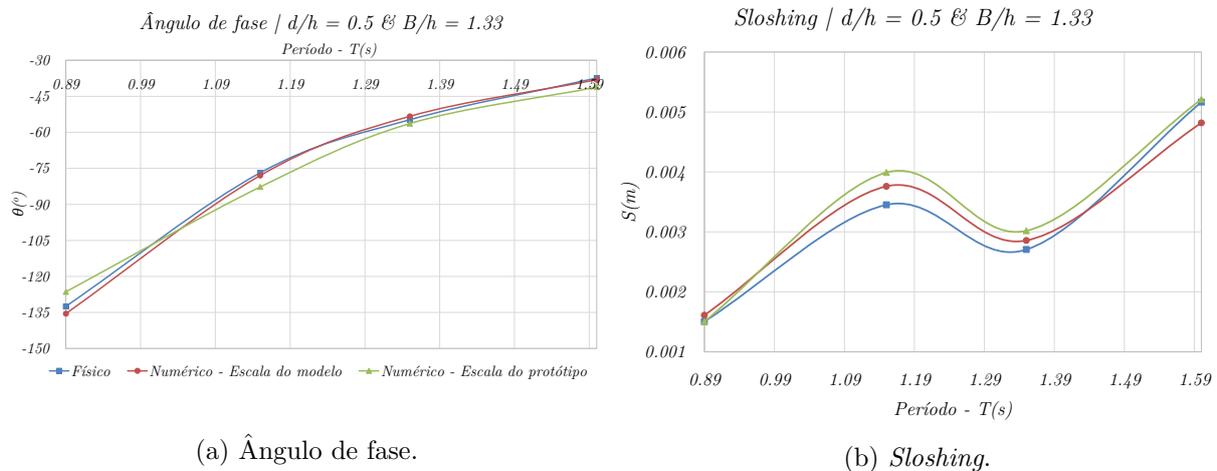


Figura 5.13: Validação do modelo numérico pela análise do ângulo de fase e do *sloshing*.

Quanto ao fator de amplificação (figura 5.14) verifica-se que este aumenta com o aumento do período de onda, e esse andamento é reproduzido de uma forma muito próxima à dos ensaios pelo modelo numérico. Sendo este o parâmetro de análise mais importante no estudo da eficiência hidrodinâmica da CAO, é crucial que a sua reprodução seja fiel. É ainda importante mencionar que não se verifica grande variação entre os resultados numéricos obtidos à escala do modelo (1 : 35) e à escala do protótipo (1 : 1), indicando que os efeitos de escala são reduzidos. No entanto, verifica-se especialmente no ângulo de fase e *sloshing*, que os resultados obtidos à escala do modelo (1 : 35) se aproximam mais dos resultados experimentais que os obtidos à escala do protótipo (1 : 1) (figura 5.13), embora a diferença seja muito pequena (aproximadamente 2.5%).

Acaba por não ser surpreendente que estes três parâmetros característicos da CAO sejam reproduzidos de uma forma muito aproximada pelo modelo numérico, pois são resultantes dos

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

resultados numéricos da elevação da superfície livre, que por sua vez já tinham sido confirmados como tendo um andamento concordante e aproximado dos resultados obtidos nos ensaios físicos aquando da calibração do modelo.

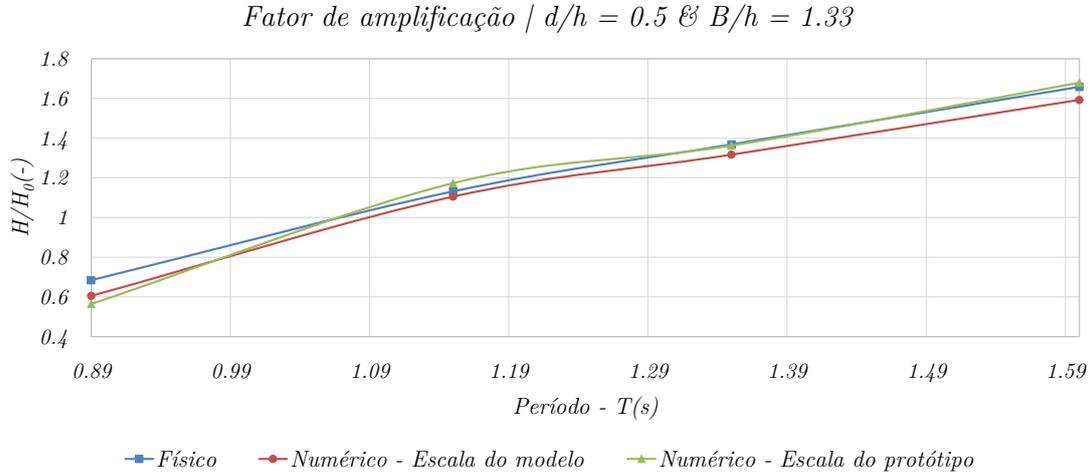
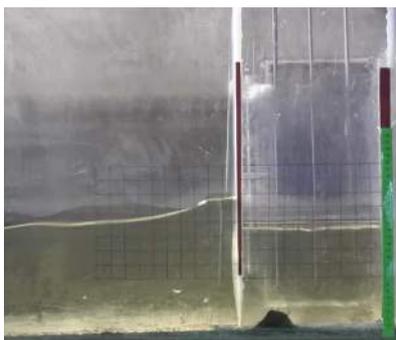


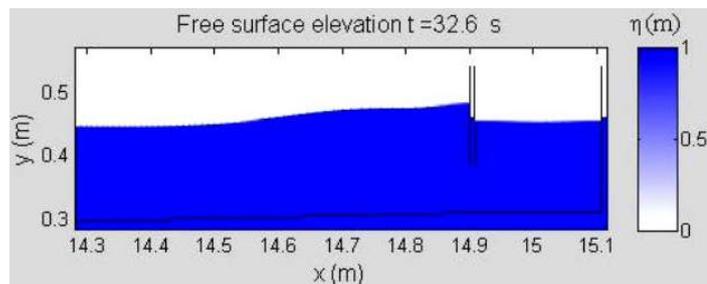
Figura 5.14: Validação do modelo numérico pela análise do fator de amplificação.

Finalmente, ainda na validação do modelo numérico, compara-se a oscilação no exterior da parede frontal da CAO e no seu interior em vários instantes dos ensaios. Para tal, apresenta-se uma série de figuras extraídas dos vídeos realizados durante os ensaios experimentais e os seus correspondentes que resultam das simulações pelo IH-2VOF, servindo estes para uma comparação direta da oscilação da superfície livre obtida a barlar da CAO e no seu interior. Pretende-se confirmar que os resultados numéricos são realmente concordantes e fiéis aos ensaios experimentais através de imagens reais, às quais não estão associados erros de medição.

A figura 5.15 apresenta o instante em que a onda atinge a parede frontal da CAO, não se verificando ainda oscilação da coluna de água interna, a figura 5.16 representa o instante onde existe a amplificação da mesma e a figura 5.17 o instante onde se observa a reflexão da onda incidente após interagir com a parede frontal.



(a) Modelo físico.



(b) Modelo numérico.

Figura 5.15: $T = 0.89s$ - Instante de elevação máxima junto ao exterior da parede frontal.

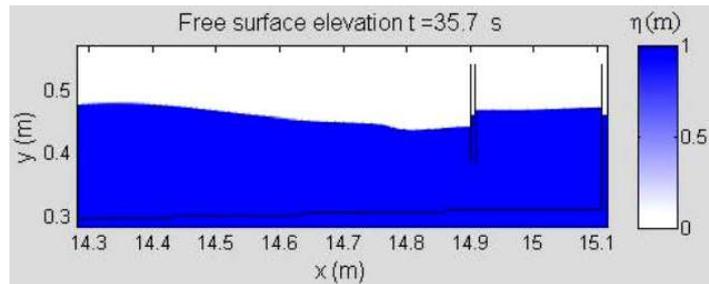
Nas três figuras apresentadas existe uma excelente concordância entre os ensaios e o modelo numérico face à forma da superfície livre fora da CAO. No interior da mesma constata-se, pela figura 5.16, que existe uma ligeira diferença entre o modelo físico e o numérico, pois o fenómeno

de *sloshing* aparenta ocorrer no experimental, enquanto que, no numérico, a superfície mantém-se horizontal durante oscilação. Contrariamente, na figura 5.17, o fenómeno de *sloshing* já é representado de uma forma mais aproximada pelo modelo numérico. Nestas figuras é evidente a oscilação desfasada entre o exterior e o interior da parede frontal da estrutura.

No período de onda de 0.89 segundos não ocorre rebentação nos ensaios experimentais mas verifica-se nas simulações numéricas. Na figura 5.18 visualiza-se a rebentação descrita, que acontece tanto no interior como no exterior da CAO.

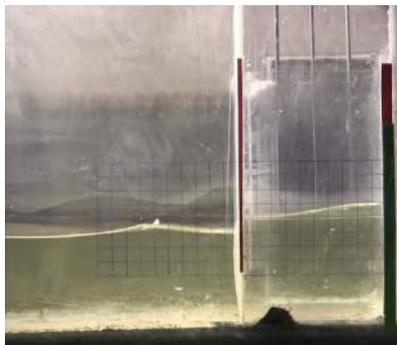


(a) Modelo físico.

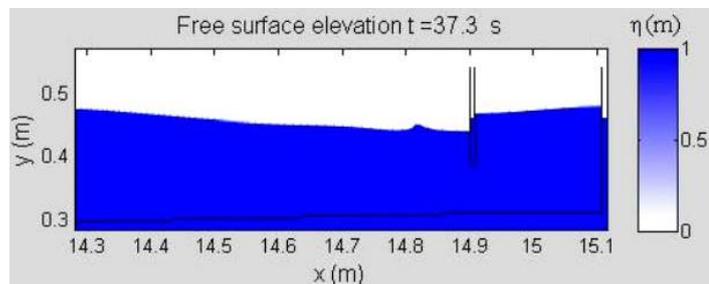


(b) Modelo numérico.

Figura 5.16: $T = 0.89s$ - Instante de amplificação da CAO.

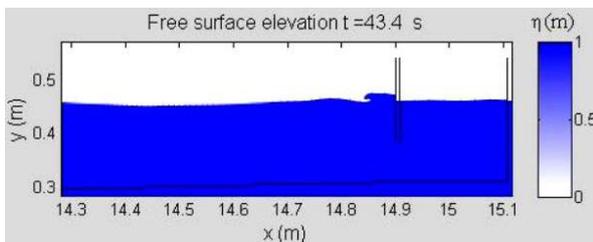


(a) Modelo físico.

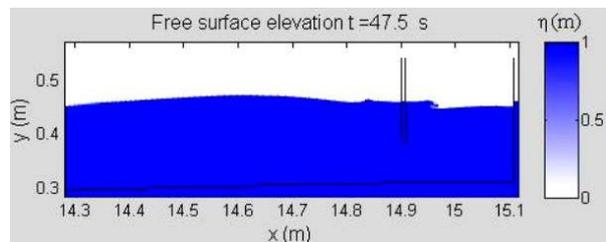


(b) Modelo numérico.

Figura 5.17: $T = 0.89s$ - Instante onde se verifica a interação entre um onda incidente e uma onda refletida pela parede frontal da estrutura.



(a) Rebentação junto ao exterior da parede frontal.



(b) Rebentação junto ao interior da parede frontal.

Figura 5.18: $T = 0.89s$ - Instante em que se verifica rebentação no modelo IH-2VOF.

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

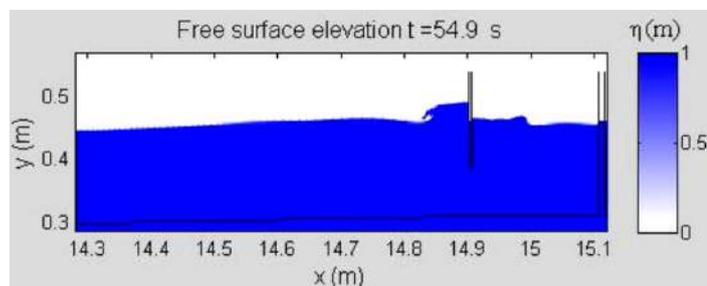
Para o período de onda de 1.15 segundos verifica-se a ocorrência de rebentação no exterior da CAO em ambos os modelos e a ocorrência de rebentação no interior da CAO apenas no modelo numérico (Figura 5.19). Comparando visualmente a superfície livre instantânea, é visível uma boa concordância a barlamar da estrutura. No entanto, na simulação em modelo numérico a rebentação aparenta ser mais energética. No interior da CAO existe alguma diferença entre os modelos físico e numérico. A oscilação da coluna de água no modelo físico parece ser regular, apresentando apenas uma ligeira reflexão junto à parede frontal, enquanto que, no modelo numérico, a forma da superfície livre durante a oscilação é mais irregular, e ocorre rebentação devido à reflexão na parede frontal. No movimento descendente da coluna de água no interior da câmara (figura 5.19) a concordância entre o modelo físico e o numérico é maior, não existindo rebentação e apresentando formas das superfícies livres semelhantes (sub-figuras 5.19a e 5.19b). No movimento ascendente (figura 5.20) existe alguma discrepância, verifica-se na simulação física que a onda é refletida junto à parede frontal e mantém o resto da superfície livre aproximadamente plana (sub-figura 5.20a), enquanto que na simulação numérica, junto à parede frontal existe rebentação da onda e a restante superfície livre aumenta (sub-figura 5.20b). De um forma geral o modelo numérico aparenta ter uma rebentação mais energética.

Para o período de onda de 1.60 segundos verifica-se que existe rebentação fora e dentro da CAO, figura 5.21 e figura 5.22 respetivamente. De uma forma geral, o comportamento da superfície livre obtida numericamente é bastante aproximado ao do modelo físico, tanto no exterior como no interior da CAO, e a rebentação que ocorre está relacionada com a reflexão em ambos os casos. No exterior da parede frontal da estrutura, a maior diferença relaciona-se com o tipo de rebentação, sendo que, para o modelo físico, a sub-figura 5.21a apresenta uma rebentação que parece ser do tipo colapsante, enquanto que, no modelo numérico, a sub-figura 5.21b apresenta uma rebentação mais mergulhante, o que vai de acordo com o que foi verificado para o período de onda de 1.15 segundos, onde a rebentação que ocorre no modelo numérico aparenta ser mais energética que a do modelo físico. No interior da estrutura é difícil classificar o tipo de rebentação. No entanto, verifica-se o que já tinha sido descrito para o período de onda anterior, que a oscilação da coluna de água na câmara obtida pelo modelo numérico é mais irregular e a superfície livre apresenta mais *sloshing*.

Concluindo, o modelo numérico IH-2VOF permite modelar de forma coerente a propagação e transformação de ondas regulares no canal, quer seja em profundidade constante quer em zonas com profundidade variável ($ic = 98.8\%$). A modelação da interação onda/estrutura não é tão exata como a da propagação de ondas. No entanto, a concordância dos resultados dos modelos físico e numérico continua a ser bastante significativa, apresentando um valor mínimo de ic de 91.8% no interior da CAO.

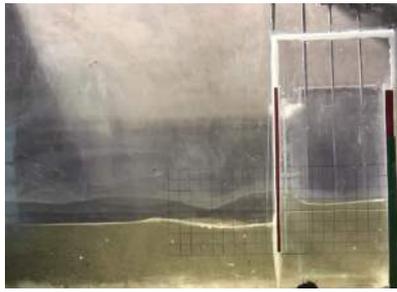


(a) Modelo físico.

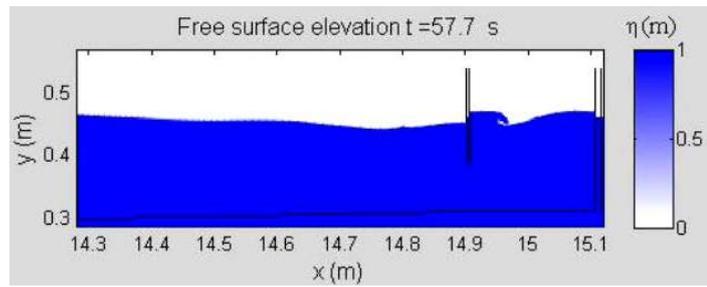


(b) Modelo numérico.

Figura 5.19: $T = 1.15$ s - Rebentação no exterior da CAO.

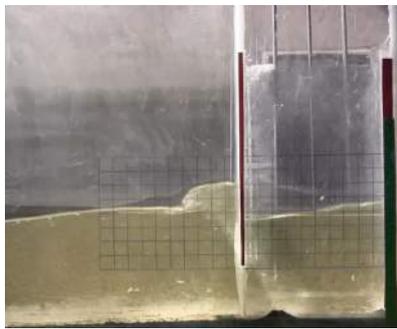


(a) Modelo físico.

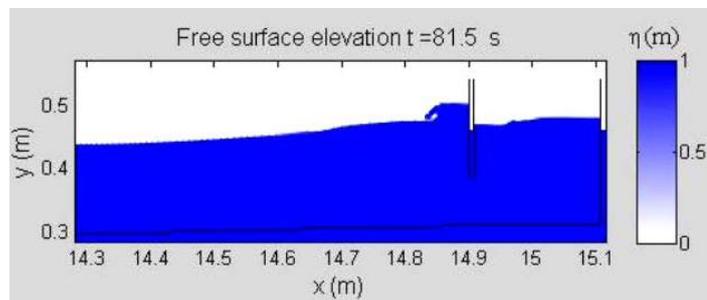


(b) Modelo numérico.

Figura 5.20: $T = 1.15s$ - Rebentação no interior da CAO.



(a) Modelo físico.

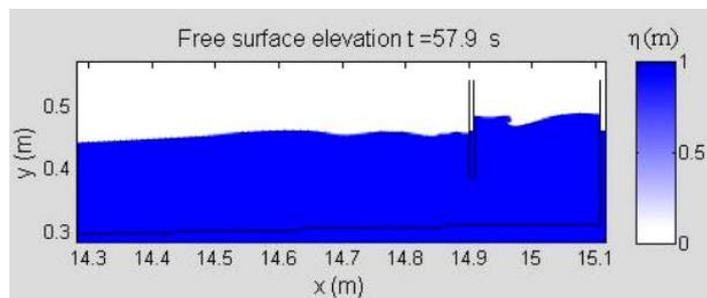


(b) Modelo numérico.

Figura 5.21: $T = 1.60s$ - Rebentação no exterior da CAO.



(a) Modelo físico.



(b) Modelo numérico.

Figura 5.22: $T = 1.60s$ - Rebentação no interior da CAO.

O maior ponto de discrepância entre os resultados experimentais e numéricos relaciona-se com a ocorrência de rebentação e do tipo de rebentação. O facto de não ter sido considerado o modelo de turbulência nas simulações numéricas pode ser uma das razões pela qual existe esta diferença. No modelo físico observa-se que o escoamento junto à CAO é turbulento, no entanto, no IH-2VOF, o modelo de turbulência não foi ativado. Assim, poderá existir uma maior dissipação de energia no modelo físico juntamente com uma diminuição na altura de onda e com alterações no fenómeno de rebentação (na intensidade e tipo de rebentação), que não se verificam no modelo numérico.

Esta sobre-estimação da elevação da superfície livre experimental por parte dos resultados

numéricos já tinha sido verificada quando foi analisado o parâmetro *bias*, onde se constatou o seu valor era sempre positivo na sonda *G5* e nas sondas do interior da CAO (ver tabelas 5.9, C.1 e C.3). Existe ainda outra possibilidade para justificar estas diferenças entre os resultados experimentais e numéricos, sendo essa que, o modelo numérico despreza perdas que acontecem devido atrito de fundo ou das parede do canal.

Apesar de existirem ligeiras discrepâncias quanto à quantificação da elevação da superfície livre e da interação onda/estrutura, todos os fenómenos que ocorrem em modelo físico, resultados da propagação das ondas e da sua interação com uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante, são reproduzidos pelo modelo numérico com índices de concordância bons, podendo, por isso, considerar-se como validado o IH-2VOF para esta aplicação.

5.3 Estudo da geométrica da CAO

Nesta secção é feita a análise da geometria da CAO (submersão e comprimento) que conduz à maior eficiência hidrodinâmica. A eficiência hidrodinâmica caracteriza-se, no presente estudo, por um compromisso entre o fator de amplificação, que deve ser maximizado, a hidrodinâmica da CAO, ou seja, um estudo da superfície livre e do campo de velocidades, e as envolventes da elevação da superfície livre, por forma a verificar que não existe um nível mínimo que permite a entrada de ar pela abertura inferior da CAO ou um nível máximo associado à possibilidade de entrada de água na turbina.

A análise da geometria da CAO é feita à escala do protótipo, por forma a que os resultados possam ser interpretados diretamente à escala real. Para tal, foi necessário escalar as grandezas envolvidas no estudo. Todas as grandezas espaciais, como a malha ou a altura de onda, foram escaladas através da multiplicação direta pelo fator de escala (35), enquanto que, as grandezas temporais, como o período de onda, foram obtidas multiplicando os valores à escala do modelo pela raiz quadrada do fator de escala ($\sqrt{35}$). Sendo assim, a malha m_2 , à escala do protótipo, resultou num domínio numérico com $L_x = 549.5m$ e $L_y = 18.9m$. O espaçamento mínimo da malha é 0.0875 metros, tanto nas sub-zonas horizontais como nas verticais. Escalando a altura de onda 0.038 metros e os períodos de onda testados na fase de calibração e validação, obtém-se os valores apresentados na tabela 5.11, que traduzem as condições de agitação testadas nas simulações à escala do protótipo.

Tabela 5.11: Condições de agitação testadas nas simulações à escala do protótipo.

$H(m)$	$T(s)$					
1.33	5.27	6.80	8.00	9.46	11.24	13.08

As configurações geométricas testadas envolvem quatro relações de submersão da parede frontal, nomeadamente, valores de d/h de 30%, 40%, 50% e 60% e valores de B/h de 1.33 e 1.00. Estas relações geométricas estão em concordância com trabalhos desenvolvidos por Evans and Porter (1995) e Teixeira et al., (2013), que testaram valores similares através de modelos numéricos diferentes, e com os valores característicos das estruturas já construídas, em particular os da Central do Pico, e que são indicados na tabela 2.1. No que respeita à relação d/h , não foram testados valores mais pequenos que 0.3 por estarem associados à entrada na CAO de ar pela parte submersa da estrutura, e valores maiores que 0.6 também não foram incluídos nas simulações, por contribuírem para uma maior reflexão da onda incidente. Quanto ao comprimento da CAO,

foi testado apenas um valor inferior ao *standard* ($B/h = 1.33$), por forma a compreender se realmente com uma câmara mais estreita se obtém uma maior amplificação.

O processo de análise da geometria da CAO inicia-se com a variação da submersão da parede frontal, mantendo o valor da comprimento de 7 metros ($B/h = 1.33$). Procura-se estabelecer a relação ideal de submersão que leva à maior amplificação e uma vez estabelecido esse valor, variar a dimensão do comprimento da câmara interna, por forma a compreender as consequências que estão associadas a essa alteração.

As figuras 5.23 a 5.26 ilustram as geometrias simuladas caracterizadas por $B/h = 1.33$ e por valores de submersão, d/h , de 0.3, 0.4, 0.5 e 0.6.

As figuras 5.27 e 5.28 ilustram as geometrias simuladas caracterizadas por $B/h = 1$ e por valores de submersão, d/h , de 0.4 e 0.5.

Em todas as figuras apresenta-se a tracejado a configuração base da CAO, isto é, $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$, e a vermelho as variações testadas.

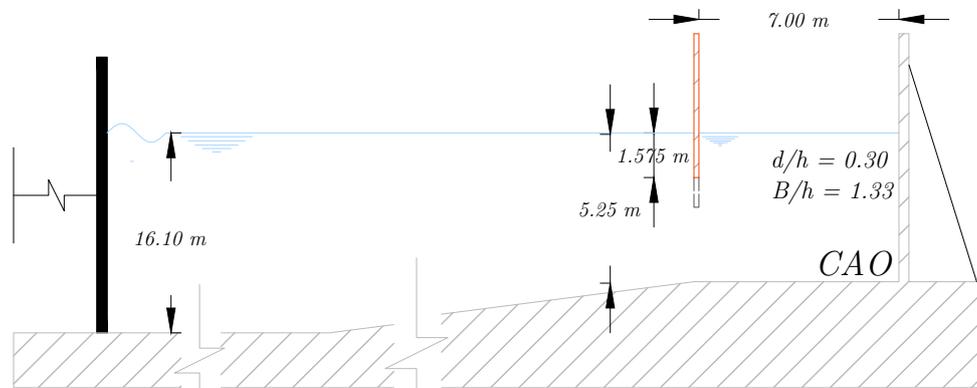


Figura 5.23: Configuração geométrica com $d/h = 0.3$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

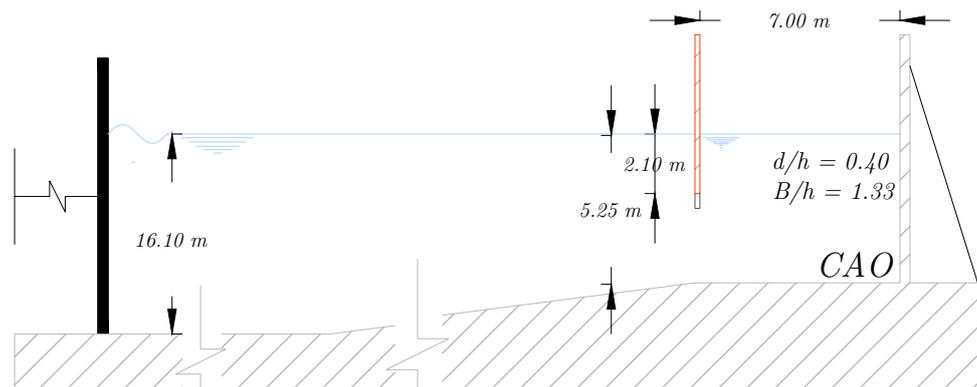


Figura 5.24: Configuração geométrica com $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

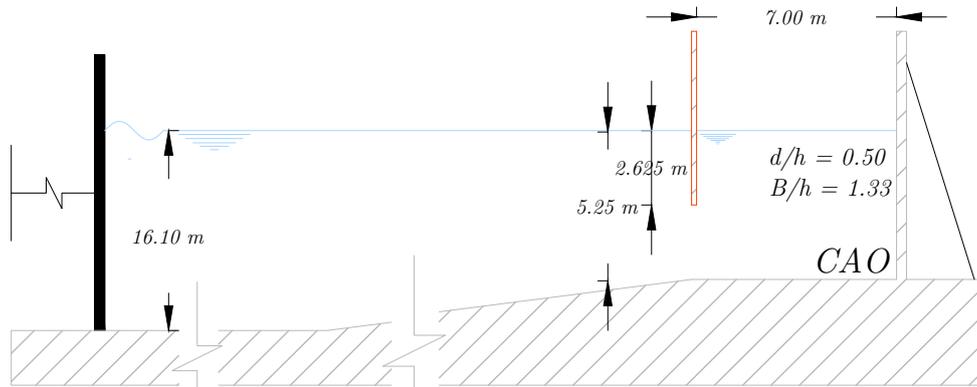


Figura 5.25: Configuração geométrica com $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

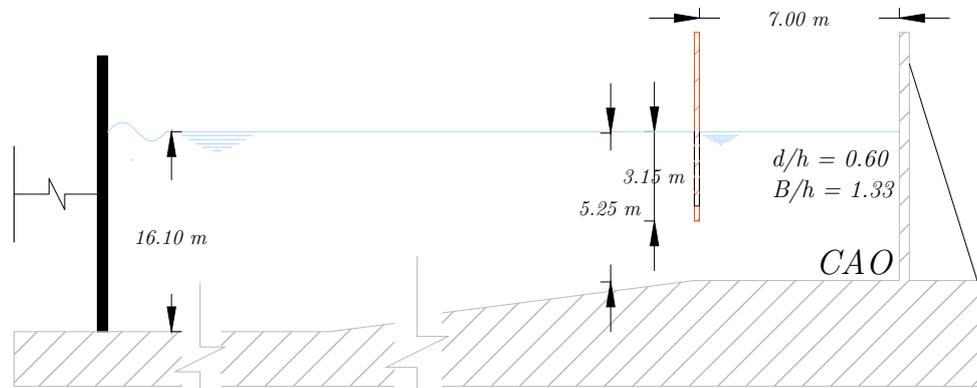


Figura 5.26: Configuração geométrica com $d/h = 0.6$ e $B/h = 1.33$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

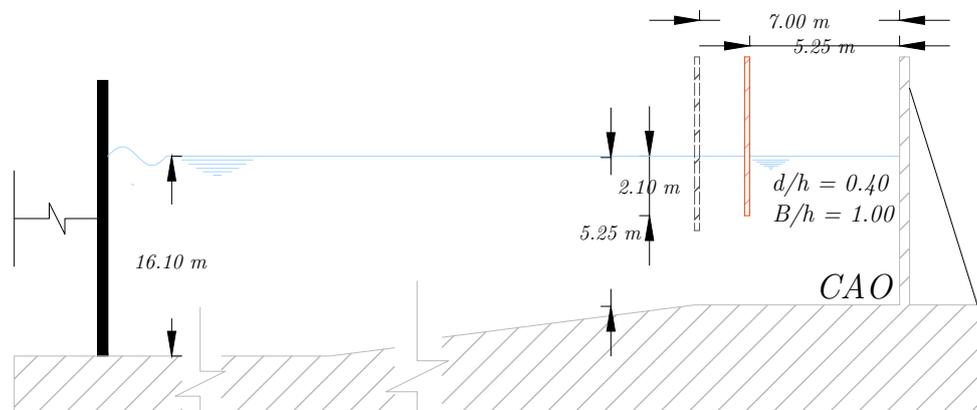


Figura 5.27: Configuração geométrica com $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.00$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

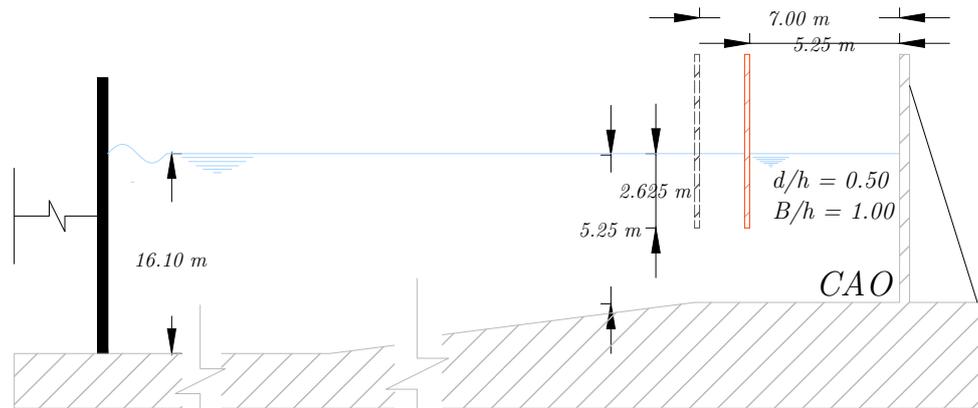


Figura 5.28: Configuração geométrica com $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.00$ e configuração base $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

Para as configurações geométricas da CAO caracterizadas por $B/h = 1.33$ ($B = 7m$), foram realizadas simulações com todos os períodos de onda apresentados na tabela 5.11. Para as configurações que envolvem um comprimento da CAO igual à profundidade ($B/h = 1.00$, $B = 5.25m$), foram apenas feitas simulações com os períodos 5.27, 6.80, 8.00 e 9.46 segundos. Consequentemente, à escala do protótipo, o estudo geométrico baseia-se num total de 32 simulações, apresentadas na tabela 5.12. A altura de onda foi mantida constante e igual a 1.33 metros em todas as simulações.

Tabela 5.12: Simulações realizadas para o estudo da geometria da CAO.

$T(s)$	d/h	B/h															
5.27	0.3	1.33	6.80	0.3	1.33	8.00	0.3	1.33	9.46	11.25	13.08	0.3	1.33	0.3	1.33		
	0.4	1.33		0.4	1.33		0.4	1.33				0.4	1.33				
	0.5	1.33		0.5	1.33		0.5	1.33				0.5	1.33				
	0.6	1.33		0.6	1.33		0.6	1.33				0.6	1.33				
	0.4	1.00		0.4	1.00		0.4	1.00				0.4	1.00				
	0.5	1.00		0.5	1.00		0.5	1.00				0.5	1.00				

5.3.1 Influência do período de onda na hidrodinâmica da CAO

Apresenta-se de seguida a influência do período de onda na resposta hidrodinâmica da CAO. Assim, analisa-se para a configuração geométrica base ($d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$) os períodos de onda 5.27, 6.80, 8.00, 9.46, 11.24 e 13.24 segundos.

A análise apresentada refere-se a três instantes de um período de onda, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre: zero ascendente, crista da onda e cava da onda.

Para que os campos de velocidades associados a cada período de onda sejam comparáveis entre si, e para que se compreendam as consequências que advêm da alteração dessa característica da onda, é necessário que estes correspondam a tempos equivalentes nas simulações. Assim, identificaram-se, para cada simulação, os instantes após a propagação do mesmo número de ondas.

Observa-se, de um modo geral, que os fenómenos e interações entre a onda incidente, a parede frontal e a câmara, aumentam de complexidade com o período de onda.

Na sub-figura 5.29a, referente ao campo de velocidades para $T = 8.00$ segundos, $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$, no zero ascendente (tempo relativo - $0.00 T$), verifica-se um movimento de água do exterior para o interior da câmara, caracterizando o início da oscilação ascendente. Devido à parede frontal impor-se como um obstáculo à propagação das ondas, observa-se, junto à sua base, um aumento significativo da velocidade. Ainda nesse instante, junto à parede frontal do lado exterior da mesma, existe um aumento na superfície livre, provavelmente devido à reflexão da onda incidente.

Durante o movimento ascendente da coluna de água interna, e até ao instante da crista ($0.22 T$), verifica-se a formação de um vórtice no interior da estrutura. Este aparece, como resultado do incremento da velocidade na entrada da CAO e da reflexão do escoamento na parede traseira (sub-figura 5.29b).

Na sub-figura 5.29c, relativa à cava ($0.75 T$), verifica-se que a interação entre o escoamento relativo ao movimento descende da coluna de água e a onda incidente na estrutura, resulta na formação de um vórtice no exterior da CAO junto à parede frontal.

Resumindo, o movimento oscilatório que resulta da interação entre a onda incidente e a estrutura é caracterizado por um campo de velocidades que apresenta dois vórtices (figura 5.29): um, no exterior da CAO junto à parede frontal, resultante da interação entre as ondas incidentes e o escoamento de saída (movimento descendente da CAO), e outro, no interior da CAO, que se deve à reflexão de escoamento de entrada (movimento ascendente da CAO) na parede traseira.

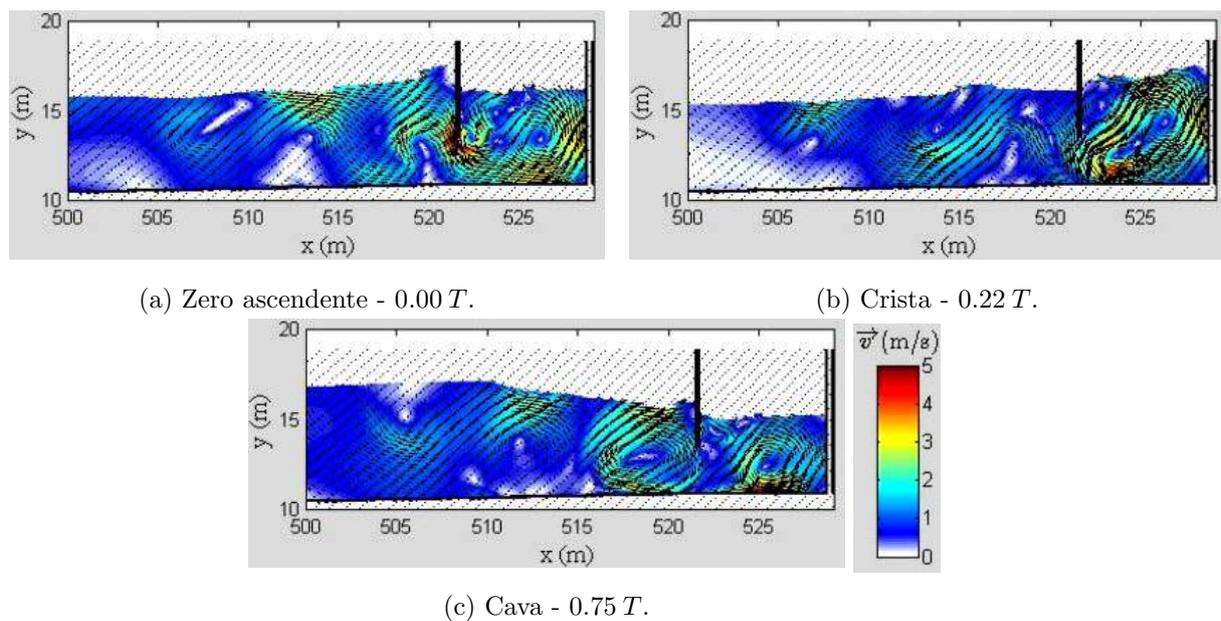


Figura 5.29: $T = 8.00s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

O padrão geral que se verifica no movimento da coluna de água oscilante durante um ciclo de onda, ou seja, o aumento da velocidade junto à base da parede frontal, o vórtice interior devido à reflexão do escoamento na parede traseira e o vórtice exterior resultante da interação entre o fluxo descendente e a ondas incidentes, verifica-se para todos os períodos de onda simulados. No entanto, surgem algumas variações na forma dos vórtices, no seu posicionamento e velocidades, à medida que o período de onda se altera (figuras D.1 e D.2 do apêndice D).

Comparando o campo de velocidades dos períodos de onda 5.27, 6.80, 8.00, 9.46, 11.24 e 13.24

segundos, nas sub-figuras D.1a, D.1b, D.1c, D.2a, D.2b e D.2c, no instante $0.00T$ (correspondente ao zero ascendente na CAO), verifica-se um acréscimo nas velocidades dentro da câmara com o aumento do período de onda. Especificamente para $T = 5.27s$ (sub-figura D.1a) não existem velocidades consideráveis na câmara interna. No entanto, para $T = 6.80s$ e $T = 8.00s$, as velocidades no interior da CAO já são elevadas, sendo clara a formação do vórtice interno (sub-figuras D.1b, D.1c). Para os períodos de onda maiores (9.46, 11.24 e 13.08 segundos) verifica-se a formação de dois vórtices no interior, um junto ao interior da parede frontal e, outro, junto à parede traseira (sub-figuras D.2b, D.2c).

No que respeita os instantes máximos de elevação da superfície livre durante um ciclo de onda analisados, verifica-se que estes ocorrem em tempos relativos ligeiramente diferentes, conforme o período de onda simulado (figuras D.1 e D.2). A crista que surge mais tarde está associada ao período de onda menor ($T = 5.27s - 0.26 T$) e a que ocorre mais cedo ao maior ($T = 13.08s - 0.18 T$). Estas variações, no instante em que ocorrem as cristas ou cavas, podem estar relacionadas com a maior ou menor ocorrência de fenómenos de reflexão ou rebentação. No entanto, as diferenças que se verificam não são significativas.

Pela sub-figura D.1d, confirma-se que o período de 5.27 segundos é o que está associado com menor atividade oscilatória da CAO. No instante da crista ($0.26 T$) o vórtice interno é muito ligeiro. Para $T = 6.80s$ e $T = 8.00s$ verifica-se o preenchimento total do interior da CAO pelo vórtice interno, sendo significativamente maior a velocidade na base da câmara (sub-figuras D.1e e D.1f). Para os períodos de onda maiores (9.46, 11.24 e 13.08 segundos) o preenchimento do interior é feito por um vórtice junto ao interior da parede frontal, resultado da elevada velocidade do fluxo de entrada e por um outro vórtice (mais ligeiro) junto à parede traseira (sub-figuras D.2d, D.2e e D.2f).

No instante correspondente à cava, sub-figura D.1g ($T = 5.27s$), salienta-se a presença de um vórtice com área considerável junto ao exterior da parede frontal e pouca atividade dentro da CAO. Nos períodos de 6.80 e 8.00 segundos, para além do vórtice exterior, verifica-se a permanência no interior da CAO do vórtice interno durante o movimento descendente da superfície livre da CAO. Estes dois vórtices apresentam-se com um sentido de rotação anti-simétrico, devido à direção da onda incidente ser contrária à do escoamento de saída (sub-figuras D.1h e D.1i). De uma forma geral, os períodos de 6.80 e 8.00 segundos apresentam campos de velocidades muito semelhantes.

Para os períodos de onda maiores (9.46, 11.24 e 13.08 segundos) verifica-se a formação de um vórtice mais comprido e achatado junto à parte externa da parede frontal câmara (ver sub-figura 5.30 ou sub-figuras D.2g, D.2h e D.2i).

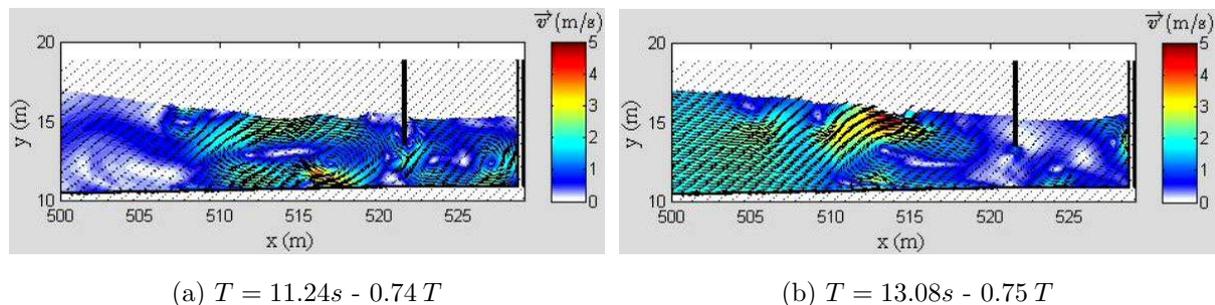


Figura 5.30: $T = 11.24s$ e $T = 13.08s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

5.3.2 Influência da variação de d/h na hidrodinâmica da CAO

De seguida analisa-se a forma como a alteração do comprimento submerso da parede frontal, d/h , influencia o campo de velocidades para o período de onda de 6.8 segundos (figuras 5.31 e 5.32).

Constata-se o aumento da intensidade do campo de velocidades no interior da CAO com o aumento do comprimento submerso da parede frontal (variar de 0.3 a 0.6). Verifica-se, nas sub-figuras 5.31a e 5.31b (relativas a $d/h = 0.3$ e $d/h = 0.4$), que existem velocidades elevadas apenas junto ao interior da parede frontal, enquanto que, para $d/h = 0.5$ e $d/h = 0.6$, todo o interior da estrutura é caracterizado por um campo de velocidades intenso (sub-figuras 5.32a e 5.32b).

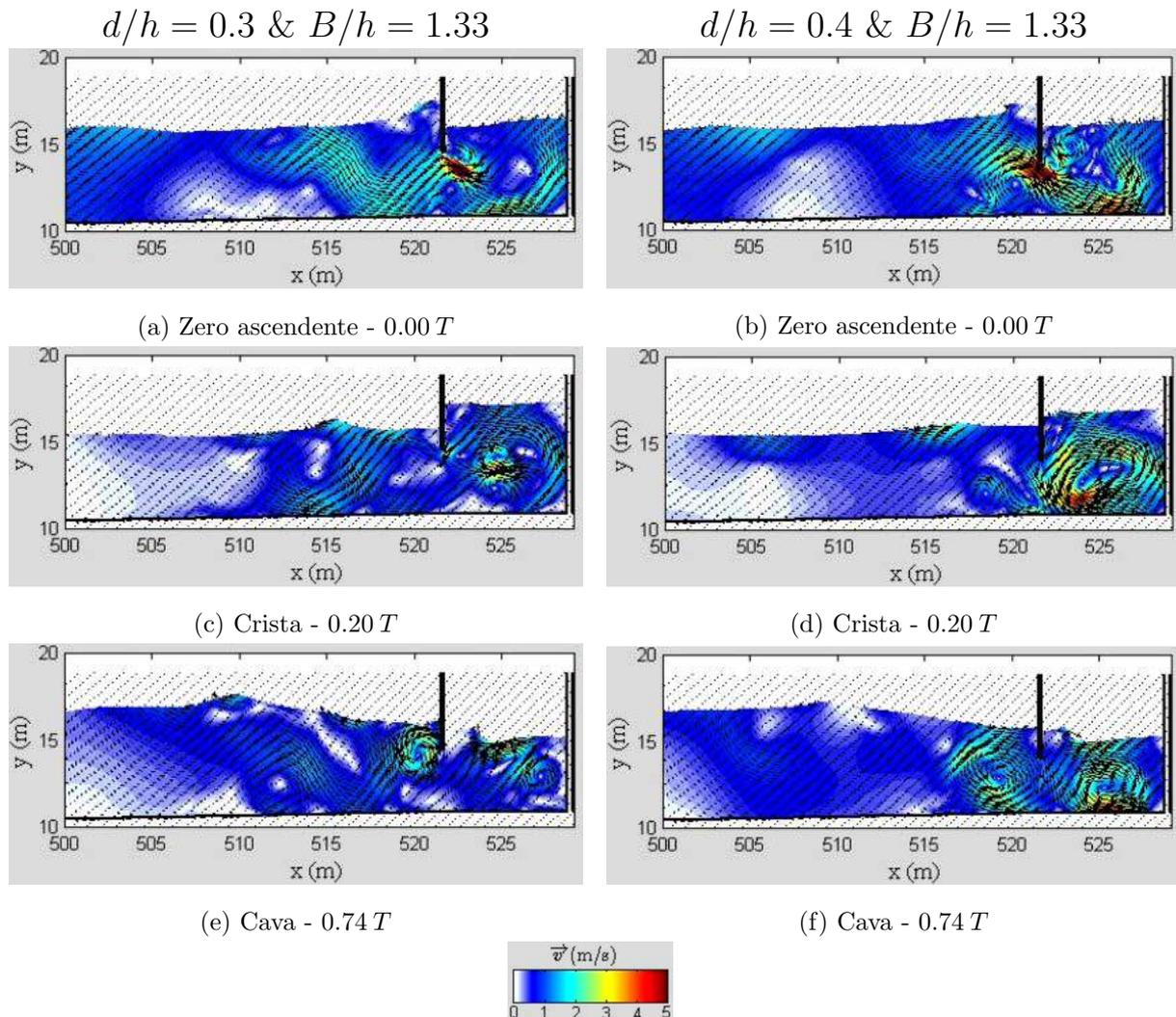


Figura 5.31: $T = 6.80s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.3$ e $B/h = 1.33$ ou $d/h = 0.4$ e $B/h = 1.33$.

Para $d/h = 0.3$ no instante do zero ascendente (sub-figura 5.31a) verifica-se que a alteração no campo de velocidades concentra-se no topo da entrada submersa, influenciando pouco as interações no interior. Com o aumento de d/h a influência da parede frontal no campo de

velocidades é cada vez maior (sub-figuras 5.31b, 5.32a e 5.32b). Para valores de submersão de 0.4, 0.5 e 0.6, constata-se um acréscimo nas velocidades junto à base da câmara interna e junto à parede traseira. No exterior, junto à parede frontal, é ainda de verificar que quanto maior é o comprimento submerso, maior é a elevação da superfície livre.

No instante da crista, a alteração dos valores de d/h conduz a formas e velocidades diferentes no vórtice interno. Para $d/h = 0.3$ (sub-figura 5.31c) o vórtice que ocorre devido à reflexão na parede traseira do fluxo de entrada, apresenta-se como sendo um fenómeno concentrado no centro da câmara, influenciando pouco o resto do campo de velocidades.

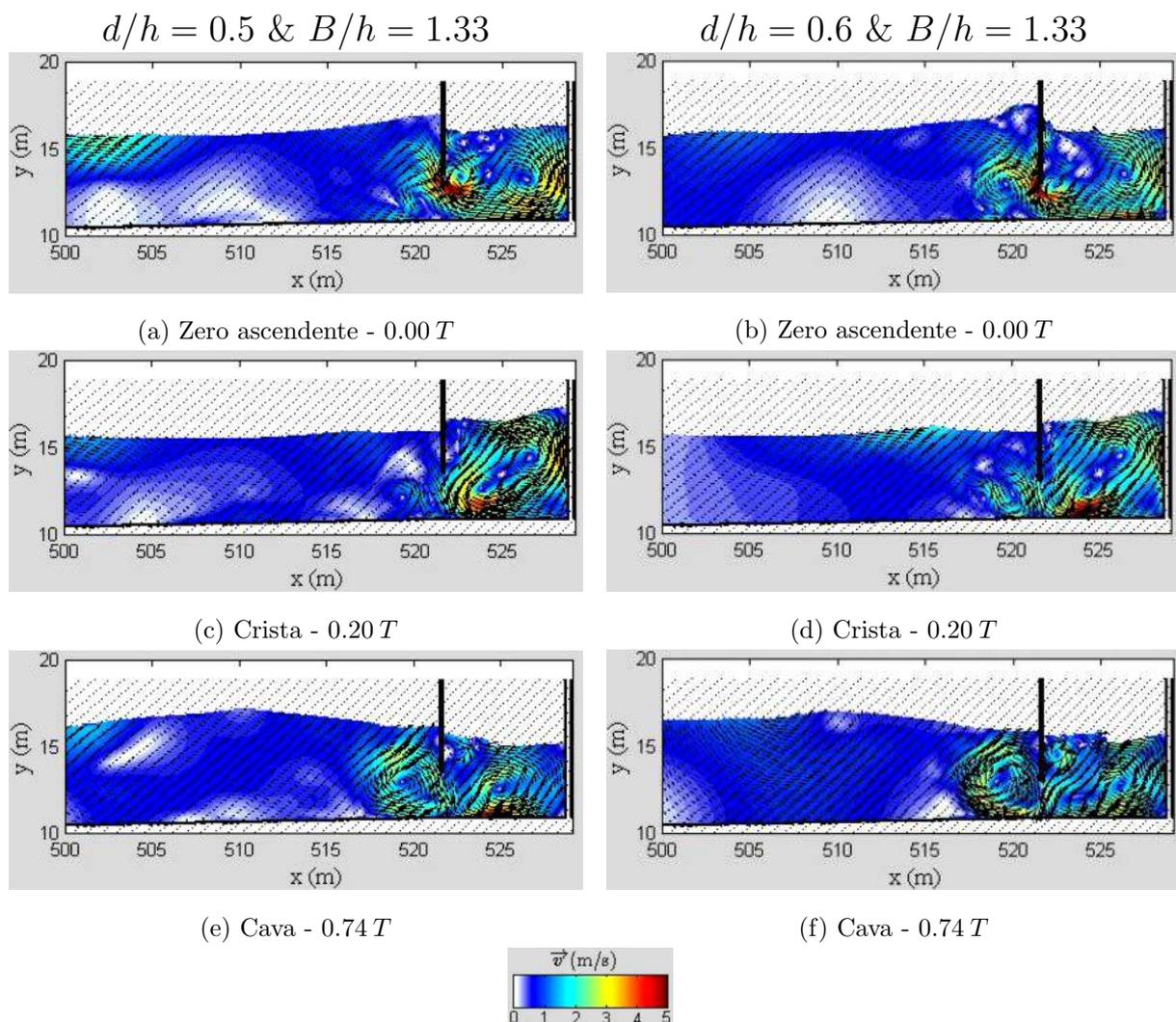


Figura 5.32: $T = 6.80s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$ ou $d/h = 0.6$ e $B/h = 1.33$.

Com o aumento de d/h (de 0.3 e 0.6) verifica-se que o vórtice interno começa a preencher de forma cada vez mais significativa o interior da CAO, apresentando velocidades máximas junto à base (figuras 5.31d, 5.32c e 5.32d).

Relativamente ao instante correspondente à cava, o vórtice que se desenvolve junto ao ex-

terior da parede frontal apresenta dimensões e velocidades cada vez maiores com o aumento da relação de submersão. Para $d/h = 0.3$ (sub-figura 5.31e) verifica-se apenas um ligeiro vórtice, concentrado imediatamente junto ao exterior da parede frontal. Para maiores relações de submersão (sub-figuras 5.31f, 5.32e e 5.32f), a área que o vórtice ocupa é cada vez maior, devido à maior reflexão da onda incidente e à maior velocidade do escoamento de saída. O vórtice interior, à semelhança do seu anti-simétrico, aumenta cada vez mais a sua área com o aumento de d/h . Para os valores de 0.3 e 0.4 o vórtice ocupa apenas a região interior junto à parede traseira, enquanto que, para valores maior de submersão, o vórtice interno ocupa quase toda a área interior e surge ainda um ligeiro vórtice junto ao interior da parede frontal, devido à reflexão do escoamento de saída (sub-figuras 5.32e e 5.32f).

Concluindo, de entre os valores de d/h testados, o aumento do comprimento submerso da parede frontal contribui para o aumento da dimensão dos vórtices interiores e exteriores. Para $d/h = 0.3$ existe menos obstáculo à propagação das ondas incidentes, e, como tal, verificam-se menos alterações no campo de velocidades e uma menor reflexão da agitação incidente. Para valores de d/h maiores a área da entrada submersa é menor resultando em maior reflexão e em maiores gradientes de velocidades.

5.3.3 Influência de d/h no fator de amplificação e frequência de ressonância para $B/h=1.33$

Descrita a forma como a hidrodinâmica da CAO é influenciada pelo período da onda e pelo comprimento submerso da parede frontal, analisa-se de seguida, a amplificação da coluna de água oscilante (fator de amplificação). Para os períodos de onda de 5.27, 6.80, 9.46, 11.24 e 13.08 segundos e para as relações de submersão $d/h = 0.3, 0.4, 0.5$ e 0.6 foram calculados os respetivos fatores de amplificação, ilustrados na figura 5.33. No intervalo dos períodos de onda testados, verifica-se um aumento do fator de amplificação com o aumento do período da onda, apresentando um comportamento regular. Para os períodos de onda menores o acréscimo no fator de amplificação é mais significativo, aumentando cerca de 47.0% quando o período passa de 5.27 para 6.80 segundos. Para períodos de onda maiores verifica-se uma variação menor no fator de amplificação, sendo que, por exemplo, entre os períodos de 9.46 e 11.24 segundos, a diferença é de apenas 3.5%.

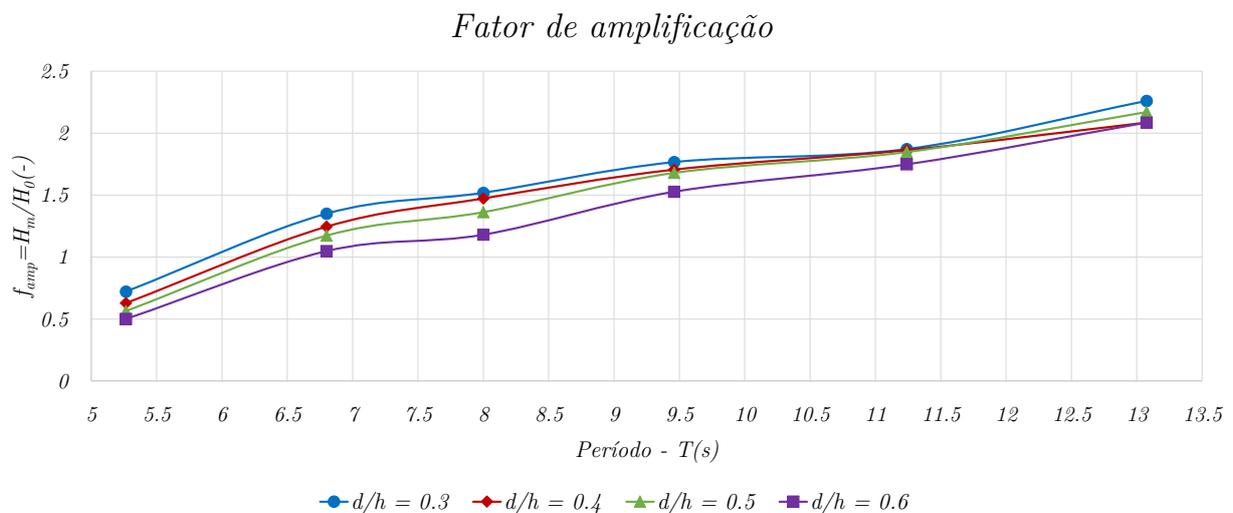


Figura 5.33: Variação do fator de amplificação com d/h e com o período de onda.

No que respeita os valores de submersão relativa da parede frontal, d/h , o valor de 0.3 (comprimento de submersão de 1.575 metros) está associado à maior amplificação em todos os períodos de onda. No entanto, à medida que o período de onda aumenta, a diferença de amplificação entre os diferentes valores de d/h é menor, em especial para o período de 11.24 segundos, onde se obtém praticamente a mesma amplificação para d/h de 0.3, 0.4 ou 0.5. Concluí-se, desta forma, que com o aumento do período de onda, a relação de submersão relativa deixa de ter uma influência significativa no fator de amplificação. Contrariamente a $d/h = 0.3$, $d/h = 0.6$ (comprimento de submersão de 3.15 metros) apresenta-se como o valor que está associado a uma menor amplificação em todos os períodos de onda.

De um ponto de análise teórico, devido a características intrínsecas às estruturas do tipo Coluna de Água Oscilante, o aumento regular e contínuo do fator de amplificação que se verifica com o aumento do período de onda (figura 5.33) não é válido qualquer que seja o valor de T , sendo que numa situação limite, quando o período de onda tende para infinito, a média das alturas de onda no interior da CAO tenderá na o dobro da altura de onda no exterior (quando $T \rightarrow \infty$ então $f_{amp} \rightarrow 2$).

Outro aspeto a analisar na figura 5.33 é a frequência de ressonância da CAO. Esta é normalmente identificada quando existe um acréscimo significativo no valor de f_{amp} , ou seja, quando existe uma tendência para o sistema oscilar com maior amplitude num determinado período de onda, não seguindo o mesmo andamento para os períodos de onda contíguos.

No entanto, não se verifica qualquer pico de amplificação, indicando que o fenómeno de ressonância não ocorre para nenhum dos períodos de onda testados.

Por forma a compreender que valores de T estão associados com esse fenómeno, calculou-se explicitamente um valor aproximado da frequência fundamental da CAO pela equação 2.1 e obteve-se:

$$\begin{cases} h = 5.25m \\ S = 7m \times 7m \end{cases} \longrightarrow f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.81}{5.25 + 0.41(7 \times 7)^{1/2}}} = 0.174Hz \longrightarrow T_f = 5.71s \quad (5.4)$$

Assim, sendo o período fundamental da CAO de aproximadamente 5.71 segundos, a ocorrer algum pico no fator de amplificação, seria entre os dois períodos de onda mais baixos simulados (5.27 e 6.80 segundos). No entanto, não se verifica qualquer aumento de amplificação ao redor destes períodos de onda, sugerindo que o pico de ressonância será estreito e ocorrerá para valores muito próximos de T_f . Por forma a confirmar o acima descrito seria necessário realizar mais simulações numéricas, com o valor do período da onda gerada em torno do valor de 5.71 segundos, o que sai do âmbito desta dissertação.

De seguida é feita uma análise da envolvente da elevação da superfície livre. Mais concretamente, procura-se compreender a forma como os máximos e mínimos desta variam com a alteração do valor de d/h e do período de onda, para que se garanta a funcionalidade hidráulica da CAO.

Para o período de onda de 5.27 segundos (figura 5.34) não se verifica uma grande diferença entre as envolventes máximas e mínimas. Algo que vai de acordo com o facto do fator de amplificação ser menor que a unidade, ou seja, que a altura média das ondas na CAO é pouco mais de metade da altura da onda gerada (1.33 metros).

Com o aumento de d/h constata-se uma diminuição da amplitude entre as envolventes máximas e mínimas. Para os valores de 0.3 e 0.4 as envolventes exteriores e interiores têm praticamente a mesma amplitude, enquanto que, para $d/h = 0.5$ e $d/h = 0.6$, os valores máximos

e mínimos da envolvente interior diferem muito pouco da posição de repouso (sub-figuras 5.34a e 5.34d). Confirmando-se assim a reduzida oscilação da CAO para este período de onda, e, em especial, para valores de d/h maiores.

Verifica-se ainda que a envolvente máxima da elevação da superfície livre no exterior da CAO, junto à sua parede frontal, é maior para comprimentos da parede frontal maiores. Confirma-se assim que a um valor maior de d/h está associado uma maior reflexão da onda incidente. De uma forma geral, pela análise das envolventes para $T = 5.27s$, não se verificam oscilações extremas na CAO, observando-se um máximo da envolvente da superfície livre interior junto à parede traseira.

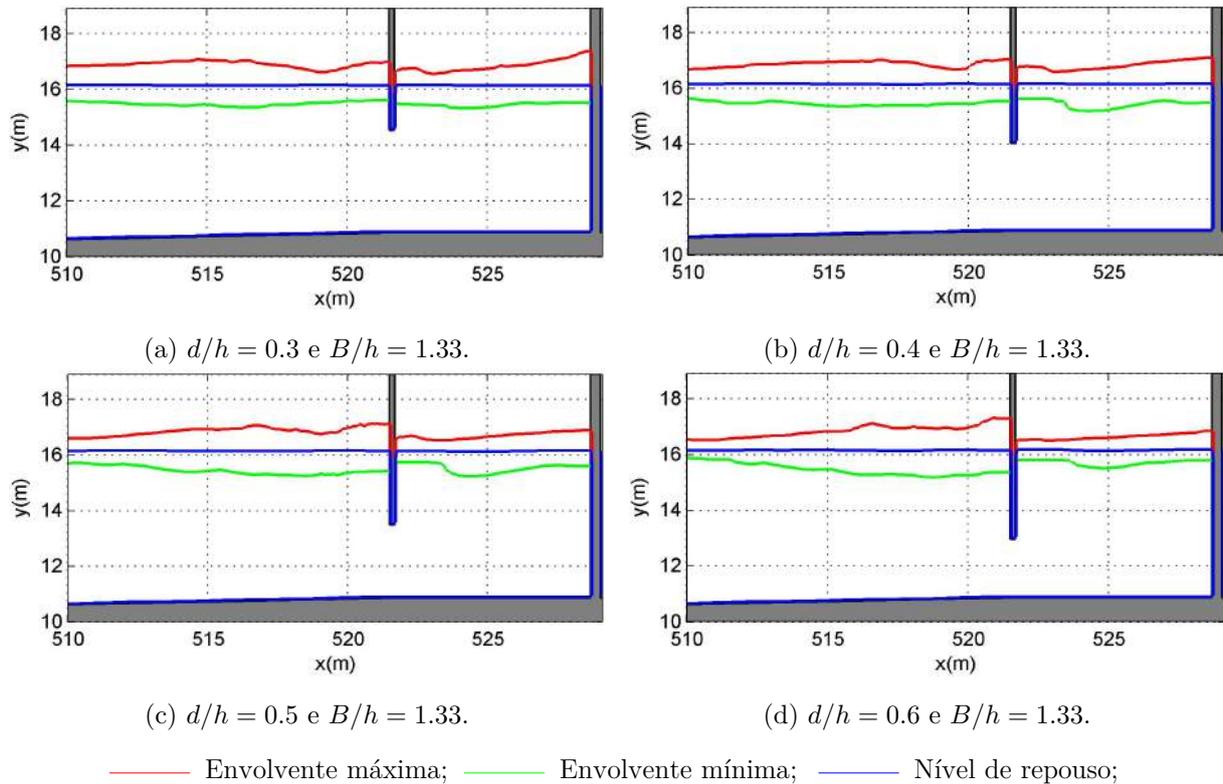


Figura 5.34: $T = 5.27s$ - Envloventes da elevação da superfície livre.

Para o período de onda de 6.80 segundos (figura 5.35) obtiveram-se envolventes menos lineares. Com comprimentos menores de submersão existem alguns pontos que devem ser tidos em consideração. Nomeadamente, junto à parede frontal, observa-se que o mínimo da elevação da superfície livre atinge a extremidade inferior desta, o que possivelmente resultará na entrada de ar para câmara interna (sub-figura 5.35a), reduzindo a eficiência hidrodinâmica da CAO.

Ao nível da envolvente máxima, observa-se que na zona junto à parede frontal, os valores são significativamente maiores que em qualquer outro ponto do interior. Apesar de isto não resultar em nenhuma consequência direta, uma vez que a turbina é normalmente instalada na parte de trás da estrutura, deve-se evitar uma elevação irregular da superfície livre da CAO, para que não exista projeção de salpicos de água para a zona da turbina.

Para $d/h = 0.5$ e $d/h = 0.6$ não se verificam problemas de funcionalidade da CAO, apesar da irregularidade das envolventes mínimas (sub-figuras 5.35c e 5.35d).

Para os restantes períodos as envolventes máximas e mínimas da elevação da superfície livre seguem a mesma tendência. Quando d/h é mais pequeno verifica-se uma maior amplitude entre envolventes e uma grande proximidade entre o valor mínimo e a cota da base da parede frontal. Para $T = 11.24s$ e $T = 13.08s$, que estão associados a um maior fator de amplificação, verifica-se, em vários pontos do interior da CAO, que a envolvente máxima atinge o limite do domínio numérico, alertando para o facto de que a cota de implantação da turbina deve ter em consideração a possibilidade da elevação da coluna de água interna ter valores elevados (figuras E.3 e E.4 do apêndice E).

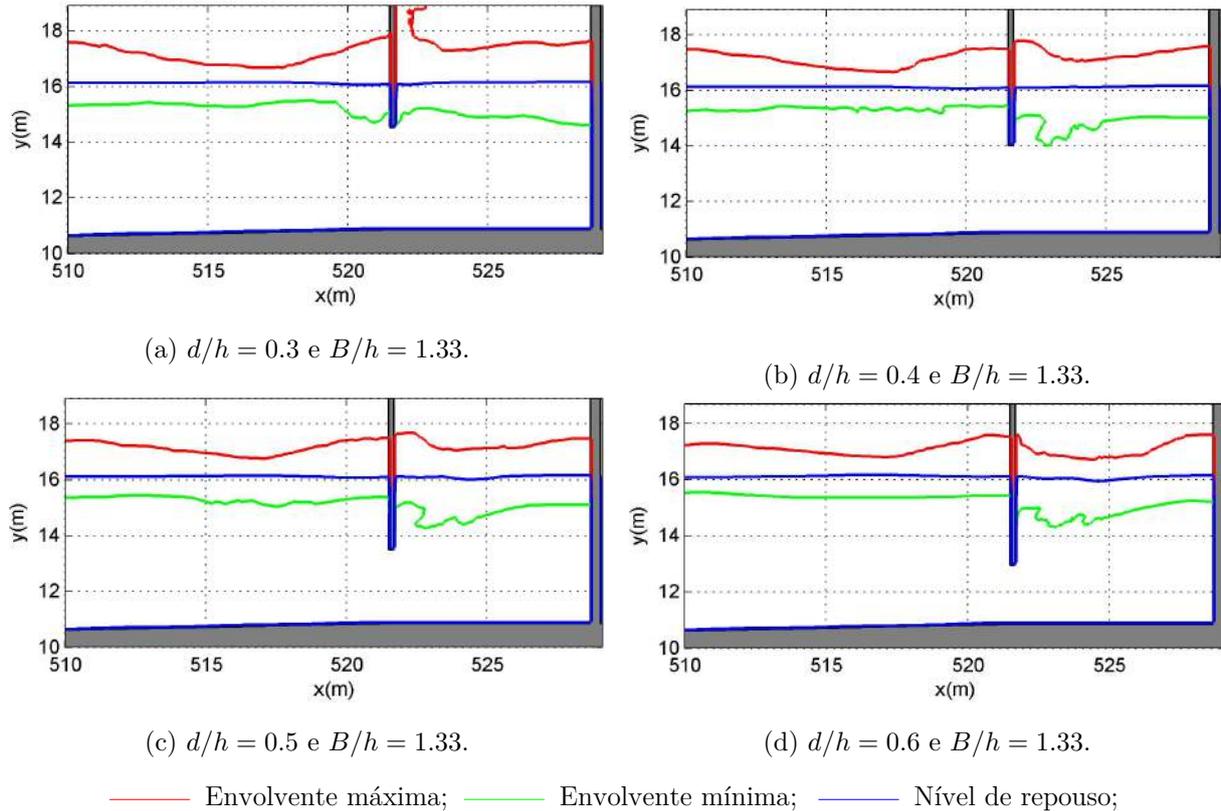


Figura 5.35: $T = 6.80s$ - Envloventes da elevação da superfície livre.

Ainda dentro das relações de submersão, foi feita uma análise sobre a forma como o ângulo de fase, θ , varia com estas e com o período da onda (figura 5.36). À medida que o período de onda aumenta, verifica-se uma diminuição no ângulo de fase até $T = 9.46s$, seguindo-se uma estabilização do mesmo para os períodos restantes. À semelhança do fator de amplificação, no ângulo de fase verifica-se que o comprimento de submersão de 1.575 metros ($d/h = 0.3$) está associado sempre com o menor valor, qualquer que seja o período de onda, e que existe uma maior diferença entre a fase de oscilação à medida que o comprimento submerso aumenta.

No mesmo contexto, verifica-se que o ângulo de fase deixa de ser tão influenciado pela geometria para períodos de onda maiores, uma vez que a diferença entre valores de θ para diferentes valores de d/h não é muito significativa para períodos maiores que 9.46 segundos, especialmente entre os valores de d/h de 0.3 e 0.5.

Do ponto de vista teórico, à medida que o período de onda aumenta ($T \rightarrow \infty$) o ângulo de fase tenderá para zero ($\theta \rightarrow 0$), uma vez que o comprimento de onda toma valores muito maiores

que o comprimento da câmara, não existindo grande diferença entre a fase exterior e interior de oscilação.

Concluindo, independentemente do período de onda, quanto menor for o valor da relação geométrica de submersão, menor será o desequilíbrio de força externas a atuar na parede frontal.

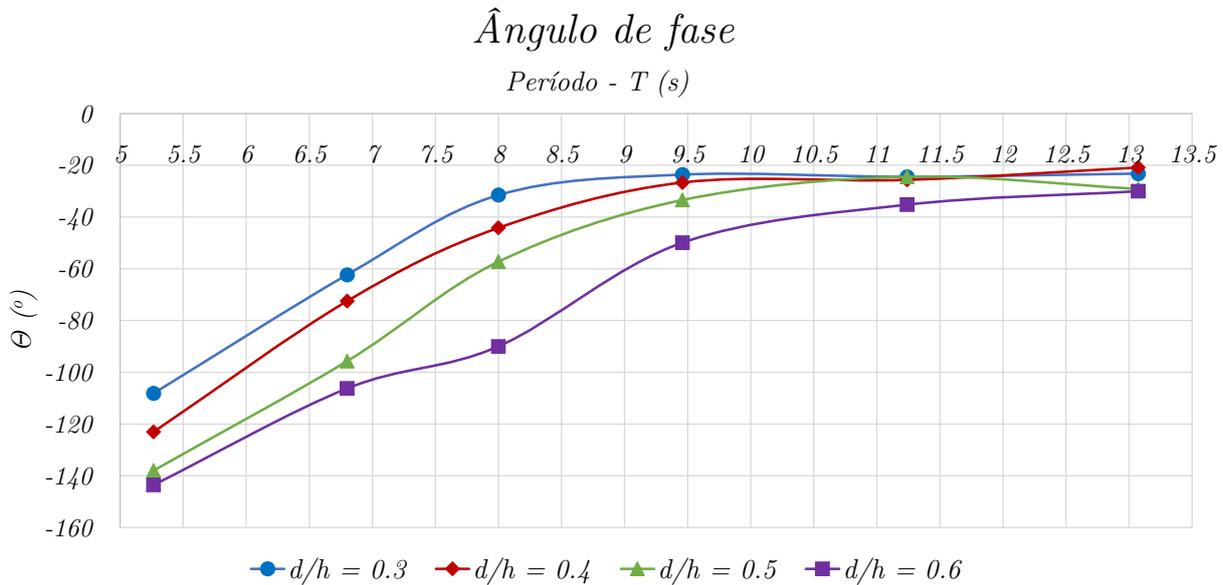


Figura 5.36: Variação do ângulo de fase com d/h e com o período de onda.

5.3.4 Influência de B/h no fator de amplificação e frequência de ressonância para $B/h=1.00$

Depois da análise da influência do período e da variação de d/h na resposta hidrodinâmica da CAO, no fator de amplificação e nas envolventes da elevação da superfície, é possível definir quais os valores base de d/h para estudar a influência de B/h na eficiência hidrodinâmica da CAO. As principais conclusões foram: (i) o valor de $d/h = 0.6$ associa-se sempre com um menor fator de amplificação e, portanto, com uma menor eficiência hidrodinâmica do dispositivo. Pela análise dos campos de velocidades obtidos com esta relação, compreende-se que existem maiores gradientes de velocidades para este caso, o que possivelmente conduz a mais energia dissipada. Para além disso, as envolventes máximas exteriores apresentam sempre valores maiores quando o comprimento submerso é 3.15 metros, indicando maior reflexão da agitação incidente; (ii) o maior fator de amplificação está associado ao valor de $d/h = 0.3$ para todos os períodos de onda. No entanto, após a análise das envolventes, conclui-se que os valores mínimos desta, estão sempre perto da cota da base da parede frontal, sugerindo que, com um ligeiro aumento na altura de onda, a entrada de ar na câmara interna seria um fenómeno recorrente; (iii) apesar de, para período de onda menores existir uma diferença significativa entre a amplificação obtida com $d/h = 0.4$ e com $d/h = 0.5$, apresentando a primeira valores maiores, à medida que o período de onda aumenta, esta diferença diminui, existindo até mesmo uma inversão para $T = 13.08s$. Assim, é difícil afirmar qual destas relações conduz a um funcionamento hidrodinâmico melhor, devendo-se portanto, agregar ao estudo, a relação geométrica B/h .

Tendo em consideração todas as condicionantes referidas no parágrafo anterior, sobre qual o valor de d/h mais favorável para a hidrodinâmica da CAO, verifica-se que, apesar de $d/h = 0.3$

originar maior amplificação, muito provavelmente estará relacionado com problemas de funcionalidade da CAO. Assim, estabelece-se que valores entre $d/h = 0.4$ e $d/h = 0.5$ são os aconselháveis para que se obtenha uma melhor eficiência hidrodinâmica.

Assim, com os valores de $d/h = 0.4$ e $d/h = 0.5$, realizaram simulações com o comprimento da câmara interna igual à profundidade ($B/h = 1.00$) e com o valor de referência ($B/h = 1.33$) para estudar a influência que essa relação geométrica tem na amplificação da coluna de água oscilante.

Os resultados obtidos para o fator de amplificação estão apresentados na figura 5.37.

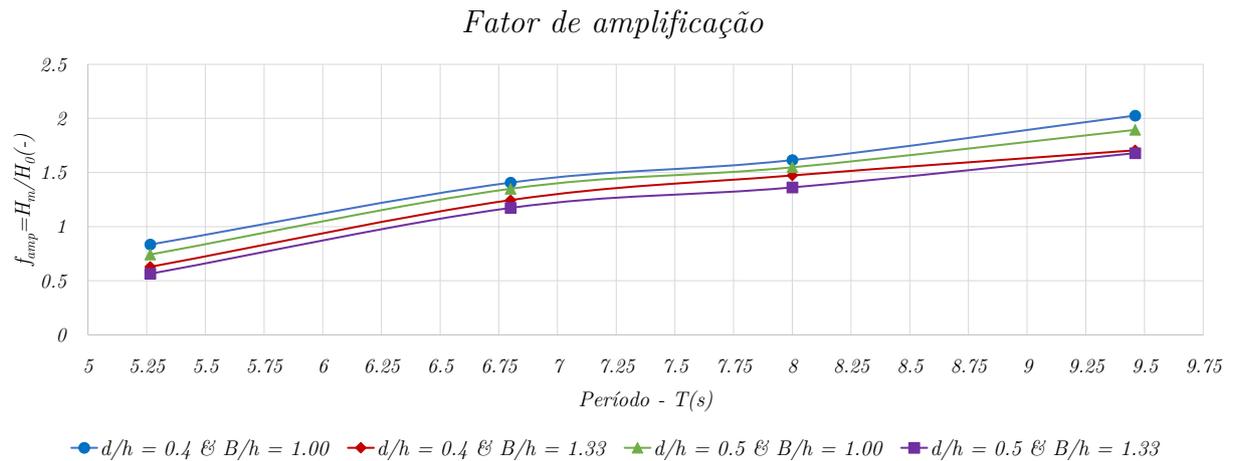


Figura 5.37: Variação do fator de amplificação com d/h , com B/h e com o período de onda.

De uma forma geral, verifica-se que, considerando um comprimento da câmara interna de 5.25 metros ($B/h = 1.00$), o fator de amplificação aumenta relativamente ao comprimento de 7 metros ($B/h = 1.33$). Para $B/h = 1.00$ o valor de $d/h = 0.4$ conduz sempre a uma maior amplificação que o valor de $d/h = 0.5$, independentemente do período de onda (figura 5.37). Quando o comprimento da CAO é 7 metros e para períodos de onda maiores, o fator de amplificação não difere muito, quer seja utilizado $d/h = 0.4$ ou $d/h = 0.5$.

Uma vez que o comprimento da CAO é uma das dimensões que influencia o período fundamental, T_f , calculou-se de novo esta grandeza.

$$\begin{cases} h = 5.25m \\ S = 5.25m \times 7m \end{cases} \rightarrow f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.81}{5.25 + 0.41(5.25 \times 7)^{1/2}}} = 0.179Hz \rightarrow T_f = 5.57s \quad (5.5)$$

O valor de T_f não difere significativamente do calculado na equação 5.4 e na figura 5.37, continua a não aparecer nenhum pico de amplificação para qualquer dos valores do período de onda simulados. Assim, confirma-se realmente que, a ocorrer ressonância, será um fenómeno muito pontual.

Analisando as envolventes da superfície livre (figura 5.38), concluí-se que, com a diminuição do comprimento da CAO, as envolventes da elevação da superfície livre mantêm-se regulares, não apresentando riscos de entrada de ar pela parte submersa da parede frontal ou de ocorrência de pontos de elevação extrema no interior da CAO.

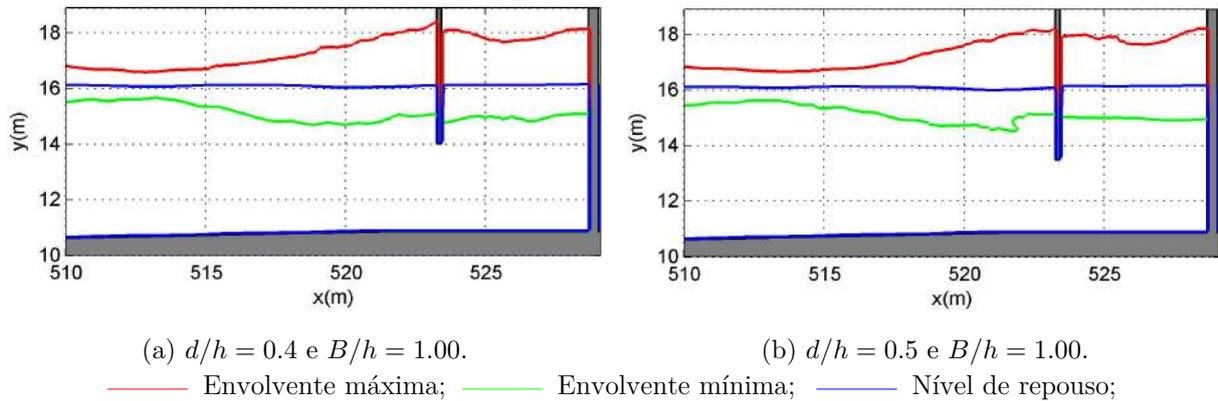


Figura 5.38: $T = 9.46s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.

Após o estudo de otimização geométrica da CAO, que compreendeu uma análise da hidrodinâmica, do fator de amplificação e das envoltentes da superfície livre na câmara interna, pode-se concluir o seguinte: (i) durante o movimento ascendente da CAO, o fluxo de entrada é refletido pela parede traseira originando um vórtice no interior. Durante o movimento descendente, o fluxo de saída ao interagir com a onda incidente origina a formação de um vórtice no exterior, junto à parede frontal; (ii) a intensidade do campo de velocidades aumenta com o aumento do período da onda e com o aumento do valor de d/h ; (iii) menores comprimentos de submersão da parede frontal estão associados com maior amplificação da CAO. No entanto, para o valor de $d/h = 0.3$ as envoltentes mínimas da elevação da superfície livre sugerem uma possível entrada de ar pela parte submersa para a câmara. Inviabilizando assim este valor de d/h ; (iv) comprimentos menores da câmara interna originam maior amplificação da CAO. Em particular, com o comprimento de 5.25 metros ($B/h = 1.00$), clarificou-se de entre os valores $d/h = 0.4$ e $d/h = 0.5$ qual é o que está associado com um maior fator de amplificação.

De uma forma geral, os valores para as relações geométricas estudadas, d/h e B/h , que conduzem a uma maior eficiência hidrodinâmica são 0.4 e 1.0, respetivamente. Estando estes associados a um fator de amplificação de 2.

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

Nesta Dissertação foi desenvolvido um estudo em modelo numérico sobre a interação entre a agitação marítima e uma estrutura esquemática do tipo Coluna de Água Oscilante. Para tal, recorreu-se ao modelo numérico IH-2VOF, desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria, Espanha. Particularmente, calibrou-se e validou-se o modelo numérico, por forma a confirmar que podem ser utilizado, de forma fiável, no estudo da otimização hidrodinâmica da geometria da CAO, isto é, da geometria que conduz a uma maior amplificação da coluna de água interna e não compromete a funcionalidade geral do dispositivo.

Na fase de calibração e validação os resultados do modelo numérico realizados recentemente num canal de ondas do LNEC. A escala do modelo numérico é a mesma que a do modelo físico (1 : 35), para que os resultados da elevação da superfície obtidos por via numérica possam ser comparados com os valores obtidos experimentalmente. Na fase de otimização da geometria da CAO, o modelo numérico, foi executado à escala do protótipo (1 : 1), por forma a que os resultados possam ser interpretados à escala real.

Os resultados deste estudo permitiram verificar que os resultados obtidos pelo modelo IH-2VOF, em especial da elevação da superfície livre, mostram uma concordância significativa com os resultados obtidos nos ensaios em modelo físico. O IH-2VOF apresenta-se como um modelo numérico que permite modelar a propagação de ondas ao longo de canal, com batimetria variável, e a interação das onda com uma estrutura do tipo Coluna de Água oscilante com câmara aberta.

Em particular, os principais resultados apresentados nesta dissertação referem-se: (i) à calibração da altura de onda incidente a introduzir no modelo; (ii) à análise da convergência dos resultados com a dimensão das malhas; (iii) à análise da influência da introdução do modelo de turbulência nos resultados; (iv) à análise dos fenómenos resultantes da interação onda/estrutura. Por outro lado, foi efetuado um estudo da influência da relação entre a altura da parede frontal e a profundidade, d/h , e entre o comprimento da CAO e a profundidade, B/h , nos resultados, afim de definir quais os valores que conduzem a uma maior amplificação da superfície livre interior, sem que a funcionalidade do dispositivo comprometida.

O primeiro passo de calibração incluiu uma análise de qual a altura de onda gerada que conduz a uma altura de onda incidente mais aproximada da obtida nos ensaios experimentais. Foram realizadas simulações numéricas com as alturas de ondas de 0.038 metros (altura medida

nas sondas *Sb1* e *Sb2*) e 0.040 metros (valor teórico pretendido e imposto no batedor experimental). Concluí-se que a altura de 0.038 metros conduz a um valor numérico de altura de onda ao longo do canal mais aproximado.

O segundo passo de calibração envolve um estudo da convergência da dimensão da malha que discretiza o domínio numérico. A convergência foi estabelecida com base na aproximação entre os resultados da elevação da superfície livre obtidos numericamente com diferentes malhas e experimentalmente. Procurou-se com o refinamento das malhas, verificar qual a dimensão para a qual o erro entre resultados numéricos e experimentais era mínimo. Das três malhas utilizadas, mostrou-se que a malha com um espaçamento mínimo de 0.0025 metros (0.0875 metros à escala do protótipo), conduz a um grau de precisão bastante razoável sem um esforço computacional exagerado. À malha escolhida, estão associadas 490 células por comprimento de onda e 15 por altura de onda.

O terceiro e último passo de calibração incide sobre a influência da aplicação ou não de um modelo de turbulência nos resultados da elevação da superfície livre obtidos pelo IH-2VOF. Especificamente, pretende-se saber se a ativação do modelo $\kappa - \varepsilon$ nas simulações, melhora a aproximação entre os resultados numéricos e experimentais. Verificou-se que, com o modelo de turbulência ativo, as alterações obtidas são muito pouco significativas, levando à conclusão de que o principal fenómeno de dissipação de energia é o movimento de oscilação ascendente e descendente da coluna de água interna, tendo os efeitos da turbulência uma contribuição reduzida. Em particular, a opção de não o modelo de turbulência pode-se considerar adequada para simulações em $2D$.

A validação do modelo numérico IH-2VOF foi efetuada com base na análise dos fenómenos devidos à interação onda/estrutura, confirmando se os fenómenos que se verificam nos ensaios em modelo físico são reproduzidos de forma adequada pelo modelo numérico. Nomeadamente, foi comparado o fator de amplificação na CAO, o ângulo de fase e o *sloshing*, que são fenómenos intrínsecos deste tipo de estrutura, assim como a reflexão e a rebentação das ondas, que apesar de não dever ocorrer, está muitas vezes associada às CAO de primeira geração. Concluí-se que, de uma forma geral, o modelo numérico IH-2VOF reproduz todos os fenómenos verificados durante os ensaios físicos. Em particular, o fator de amplificação, o ângulo de fase e o *sloshing* obtidos numericamente apresentam uma excelente concordância com os valores cálculos através da elevação da superfície livre experimental. Quanto à rebentação, verificaram-se ligeiras discrepâncias de resultados. Especificamente, nos resultados do modelo numérico observou-se a ocorrência de rebentação em zonas onda tal não se verificava no modelo físico, assim como diferentes tipos de rebentação, quando esta ocorria. O modelo numérico apresenta uma rebentação mais energética que o físico, muito provavelmente devido ao facto de não ter sido incluído o modelo de turbulência nas simulações e essa parcela de dissipação de energia (tensor de *Reynolds*) não ter sido calculada.

A calibração e validação do modelo numérico permitiu verificar que a elevação da superfície livre numérica ao longo do canal apresenta valores de erros quadráticos médios menores que 5% e índices de concordância superiores a 91%, e que o modelo IH-2VOF para as condições simuladas deu resultados fiáveis na modelação numérica deste tipo de estrutura de aproveitamento da energia das ondas.

Após a validação o modelo numérico foi executado à escala do protótipo deforma a verificar quais as dimensões que levaram à sua maior eficiência hidrodinâmica. Verificou-se que quanto maior é o comprimento submerso da parede frontal, menor é o fator de amplificação da CAO e maior é a intensidade do campos de velocidades. Algumas razões base para esta tendência

podem ser: (i) o facto das partículas de água terem que contornar um obstáculo maior quando d/h toma um valor maior, dissipando mais energia (Teixeira et al., 2013); (ii) o facto da parede frontal ter uma área maior e portanto ser mais refletiva, refletindo mais energia incidente.

Contrariamente, observou-se que quanto menor for o valor de d/h maior é o facto de amplificação. No entanto, é necessário ter em consideração a funcionalidade do dispositivo e, ao analisar-se as envolventes da elevação da superfície livre, constatou-se que para $d/h = 0.3$, um ligeiro aumento na altura de onda poderá conduzir à entrada de ar pela parte submersa da estrutura, inviabilizando assim este valor para a relação de submersão.

Mantendo a relação d/h constante e variando o valor de B/h , verificou-se que entre $B/h = 1.00$ e $B/h = 1.33$, o valor que conduz a uma maior amplificação é o que está associado com um comprimento da CAO menor.

Ainda dentro da análise da amplificação da superfície livre interna, concluí-se que o fenómeno de ressonância não se verifica para nenhum dos períodos simulados e que, a ocorrer, será para uma gama de períodos muito estreita, de certa forma indicando que este fenómeno não será muito recorrente ao longo do funcionamento do dispositivo.

Como conclusão final, para que uma CAO com a forma geométrica estudada nesta dissertação tenha um fator de amplificação considerável sem comprometer a sua funcionalidade, o comprimento submerso da parede frontal deve ser da ordem dos 40% da profundidade de entrada, e o comprimento da câmara interna igual a essa mesma profundidade. Estes valores vão de acordo com os valores característicos da maioria das estrutura em funcionamento atualmente e indicadas ao longo deste trabalho.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Esta Dissertação abre caminho a possíveis trabalhos futuros.

No âmbito do projeto DITOWEC, foram previsto alguns ensaios que não foram realizados até ao momento. Assim, um trabalho complementar ao do efetuado nesta dissertação é a realização de ensaios em modelos físicos de uma estrutura esquemática de CAO com a câmara interna fechada, visando compreender a influência que a coluna de ar tem na oscilação da CAO e na sua eficiência, e a respetiva modelação numérica. Por outro lado, uma vez que a eficiência global de uma estrutura do tipo Coluna de Água Oscilante deve-se ao acoplamento entre a hidrodinâmica e a aerodinâmica, é necessário incluir a coluna de ar na modelação numérica, para que se possa quantificar a energia pneumática que faz girar a turbina. Para tal, seria necessário utilizar outro modelo numérico, uma vez que o IH-2VOF apenas permite simular a parte hidráulica do problema.

Outra possibilidade passa pela definição de formas geométricas diferentes para a estrutura da CAO. A CAO estudada neste trabalho apresenta uma estrutura esquemática, com ambas as paredes completamente verticais. Seria interessante, estudar a inclinação de ambas as paredes: (i) na parede frontal, uma diminuição no ângulo que esta faz com a horizontal poderá conduzir a uma menor reflexão da onda incidente; (ii) na parede traseira, uma diminuição no ângulo que esta faz com a horizontal poderá conduzir a menos reflexão na câmara interna e a um encaminhamento do escoamento de entrada na CAO que leve a uma diminuição na turbulência. A modelação numérica destas geometrias alteradas permite verificar a melhoria esperada da resposta da CAO.

Bibliografia

- Battjes, J. A. (1974). Surf similarity. *Proceedings 14th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 466–480, doi:10.9753/icce.v14.
- Brooke, J. (2003). *Wave Energy Conversion*. Elsevier Science, Ltd, R. Bhattacharyya and M. E. McCormick.
- Drew, B., Plummer, A., and Sahinkaya, M. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 1:887–902.
- Evans, D. and Porter, R. (1995). Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. *Applied Ocean Research*, 17:155–164.
- Falcão, A. F. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:899–918.
- Ferziger, J. and Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, 3rd edition.
- Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (vof) method for dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39:201–225.
- IH Cantabria (2012). *IH-2VOF Course*. Instituto de Hidráulica Ambiental - Universidade de Cantabria, Spain.
- Kelly, J. (2013). Real time integrated monitoring and control systems, operation and maintenance for wave energy converters: European pilot central of Pico. *University College Cork, Ireland*.
- Khezzer, L., Seibi, A., and Goharzadeh, A. (2011). Water sloshing in rectangular tanks - an experimental investigation and numerical simulation. *International Journal of Engineering (IJE)*, 3:174–184.
- Lamb, S. H. (1945). *Hydrodynamics*. New York, Dover Publications.
- Lara, J., Ruju, A., and Losada, I. (2011). Reynolds averaged navier-stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A*, 467:1215–1242.
- LIMPET (2010). <http://www.renewableenergyfocus.com/limpet10years> - abril, 2015.

BIBLIOGRAFIA

- Liu, Z. and Frigaard, P. (2001). *Generation and Analysis of Random Waves*. Aalborg, Aalborg Universitet.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., de Alegría, I. M., and Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27:413–434.
- MARINET (2015). <http://www.fp7-marinet.eu/eve-mutriku-owc-plant.html> - abril, 2015.
- Munk, W. (1950). Origin and generation of waves. *Proceedings of the International conference on Coastal Engineering. Long Beach, California: ASCE*, 1:1–4, ISSN 2156–1028.
- Olsen, H. (1976). “what is sloshing?”. *Seminar on Liquid Sloshing. Det Norske Veritas*.
- Panicker, N. N. (1976). Power resource potential of ocean surface waves. *Proceeding of the wave and salinity gradient workshop*, pages J1–J48.
- QUB (2002). Island of Islay, LIMPET wave power plant - Project and Performance Review. *The Queens University of Belfast*.
- Setoguchi, T. and Takao, M. (2006). Current status of self rectifying air turbines for wave energy conversion. *Energy Conv. Manag.*, 47:2382–2396.
- Teixeira, P. R., Davyt, D. P., Didier, E., and Ramalhais, R. (2013). Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on navier-stokes equations. *Energy*, 61:513–530.
- Torres-Freyermuth, A., Lara, J. L., and Losada, I. J. (2010). Numerical modelling of short- and long-wave transformation on barred beach. *Coastal Engineering*, pages 317–330.
- USACE (2006). *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- Veer, R. and Thorlen, J. (2008). Added resistance of moonpool in calm water. *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering in Estoril, Portugal*.
- WavEC (2015). <http://www.pico-owc.net/> - abril, 2015.
- Webb, I., Seaman, C., and Jackson, G. (2005). *Marine Energy Challenge: Oscillating water column wave energy converter evaluation report*. The Carbon trust - Arup.
- Whitham, G. B. (1974). *Linear and Nonlinear Waves*. Wiley, New York, N.Y.
- Willmott, J. C., Ckleson, G. S., and Davis, E. R. (1985). Statistics for evaluation and comparisons of models. *Journal of Geophysical Research, Ottawa*, 90:8995–9005.

Apêndice A

DESIGN OPTIMIZATION OF AN OSCILLATING WATER COLUMN WAVE ENERGY CONVERTER: ANALYTICAL AND NUMERICAL MODELING

A. Mendonça¹, M.L. Jalon², R. Correia³, J. Dias³, M.G. Neves¹ and E. Didier¹

Abstract: An analytical model is applied to a schematic case of an oscillating water column (OWC), without head loss, to obtain a first estimation of the chamber hydraulic efficiency. The IH2VOF numerical model of wave-structure interactions is applied to perform an investigation, useful to complement and verify the analytical approach and analyses the flow characteristics on the OWC, including nonlinear effects. The numerical model was validated against physical model tests on a schematic OWC structure at the National Laboratory of Civil Engineering, presenting good agreement.

A significant difference of amplification factor parameter was observed between the analytical results and numerical results and experimental data, which may be attributed to the absence of head loss in the analytical model.

INTRODUCTION

Oscillating water column (OWC) wave energy converters (WECs) started slowly operating since the late 80's at pilot scale being characterized by their adaptability in installation on onshore and shallow water regions on fixed structures (e.g. LIMPET OWC plant, Pico OWC plant, Mutriku OWC Breakwater).

Nevertheless, the operability of these structures is still not fully developed with the design and optimization of the water chamber (hydrodynamics), the air chamber (aerodynamics) and the turbine playing a major role in the performance of these devices.

Energy to be captured is stronger where wave periods are close to the natural period of the water column device.

In the present study, developed within project "DITOWEC: Development of an Integrated Tool for Numerical Modelling of Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in Vertical Breakwaters", the chamber hydraulic performance is studied through the combination of analytical, physical and numerical modelling.

METHODOLOGY

An analytical model (adapted from Neves 2007) is applied to a prototype schematic case of an OWC, without head loss, to obtain a first estimation of the chamber hydraulic efficiency for a fully opened OWC. The model is based on eigenfunction expansion and the linear theory. The influence on the results of regular incident wave conditions (wave period, T , and wave height, H) and key geometric parameters which are thought to have a significant influence on OWC's performance chamber, as submergence, d , chamber width, B , and depth, h , are analysed in terms of wave amplification inside the chamber and sloshing. Based on these results a banded efficiency centered about a resonant peak was determined.

The IH2VOF numerical model of wave-structure interactions (Lara et al. 2011) is then applied to complement and verify the analytical approach and analyse the flow

¹ Harbours and Maritime Structures Division (NPE), National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisbon, Portugal.
amendonca@lnec.pt, gneves@lnec.pt, edidier@lnec.pt

² Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA), University of Granada, Av. del Mediterráneo, 18006 Granada, Spain.
mljalon@ugr.es

³ UNIDEMI, FCT, UNL, Campus da Caparica, 2829-516, Caparica, Portugal. rm.correia@campus.fct.unl.pt, jdias@lnec.pt

characteristics on the OWC, including nonlinear effects. This numerical model was validated against systematic physical tests (Dias et al. 2015) on a 1:35 scale schematic OWC structure at the National Laboratory of Civil Engineering. The numerical model not only provides the prediction of hydrodynamic efficiency of the OWC, but also reveals the detailed flow field, pressure distribution, vorticity, surface elevation, which helps to elucidate the physical process related to OWC performance and the complex hydrodynamics interactions between the incident wave and the water chamber.

WAVE FLUME PHYSICAL MODEL

To study the hydraulic functionality of an OWC-WEC power plant integrated in a vertical breakwater or in the shoreline, a set of 2D physical model tests were conducted at LNEC. The main goals of these tests were to study the hydrodynamic characteristics of the plant and the validation of wave-structure interaction models.

The tests were performed in a wave flume, which is approximately 50 m long and it has an operating width and an operating water depth of 0.80 m. The flume is equipped with a random absorbing piston-type wave maker and resistive-type wave gauges are used to determine the wave characteristics in front of the wave maker and in front of the tested structures. A geometric scale of 1:35 is used in order to reduce scale effects.

A simplified plant geometry was tested: a chamber with a fully opened airway, allowing free air flow in and out of the chamber. Fig. 1 shows a scheme of the wave flume, water chamber and wave gauge positions.

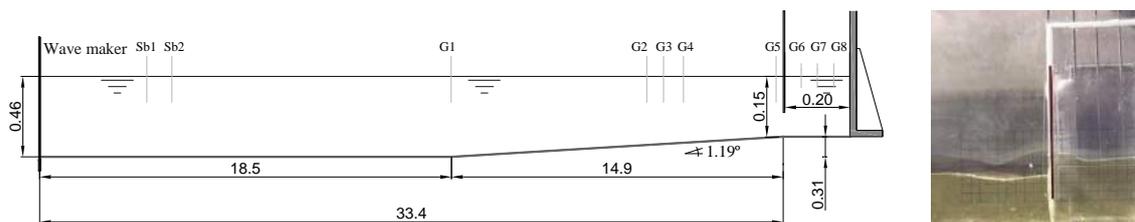


Fig. 1. Left: Scheme of the wave flume, water chamber and wave gauge positions (dimensions are in meters). Right: Physical model near the water chamber during a test carried out for $T=1.0$ s and $H=0.038$ m

Simultaneous acquisition of free surface elevation at different points along the model and the chamber was carried out. Physical model tests has been performed for a regular wave height, H , of 0.038 m and a wave period, T , ranging from 0.67 s to 2.30 s. Water depth was kept constant, equal to 0.46 m at the wave maker and 0.15 m at the chamber entry. The chamber has 0.20 m width and an opening 0.075 m high, which is half the water depth at the chamber.

Free surface elevation was measured at ten sections of the wave flume (Fig. 1), near the wave maker, at the toe of the smooth ramp, on the ramp, before and inside the water chamber. Each wave condition was repeated eight times to ensure the accuracy of the experimental results.

ANALYTICAL MODEL

This paper presents an analytical model adapted from schematic cases of perforated breakwaters (Neves 2007), to investigate the hydraulic performance of an OWC.

The main advantage of the analytical method is that it enables fast parameter studies to optimize the geometry of OWC devices finding guidelines for numerical simulations. A monochromatic wave train with amplitude A_0 , frequency σ and obliquity θ , propagates from infinity to the OWC system, in water of depth h . The water surface at the OWC device is at atmospheric pressure and consists of a vertical barrier of thin thickness and infinite width, submerged a depth d and spaced a distance B from a vertical and impermeable wall (Fig. 2).

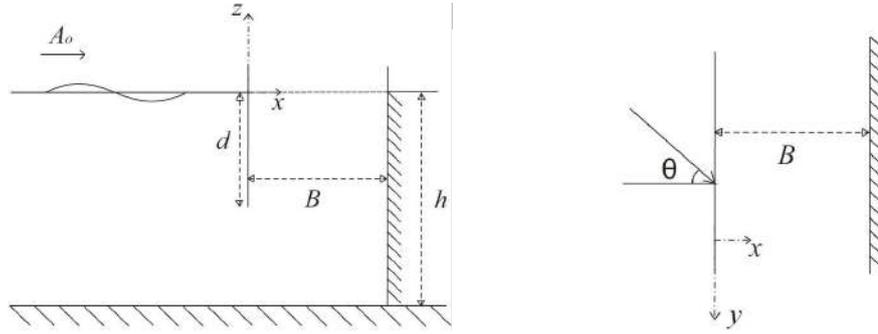


Fig. 2. Diagram of the OWC system

Assuming the initial hypotheses of horizontal and impermeable bottom, irrotational flow and incompressible and non-viscous fluid, the problem may be in terms of the potential function, which must satisfy the Laplace equation in the fluid, the kinematic boundary condition at the borders and mixed boundary condition on the free surface,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} &= 0 \quad h < z < 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= 0 \quad z = -h \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= 0 \quad z = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where (x, y, z) are the Cartesian coordinates with z -axis points upwards from the still water level, t is the time and φ is the potential function expressed as:

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \phi(x, z) e^{i(\lambda y - \sigma t)} \right\} \quad (2)$$

where $\lambda = k_0 \sin \theta$ and k_0 is the wave number of the incident wave, corresponding to the real solution of the dispersion equation,

$$\frac{\sigma^2}{g} = k_n \tanh(k_n h), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

The study domain is separated into two regions and the corresponding potential function is calculated, φ_1 in the upstream of the barrier and φ_2 between the barrier and the wall:

$$\begin{aligned}\phi_1(x, z) &= A_o f_o(z) e^{iQ_0 x} + \sum_{n=0}^{\infty} R_n f_n(z) e^{-iQ_n x} & x < 0 \\ \phi_2(x, z) &= A_o f_o(z) e^{iQ_0 x} - \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) e^{iQ_n x} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n f_n(z) e^{-iQ_n(x-B)} & 0 < x < B\end{aligned}\quad (4)$$

where,

$$\begin{aligned}f_n(z) &= \frac{-ig \cosh k_n(h+z)}{\sigma \cosh k_n h}, \quad k_n = k_0, ik_1, ik_2, \dots \\ Q_n &= \sqrt{k_n^2 - \lambda^2}\end{aligned}\quad (5)$$

The resolution method used is based on eigenfunction series expansion of the function of depth, $f_n(z)$, whose values are the real root (k_0) and the imaginary roots (ik_1, ik_2, \dots) of the dispersion equation.

To ensure continuity of the solution between the two regions, the potential functions (Eqs. 4) must satisfy the kinematic and dynamic conditions on the barrier ($x = 0$) and on the waterproof wall ($x = B$):

$$\phi_{1,x}(x, z) = \phi_{2,x}(x, z) \quad x = 0, -h < z < -d \quad (6)$$

$$\phi_{1,x}(x, z) = \phi_{2,x}(x, z) = 0 \quad x = 0, -d < z < 0 \quad (7)$$

$$\phi_1(x, z) = \phi_2(x, z), \quad x = 0, -h < z < -d \quad (8)$$

$$\phi_{2,x}(x, z) = 0 \quad x = B, -h < z < 0 \quad (9)$$

Equations 6 and 7 establish that the horizontal velocities (along the x -axis) must be equal throughout the water column, canceling on the barrier. Therefore, the condition of equal speed throughout the water column, at $x = 0$, is imposed:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (R_n - D_n - C_n e^{iQ_n B}) f_n(z) iQ_n = 0 \quad (10)$$

Taking into account the orthogonality of the functions $f_n(z)$, it is obtained:

$$R_n = D_n + C_n e^{iQ_n B} \quad (11)$$

If this expression is replaced in the potential function ϕ_1 :

$$\begin{aligned}\phi_1(x, z) &= A_o f_o(z) e^{iQ_o x} + \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) e^{-iQ_n x} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n f_n(z) e^{-iQ_n(x-B)} & x < 0 \\ \phi_2(x, z) &= A_o f_o(z) e^{iQ_o x} - \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) e^{iQ_n x} + \sum_{n=0}^{\infty} C_n f_n(z) e^{-iQ_n(x-B)} & 0 < x < B\end{aligned}\quad (12)$$

Next, using the equations 7 and 8, a function $G_I(z)$ defined in intervals is obtained:

$$G_1(z) \begin{cases} A_o f_o(z) iQ_o - \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) iQ_n - \sum_{n=0}^{\infty} C_n f_n(z) iQ_n e^{iQ_n B} = 0 & x=0, -d < z < 0 \\ 2 \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) = 0 & x=0, -h < z < -d \end{cases} \quad (13)$$

Finally, the condition on the waterproof wall (Eq. 9) is applied:

$$G_2(z) = A_o f_o(z) iQ_o e^{iQ_o B} - \sum_{n=0}^{\infty} D_n f_n(z) iQ_n e^{iQ_n B} - \sum_{n=0}^{\infty} C_n f_n(z) iQ_n = 0 \quad x=B, -h < z < 0 \quad (14)$$

The values of the complex coefficients D_n and C_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) are determined with the least squares method, which requires the following integral is minimized:

$$\int_{-h}^0 \left(|G_1(z)|^2 + |G_2(z)|^2 \right) dz \quad (15)$$

NUMERICAL MODEL

The model used is the IH2VOF code, developed by the University of Cantabria (Lara et al. 2011) on the basis of previous versions of the code COBRAS (Liu and Lin 1997), updated and validated against systematic tests on wave interacting with low-crested structures (Garcia et al. 2004), wave breaking on permeable slopes (Lara et al. 2006), surf zone hydrodynamics on natural beaches (Torres-Freyermuth et al. 2007) and wave overtopping (Losada et al. 2008, Lara et al. 2008).

The model solves the 2DV Reynolds Average Navier–Stokes (RANS) equations, based on the decomposition of the instantaneous velocity and pressure fields, into average and turbulent components. Two extra governing equations for modeling the turbulent kinetic energy (k) and the turbulent dissipation rate (ε) replace simplified closure conditions in case of highly turbulent flow. The Volume of Fluid (VoF) technique is adopted to track the free surface motion.

RESULTS

ANALYTICAL MODEL: INFLUENCE OF THE WAVE CLIMATE AND GEOMETRY PARAMETERS IN THE OWC HYDRAULIC EFFICIENCY

The analytical model is applied to study the chamber hydraulic efficiency by varying the wave conditions and chamber geometry parameters. The analysis is based on wave amplification and sloshing inside the chamber since both contributes to assess the chamber

efficiency.

Sloshing and wave amplification are analysed in terms of independent adimensional parameters that represent the incident wave climate (relative depth, kh) and the geometry chamber (width, B and submergence, d).

Sloshing occurs mainly in the longitudinal direction, as linear and non-linear interaction between the incident wave and the free modes.

The amplification factor is defined as the ratio between the mean wave height inside the chamber (H) and the incident wave height (H_0), whereas the sloshing parameter is defined as the maximum difference between the free surface elevation inside the chamber at the left wall minus the free surface elevation inside the chamber on the right wall.

Fig. 3 and Fig. 4. represent wave period variation, T , analysed in terms of wave amplification and sloshing, respectively, for different values of relative chamber width (B/h) and relative submergence (d/h), with $h=5.25$ m and $A_0=0.665$ m. The values of $B/h=1.33$ and $d/h=0.5$ correspond to the reference situation, the one used in the physical model tests.

Fig. 3 shows that the amplification factor decreases with the relative chamber width, B/h , and increases with the relative submergence, d/h . Fig. 4. shows that the sloshing parameter decreases with the relative submergence and increases with the OWC relative chamber width. Increasing the relative width of the chamber, B/h , increases the distance a typical fluid particle must travel during a period of motion allowing more local fluid motion inside the chamber and thus the amplitude of oscillation is decreased.

It is also seen that as the chamber width, B/h , increases, the amplification peaks shift to higher values of the wave period, T .

Also, the effect of a smaller entrance of the chamber (higher submergence) is reflected in the increase of the wave periods at which higher amplification is expected.

For lower periods, the wave amplification inside the OWC becomes more and more dependent on the relative submergence of the chamber front wall.

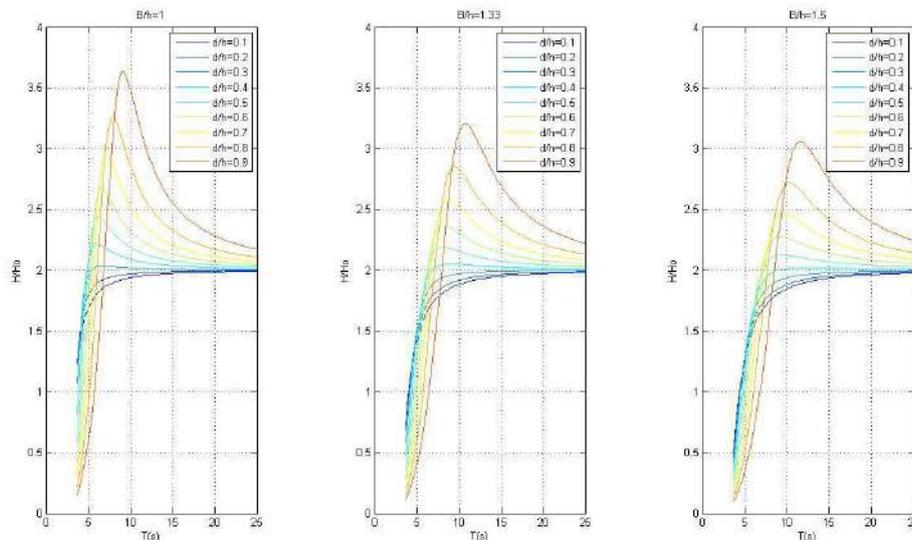


Fig. 3. Analytical model: Effect of the wave period (T), relative chamber width (B/h) and relative submergence (d/h) on the amplification factor (H/H_0) in the chamber

Large motions inside the OWC can also occur when the incident wave period is such that the fluid is excited into an antisymmetric sloshing mode that will become more prominent the less the chamber is submerged.

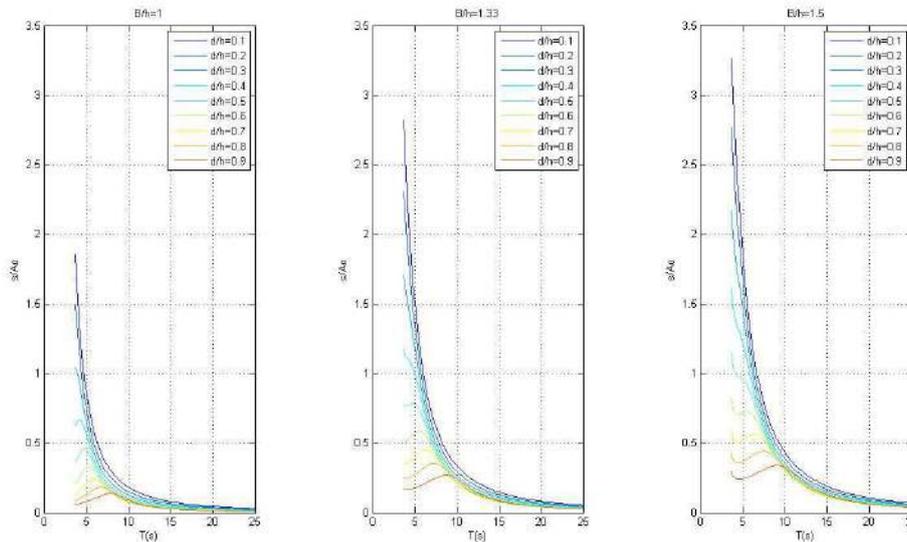


Fig. 4. Analytical model: Effect of the wave period (T), relative chamber width (B/h) and relative submergence (d/h) on the sloshing parameter (s/Ao) in the chamber

NUMERICAL MODELING RESULTS: INFLUENCE OF THE WAVE CLIMATE IN THE OWC HYDRAULIC EFFICIENCY

The IH2VOF numerical model was validated, at model scale, with experimental data of free surface elevation, η , at gauge $G1$ (located at the toe of the smooth ramp), gauges $G2$ to $G4$ located in the middle of the ramp, gauge $G5$ in front of the OWC front wall and of the mean free surface inside the water chamber (obtained from gauges $G6$ to $G8$), Fig. 1.

The agreement between the experimental data and the numerical results for three wave periods, described in Dias et al. (2015), is found to be very good for the gauges inside the chamber, with the index of agreement (Willmott et al., 1985) higher than 0.95, and the amplification factor.

The numerical simulations described in this paper were carried out at prototype scale (1:1) to not suffer from scale effects. Simulations were carried out for a water depth of 16.1 m at the wave maker, a wave height of 1.33 m and wave periods, T , of 5.26 s, 6.80 s and 9.46 s, corresponding to the conditions used in the referred experimental work, at scale 1:35, of Dias et al. (2015).

The computational domain in IH2VOF is discretized in rectangular cells and in sub-mesh regions, which allows variable cell spacing. The time step is selected automatically to satisfy the Courant condition. In order to reduce the computational time whilst assuring the required accuracy, the domain was divided in two independent domains: the first one corresponding to the wave generation zone with a constant water depth of 16.1 m where the waves propagate over a 647.5 m length; and a second one corresponding to a 521.5 m ramp, a 7 m width OWC and the last part of the flume.

In the first computational domain, the mesh is uniform in the horizontal direction, with 0.35 m cell spacing, and non-uniform in the vertical direction, with cell spacing from 0.105 m to 0.133 m. The total number of cells is 1901 x 157.

In the second computational domain, the mesh is divided in three horizontal regions with different resolutions: the ramp with cells width that vary between of 0.3 m and 0.087 m, the OWC with cells width of 0.087 m, and the end of the flume with cells width between 0.087 m and 0.15 m. In the vertical direction, the grid is divided in three regions, a maximum cell width of 0.0931 m at the upper boundary that varies towards 0.0875 m in the middle section and a maximum cell width of 0.175 m at the lowest boundary. The total number of cells is 2629 x 175.

The wave generation was made by a static wave paddle with active wave reflection absorption and a wave is generated, at the first computational domain, using regular waves and linear wave theory and at the second computational domain, using the time series of free surface elevation obtained in the first computational domain at the coupling section between the two domains, which corresponds to gauge G1, and using linear theory.

To study the influence of the wave climate in the OWC hydraulic efficiency, a comparison of the analytical results with experimental measurements and numerical results is conducted. The results are analysed in terms of wave amplitude inside the chamber.

Figures 5 to 7 show the free surface elevation outside and inside the water chamber for periods of 5.26 s, 6.80 s and 9.46 s, respectively. The figures show that the wave interaction with the OWC vertical front wall lead to wave breaking in front of the wall (due to the reflected wave) and also inside the chamber for the three wave periods tested. The experimental tests show a smooth wave breaking in front of the wall, in the reflected wave direction, and the complex motion of the free surface at the exterior wall, due to the interaction between the incident and reflected wave and inside the chamber. However, in the experimental tests, inside the water chamber breaking occurs only for the wave period of 1.60 s, and not for the wave periods of 0.89 s and 1.15 s where, instead, vortices motion seem to induce a small and speedy wave.

The vortex impulse produces some strong current, that increases with the wave period, which generates rapid small waves inside the water chamber, increasing the sloshing, and also outside, at the vertical wall, producing small waves in opposite direction than incident wave (Figures 5 to 10).

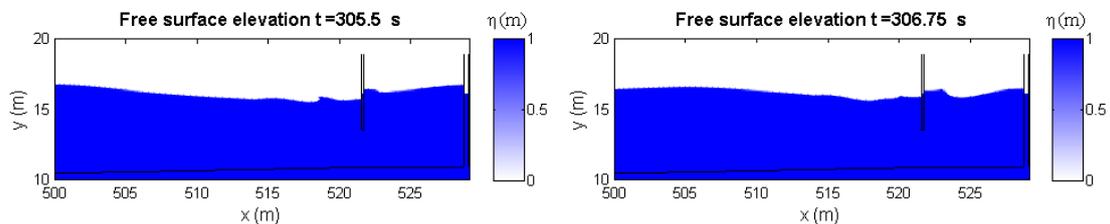


Fig. 5. Free surface elevation outside and inside the water chamber for $T=5.26$ s and $H=1.33$ m at two instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: wave crest (305.50 s) and zero down-crossing (306.75 s)

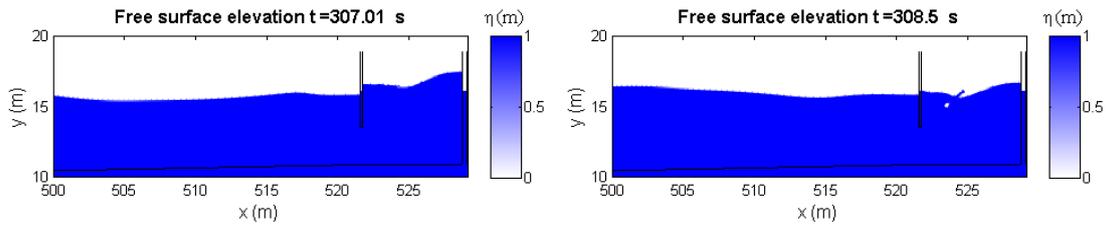


Fig. 6. Free surface elevation outside and inside the water chamber for $T=6.80$ s and $H=1.33$ m at two instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: wave crest (307.01 s) and zero down-crossing (308.50 s)

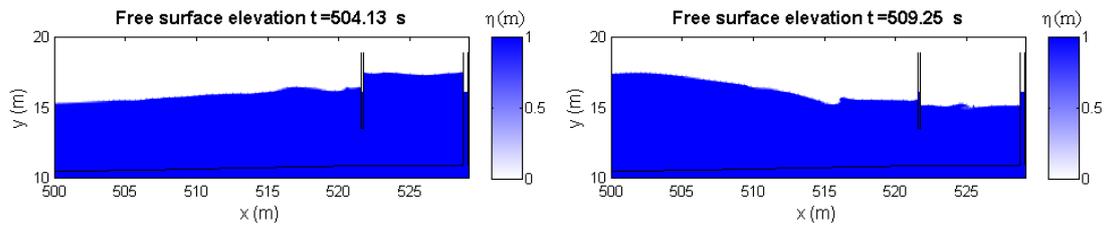


Fig. 7. Free surface elevation outside and inside the water chamber for $T=9.46$ s and $H=1.33$ m at two instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: wave crest (504.13 s) and wave trough (509.25 s).

Figures 8 to 10 show the velocity field outside and inside the water chamber for wave periods of 5.26 s, 6.80 s and 9.46 s, respectively.

In Fig. 8, for the wave period $T=5.26$ s, a significant flow can be observed entering in the chamber forming two almost symmetrical vortex; a clockwise rotating vortex outside the chamber and anti-clockwise inside the chamber.

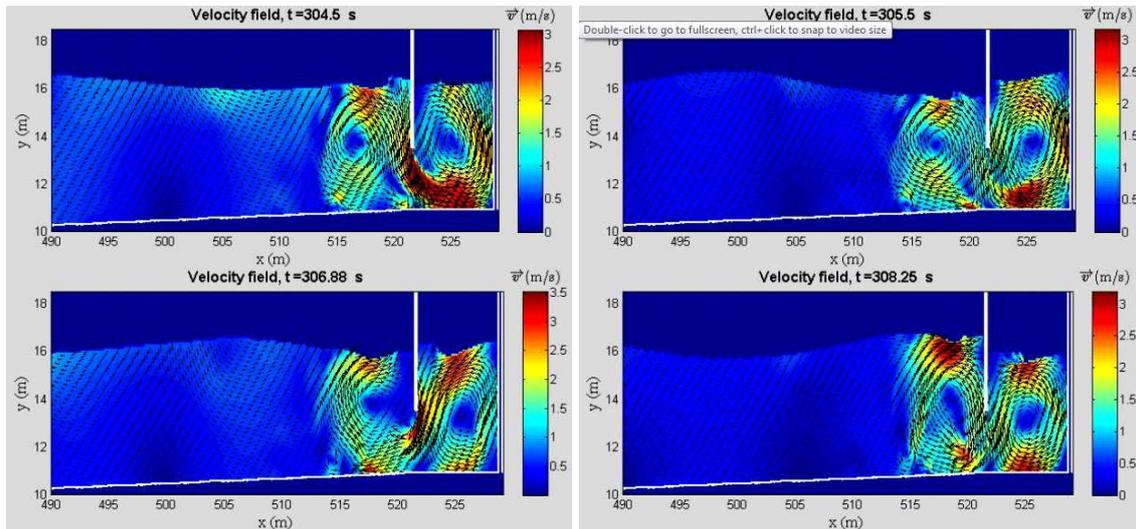


Fig. 8. Velocity field outside and inside the water chamber for $T=5.26$ s and $H=1.33$ m at four instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: zero up-crossing (304.5 s); wave crest (305.5 s); zero down-crossing (305.98 s); and wave trough (308.25 s)

Fig. 9 shows that, for the wave period $T=6.80$ s, the vortex inside the chamber continues to build and strengthen as inflow continues into the device forming an anti-clockwise rotating vortex, that when fully established pulls the flow against the inner chamber wall conducting to wave breaking.

Fig. 10 shows that, for the wave period $T=9.46$ s, the anti-clockwise vortex is migrating to the lower left side of the chamber allowing for the formation of a second vortex in the upper left side of the chamber.

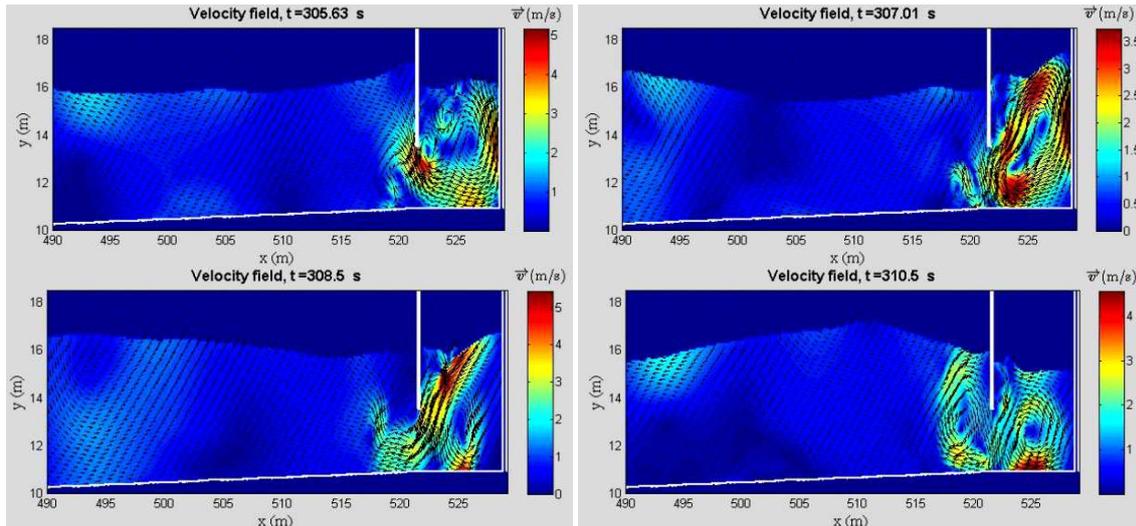


Fig. 9. Velocity field outside and inside the water chamber for $T=6.80$ s and $H=1.33$ m at four instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: zero up-crossing (305.63 s); wave crest (307.01 s); zero down-crossing (308.05 s); and wave trough (310.5 s)

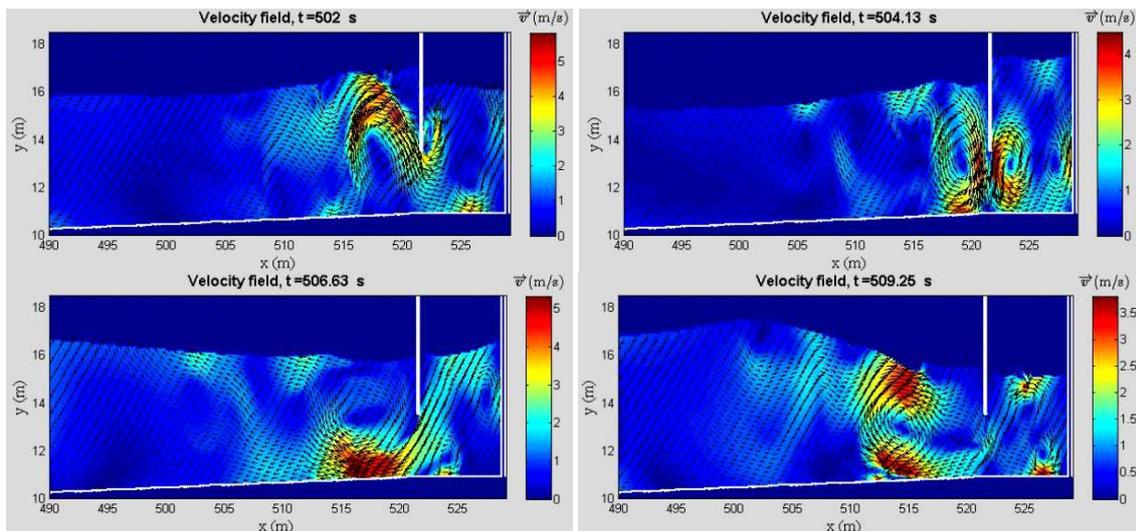


Fig. 10. Velocity field outside and inside the water chamber for $T=9.46$ s and $H=1.33$ m at four instants corresponding, inside the water chamber, to mean free surface position: zero up-crossing (502.0 s); wave crest (504.13 s); zero down-crossing (506.63 s); and wave trough (509.25 s)

The highest velocity flow is approximately 3.0-3.5 m/s for the lowest wave period (Fig. 8) and occurs repeatedly at the chamber entrance and in the vortex area that contributes to wave breaking.

The velocity flow increases reaching around 5.0-5.5 m/s for higher wave periods (Fig. 9 and Fig. 10).

The reference case was analysed with IH2VOF, at model and prototype scales, and compared with the results from experimental tests in terms of amplification factor at model scale and with results from experimental tests and from analytical model at prototype scale (Fig. 11).

The IH2VOF results, at both model and prototype scales, follow the same behavior of the experimental tests in terms of wave amplification (Fig. 11 left). The relative errors between prototype scale and the experimental tests are 17.47 %, 3.65 %, 0.43 % and 1.26 %, for the wave periods of 0.89 s, 1.15 s, 1.35 s and 1.60 s, respectively. The relative errors between model scale and experimental tests are 11.5 %, 2.32 %, 5.77 % and 6.35 %, for the wave periods of 0.89 s, 1.15 s, 1.35 s and 1.60 s, respectively.

Fig. 11 (right) shows that the analytical model results, in terms of wave amplification, are not reproducing the numerical results (neither the experimental results), given always much higher values of H/H_0 than the other models, with relative errors of 61.91 %, 44.65 %, 37.76 % and 22.56 %, for the wave periods of 0.89 s, 1.15 s, 1.35 s and 1.60 s, respectively. This can be explained by the fact that, in the analytical model, the system is not damped by head losses due to friction and shear stresses occurring between the water and the chamber walls. Also, no flow restriction representing the head loss caused by the turbine was considered. This leads to a low energy dissipation by the system and substantially overestimated values of wave amplification.

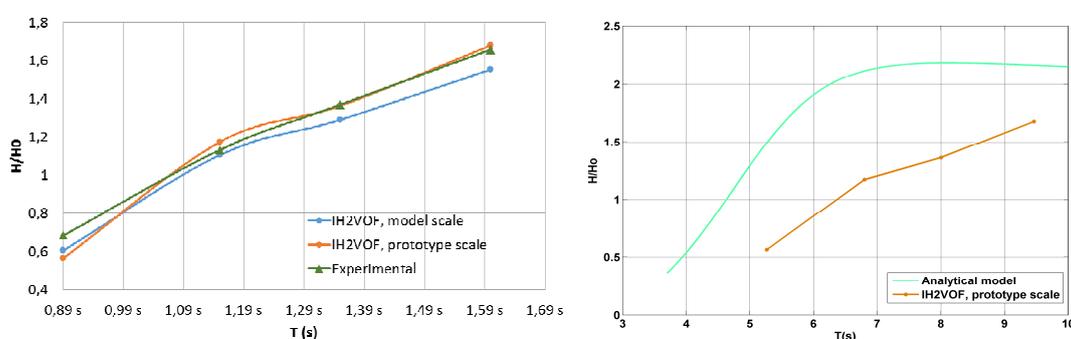


Fig. 11. Wave amplification inside the chamber for four wave periods (0.89 s, 1.15 s, 1.35 s and 1.60 s), $B/h=1.33$, $H=0.038$ m, comparison between: IH2VOF results, at model and prototype scales, and experimental results (left) and analytical mode and IH2VOF at prototype scale (right).

CONCLUSIONS

An analytical model is applied to analyze the hydrodynamic performance of a fully opened OWC system. A parametric study for various geometric and wave climate conditions was performed to predict the motion characteristics and determine the proper OWC shape for various environmental conditions.

The analytical model provided fast parameter studies to optimize the geometry of OWC devices finding guidelines for numerical simulations and information on the flow through the OWC device but proved difficult to accurately represent the experimental and

numerical results. IH2VOF provided the prediction of hydrodynamic efficiency of the OWC, allowing the detailed flow field description, including pressure distribution, vorticity, surface elevation, which helps to elucidate the physical process, related to OWC performance but is much more time consuming than analytical model. Its results, at model and prototype scales, showed that the agreement with experimental results is very satisfactory and indicates that the numerical model is able to adequately reproduce most of the important features of the experimental results.

The analytical model results showed that disregarding damping gives rise to low air chamber pressures and high water column activity in the OWC model, resulting in higher values of wave amplification. Head loss needs to be considered to allow for a better prediction of the hydrodynamics in the OWC chamber, taking into account the frictional losses due to viscous flow.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support of project ref. PTDC/ECM-HID/1719/2012 by FCT, Portugal.

REFERENCES

- Dias, J., Mendonça, A., Didier, E., Neves, M.G. and Conde, J.M.P. (2015). “Application of URANS-VOF models in hydrodynamic study of oscillating water column”. SCACR2015 – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research. 28th September – 1st October 2015 – Florence, Italy (in press). Doi: 10.13140/RG.2.1.5135.8249
- Garcia, N., Lara, J.L., Losada, I.J. (2004). “2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters”. *Coast. Eng.* 51 (10), 991 – 1020.
- Lara, J.L., Losada, I.J., Liu, P.L.-F. (2006). “Breaking waves over a mild gravel slope: experimental and numerical analysis”. *Journal of Geophysical Research, AGU*, Vol. 111, C11019; doi: 10-1029/2005 JC003374.
- Lara J.L., Losada I.J., R. Guancho (2008). “Wave interaction with low-mound breakwater using a rans model”. *Ocean Engineering*, 56, 543-558.
- Lara, J.L., Ruju, A. and Losada, I.J. (2011). “Reynolds Averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach”. *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 467, 1215- 1242.
- Losada, I.J., J.L. Lara, R. Guancho and J.M. Gonzalez-Ondina, 2008. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters, *Coastal Engineering, ELSEVIER*, 55(1), 47-62.
- Liu, L.-F. P., Lin, P. (1997). “A numerical model for breaking waves: The Volume of Fluid Method”. Research Report. No. CACR-97-02, Center for Applied Coastal Research, Ocean Engineering Laboratory, University of Delaware.
- Neves, M.G. (2007). “Interação de ondas com Quebra-mares Perfurados. Modelação analítica”. *Recursos Hídricos, APRH*, maio, Vol.28, nº 1, 15-23.
- Torres-Freyermuth, A., Losada, I. J., and Lara, J. L. (2007). “Modeling of surf zone processes on a natural beach using Reynolds Averaged Navier-Stokes equations”. *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JC004050.

Apêndice B

B.1 Ficheiro *Output* - CORAL

&WIDTH
6.20000000000000E-0001
&HEIGHT
1.90000000000000E+0001
&NUMBER.SUBZONESX
1
&CENTER
9.50000000000000E+0000
&DIVISION
0.00000000000000E+0000
&NUMCELLLEFT
950
&NUMCELLRIGHT
950
&MAXSEPCENTER
1.00000000000000E-0002
&NUMBER.SUBZONESY
3
&CENTER
7.70000000000000E-0002
&DIVISION
8.00000000000000E-0002
&NUMCELLDOWN
23
&NUMCELLUP
1
&MAXSEPCENTER
3.00000000000000E-0003
&CENTER
8.30000000000000E-0002
&DIVISION
8.00000000000000E-0002
&NUMCELLDOWN
1
&NUMCELLUP
131
&MAXSEPCENTER
3.00000000000000E-0003
&CENTER
5.80000000000000E-0001
&DIVISION
5.40000000000000E-0001 &NUMCELLDOWN
10
&NUMCELLUP

```
10
&MAXSEPCENTER
4.000000000000000E-0003
&NUMBERVERTEX
4 1
-0.07000000 0.54000000
19.90000000 0.54000000
19.90000000 0.66000000
-0.07000000 0.66000000
TObstacleDef
Obstacle 1
&NUMBERVERTEX
4 1
-0.09000000 0.08000000
19.75000000 0.08000000
19.75000000 0.64000000
-0.09000000 0.64000000
TWaterDef
Water 1
0.000000000000000E+0000
```

B.2 Ficheiro *Input* - IH-2VOF

```
&NUMERIC_PARAMETER
delt = 0.005
twfin = 100
kl = 6
kr = 3
/
&NUMERIC_PARAMETER
rhof = 1
/
&WAVE_PARAMETER
wave.type = 'static-paddle'
wave.generation.side = 'left'
aa = 1
h0 = 0.46
/
&OUTPUT
writeON = .true.
tinit_output = 0
tend_output = 100
freq_output = 0.02
interx = 1
intery = 1
```

APÊNDICE B.

```
number_lines = 1000
start_number_lines = 1
toreal4 = .true.
write_vof = .true.
write_u = .true.
write_w = .true.
write_pressure = .false.
write_k = .false.
/
&SENSOR_FREESURFACE
sensor_freesurfaceON = .true.
num_fs_sensor = 47
xout_fs = 0.5,11.46,11.48,11.49, 11.5,11.51,11.52,11.54,11.76,11.78,11.79, 11.8,11.81,11.82,
11.84,12.21,12.23,12.24,12.25,12.26,12.27,12.29,14.83,14.85,14.86,14.87,14.88,14.89,14.91,
14.93,14.94,14.95,14.96,14.97,14.98,14.99, 15,15.01,15.02,15.03,15.04,15.05,15.06,15.07,
15.08,15.09, 15.1
tinit_fs_sensor = 0
tend_fs_sensor = 100
freq_fs_sensor = 0.02
/
&SENSOR_VELOCITY
sensor_velocityON = .true.
num_v_sensor = 47
xout_v = 0.5,11.46,11.48,11.49, 11.5,11.51,11.52,11.54,11.76,11.78,11.79, 11.8,11.81,11.82,
11.84,12.21,12.23,12.24,12.25,12.26,12.27,12.29,14.83,14.85,14.86,14.87,14.88,14.89,14.91,
14.93,14.94,14.95,14.96,14.97,14.98,14.99, 15,15.01,15.02,15.03,15.04,15.05,15.06,15.07,
15.08,15.09, 15.1
tinit_v_sensor = 0
tend_v_sensor = 100
freq_v_sensor = 0.02
/
&FREESURFACE_TRACKING
freesurface_method = 'vof'
/
&ZONE_RUNUP
ZoneRunupON = .true.
x_run_ini_m = 14
x_run_fin_m = 15.15
y_run_ini_m = 0.25
y_run_fin_m = 0.54
tinit_ZoneRunup = 0
tend_ZoneRunup = 100
freq_ZoneRunup = 0.02
/
&ZONE_PRESSURE
ZonePressureON = .true.
```

```
x_pres_ini_m = 14.9
x_pres_fin_m = 15.12
y_pres_ini_m = 0.3
y_pres_fin_m = 0.54
tinit_ZonePressure = 0
tend_ZonePressure = 100
freq_ZonePressure = 0.02
/
&ENVELOPE
envelopeON = .true.
x_env_ini_m = 0
x_env_fin_m = 100000
y_env_ini_m = 0
y_env_fin_m = 100000
tinit_envelope = 0
tend_envelope = 100
freq_envelope = 0.1
/
&TURBULENCE
kemodel = 'none'
/
```


Apêndice C

C.1 Calibração - Altura de onda

Malha m_1 :

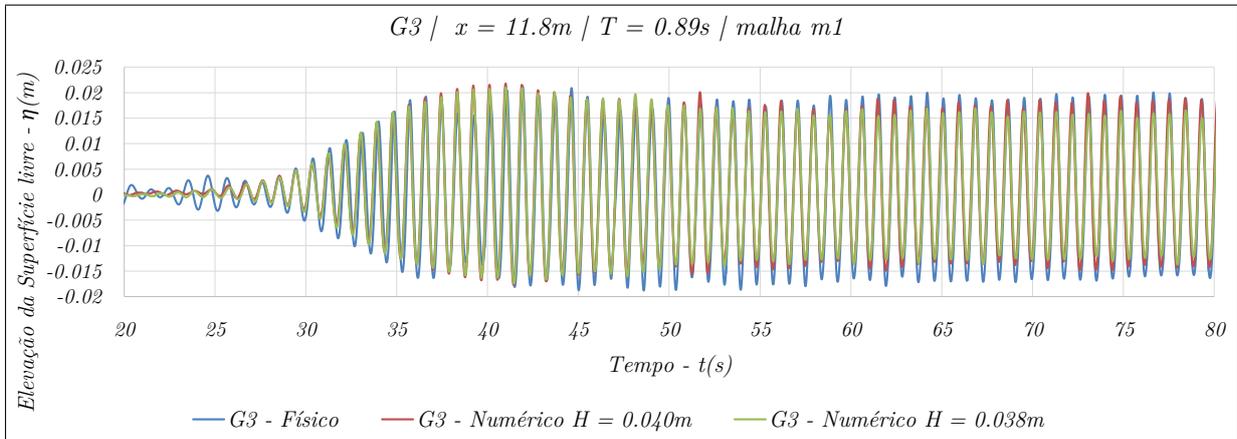


Figura C.1: Elevação da superfície livre na sonda $G3$.

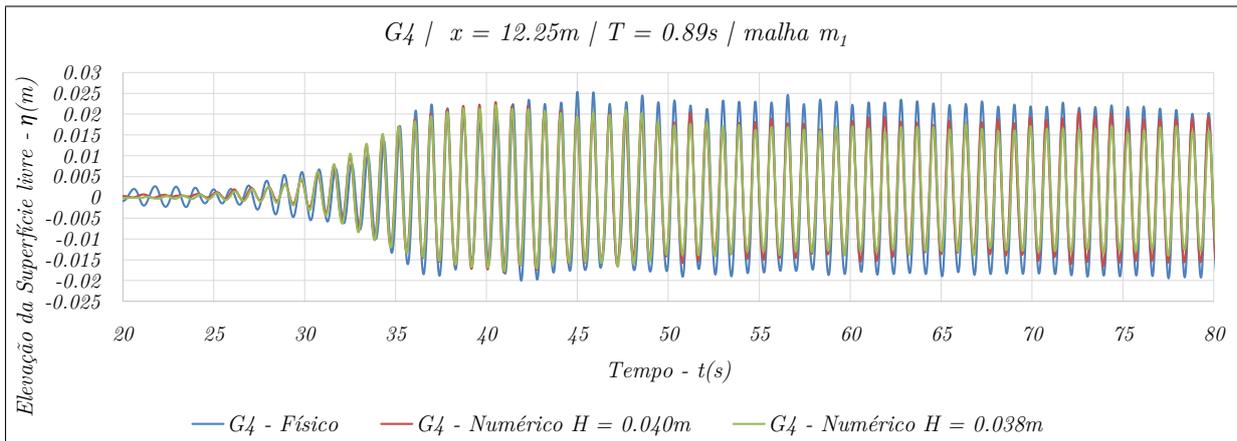


Figura C.2: Elevação da superfície livre na sonda $G4$.

C.1. CALIBRAÇÃO - ALTURA DE ONDA

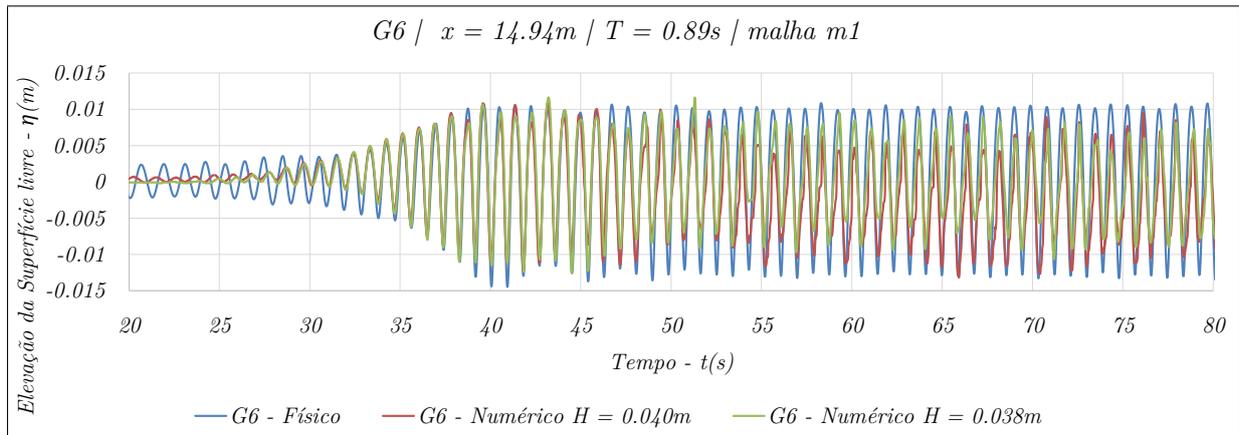


Figura C.3: Elevação da superfície livre na sonda G6.

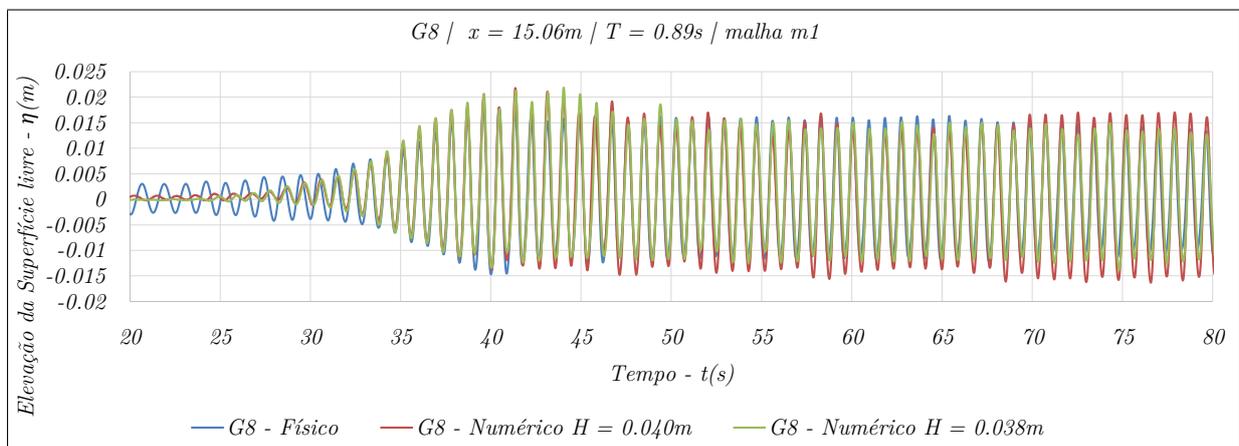


Figura C.4: Elevação da superfície livre na sonda G8.

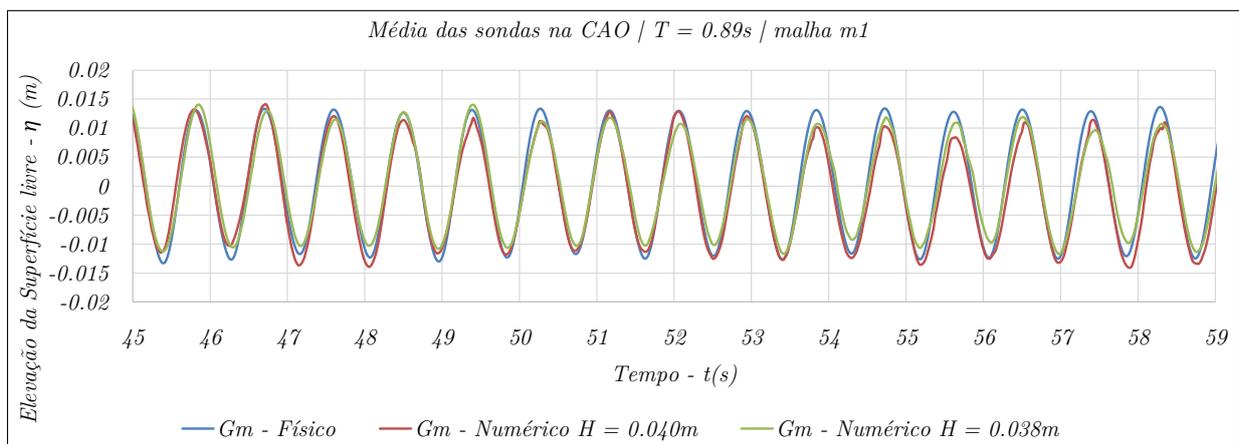


Figura C.5: Média da elevação da superfície livre das sondas G6, G7 e G8 (G_m).

APÊNDICE C.

Malha m_2 :

Tabela C.1: Parâmetros estatísticos relativos à malha m_2 e com altura de onda de 0.038 metros.

H = 0.038 m							
Sondas	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_m
<i>RMSE</i>	0.00243	0.00430	0.00420	0.00369	0.00206	0.00188	0.00172
<i>bias</i>	-0.00091	-0.00050	0.00277	0.00071	0.00093	0.00006	0.00028
<i>ic</i>	0.98795	0.97129	0.97568	0.91761	0.98730	0.99058	0.98926

Tabela C.2: Parâmetros estatísticos relativos à malha m_2 e com altura de onda de 0.040 metros.

H = 0.040 m							
Sondas	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_m
<i>RMSE</i>	0.00190	0.00310	0.00433	0.00490	0.00369	0.00202	0.00179
<i>bias</i>	0.00137	0.00103	0.00321	-0.00096	-0.00175	-0.00021	-0.00021
<i>ic</i>	0.99376	0.98608	0.97413	0.84690	0.96153	0.98843	0.98443

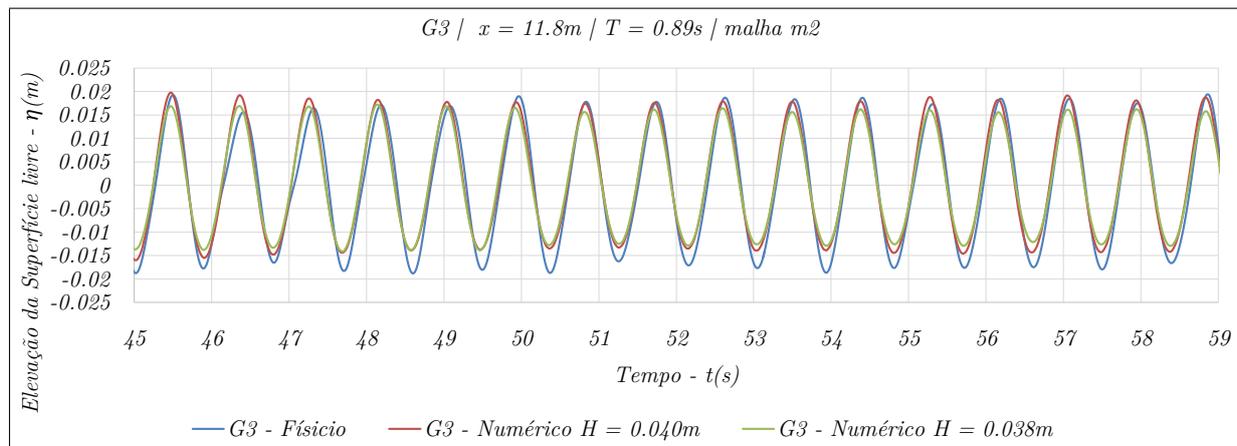


Figura C.6: Elevação da superfície livre na sonda G_3 .

C.1. CALIBRAÇÃO - ALTURA DE ONDA

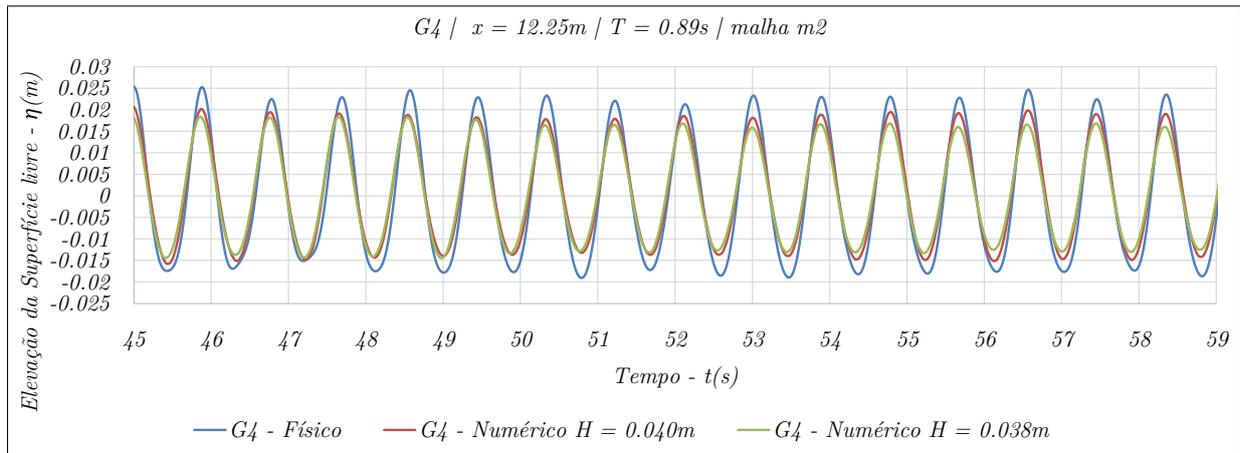


Figura C.7: Elevação da superfície livre na sonda $G4$.

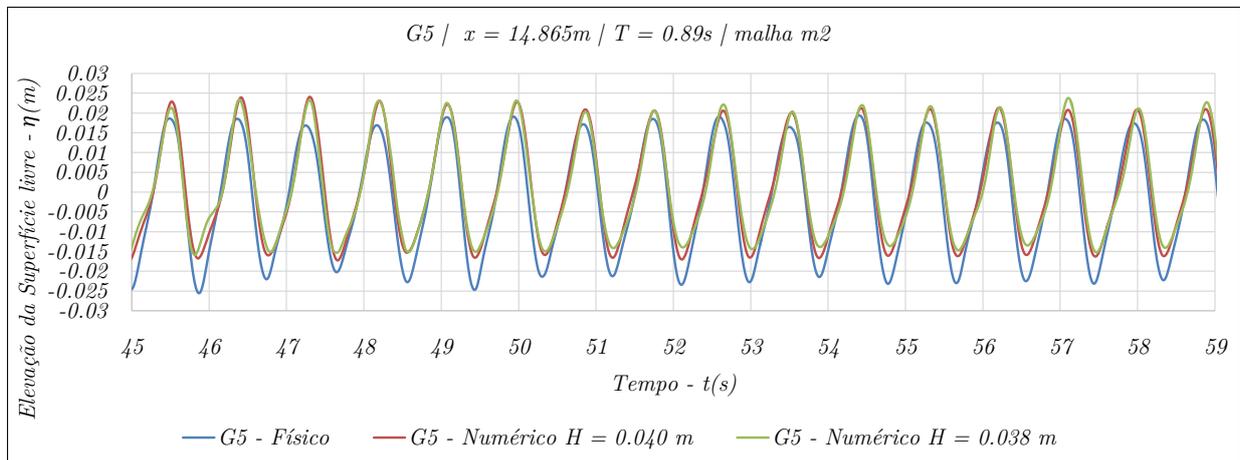


Figura C.8: Elevação da superfície livre na sonda $G5$.

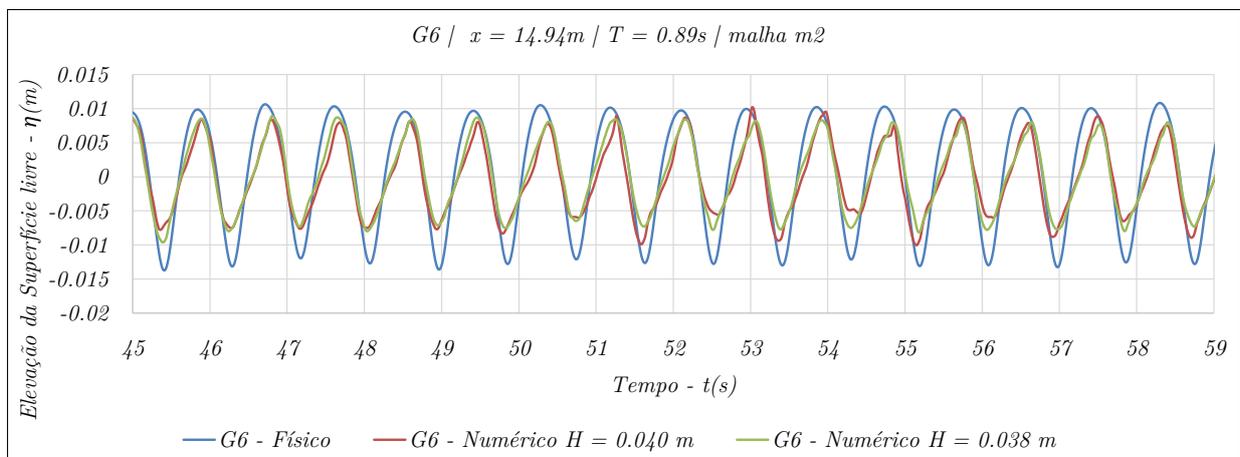


Figura C.9: Elevação da superfície livre na sonda $G6$.

APÊNDICE C.

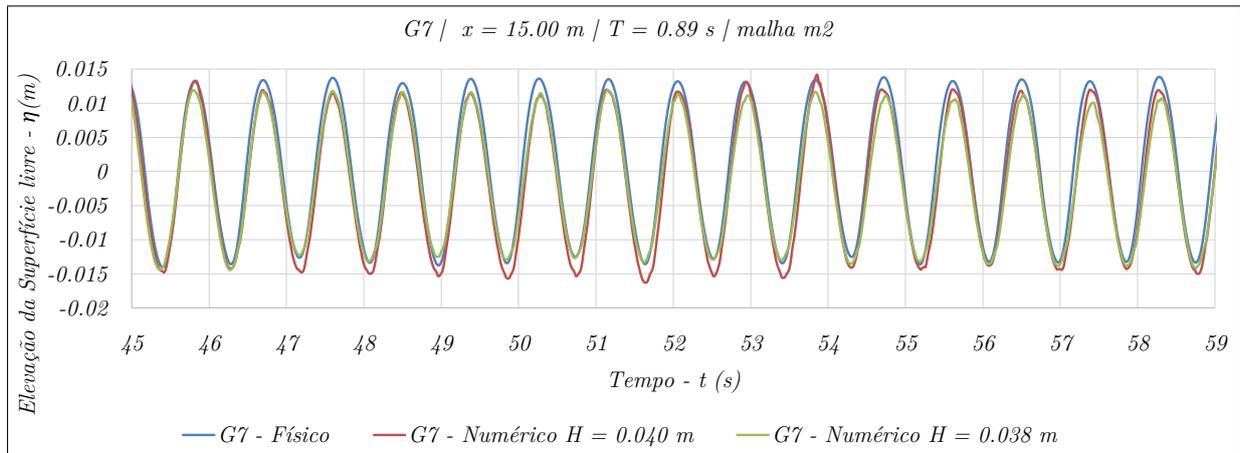


Figura C.10: Elevação da superfície livre na sonda G7.

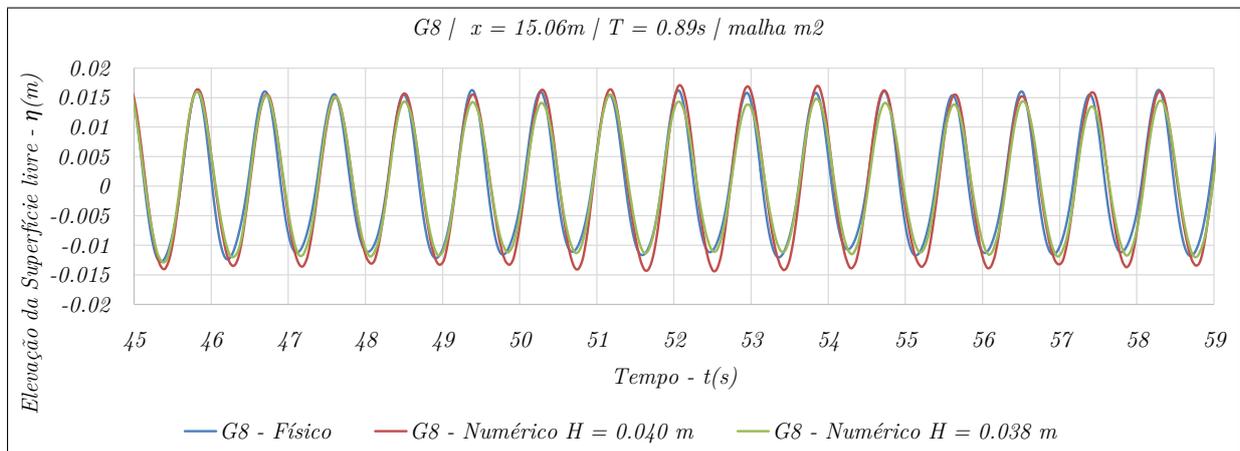


Figura C.11: Elevação da superfície livre na sonda G8.

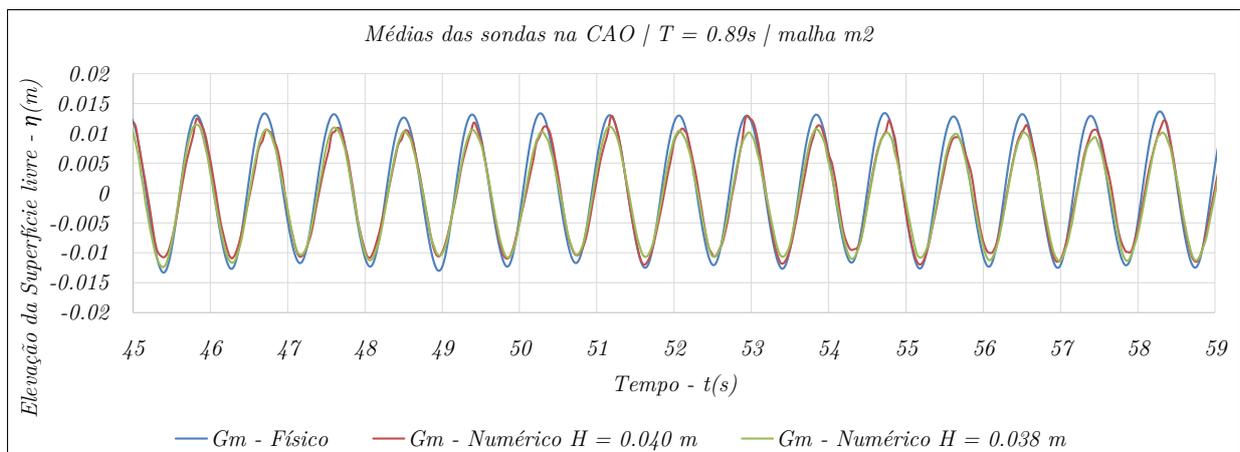


Figura C.12: Média da elevação da superfície livre das sondas G6, G7 e G8 (G_m).

C.2 Calibração - Convergência

Malha m_3 :

Tabela C.3: Parâmetros estatísticos relativos à malha m_3 e com altura de onda de 0.038 metros

$H = 0.038 \text{ m}$

Sondas	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7	G_8	G_m
$RMSE$	0.00255	0.00421	0.00391	0.00341	0.00186	0.00141	0.00159
$bias$	-0.00073	-0.00047	0.00122	-0.00036	0.00069	0.00005	0.00027
ic	0.99245	0.98220	0.97994	0.93120	0.99130	0.99358	0.99013

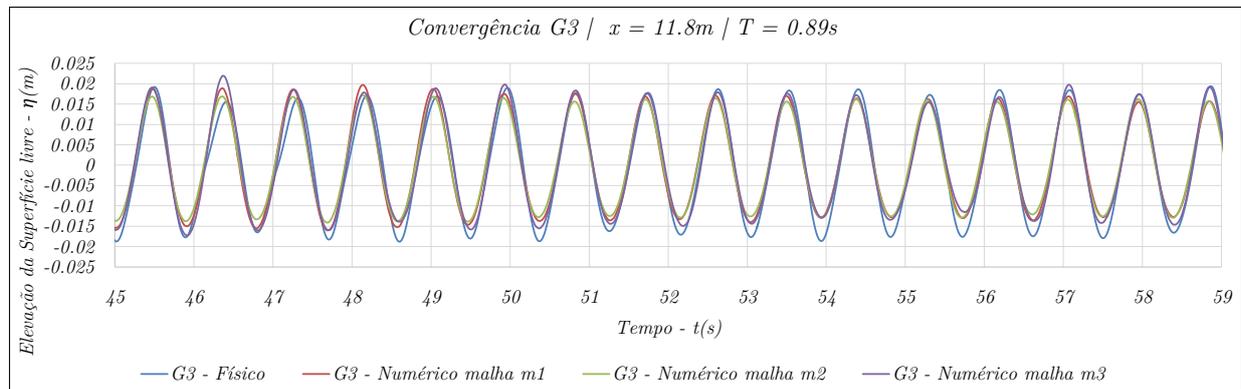


Figura C.13: Elevações da superfície livre na sonda G_3 , obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

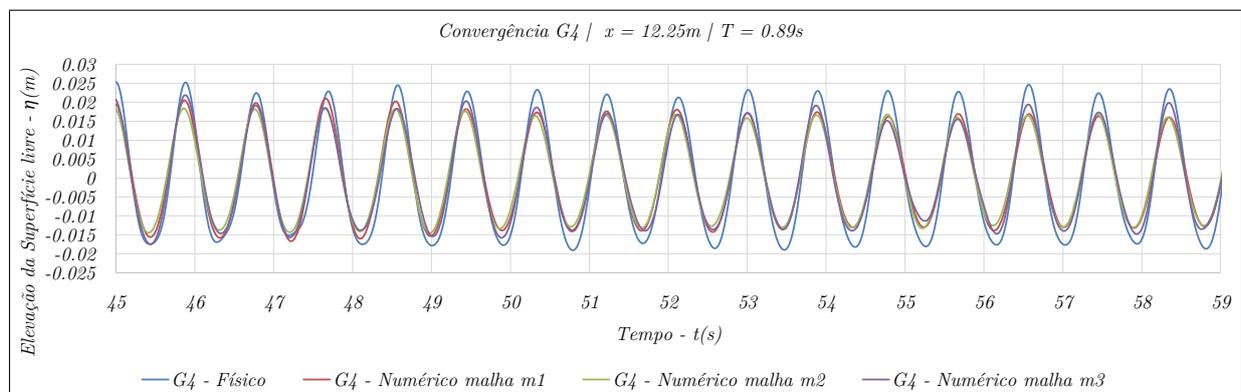


Figura C.14: Elevações da superfície livre na sonda G_4 , obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

APÊNDICE C.

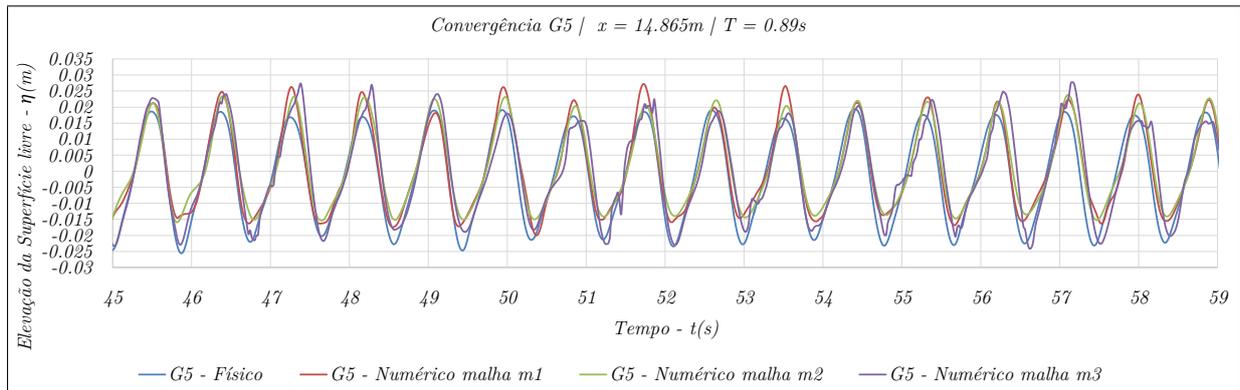


Figura C.15: Elevações da superfície livre na sonda G5, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

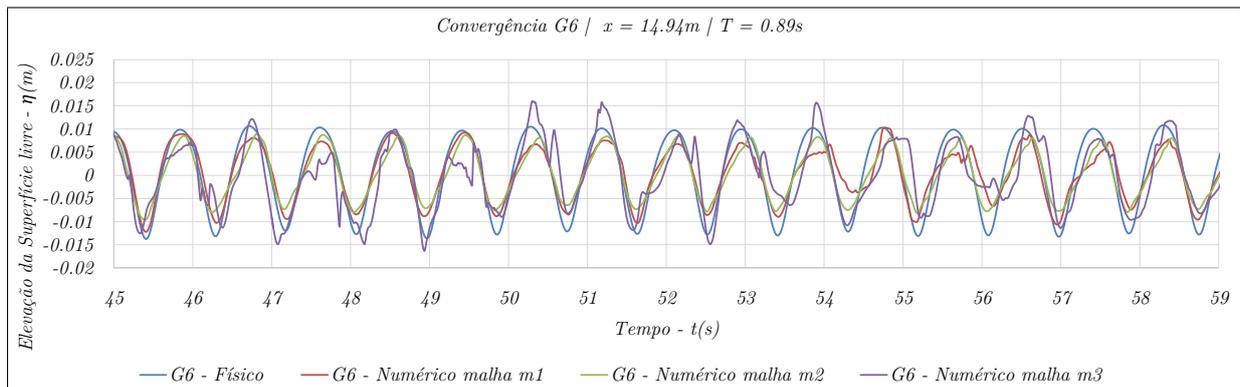


Figura C.16: Elevações da superfície livre na sonda G6, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

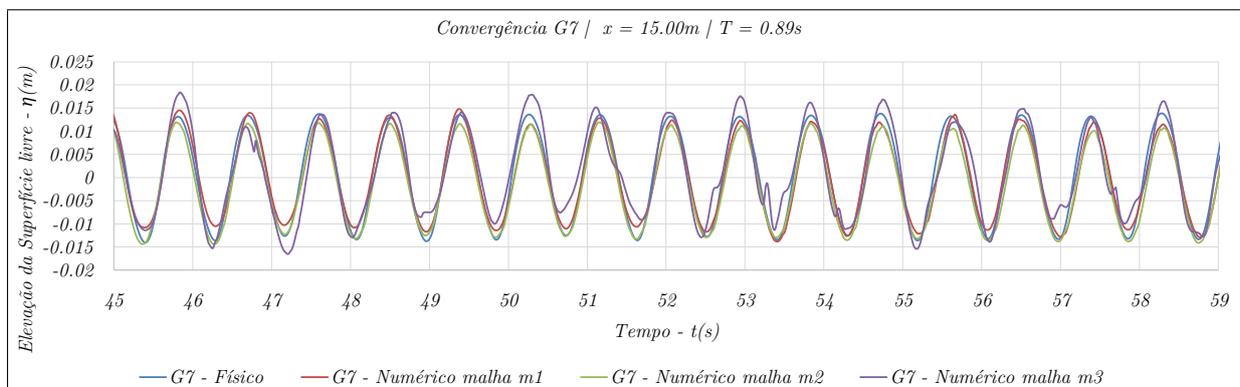


Figura C.17: Elevações da superfície livre na sonda G7, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

C.2. CALIBRAÇÃO - CONVERGÊNCIA

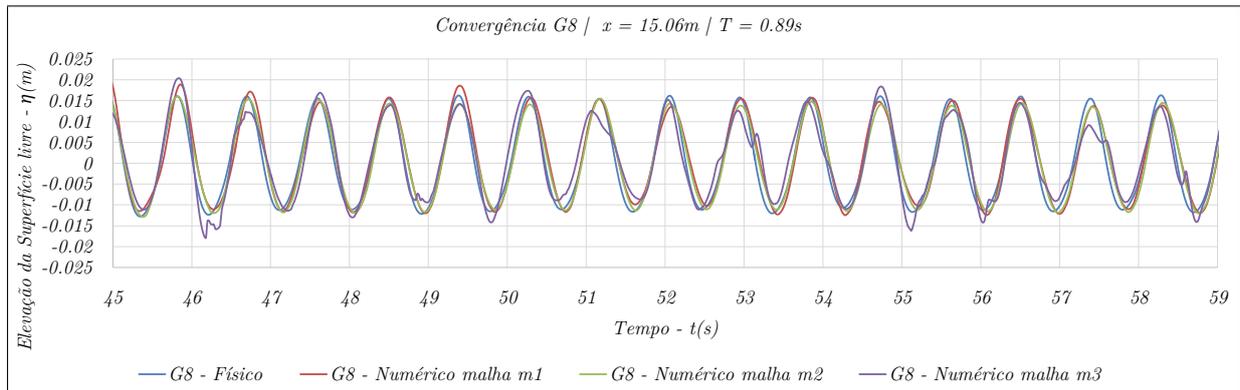


Figura C.18: Elevações da superfície livre na sonda G8, obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

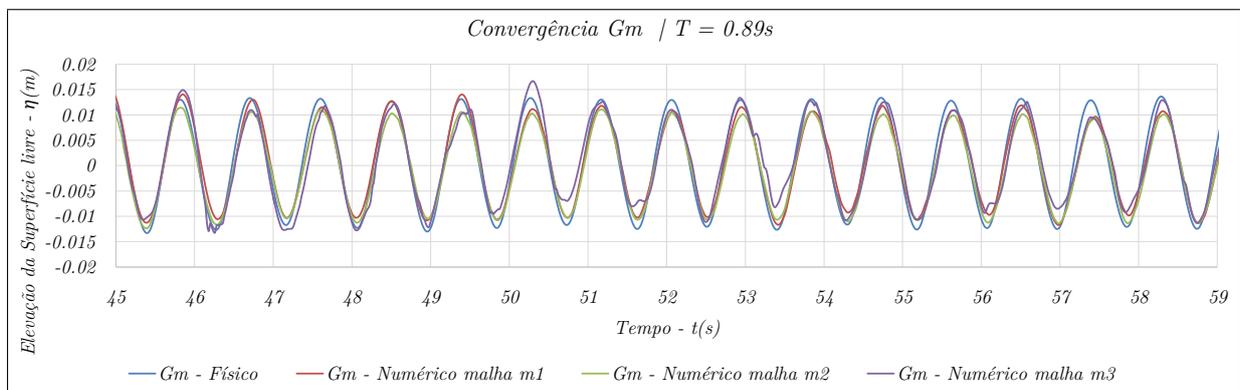


Figura C.19: Média das elevações da superfície livre nas sonda G6, G7 e G8 (G_m), obtidas pelos ensaios experimentais e pelos três modelos numéricos com malhas de diferentes dimensões.

C.3 Calibração - Turbulência

Malha m_2 :

As seguintes séries temporais de elevação da superfície livre contém os resultados dos ensaios experimentais e os dos modelos numéricos com e sem modelo de turbulência.

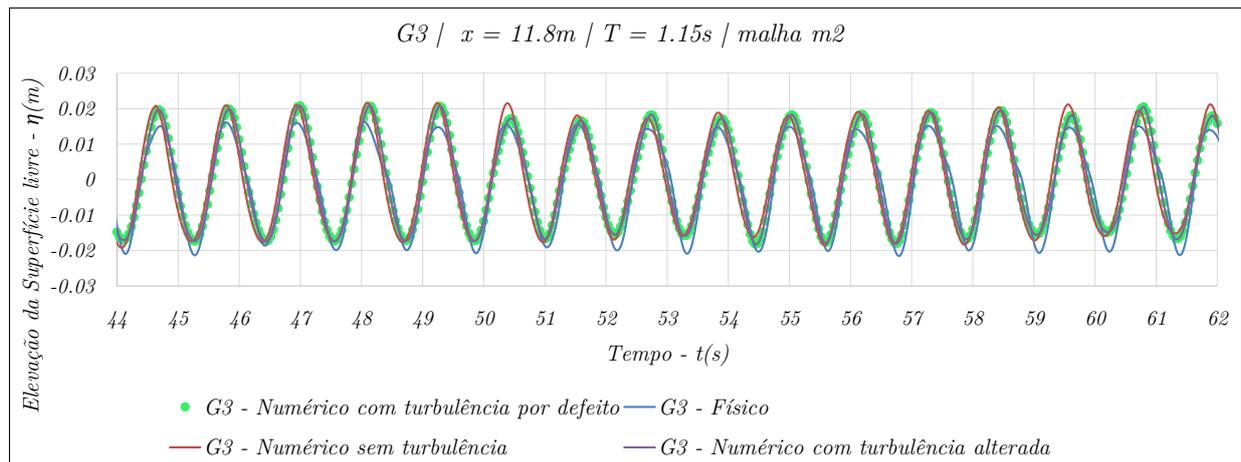


Figura C.20: Elevações das superfícies livres na sonda $G3$.

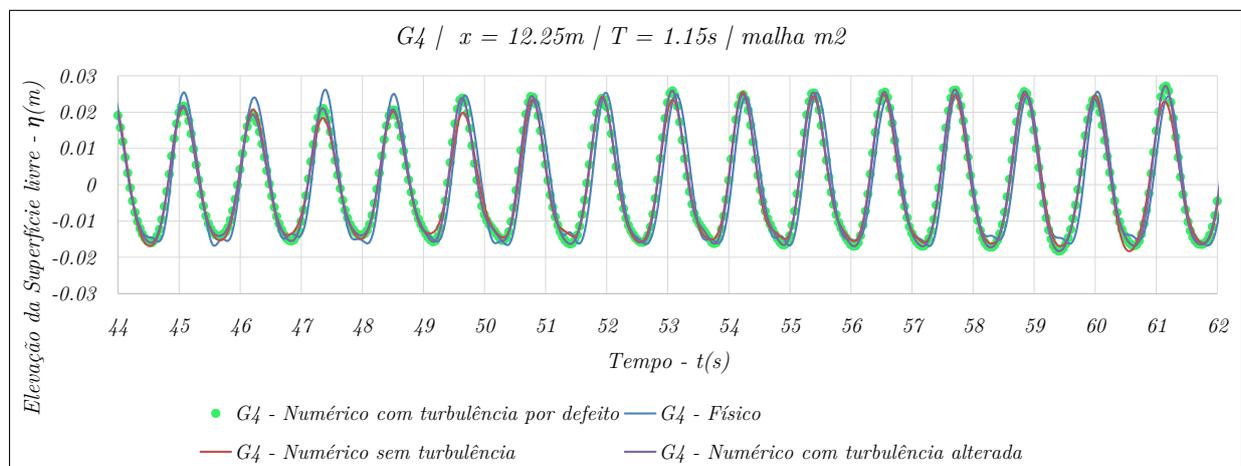


Figura C.21: Elevações das superfícies livres na sonda $G4$.

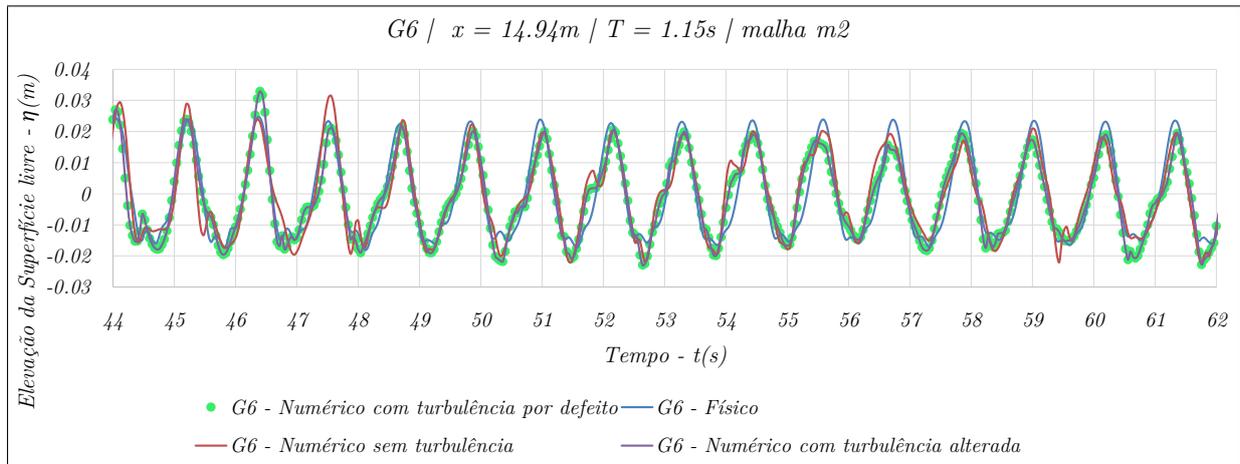


Figura C.22: Elevações das superfícies livres na sonda G6.

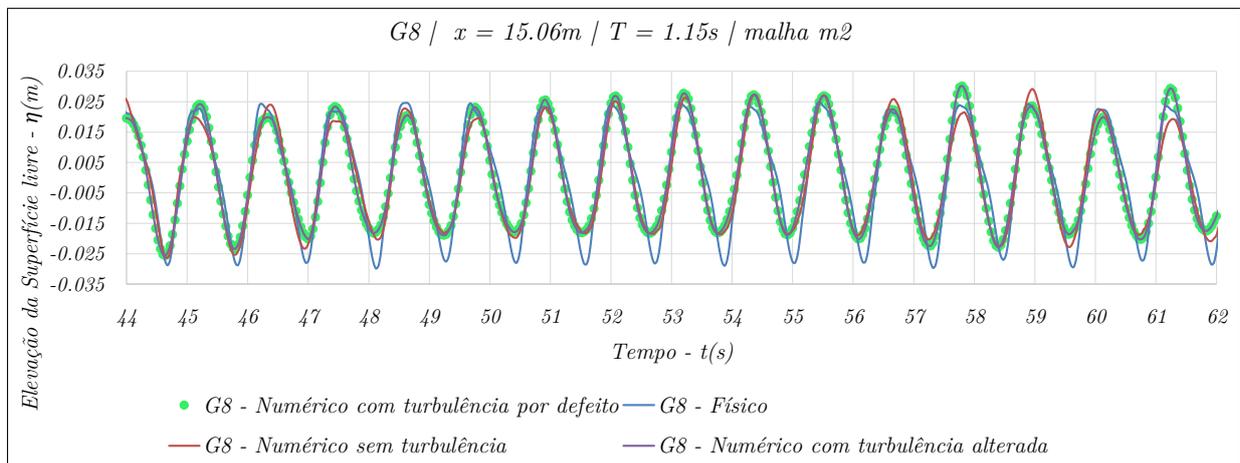


Figura C.23: Elevações das superfícies livres na sonda G8.

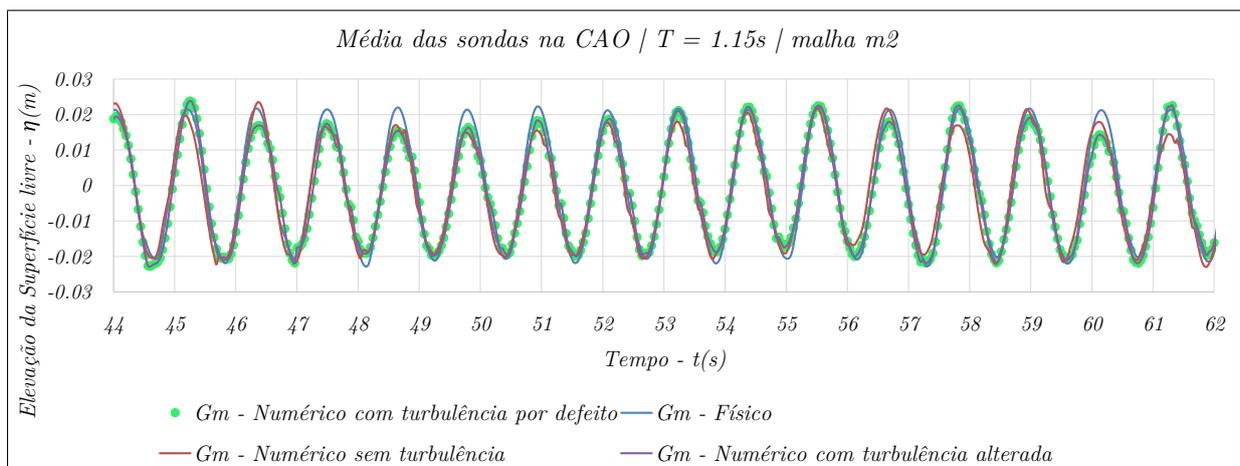


Figura C.24: Média das elevações da superfície livre nas sonda G6, G7 e G8 (G_m).

Apêndice D

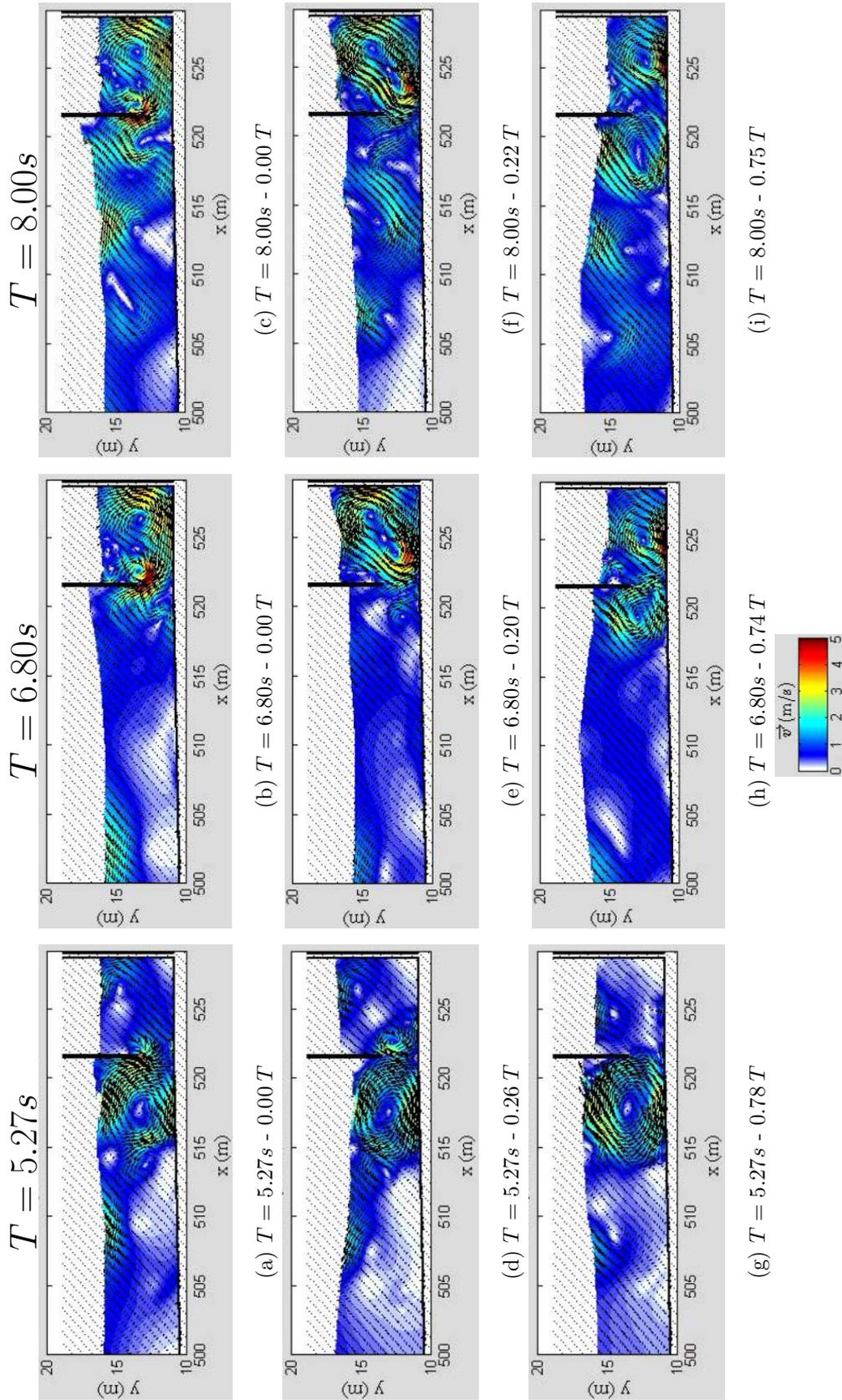


Figura D.1: $T = 5.27s$, $T = 6.80s$ e $T = 8.00s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

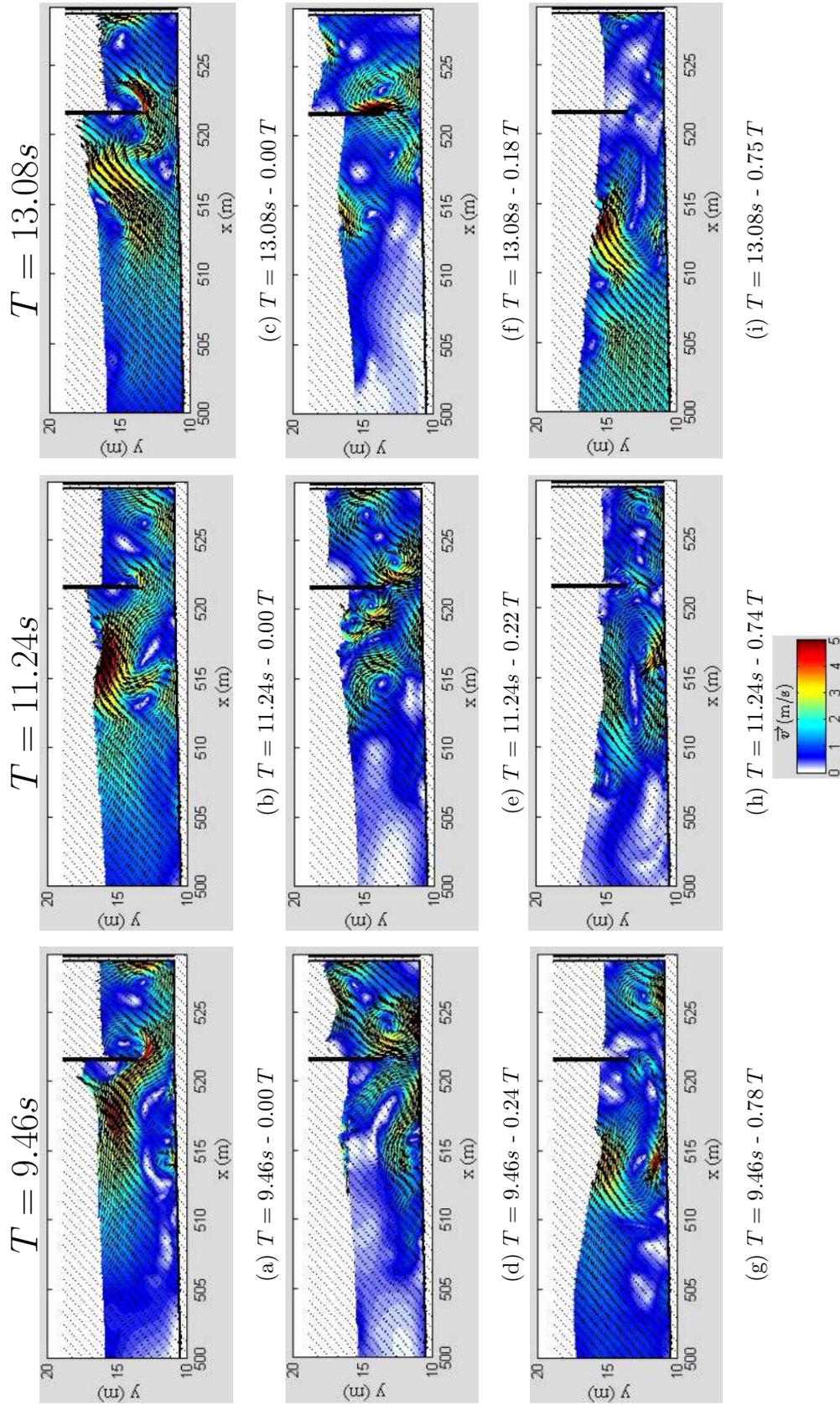


Figura D.2: $T = 9.46s$, $T = 11.24s$ e $T = 13.08s$ - Campo de velocidades nos instantes de zero ascendente, de crista e de cava, que correspondem, dentro da CAO, à média da elevação da superfície livre, para $d/h = 0.5$ e $B/h = 1.33$.

Apêndice E

APÊNDICE E.

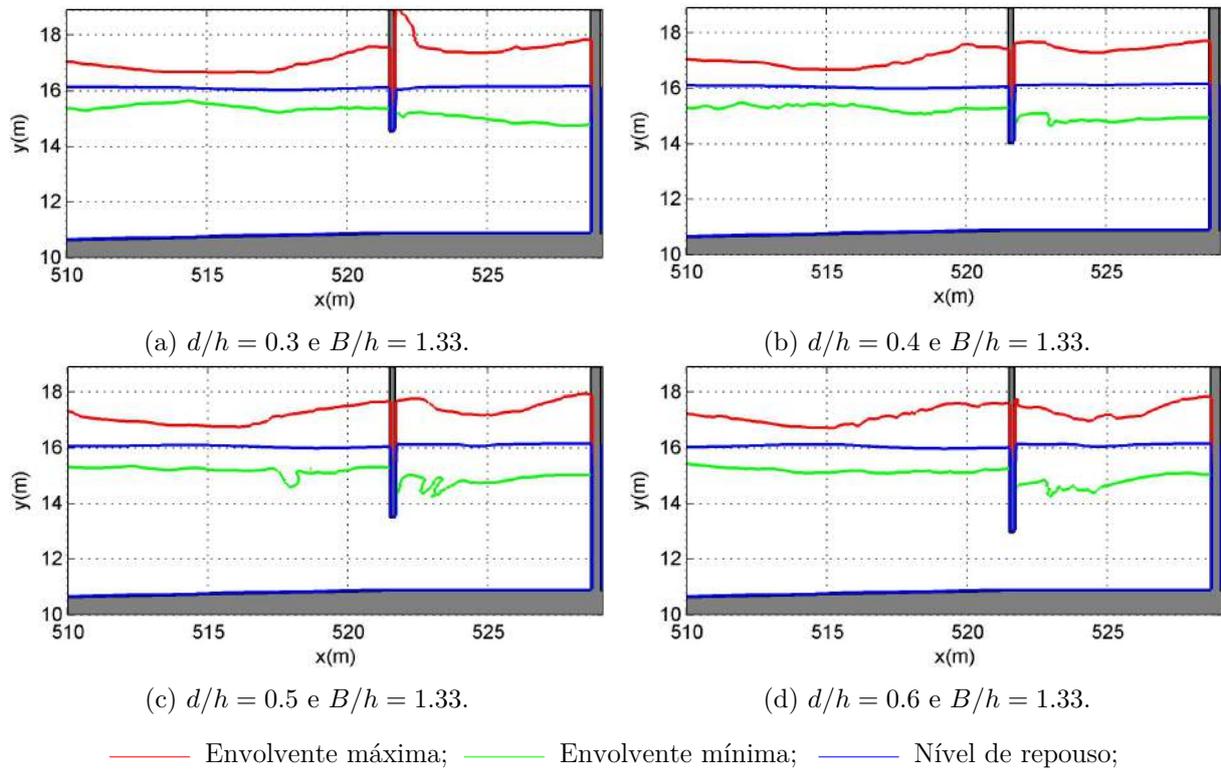


Figura E.1: $T = 8.00s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.

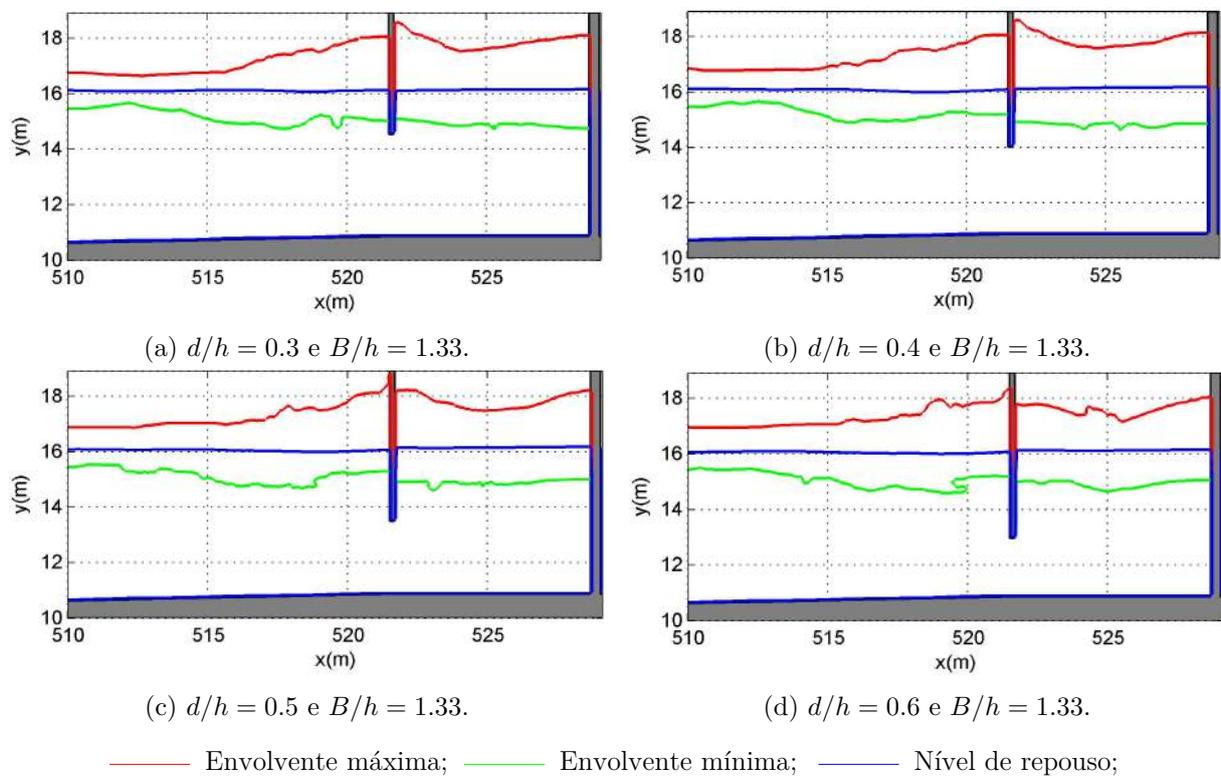


Figura E.2: $T = 9.46s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.

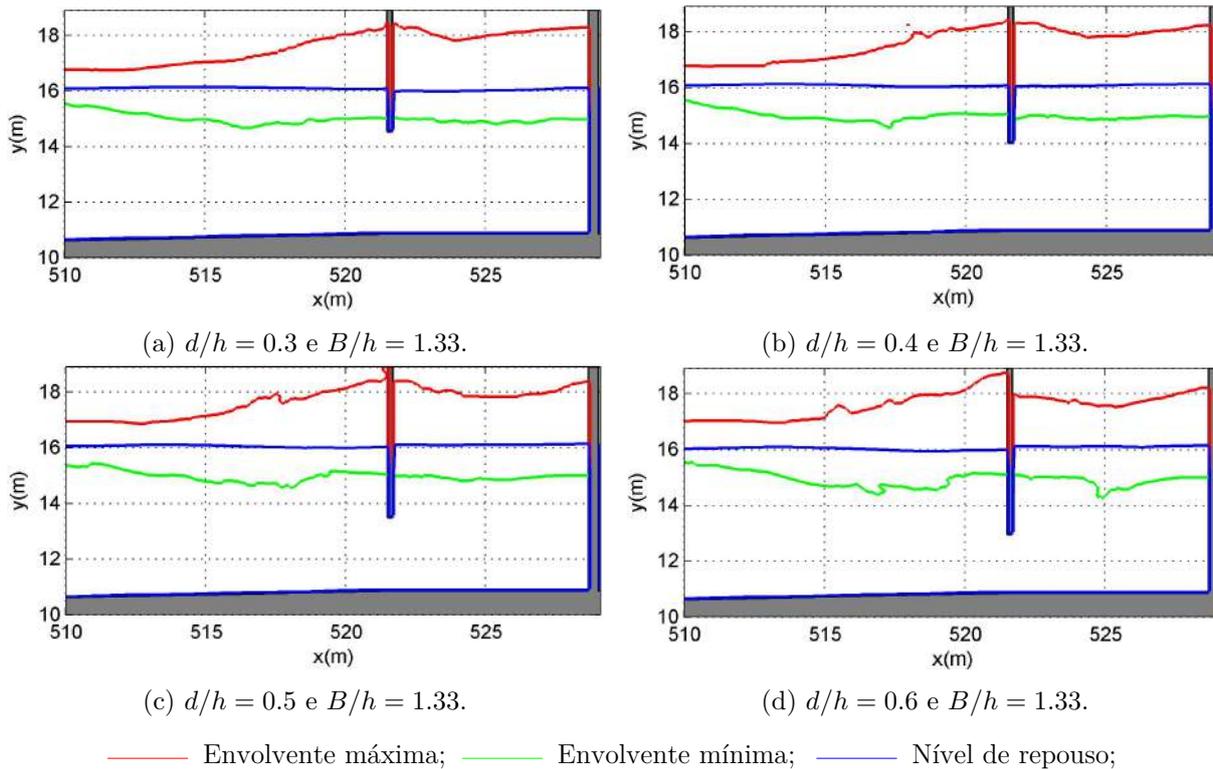


Figura E.3: $T = 11.24s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.

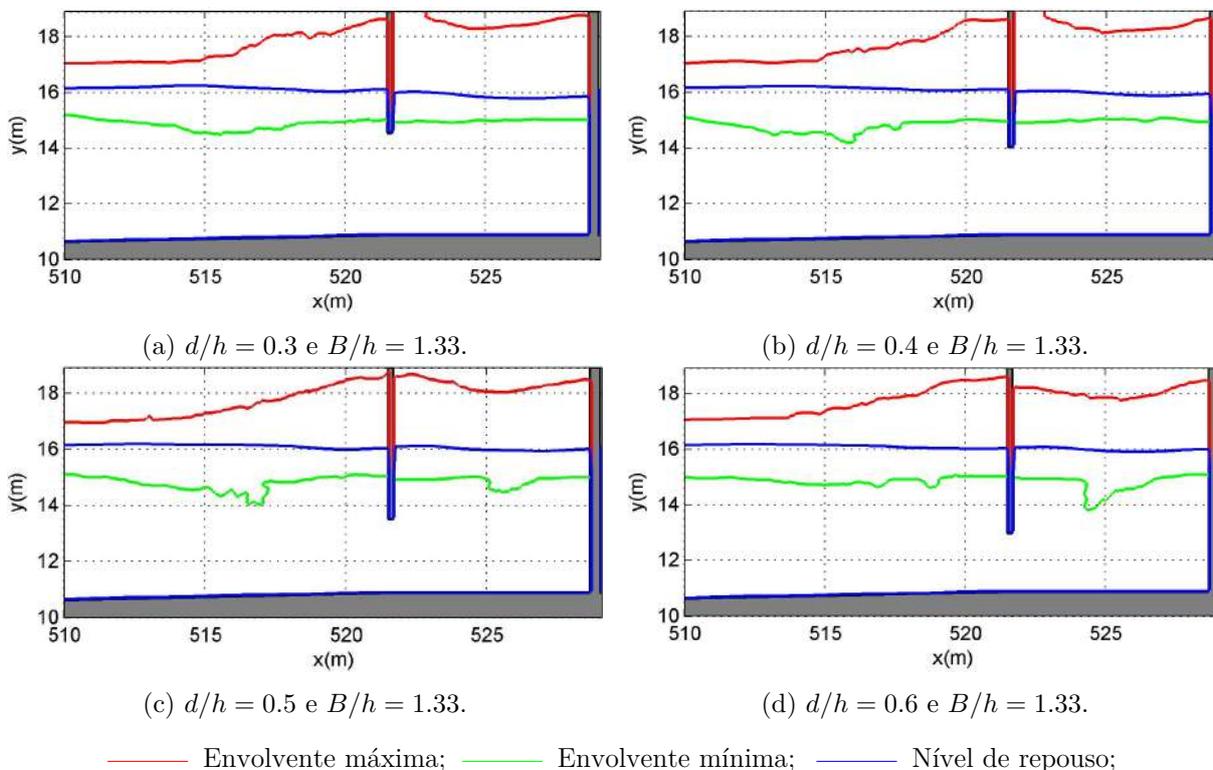


Figura E.4: $T = 13.08s$ - Envoltentes da elevação da superfície livre.