



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Simulação numérica do escoamento de superfície livre com rebentação de ondas**

## **Numerical simulation of free surface flow with breaking of waves**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**Fábio Miguel Marques Machado**

**Orientadores**

**António Manuel Gameiro Lopes, DEM-UC**

**Juana Conceição Fortes, LNEC**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Maio, 2017**



## **Agradecimentos**

O meu muito obrigado ao Professor António Gameiro pela disponibilidade demonstrada em todos os momentos. Todas as sugestões, orientações e novas perspetivas dadas foram uma ajuda central na execução deste trabalho.

Um profundo agradecimento aos meus pais, que sempre me ajudaram durante todo o meu percurso académico.

Por fim, agradeço aos meus amigos e família por todos os momentos inesquecíveis que passei em Coimbra, que para sempre levarei comigo.



## Resumo

Com o aumento do poder computacional, a modelação numérica aplicada a escoamentos de fluidos constitui uma ferramenta cada vez mais importante para as engenharias oceânica e costeira, podendo ser aplicada em estudos de conversores de energia.

O objetivo desta dissertação de mestrado consiste no uso de um *software* de dinâmica de fluidos computacional (CFD), ANSYS® CFX®, para o estudo de um escoamento em superfície livre com rebentação de ondas.

Numa primeira fase, cria-se um tanque numérico de ondas de modo a estudar a capacidade do ANSYS® CFX® em modelar ondas progressivas regulares. Deste modo, testam-se duas formas distintas de gerar ondas no início do tanque numérico, concluindo-se que a implementação da teoria *Wavemaker*, do tipo pistão, apresenta melhores resultados. Além disso, são analisadas formas de prevenir a reflexão das ondas no fim do tanque numérico, sendo também realizada uma análise de vários parâmetros de maneira a otimizar a solução. A solução otimizada é comparada com a Teoria de Stokes de Segunda Ordem, mostrando boa concordância. Desta forma é demonstrado que com o uso do ANSYS® CFX® é possível simular corretamente ondas progressivas regulares.

No entanto, o ANSYS® CFX® não se mostra como uma boa alternativa para modelação de ondas perto do valor crítico de quebra em águas profundas. Registou-se um elevado amortecimento da altura da superfície livre e um desfasamento em relação à teoria.

Por fim, modela-se numericamente diferentes quebras de onda nas denominadas zonas de *surf*. O ANSYS® CFX® mostrou ser capaz de simular três tipos diferentes de quebra de ondas: *spilling*, *plunging* e *surging*.

**Palavras-chave:** Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) , ANSYS® CFX®, Ondas regulares ,Teoria *Wavemaker*, Teoria de Stokes de Segunda Ordem, Quebra de onda.



## Abstract

With the growth registered in computational power, numerical models applied to fluid flows is an increasingly important tool for oceanic and coastal engineering, and can be used in studies including energy converters.

The main objective of this master's thesis consists of using a Computational Fluid Dynamics (CFD) software, ANSYS® CFX®, to study a free surface flow with breaking of waves.

At first, a Numerical Wave Tank (NWT) is created to study the ability of ANSYS® CFX® to model regular progressive waves. Thus, two different ways of generating waves at the beginning of the NWT are tested. It was concluded that the implementation of a piston wavemaker provides more accurate results. In addition, ways of preventing reflection at the end of the NWT are analyzed, as well as several parameters in order to optimize the solution. The optimized solution is compared to Stokes second order theory, showing good agreement. It was demonstrated that ANSYS® CFX® is capable of modelling accurately progressive regular waves.

However, ANSYS® CFX® is not a good choice to modelling of waves with steepness near the critical deepwater breaking value. It was registered damping of waves and was noted that the period of the waves doesn't match with the theoretical values.

Finally, different breaking of waves are modelled in the surf zone. ANSYS® CFX® was shown to be able to model three types of breaking waves: spilling, plunging and surging.

**Keywords** Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS® CFX®, Regular waves, Wavemaker Theory, Stokes second order theory, Breaking waves.





## Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvi
1. Introdução .....	1
2. Teoria das ondas.....	5
2.1. Teoria de Stokes de Segunda Ordem.....	5
2.1.1. Elevação da superfície livre .....	6
2.1.2. Campo de velocidades .....	7
2.1.3. Validade da Teoria de Stokes de Segunda Ordem .....	8
2.1.4. Quebra de onda .....	9
2.1.5. Quebra de ondas na zona de surf.....	10
3. Introdução à modelação computacional da dinâmica de fluidos (CFD).....	13
3.1. ANSYS® CFX®.....	13
3.1.1. Equações Governantes.....	15
4. Introdução aos tanques numéricos de ondas.....	17
4.1. Teoria Wavemaker .....	18
4.2. Revisão bibliográfica.....	20
5. Caso de estudo.....	23
5.1. Definição de casos de estudo e geometrias .....	23
5.1.1. Geometria: Caso 1 .....	23
5.1.2. Geometria: Caso 2 .....	24
5.1.3. Ondas de projeto.....	25
5.2. Caso 1: Geração e propagação de ondas regulares num tanque numérico de ondas com fundo plano.....	25
5.2.1. Condições de fronteira .....	25
5.2.1. Malha computacional.....	32
5.2.2. Condições iniciais.....	34
5.2.3. Parâmetros de simulação.....	35
5.2.4. Otimização do tanque numérico (Caso 1B).....	36
5.3. Caso 2: Demonstração de quebra de ondas regulares numa praia.....	37
5.4. Tempo de cálculo computacional .....	38
6. Análise de resultados .....	41
6.1. Caso 1: Geração e propagação de ondas regulares num tanque numérico com fundo plano .....	41
6.1.1. Caso 1A: Método Inlet Velocity .....	41
6.1.2. Caso 1B: Teoria Wavemaker (Pistão).....	43
6.2. Teste de influência da malha (Caso 1B).....	45
6.3. Otimização do tanque numérico (Caso 1B).....	46

6.3.1. Passo de tempo .....	46
6.3.2. Comprimento do tanque .....	47
6.3.3. Declive da praia .....	48
6.3.4. Tanque numérico otimizado .....	49
6.4. Resultados obtidos por Lambert (2012) .....	51
6.4.1. Limitações no uso do OpenFOAM .....	52
6.5. Caso 2 .....	53
7. Conclusão .....	57
Referências bibliográficas .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribuição global da energia das ondas (Potência média das ondas em kW/m). (Astariz & Iglesias, 2015) .....	1
Figura 1.2. Zona de teste de S.Pedro de Moel. Adaptado de Brito (2009) .....	3
Figura 1.3. (a) Central de Ondas Pelamis (Lambert, 2012); (b) Central de Ondas do Pico. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017) .....	3
Figura 2.1. Características de uma onda progressiva regular. Adaptado de U.S Army Coastal Engineering Research Center (1984) .....	7
Figura 2.2. Campo de velocidades nas várias fases da onda. Adaptado de U.S Army Coastal Engineering Research Center (1984) .....	8
Figura 2.3. Assimetrias presentes numa onda a atingir zonas de profundidade reduzida. (Sorensen, 2006).....	10
Figura 2.4. Três tipos de quebras de onda. (a) spilling (b) plunging (c) surging. (Richardson, 1996).....	11
Figura 3.1. Etapas de uma análise CFD utilizando ANSYS® CFX®. Adaptado de Ansys (2013).....	14
Figura 4.1. Exemplo de geometria e condições de fronteira de um tanque de ondas numérico. ....	17
Figura 4.2. Funcionamento de geradores de ondas do tipo: (a) Flap (b) Pistão (Dean & Dalrymple, 1984).....	18
Figura 4.3. Teoria de Galvin para um gerador de ondas do tipo pistão. (Dean & Dalrymple, 1984).....	19
Figura 5.1. Geometria do tanque numérico de ondas relativo ao Caso 1. (Figura não está à escala) .....	23
Figura 5.2. Geometria do tanque numérico de ondas relativo ao Caso 2A. (Figura não está à escala).....	24
Figura 5.3. Geometria do tanque numérico de ondas relativo aos Casos 2B ( $\beta_2$ ) e 2C ( $\beta_3$ ). (Figura não está à escala) .....	24
Figura 5.4. Condições de fronteira implementadas no caso 1.....	26
Figura 5.5. Geometria final do tanque numérico e condições de fronteira relativo ao: (a) Caso 1A (b) Caso 1B. ....	29
Figura 5.6. Aspeto das malhas computacionais geradas. ....	32
Figura 5.7. Malha computacional na zona do SWL.....	32
Figura 6.1. Perfil da superfície livre no caso 1A, para o instante $t = 30s$ . ....	41
Figura 6.2. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante $t = 0s$ .....	42

---

Figura 6.3. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante $t = 5s$ .....	42
Figura 6.4. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante $t = 10s$ .....	43
Figura 6.5. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante $t = 15s$ .....	43
Figura 6.6. Elevação da superfície livre para o Caso 1B, no instante $t = 20s$ .....	44
Figura 6.7. Elevação da superfície livre no início do tanque, no Caso 1B.....	44
Figura 6.8. Elevação da superfície livre obtida com três malhas computacionais diferentes, no instante $t = 20s$ .....	45
Figura 6.9. Elevação da superfície livre para diferentes passos de tempo, no instante $t = 20s$ .....	46
Figura 6.10. Elevação da superfície livre para um passo de tempo de $0.04s$ , no instante $t = 20s$ .....	47
Figura 6.11. Elevação da superfície livre para vários comprimentos do tanque numérico, no instante $t = 20s$ .....	47
Figura 6.12. Elevação da superfície livre obtida para vários declives da praia, no instante $t = 20s$ .....	48
Figura 6.13. Elevação da superfície livre em $x = 32m$ , para vários declives da praia.....	49
Figura 6.14. Elevação da superfície livre relativas ao tanque de ondas numérico otimizado, no instante $t = 20s$ .....	50
Figura 6.15. Percentagem de erro entre as alturas de ondas numéricas e teóricas no instante $t = 20s$ , relativo ao Caso 1B.....	50
Figura 6.16. Velocidade superficial vertical $w$ e horizontal $u$ da água referente ao Caso 1B, para o instante $t = 20s$ .....	51
Figura 6.17. Elevação da superfície livre obtida por Lambert (2012). Adaptado de Lambert (2012).....	51
Figura 6.18. Elevação da superfície livre de ondas com uma declividade de $0.1$ ( $H = 0.2m$ ; $L = 2m$ ; $h = 1m$ ).....	52
Figura 6.19. Caso 2A: Formação de quebra de onda do tipo spilling, usando ANSYS® CFX®.....	54
Figura 6.20. Caso 2B: Formação de quebra de onda do tipo plunging, usando ANSYS® CFX®.....	55
Figura 6.21. Caso 2C: Formação de quebra de onda do tipo surging, usando ANSYS® CFX®.....	56

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores críticos de $\xi_0$ para previsão do tipo de quebra de onda (Battjes, 1947). .....	12
Tabela 5.1. Características das ondas para cada caso.....	25
Tabela 5.2. Resumo das condições de fronteira para o Caso 1A. ....	30
Tabela 5.3. Resumo das condições de fronteira para o Caso 1B.....	31
Tabela 5.4. Parâmetros de malha computacional para a zona da superfície livre. ....	33
Tabela 5.5. Dimensões de cada malha computacional. ....	33
Tabela 5.6. Condições iniciais para o Caso 1A. ....	34
Tabela 5.7. Condições iniciais para o Caso 1B.....	35
Tabela 5.8. Parâmetros de simulação.....	35
Tabela 5.9. Parâmetro surf similarity $\xi_0$ relativo a cada quebra de onda simulada. ....	37
Tabela 5.10. Número de elementos da malha computacional para os casos 2A, 2B e 2C. .	38
Tabela 5.11. Tempo de cálculo computacional nos diversos casos de estudo. ....	39



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$g$  – Aceleração gravítica, [ $\text{m s}^{-2}$ ]

$h$  – Profundidade média da água, [m]

$H$  – Altura da onda, [m]

$H_0$  – Altura de onda em águas profundas, [m]

$k$  – Número de onda, [ $\text{rad m}^{-1}$ ]

$L$  – Comprimento de onda, [m]

$L_0$  – Comprimento de onda em águas profundas, [m]

$p$  – Pressão, [Pa]

$S$  – Amplitude de movimento do pistão, [m]

$t$  – Tempo, [s]

$T$  – Período de onda, [s]

$u$  – Componente da velocidade segundo o eixo  $x$ , [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$U$  – Campo de velocidades ( $u, v, w$ ), [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$U_r$  – Parâmetro de Ursell

$v$  – Componente da velocidade segundo o eixo  $y$ , [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$w$  – Componente da velocidade segundo o eixo  $z$ , [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$x$  – Coordenada horizontal, [m]

$x_p$  – Movimento horizontal do pistão, [m]

$z$  – Coordenada vertical, [m]

$\alpha$  – Fração volúmica da água

$\beta$  – Ângulo de inclinação da praia, [Graus]

$\zeta_A$  – Amplitude de onda, [m]

$\eta$  – Elevação da superfície livre, [m]

$\mu$  – Viscosidade dinâmica, [Pa s]

$\xi_0$  – Parâmetro *surf similarity*

$\rho$  – Densidade, [kg m<sup>-3</sup>]

$\rho_a$  – Densidade do ar, [kg m<sup>-3</sup>]

$\rho_w$  – Densidade da água, [kg m<sup>-3</sup>]

$\sigma$  – Frequência angular da onda, [rad s<sup>-1</sup>]

$\varphi$  – Velocidade potencial, [m s<sup>-1</sup>]

## **Siglas**

UE – União Europeia

CAO – Coluna de Água Oscilante

CFD – Computational Fluid Dynamics

CEL – CFX Expression Language

GGI – General Grid Interface

ANSYS – Analysis System

MVF – Método dos Volumes Finitos

VOF – Volume of Fluid

SST – Shear Stress Transport

SWL – Still Water Level



## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável do planeta tem sido um interesse em foco nos últimos anos. Como prova disso, em 2009 a União Europeia (UE) estabeleceu o objetivo de até 2020 reduzir em 20% as emissões de CO<sub>2</sub>, bem como aumentar para 20% a energia produzida através de fontes renováveis (Parlamento Europeu e do Conselho, 2009). O foco principal desta política recai essencialmente nas energias eólica e solar, visto serem energias já comercializadas com sucesso. No entanto, de modo a se atingir e ultrapassar essas percentagens é necessário desenvolver novas formas de produção de energia renovável (Astariz & Iglesias, 2015). Neste âmbito, a energia proveniente das ondas do mar eleva-se como uma alternativa promissora.

As ondas do mar representam umas das mais abundantes fontes de energia do planeta. Segundo o Conselho Mundial de Energia, estima-se que a sua potência mundial seja de 2 TW (Oliveira & Lopes, 2016). As ondas possuem uma elevada densidade energética (energia por unidade de massa) e, após a sua formação, podem percorrer milhares de quilómetros em alto-mar sem perda significativa de energia (U.S Army Coastal Engineering Research Center, 1984). Estes dois aspetos estão na origem do elevado potencial energético que apresentam. A Figura 1.1 ilustra a distribuição da energia das ondas para cada local do planeta.



**Figura 1.1.** Distribuição global da energia das ondas (Potência média das ondas em kW/m<sup>2</sup>). (Astariz & Iglesias, 2015)

<sup>1</sup> Considera-se a potência das ondas por unidade de comprimento da sua frente de onda.

Apesar das claras vantagens a nível energético, a conversão da energia das ondas em energia mecânica e/ou elétrica apresenta uma série de dificuldades difíceis de solucionar, tendo em conta a tecnologia atualmente disponível. Para o efeito, os conversores de energia necessitam de cumprir vários requisitos, fruto das condições marítimas. Requerem-se estruturas que (i) sejam robustas e, simultaneamente, flexíveis; (ii) ofereçam elevada resistência à corrosão; (iii) facilitem intervenções de manutenção; (iv) resistam a condições extremas, como por exemplo, fortes tempestades (v) reduzam o impacto ambiental (Oliveira & Lopes, 2016). Até à data, cerca de mil invenções são conhecidas, sendo que apenas duzentas atingiram a fase de teste. Nenhuma se apresenta ainda economicamente viável para comercialização (Mustapa *et al.*, 2017).

Portugal tem mostrado enorme interesse no estudo e desenvolvimento deste assunto. A sua privilegiada posição geográfica assim o encoraja, visto que na costa ocidental portuguesa incidem ondas com uma potência média anual próxima de 50 kW/m (Oliveira & Lopes, 2016), conforme perceptível na Figura 1.1. Neste contexto, Portugal tem centros ativos de pesquisa no Instituto Superior Técnico, de Lisboa, e no Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, tendo o primeiro um programa de colaboração com o Massachusetts Institute of Technology. Além disso, Portugal tem participação ativa em vários programas da Comissão Europeia (World Energy Council, 2017).

Como prova da grande ambição em comercializar este tipo de energia, o governo Português definiu o decreto-lei 225/2007 de 31 de Maio de 2007. Este introduz uma tarifa especial de 260 €/MWh para os primeiros 20 MW instalados, com preços decrescentes para capacidade adicional instalada (Ministério da Economia e da Inovação, 2007). Em adição, o governo Português criou, em 2008, uma zona de teste para projetos de conversão de energia de ondas (ver Figura 1.2). Esta encontra-se situada em S. Pedro de Moel, tem uma área de 400 km<sup>2</sup> e uma potência máxima de instalação de 250 MW (Sarmiento, 2010).

Resultante das medidas tomadas por Portugal para promover a comercialização de energia proveniente das ondas do mar, o país acolheu em seu território vários projetos pioneiros. Referem-se os dois que mais impacto tiveram, até à data: a central de ondas Pelamis, em Aguçadoura (Figura 1.3.(a)), e a Central de Ondas do Pico, nos Açores (Figura 1.3.(b))

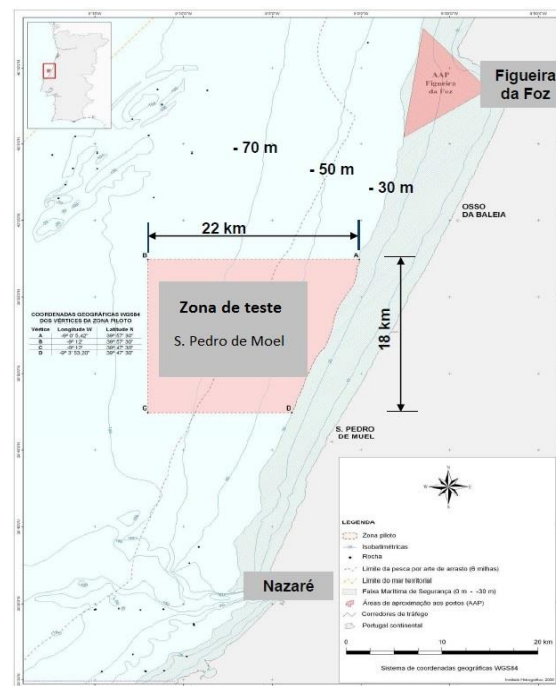


Figura 1.2. Zona de teste de S. Pedro de Moel. Adaptado de Brito (2009)



Figura 1.3. (a) Central de Ondas Pelamis (Lambert, 2012); (b) Central de Ondas do Pico. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017)

Os conversores de energia Pelamis<sup>2</sup> constituíram a primeira demonstração de central de energia de ondas pré-comercial do mundo. Três conversores de 750 kW foram instalados, cada um com 120 metros de comprimento. No entanto, o projeto terminaria poucos meses depois, devido aos estragos causados por ondas violentas no decorrer de uma tempestade (Lambert, 2012). A Central de Ondas do Pico está ainda em funcionamento, sendo um projeto piloto começado em 1999. O projeto visa o desenvolvimento de um

<sup>2</sup> O estudo sobre conversores de energia estão fora do âmbito deste trabalho. Para uma pesquisa esclarecedora sobre o tema, recomenda-se a leitura de Drew *et al.* (2009) e Thorpe (1999)

conversor de energia do tipo CAO (Coluna de Água Oscilante), e tem atualmente uma potência instalada de 400 kW (World Energy Council, 2017).

Vários outros projetos dignos de nota estão em desenvolvimento no país, existindo já alguns protótipos resultantes. Recomenda-se a leitura de World Energy Council (2017) para um conhecimento mais aprofundado.

Esta dissertação de mestrado procura contribuir no âmbito da energia das ondas, através da simulação numérica do comportamento das ondas e a interação destas com as zonas costeiras. Com o uso de um programa comercial para o efeito (ANSYS<sup>®</sup> CFX<sup>®</sup>), pretende-se provar que é possível modelar com precisão o comportamento das ondas, podendo ser uma ferramenta importante no teste de conversores de energia antes de atingirem a fase de protótipo. Nesse sentido, tendo em conta o grande apoio demonstrado pelo governo Português, juntamente com a vantajosa posição geográfica do país, espera-se que este trabalho mostre que o ANSYS<sup>®</sup> CFX<sup>®</sup> pode ser aplicado ao desenvolvimento de conversores de energia.

## 2. TEORIA DAS ONDAS

O comportamento das ondas é um aspeto central nas engenharias costeira e oceânica. Para além de conversores de energia, outras estruturas estão expostas ao efeito das ondas: navios e refinarias de petróleo são exemplos.

A formação de ondas pode resultar de vários processos. A interação com o vento, a ocorrência de eventos sísmicos, perturbações causadas por veículos marítimos e interações da Terra com a Lua e com o Sol são os principais processos. A onda com maior período conhecido resulta deste último: as marés apresentam períodos entre 12h e 24h.

Existem vários tipos de ondas, podendo ser classificadas consoante um lote variado de características. Este trabalho foca-se em ondas com as seguintes classificações (Sorensen, 2006):

- Gravíticas: no movimento oscilatório, a gravidade é a força de restauro da superfície da onda à sua posição de equilíbrio.
- Progressivas: movem-se relativamente a um ponto fixo.
- Regulares: repetem-se em iguais intervalos de tempo (Periódicas) e as suas características mantêm-se uniformes a cada repetição.

### 2.1. Teoria de Stokes de Segunda Ordem

Uma descrição adequada de uma onda envolve a definição da forma da sua superfície e do movimento do fluido por baixo dela.

A Teoria de Stokes de Segunda Ordem é uma teoria não-linear que descreve ondas progressivas regulares de amplitudes finitas. Através desta teoria, obtêm-se expressões que descrevem o campo de velocidades e a posição da superfície livre.

Existem várias ordens superiores da Teoria de Stokes, tal como a de quinta e nona ordem. No entanto, estas apresentam maior complexidade em aplicações de engenharia. Uma revisão da literatura indica que a Teoria de Stokes de Primeira Ordem (também denominada por Teoria de Airy ou Teoria Linear da Onda) e de Segunda Ordem são frequentemente utilizadas. Neste trabalho recorre-se à Teoria de Stokes de Segunda Ordem.

### 2.1.1. Elevação da superfície livre

Num escoamento em que o fluido está em contacto com a atmosfera ou outro meio gasoso, a fronteira entre o ar e a água designa-se por superfície livre. De acordo com a Teoria de Stokes de Segunda Ordem, o perfil da superfície livre da onda é dado pela expressão (2.1) e representa a distância vertical que a onda se move em relação ao nível médio da água (SWL – *Still Water Level*).

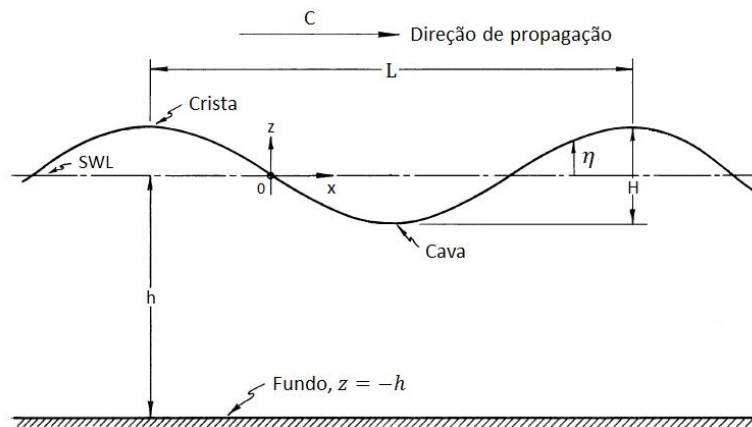
$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k \cosh kh}{16 \sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.1)$$

$H$  representa a altura da onda desde a crista até à cava da onda [m],  $h$  a profundidade [m],  $x$  a distância na direção longitudinal [m], e  $t$  o tempo [s].  $\sigma$  representa a frequência angular da onda (expressão (2.2)) e  $k$  é o número de onda (expressão (2.3), onde  $L$  é o comprimento de onda [m]).

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kh} \quad (2.2)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.3)$$

A Figura 2.1 ilustra as principais características de uma onda progressiva regular.



**Figura 2.1.** Características de uma onda progressiva regular. Adaptado de U.S Army Coastal Engineering Research Center (1984)

### 2.1.2. Campo de velocidades

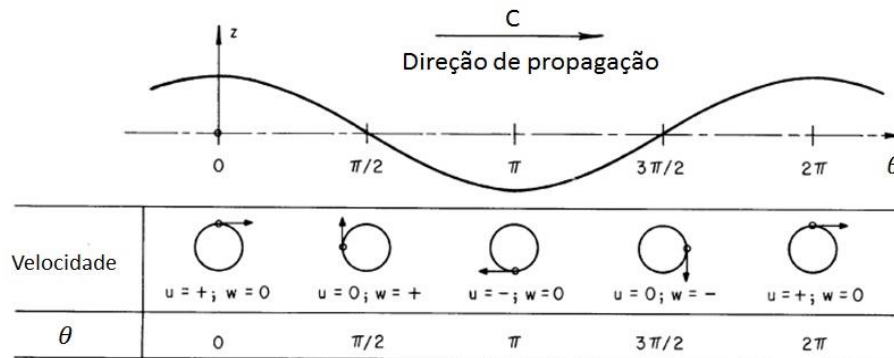
De acordo com a Teoria de Stokes de Segunda Ordem, para um escoamento bidimensional, a velocidade local define-se pela expressão (2.4) e pela expressão (2.5), sendo  $u$  a velocidade na direção horizontal e  $w$  na direção vertical. Estas expressões resultam de derivadas parciais da equação potencial de velocidade  $\varphi$ .

$$u = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \sigma k \cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.4)$$

$$w = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \sigma k \sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.5)$$

$g$  representa a aceleração gravítica [ $\text{m s}^{-2}$ ] e  $z$  o eixo vertical (onde  $z = 0$  é o nível médio da água, SWL).

A Figura 2.2 esquematiza a velocidade de escoamento nas várias fases da onda:



**Figura 2.2.** Campo de velocidades nas várias fases da onda. Adaptado de U.S Army Coastal Engineering Research Center (1984)

### 2.1.3. Validade da Teoria de Stokes de Segunda Ordem

Segundo Dean & Dalrymple (1984), a teoria de Stokes de Segunda Ordem é aplicável no estudo de ondas regulares em profundidades elevadas e intermédias, não sendo uma boa aproximação quando a profundidade é reduzida (profundidades reduzidas são definidas por  $h/L < 1/20$  e profundidades elevadas por  $h/L \geq 1/2$ ).

Para se determinar a validade do uso desta teoria, dois critérios necessitam de ser satisfeitos. Primeiramente, os termos de segunda ordem das expressões (2.1), (2.4) e (2.5) devem ser menores que os termos lineares, garantindo assim convergência. Em segundo lugar, cada onda deve ser formada por uma única crista, não podendo ocorrer quebra da onda (ver secção 2.1.4). Para que esses critérios sejam validados, as expressões (2.6) e (2.7) têm que ser verificadas (Havn, 2011).

$$U_r = \frac{k\zeta_A}{(kh)^3} < \frac{1}{3} \quad (2.6)$$

$$\frac{\zeta_A}{h} < 0.26 \quad (2.7)$$

$\zeta_A = H/2$ , representa a amplitude da onda [m] e o parâmetro  $U_r$  presente na equação (2.6) designa-se por parâmetro de Ursell, tendo este sido desenvolvido por Ursell (1953).

Os casos de estudo deste trabalho satisfazem os critérios apresentados.



#### 2.1.4. Quebra de onda

Quando uma onda quebra, nenhuma das teorias de ondas é válida. Os mecanismos que originam a quebra de uma onda são distintos em águas profundas e águas rasas.

Em águas profundas, a onda quebra quando atinge o limite máximo de declividade, definido pela razão  $H/L$ . Este limite corresponde ao momento em que a velocidade na crista da onda é igual à celeridade da onda. Após esse limite, a velocidade na crista é maior do que a celeridade da onda, provocando deste modo instabilidade e fazendo a onda quebrar (U.S Army Coastal Engineering Research Center, 1984). Michell (1893), baseado em considerações teóricas, apresenta a declividade máxima para ondas regulares em elevadas profundidades:

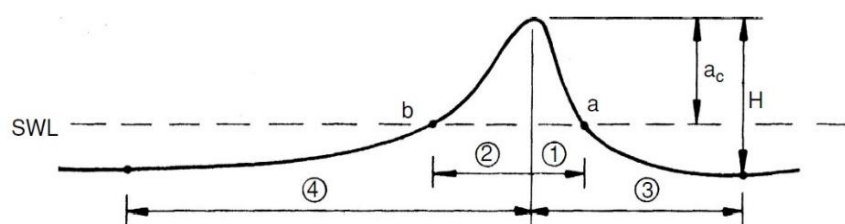
$$\frac{H_0}{L_0} = 0.142 \quad (2.8)$$

$H_0$  e  $L_0$  representam, respetivamente, a altura e comprimento de onda em águas profundas.

À medida que uma onda se aproxima da costa e, conseqüentemente, de águas com profundidades reduzidas, a velocidade na crista aumenta ao passo que a celeridade diminui. Desta forma, assimetrias surgem no perfil da onda.

Sorensen (2006) referencia um estudo conduzido por Adeyemo (1968), no qual foram apresentados quatro parâmetros de assimetrias (ilustradas na Figura 2.3), numa onda a atingir profundidades reduzidas:

- Assimetria vertical =  $a_c/H$
- Assimetria na inclinação da onda =  $0.5(\text{declive } a + \text{declive } b)$
- Assimetria horizontal (1) =  $\text{distância } 1/\text{distância } 2$
- Assimetria horizontal (2) =  $\text{distância } 3/\text{distância } 4$



**Figura 2.3.** Assimetrias presentes numa onda a atingir zonas de profundidade reduzida. (Sorensen, 2006)

As referidas assimetrias aumentam à medida que a onda se aproxima de regiões com menor profundidade, aumentando deste modo a instabilidade da mesma até ao momento da quebra.

### 2.1.5. Quebra de ondas na zona de *surf*

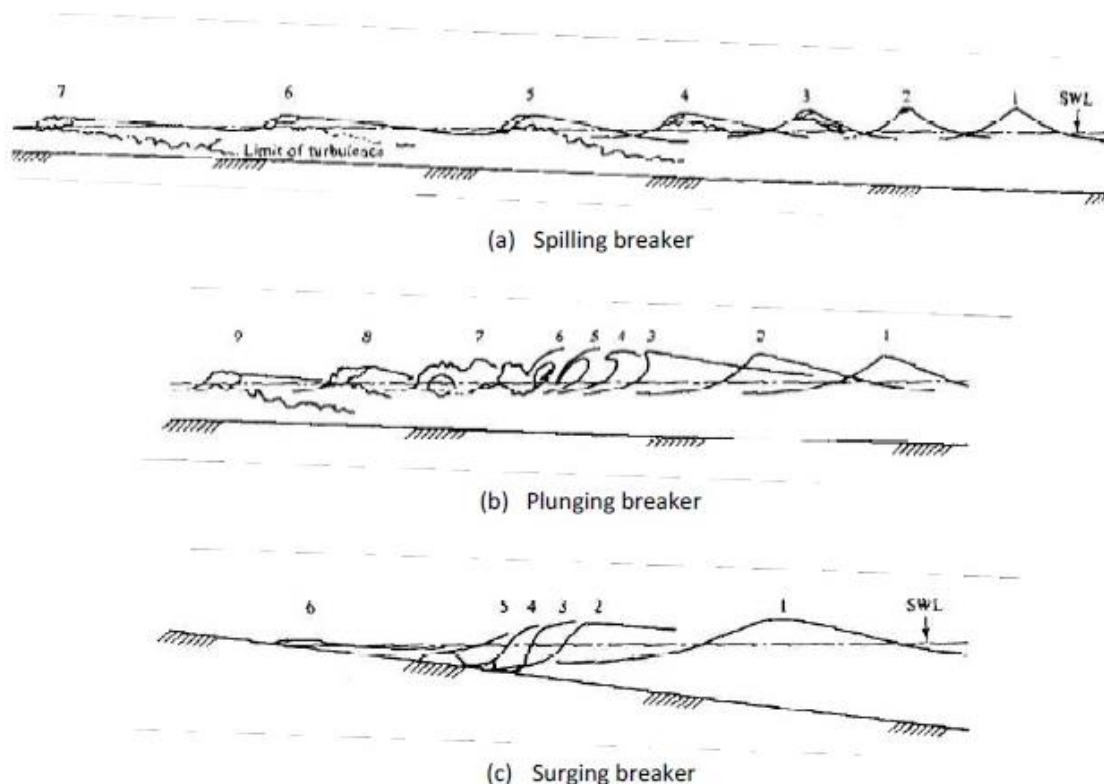
O interesse desta dissertação incide na quebra de ondas na zona de *surf*, ou seja, nas zonas perto da costa (ou “praia”). Nestas zonas podem ocorrer vários tipos de quebra, fruto das diferentes alturas e comprimentos que as ondas apresentem, bem como da inclinação da zona costeira. Consequentemente, o tipo de quebra pode ser previsto através de um parâmetro denominado *surf similarity*.

#### 2.1.5.1. Tipos de quebra de onda

As quebras de onda na zona de *surf* podem ser divididas em três tipos: (i) *spilling* (ii) *plunging* e (iii) *surging*. Na Figura 2.4 estão esquematizados os três tipos de quebra de onda, onde os números indicam as fases da quebra.

Quebras do tipo *spilling* ocorrem em declives medianos. No início da quebra forma-se espuma na crista da onda e esta desce através da face frontal da onda. A turbulência formada na crista dissipa-se a um ritmo reduzido, sendo este tipo de quebra caracterizada por uma diminuição gradual da altura da onda à medida que se aproxima da praia.

Em quebras do tipo *plunging* a crista da onda inclina-se para a frente, mergulhando sobre a base da onda. Esta ação pode promover a formação de novas ondas que acabam por também quebrar na praia. Ocorrem na presença de declives relativamente acentuados.



**Figura 2.4.** Três tipos de quebras de onda. (a) spilling (b) plunging (c) surging. (Richardson, 1996)

As quebras do tipo *surging* ocorrem em declives acentuados. A crista e a face frontal da onda mantêm-se praticamente inalteradas à medida que a onda atinge a costa, podendo não ocorrer qualquer rebentação.

Galvin (1968) identificou um quarto tipo de quebra de onda, denominada por *collapsing*, sendo uma mistura entre os tipos *plunging* e *surging* (U.S Army Coastal Engineering Research Center, 1984). Neste tipo de quebra, a crista da onda mantêm-se intacta, enquanto a parte inferior da face da onda se inclina e cai. No âmbito deste trabalho, este tipo de quebra não será tido em conta.

### 2.1.5.2. Surf Similarity

O parâmetro *surf similarity*  $\xi_0$  (Battjes, 1947), ou Número de Iribarren (Iribarren & Nogales, 1949), é um parâmetro adimensional através do qual é possível prever o tipo de quebra de onda que ocorre na zona de surf. Este é dado pela expressão (2.9), onde  $\beta$  é a inclinação da praia.

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2.9)$$

Battjes (1947) identificou valores críticos para prever qual o tipo de quebra de onda. Estes estão esquematizados na Tabela 2.1.

<b>Tipo de quebra de onda</b>	<b>Valor crítico de <math>\xi_0</math></b>
<i>Spilling</i>	$\xi_0 < 0.5$
<i>Plunging</i>	$0.5 < \xi_0 < 3.3$
<i>Surging ou Collapsing</i>	$\xi_0 > 3.3$

**Tabela 2.1.** Valores críticos de  $\xi_0$  para previsão do tipo de quebra de onda (Battjes, 1947).

### **3. INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DA DINÂMICA DE FLUIDOS (CFD)**

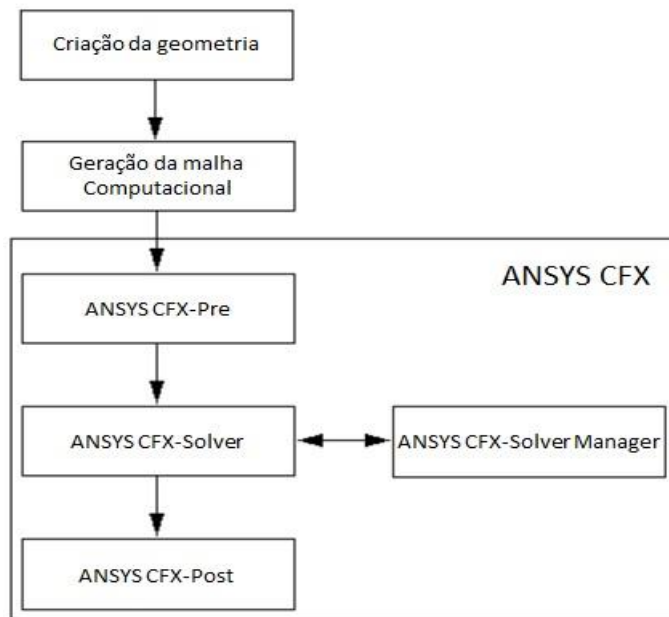
Modelação Computacional da Dinâmica de Fluidos, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é um instrumento específico de simulação numérica usado em análises de escoamentos de fluidos. O uso deste tipo de modelação numérica revela-se uma poderosa ferramenta, permitindo a previsão das características de um escoamento (Havn, 2011).

O avanço registado no poder computacional, juntamente com avanços na capacidade gráfica e manipulação em 3D de modelos numéricos, torna a criação de um modelo CFD e a análise de resultados bastante mais acessíveis. Isto reflete-se em menor tempo de operação e, em consequência, numa análise mais barata comparativamente a ensaios experimentais (Ansys, 2013). Aliado ao facto de ser relativamente simples introduzir ou alterar dimensões e variáveis de escoamento, este método oferece uma grande versatilidade no tipo de análises.

As suas aplicações estendem-se a uma grande variedade de estudos, tais como a escoamentos de um ou mais fluidos, escoamentos em superfície livre (caso de estudo do presente trabalho), escoamentos em contacto com estruturas, ou escoamentos com efeitos térmicos, entre outros. (Maguire, 2011).

#### **3.1. ANSYS® CFX®**

ANSYS® CFX® é um de vários programas CFD comerciais existentes. O programa consiste em quatro módulos: ANSYS® CFX-Pre, ANSYS® CFX-Solver, ANSYS® CFX-Solver Manager e ANSYS® CFD-Post. Estes permitem que a análise CFD seja efetuada através de uma modelação sequencial. A Figura 3.1 apresenta os passos de uma análise CFD através do programa ANSYS® CFX®:



**Figura 3.1.** Etapas de uma análise CFD utilizando ANSYS® CFX®. Adaptado de Ansys (2013)

O ANSYS® disponibiliza *softwares* de criação de geometrias e malhas computacionais: Design Modeler e Meshing, respectivamente. Após a criação das mesmas, são importadas para o ANSYS® CFX-Pre e definem-se os parâmetros de escoamento, condições de fronteira, condições iniciais e parâmetros relativos ao *solver* (Ansys, 2013).

No ANSYS® CFX-Solver as equações definidas para o projeto de estudo são calculadas usando um *solver* acoplado. O uso deste tipo de *solver* faz com que as equações hidrodinâmicas sejam resolvidas num único sistema, necessitando assim de menos iterações para obter a convergência. Com o auxílio do ANSYS® CFX-Solver Manager a fase de cálculo beneficia de um maior controlo. Especificar o tipo de ficheiros de saída do solver, iniciar ou interromper o cálculo da solução e monitorizar o progresso da solução são opções que este módulo permite (Ansys, 2013).

A análise dos resultados calculados pelo *solver* é feita através do ANSYS® CFD-Post. Aqui, ferramentas gráficas interativas estão disponíveis para uma mais fácil análise. Funcionalidades como criação de relatórios, criação de uma variedade de gráficos e processamento quantitativo estão disponíveis neste módulo (Ansys, 2013).

### 3.1.1. Equações Governantes

#### 3.1.1.1. Equações de Navier-Stokes

O método que o *solver* do ANSYS® CFX® usa para o cálculo da solução é o Método dos Volumes Finitos (MVF). Esta técnica consiste em dividir o domínio em volumes de controlo contíguos, discretizando as equações governantes de maneira a resolvê-las iterativamente em cada volume de controlo. Desta forma, uma aproximação do valor de cada variável é obtida nos pontos ao longo do domínio (Ansys, 2013).

No presente caso, as equações que são calculadas pelo *solver* são a equação da continuidade para fluidos incompressíveis ( $\rho$  constante), dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

e as equações de Navier-Stokes, para fluidos incompressíveis e de viscosidade constante:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.4)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  representam as componentes da velocidade segundo os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respetivamente [ $\text{m s}^{-1}$ ].  $\rho$  representa a densidade [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $\mu$  a viscosidade dinâmica [ $\text{Pa s}$ ],  $p$  a pressão [ $\text{Pa}$ ],  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{m s}^{-2}$ ], enquanto que  $t$  representa o tempo [ $\text{s}$ ].

### 3.1.1.2. Método *Volume Of Fluid* (VOF)

O ANSYS® CFX® usa o método *Volume Of Fluid* (VOF) de modo a calcular a posição da superfície livre. Este método consiste em determinar a fração de volume de cada fluido (ar e água) presente em cada volume de controlo. A equação da fração volúmica é dada por:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (3.5)$$

onde  $U$  representa o campo de velocidades composto por  $u$ ,  $v$  e  $w$  e  $\alpha$  representa a fração volúmica de água, que varia entre 0 e 1. Se o volume de controlo estiver cheio de água,  $\alpha = 1$ , se estiver cheio de ar, então  $\alpha = 0$ .

A fração volúmica serve também para calcular a densidade da mistura dentro de cada volume de controlo, que é incorporada nas equações de Navier-Stokes. Neste sentido, a densidade da mistura é determinada por:

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \quad (3.6)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água e  $\rho_a$  a densidade do ar.



## 4. INTRODUÇÃO AOS TANQUES NUMÉRICOS DE ONDAS

Como mencionado no Capítulo 2, um estudo correto do comportamento das ondas é uma parte importante no que diz respeito a projetos de estruturas que a elas estejam expostas. Um mau estudo pode ditar a ruína da estrutura.

Tanques de ondas experimentais são tidos como o modo tradicional de estudar ondas. Com os sucessivos avanços a nível computacional, as desvantagens do uso deste tipo de ferramenta tendem a ser cada vez mais evidentes. Além de serem caros ao nível da construção das próprias instalações, são também dispendiosos em horas de operação e manutenção. Isto prende-se com o processo de análise ser lento e sequencial. Unido à questão económica, a criação à escala de modelos físicos que representem adequadamente as condições marítimas reais é, em alguns casos, difícil de concretizar (Maguire, 2011).

Neste sentido, tanques numéricos de ondas têm como objetivo replicar numericamente tanques de ondas experimentais. Estes servem de instrumento para um vasto leque de estudos envolvendo ondas, oferecendo as vantagens de uma análise CFD, descritas no Capítulo 3.

Os resultados obtidos em estudos envolvendo tanques numéricos necessitam de ser submetidos a uma validação, de modo a se comprovar a validade dos mesmos. Esta fase pode ser satisfeita através de comparações com resultados experimentais, formulações teóricas, ou outros modelos numéricos (Silva *et al.*, 2010).

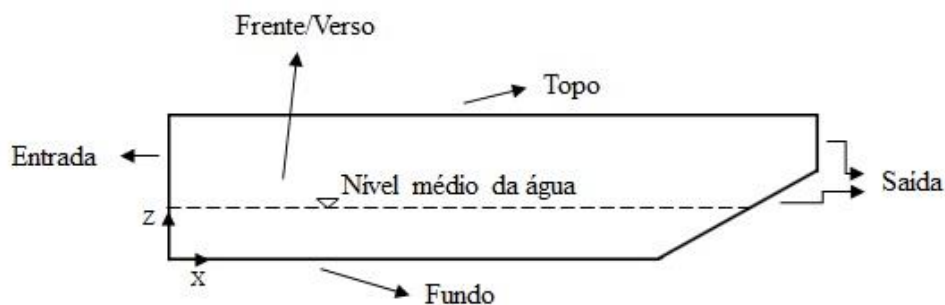


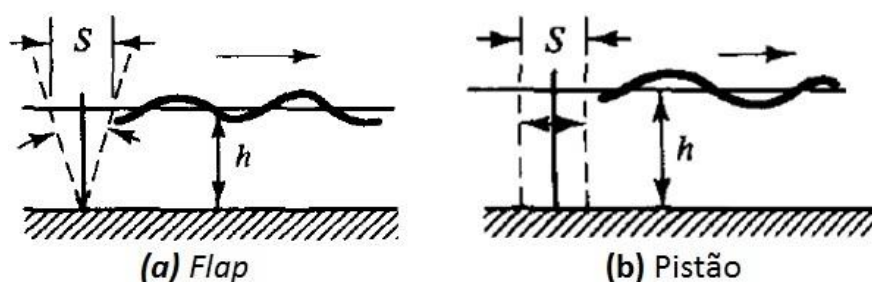
Figura 4.1. Exemplo de geometria e condições de fronteira de um tanque de ondas numérico.

Num tanque numérico de ondas, as ondas são criadas no início do domínio, progredem ao longo do tanque e são absorvidas no fim. Condições de fronteira são implementadas de modo a replicar as condições dos testes experimentais.

Na Figura 4.1 está ilustrado um exemplo de um tanque numérico de ondas, com as condições de fronteira usualmente implementadas. A criação de ondas no início do tanque e a absorção das mesmas no fim são as condições de fronteira que mais são alvo de análise. Uma revisão da literatura indica que a Teoria *Wavemaker*, para criação de ondas, e a implementação de uma zona com declive no fim do tanque (denominada por “praia”), são opções frequentemente utilizadas para os respectivos efeitos. Entre outros, estudos realizados por Elangovan (2011), Finnegan & Goggins (2012), Silva *et al.* (2010) e Saincher & Banerjee (2015) incluem a implementação destas duas condições de fronteira.

#### 4.1. Teoria *Wavemaker*

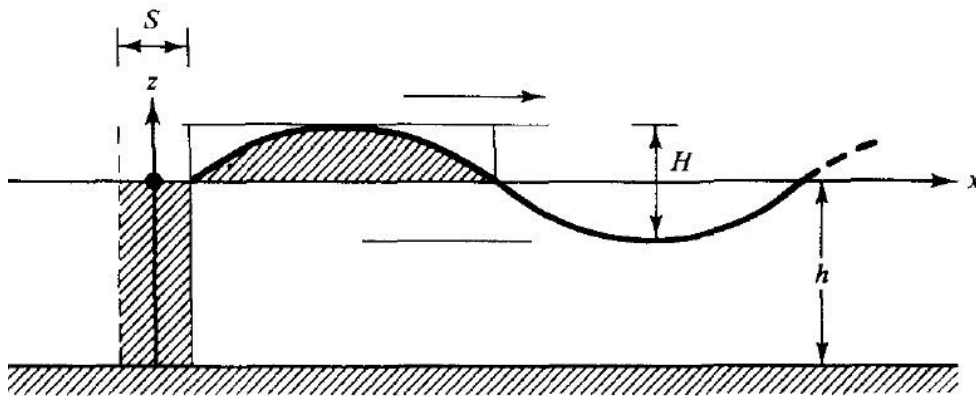
A teoria *Wavemaker* baseia-se em relacionar o movimento de uma parede no início do tanque com a elevação da superfície livre que esse movimento causa. Uma revisão da literatura mostra que criadores de ondas do tipo pistão e *flap* são vastamente utilizados em estudos envolvendo tanques numéricos. A Figura 4.2 ilustra o funcionamento dos dois.



**Figura 4.2.** Funcionamento de geradores de ondas do tipo: (a) *Flap* (b) Pistão (Dean & Dalrymple, 1984).

Anbarsooz *et al.* (2013) e Havn (2011) efetuaram estudos comparativos entre os dois tipos, concluindo que ambos são capazes de gerar ondas de acordo com a teoria, não existindo diferença significativa nos resultados entre eles. Neste trabalho, a aplicação desta teoria será feita usando um pistão.

As equações que regem a teoria *Wavemaker* para o pistão provêm do relacionamento entre o volume de água movido pelo pistão, numa amplitude de movimento, e o volume de água debaixo da crista da onda. Esta teoria foi desenvolvida por Galvin (1964), e é exemplificada na Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Teoria de Galvin para um gerador de ondas do tipo pistão. (Dean & Dalrymple, 1984)

O movimento horizontal do pistão é dado pela expressão (4.1), sendo  $S$  a sua amplitude. A relação entre a altura da onda  $H$  e a amplitude de movimento  $S$  do pistão é dada pela expressão (4.2).

$$x_p = \frac{S}{2} \sin \sigma t \quad (4.1)$$

$$\left(\frac{H}{S}\right) = \frac{2(\cosh(2kh) - 1)}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (4.2)$$

## 4.2. Revisão bibliográfica

São vários os autores que realizaram estudos envolvendo tanques de ondas numéricos. Neste sentido, Clauss *et al.* (2005) estudaram a propagação de ondas irregulares usando quatro códigos comerciais: ANSYS® CFX®, ANSYS® FLUENT®, COMET e WAVETUB. No seu estudo afirmaram que os três primeiros códigos, fazendo uso do método VOF, são mais adequados em análises envolvendo quebras de onda. Por seu turno, o WAVETUB permite um estudo mais rápido e mais preciso na propagação de ondas sem quebra. Neste contexto, a propagação das ondas foi calculada através do WAVETUB até ao momento da quebra, servindo nesse momento como condições iniciais para os restantes programas. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais, tendo-se obtido boa concordância. No entanto, constataram que todos os códigos obtêm alturas de onda mais elevadas do que a teoria.

Lal & Elangovan (2008) validou o uso de um gerador de ondas do tipo *flap*. Neste sentido, os autores criaram ondas regulares com diferentes alturas e comprimentos, estudando a dependência desses parâmetros com o período e amplitude de movimento do *flap*. No seu estudo analisaram também a absorção das ondas, realizando testes relativos ao declive da praia. Resultados envolvendo declives de 1:3 mostraram ser os mais eficazes na absorção de ondas. Modelos de turbulência foram também comparados. Simulações foram realizadas em regime laminar e com os modelos  $k - \varepsilon$  e SST (*Shear Stress Transport*). Nenhuma diferença relevante nos resultados foi detetada no uso destas três abordagens.

Silva *et al.* (2010) provaram que o código comercial ANSYS® CFX® fornece resultados corretos na simulação da geração e propagação de ondas regulares em profundidades intermédias. Neste estudo implementaram um criador de ondas do tipo *flap*. Compararam os resultados obtidos com resultados analíticos (Teoria Linear e Teoria de Stokes de Segunda Ordem), validando assim o modelo numérico. Os autores investigaram também a influência da altura do domínio, da malha computacional e do passo de tempo na posição da superfície livre.

Elangovan (2011) gerou ondas irregulares através de um criador de ondas do tipo *flap*, usando o ANSYS® CFX®. Os resultados apresentaram boa concordância com estudos analíticos, mostrando que o ANSYS® CFX® pode ser usado no estudo deste tipo de ondas. No seu estudo, o autor incluiu a análise da influência da inclinação da praia na

absorção e reflexão das ondas, concluindo que inclinações reduzidas promovem a absorção e previnem a reflexão.

Havn (2011) reproduziu os estudos feitos por Silva *et al.* (2010) e ensaios experimentais efetuados em MARINTEK, Trondheim, provando que ANSYS® CFX® é capaz de simular corretamente a propagação de ondas regulares. No seu estudo, investigou três tipos de criador de ondas: pistão, *flap* e *hinged flap*. Concluiu, através da comparação com a Teoria de Stokes de Segunda Ordem, que os três geram ondas em conformidade com a teoria, sendo irrelevante a diferença nos resultados obtidos para os três tipos.

Finnegan & Goggins (2012) utilizaram o ANSYS® CFX® no estudo de ondas lineares em profundidades elevadas. No seu estudo, os autores usaram um criador de ondas do tipo *flap*, fazendo vários testes de convergência de modo a otimizar o tanque numérico. Entre elas, testou o efeito da malha, do passo de tempo, da altura e comprimento do domínio. Comparou os resultados com a Teoria Linear da Onda, mostrando uma boa aproximação. Investigaram também os efeitos da viscosidade, realizando simulações usando o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$ . Concluíram que os resultados não diferem em relação ao regime laminar.

Anbarsooz *et al.* (2013) efetuaram um estudo CFD envolvendo dois tipos de gerador de ondas: pistão e *flap*. Para o primeiro, replicaram ensaios experimentais feitos por Ursell *et al.* (1960). Para o tipo *flap*, criaram um tanque experimental, no qual correram os seus próprios ensaios, e usaram os resultados obtidos como forma de validar o modelo numérico. Para os dois casos, concluíram que para ondas com baixa declividade os resultados mostram boa concordância com os resultados experimentais e analíticos. Para ondas com elevada declividade os resultados apresentam um amortecimento na altura da onda de cerca de 10%. Os autores criaram ainda ondas com as mesmas características através de pistão e *flap*, de modo a efetuarem um estudo comparativo entre estes dois mecanismos. Concluíram que ambos fornecem resultados de acordo com a teoria, sendo bastante semelhantes entre os dois.

Kim *et al.* (2016) usou o código comercial ANSYS® FLUENT® para estudar a ação de ondas regulares, na presença de corrente marítima, sobre uma estrutura fixa em alto-mar. No seu estudo, o aumento da malha no fim do tanque numérico foi escolhido como forma de absorver as ondas, tendo sido feita uma análise sobre o comprimento ideal. Estudos de influência da malha foram realizados de modo a otimizar o modelo.

Prasad *et al.* (2017) fizeram uso do ANSYS® CFX® para estudar a sua aplicabilidade em estudos de rendimentos de conversores de energia. Para o efeito, criaram ondas regulares através de um pistão, num tanque numérico contendo uma turbina instalada na sua extremidade. Compararam a altura da onda e o rendimento da turbina com resultados experimentais, obtendo boa concordância. Os autores concluíram assim que o ANSYS® CFX® se apresenta como uma ferramenta válida para estudo de conversores de energia.

Lambert (2012) modelou ondas regulares em profundidades intermédias usando o código OpenFOAM. Segundo a autora, o programa obteve resultados em concordância com a teoria. No entanto, o programa apresentou algumas limitações na modelação de ondas regulares perto do valor crítico de quebra de onda, para profundidades elevadas. Registou-se a ocorrência de amortecimento e quebra de ondas abaixo desse valor. Além disso, foi investigada a aptidão do OpenFOAM em simular quebra de ondas na praia, prevista pelo parâmetro *surf similarity*. O mesmo estudo foi feito por Chenari *et al.* (2015), usando o código Waves2Foam. Em ambos os casos as quebras de ondas foram modeladas corretamente.

Esta dissertação de mestrado tem como base os casos estudados por Lambert (2012), tendo como objetivo avaliar a capacidade do ANSYS® CFX® em modelar ondas regulares e quebra de ondas na zona costeira. Para além disso, é investigado se o ANSYS® CFX® partilha das mesmas limitações que o OpenFOAM apresentou. Nesse sentido, estudos envolvendo ondas perto do valor crítico de quebra em alto-mar serão também efetuados.

## 5. CASO DE ESTUDO

No seu estudo, Lambert (2012) modelou quatro casos distintos. Neste trabalho apenas dois casos serão replicados: o Caso 1 e o Caso 3. Estes dizem respeito à produção de ondas progressivas regulares num tanque numérico com fundo plano e à modelação de quebra de ondas dos três tipos (mencionados em 2.1.5.1), respetivamente.

### 5.1. Definição de casos de estudo e geometrias

Dois casos diferentes são modelados usando o ANSYS® CFX®:

Caso 1: Geração e propagação de ondas regulares em profundidade intermédia, num tanque numérico de ondas com fundo plano.

Caso 2: Demonstração de quebra de ondas regulares numa praia.

As geometrias foram geradas usando a funcionalidade ANSYS® Design Modeler. Devido ao facto de o *solver* do ANSYS® CFX® não resolver domínios bidimensionais, considera-se em todas as geometrias uma espessura de 0.01 metros.

#### 5.1.1. Geometria: Caso 1

A geometria do tanque numérico de ondas com fundo plano é apresentada na Figura 5.1.

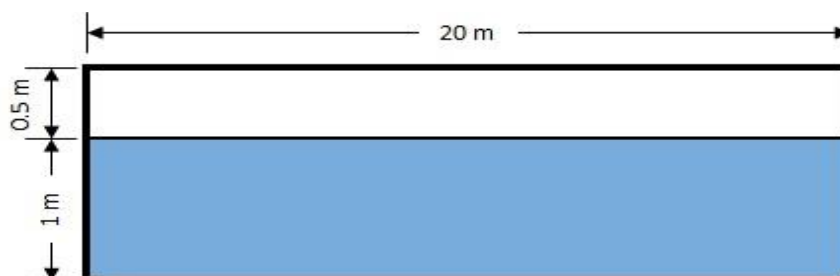


Figura 5.1. Geometria do tanque numérico de ondas relativo ao Caso 1. (Figura não está à escala)

### 5.1.2. Geometria: Caso 2

No Caso 2 são considerados três tanques numéricos de ondas com diferentes geometrias e inclinações da praia. O objetivo é simular três tipos de quebra de ondas que correspondem ao Caso 2A (quebra do tipo *spilling*), Caso 2B (quebra do tipo *plunging*) e Caso 2C (quebra do tipo *surging*)

No caso 2A (Figura 5.2), a praia tem uma inclinação  $\beta_1 = 1.5^\circ$ . Os casos 2B e 2C são modelados em versões modificadas do mesmo tanque (Figura 5.3). As praias apresentam uma inclinação  $\beta_2 = 9.5^\circ$  e  $\beta_3 = 25.4^\circ$ , respectivamente.

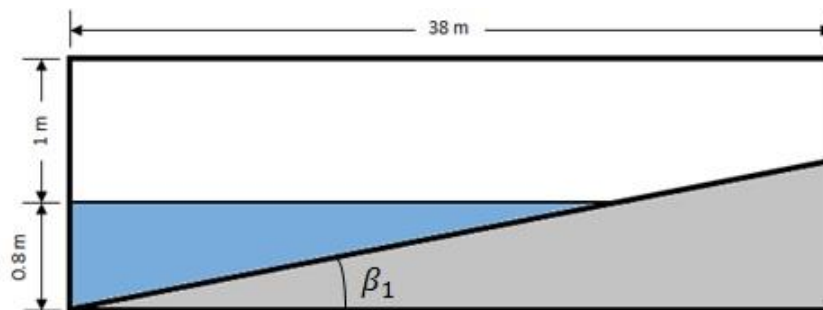


Figura 5.2. Geometria do tanque numérico de ondas relativo ao Caso 2A. (Figura não está à escala)

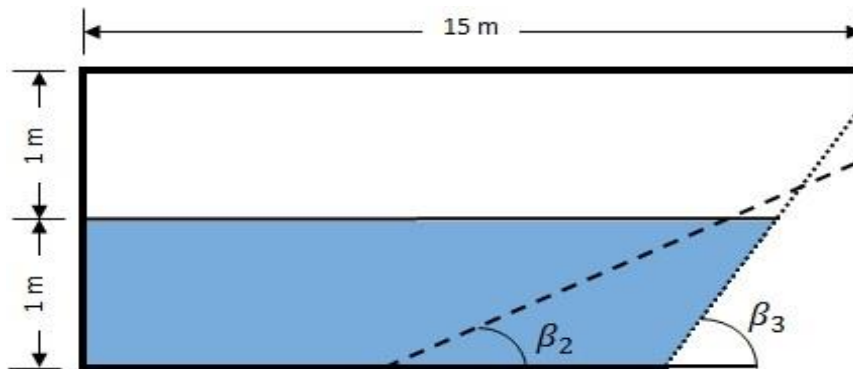


Figura 5.3. Geometria do tanque numérico de ondas relativo aos Casos 2B ( $\beta_2$ ) e 2C ( $\beta_3$ ). (Figura não está à escala)



### 5.1.3. Ondas de projeto

As características das ondas modeladas em cada caso estão ilustradas na Tabela 5.1.

<i>Caso</i>	<i>Comprimento de onda</i> $L$ [m]	<i>Altura de onda</i> $H$ [m]	<i>Período</i> $T$ [s]	<i>Profundidade</i> $h$ [m]	<i>Declividade</i> $H/L$
<b>1</b>	5	0.1	1.94	1	0.02
<b>2A</b>	5	0.2	2.05	0.8	0.04
<b>2B</b>	5	0.2	1.94	1	0.04
<b>2C</b>	5	0.1	1.94	1	0.02

**Tabela 5.1.** Características das ondas para cada caso.

## 5.2. Caso 1: Geração e propagação de ondas regulares num tanque numérico de ondas com fundo plano

### 5.2.1. Condições de fronteira

A definição das condições de fronteira é feita através do uso das expressões mencionadas ao longo deste trabalho. O ANSYS® CFX-Pre dispõe de uma ferramenta de criação de expressões, *CFX Expression Language* (CEL), através do qual é possível criar novas equações e aplicá-las na definição de vários parâmetros.

Na Figura 5.4. referenciam-se as condições de fronteira usadas no Caso 1.

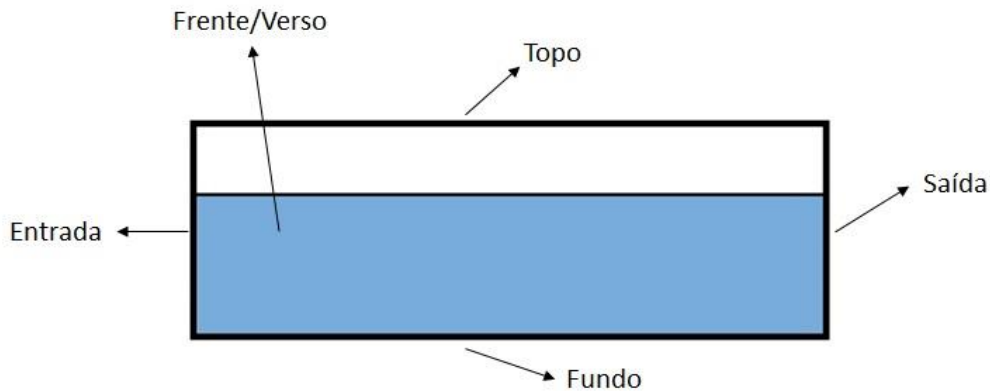


Figura 5.4. Condições de fronteira implementadas no caso 1.

#### 5.2.1.1. Criação de ondas no início do tanque de ondas numérico

Neste trabalho, duas formas distintas de criação de ondas são implementadas na condição de fronteira “Entrada”. Uma análise comparativa é feita de modo a perceber qual delas é o que melhor se adequa para o efeito.

**Situação 1A:** Método *Inlet Velocity*. Com a utilização deste método, o campo de velocidades e a elevação da superfície livre são definidas usando a Teoria de Stokes de Segunda Ordem. A elevação da superfície livre é definida com auxílio à expressão (2.1). As expressões (2.4) e (2.5) são usadas para definir as velocidades. As frações volúmicas do ar e da água são definidas segundo as expressões (5.1) e (5.2), respetivamente.

$$\text{Fração volúmica de ar (Caso 1A)} = \text{step} \left( \frac{z - \eta}{1 [m]} \right) \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Fração volúmica de água (Caso 1A)} \\ = 1 - \text{Fração volúmica de ar (Caso 1A)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

A função *step* avalia o resultado dentro de parênteses, atribuindo o valor 1 se o resultado for positivo, o valor 0 se o resultado for negativo e o valor 0.5 se o resultado for nulo.

**Situação 1B:** Teoria *Wavemaker*. Neste caso, implementa-se um gerador de ondas do tipo pistão. Para isso, define-se a entrada do tanque como uma parede impermeável com um movimento representado pela expressão (4.1).

O movimento dinâmico do pistão obriga ao movimento similar da malha computacional. Por forma a limitar o movimento da malha a uma pequena parte do domínio, criam-se dois subdomínios. O primeiro situa-se nos primeiros cinco metros, sendo o resto do domínio pertencente ao segundo.

No primeiro subdomínio, onde se encontra o pistão, implementa-se uma malha dinâmica ativando a opção *mesh deformation*. Isto permite que a malha se adapte ao movimento do pistão. Em adição, cria-se uma nova condição de fronteira relativa à fronteira superior subdomínio, denominada TopoPistão (ver Figura 5.5 (b)).

Na interseção dos dois subdomínios implementa-se uma condição de fronteira do tipo *Interface*. Assim, as malhas relativas a cada subdomínio conectam-se através de uma ligação GGI (*General Grid Interface*), permitindo a conservação do fluxo de massa e de quantidade de movimento.

As frações volúmicas do ar e da água são definidas pelas expressões (5.3) e (5.4), respetivamente.

$$\text{Fração volúmica de ar (Caso 1B)} = \text{step} \left( \frac{z - h}{1 [m]} \right) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Fração volúmica de água (Caso 1B)} \\ = 1 - \text{Fração volúmica de ar (Caso 1B)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

#### 5.2.1.2. Absorção e prevenção de reflexão das ondas no fim do tanque numérico

A absorção das ondas no fim do tanque numérico é essencial para a diminuição da ocorrência de reflexão e, conseqüentemente, prevenir que as ondas refletidas interfiram com as ondas a montante. Uma revisão da literatura indica os métodos mais usados para absorção das ondas:

- Controlar o tempo de simulação, de modo a garantir que a primeira onda gerada não atinja o fim do tanque. (Silva *et al.*, 2010; Havn, 2011; Finnegan & Goggins, 2012;)
- Amortecimento da onda através do aumento das dimensões da malha (Silva *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2016)

- Implementação de uma praia. (Silva *et al.*, 2010; Elangovan, 2011; Finnegan & Goggins, 2012; Saincher & Banerjee, 2015)
- Ajustar o comprimento do tanque, prevenindo que a reflexão perturbe a zona do foco de interesse. (Morgan *et al.*, 2010; Prasad *et al.*, 2017)
- Criação de uma zona de dissipação numérica<sup>3</sup> (*Damping zone*) (Koo & Kim, 2007; Westphalen *et al.*, 2012; Anbarsooz *et al.*, 2013)

São implementados neste trabalho alguns dos métodos supramencionados, na condição de fronteira “Saída”. Com efeito, são efetuadas duas alterações na geometria inicial, apresentada em 5.1.1: é implementada uma praia, de declive 1:5 e aumenta-se o comprimento do tanque para o dobro, 40 metros. Para além disso, o tempo de simulação é controlado de modo a prevenir que as ondas atinjam o fim do tanque.

#### 5.2.1.3. Restantes condições de fronteira

As restantes condições de fronteira são implementadas da seguinte forma para os Casos 1A e 1B:

**Topo** – Impõe-se uma fronteira do tipo *Opening*, permitindo o ar entrar e sair livremente do domínio. Dentro desta condição, escolhe-se a opção *Entrainment* com pressão relativa de 0 Pa. Esta opção prende-se com a sua utilidade em casos onde não se sabe a direção de movimento do fluido. (Ansys, 2013).

**Fundo** – Define-se a opção *No Slip Wall*, de modo a garantir uma parede impermeável no fundo do tanque e da praia.

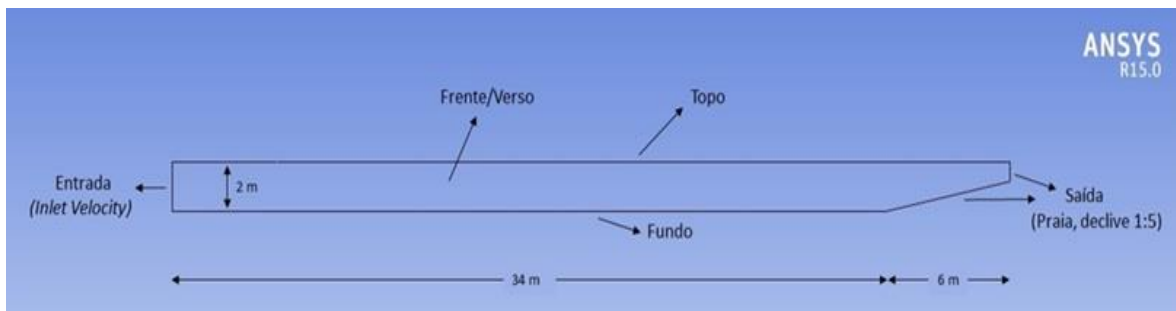
**Frente/Verso** – Uma condição *Symmetry* é implementada. No caso em que a geometria e o campo de escoamento é simétrico em relação ao eixo z, um plano de simetria é criado. Isto permite que o *solver* calcule a solução para metade desse domínio. É tida como uma fronteira que visa a redução do tempo computacional. (Havn, 2011)

**TopoPistão (Caso 1B)** – Define-se nesta fronteira a opção *No Slip Wall*. A escolha desta opção baseia-se no facto de uma fronteira do tipo *Opening* não permitir movimento dinâmico da malha.

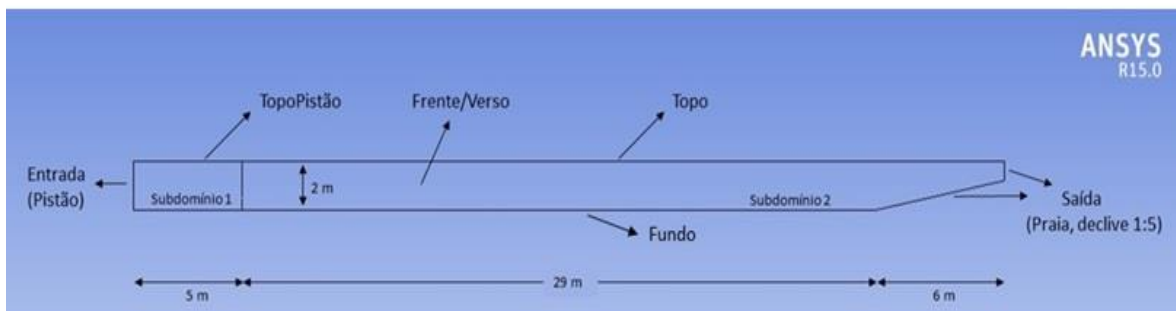
---

<sup>3</sup> Existem várias formas de se criar uma zona de dissipação numérica. Uma delas é, por exemplo, aumentar a viscosidade dinâmica na fração volúmica da água. A criação destas zonas encontra-se fora do âmbito deste trabalho.

Na Figura 5.5 está ilustrada a geometria final, bem como as condições de fronteira para cada caso.



(a)



(b)

**Figura 5.5.** Geometria final do tanque numérico e condições de fronteira relativo ao: (a) Caso 1A  
(b) Caso 1B.

De notar que a altura do tanque numérico foi aumentada para 2 metros, relativamente à dimensão inicial apresentada na Figura 5.1. Esta ação deve-se ao facto de prevenir que a circulação de ar permitida na fronteira superior interfira na elevação da superfície livre.

#### 5.2.1.4. Sumário das condições de fronteira

Um sumário das condições de fronteira adotadas para cada caso é apresentado nas Tabela 5.2 (Caso 1A) e Tabela 5.3 (Caso 1B).

<i>Fronteira</i>	<i>Tipo</i>	<i>Detalhes da Fronteira</i>	<i>Fração volúmica de ar</i>	<i>Fração volúmica de água</i>
<i>Entrada</i>	<i>Opening</i>	<i>Cartesian Velocity Components</i> $u = \text{expressão (2.4)}$ $v = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$ $w = \text{expressão (2.5)}$	Expressão 5.1	Expressão 5.2
<i>Saída</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	-	-
<i>Topo</i>	<i>Opening</i>	<i>Entrainment</i> Pressão Relativa 0 [Pa]	0	1
<i>Fundo</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	-	-
<i>Frente /Verso</i>	<i>Symmetry</i>	-	-	-

**Tabela 5.2.** Resumo das condições de fronteira para o Caso 1A.

<i>Fronteira</i>	<i>Tipo</i>	<i>Detalhes da Fronteira</i>	<i>Movimento da Malha</i>		<i>Fração volúmica de ar</i>	<i>Fração volúmica de água</i>
<i>Entrada</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	<i>Specified Displacement (Cartesian Components)</i>	$x =$ expressão (4.1)	Expressão (5.3)	Expressão (5.4)
				$y =$ $0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$		
<i>Saída</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	<i>Unspecified</i>	$z =$ $0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$	-	-
				-	-	-
<i>Topo</i>	<i>Opening</i>	<i>Entrainment</i>	<i>Stationary</i>	Pressão Relativa $0 \text{ [Pa]}$	0	1
<i>TopoPistão</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	<i>Unspecified</i>	-	-	-
<i>Fundo</i>	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	<i>Unspecified</i>	-	-	-
<i>Frente /Verso</i>	<i>Symmetry</i>	-	<i>Unspecified</i>	-	-	-

Tabela 5.3. Resumo das condições de fronteira para o Caso 1B.

### 5.2.1. Malha computacional

A criação da malha de cálculo foi efetuada através da ferramenta ANSYS® Meshing. Numa primeira fase, foi implementado o método *sweep* para a criação de uma malha estruturada, a qual consiste em dividir o domínio em elementos quadriláteros de dimensões especificadas. Devido à superfície livre da onda ser sensível ao tamanho da malha, cria-se uma zona mais refinada na redondeza do SWL. Isto é feito através da opção *edge sizing*, permitindo o aumento de divisões de cada elemento na zona especificada. O aspeto das malhas computacionais é apresentado na Figura 5.6 e na Figura 5.7.

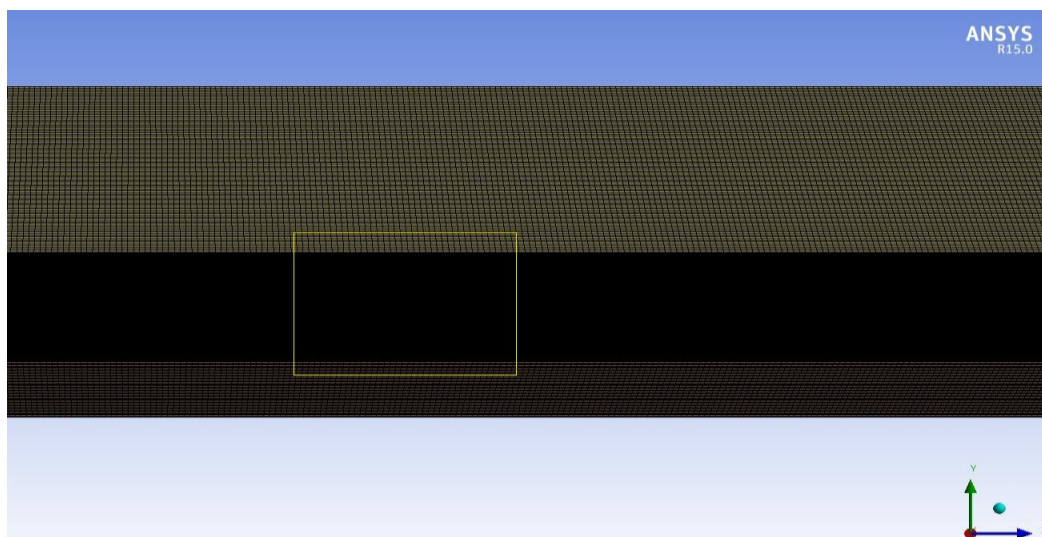


Figura 5.6. Aspeto das malhas computacionais geradas.

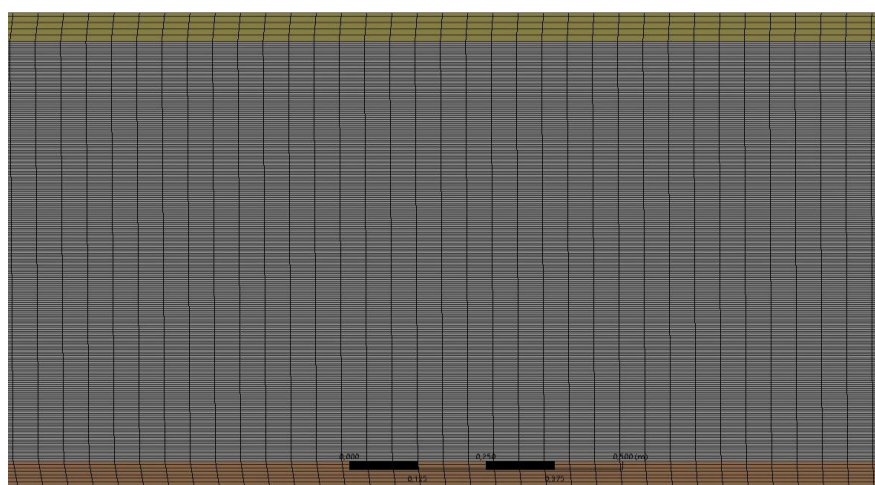


Figura 5.7. Malha computacional na zona do SWL.



Todas as malhas geradas obedecem à estrutura apresentada na Figura 5.6 e Figura 5.7, variando apenas nas dimensões.

Havn (2011) indica um conjunto de parâmetros aos quais a malha computacional deve respeitar na zona da superfície livre. Estes estão esquematizados na Tabela 5.4.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Elementos por comprimento de onda</i>	$\frac{L}{\Delta x} \geq 100$
<i>Elementos por amplitude de onda</i>	$\frac{\zeta_A}{\Delta z} > 10$
<i>Aspect ratio</i>	$\frac{\Delta x}{\Delta z} < 10$

**Tabela 5.4.** Parâmetros de malha computacional para a zona da superfície livre.

Foram criadas três malhas com diferentes dimensões, de forma a ser estudada a sua influência nos resultados. As malhas 2) e 3) estão dentro dos parâmetros apresentados por Havn (2011). Pelo contrário, a malha 1) não respeita esses critérios.

Deste modo, a malha 1) representa a malha mais grosseira, enquanto que a malha 3) representa a mais refinada. Os refinamentos da malha computacional foram feitos tendo em conta o estudo de Silva *et al.* (2010), que refere que o refinamento da malha deve ser feito ao longo dos dois eixos, em simultâneo, de modo a se obterem melhores resultados. Nesse sentido, apresentam-se as dimensões de cada malha computacional na Tabela 5.5.

<i>Malha</i>	$\Delta x$ [m]	$\Delta z$ [m]	<i>Número de Elementos</i>
1)	0.08	0.007	160161
2)	0.045	0.0047	315560
3)	0.035	0.004	463980

**Tabela 5.5.** Dimensões de cada malha computacional.

A malha 2) é implementada no Caso 1A e Caso 1B para as primeiras simulações. Testes de influência de malha são posteriormente realizadas com as restantes malhas.

### 5.2.2. Condições iniciais

A definição das condições para  $t = 0$  envolve os seguintes parâmetros: Campo de velocidades, campo de pressões e frações volúmicas de cada fluido.

A pressão estática neste instante de tempo consiste na pressão hidrostática, e é calculada através das expressões (5.5) e (5.6). De notar que em ambas as expressões se adiciona a multiplicação da fração volúmica da água, garantindo assim que apenas se atribui a pressão estática à água.  $\rho_{\text{água}}$  representa a massa volúmica da água.

$$p(1A) = \rho_{\text{água}} \times g \times \text{Fracção volúmica de água (1A)} \times (\eta - z) \quad (5.5)$$

$$p(1B) = \rho_{\text{água}} \times g \times \text{Fracção volúmica de água (1B)} \times (d - z) \quad (5.6)$$

São apresentadas as condições iniciais para o Caso 1A e Caso 1B na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7, respetivamente.

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
<i>Campo de velocidades</i>	$u = \text{expressão (2.4)}$ $v = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$ $w = \text{expressão (2.5)}$
<i>Pressão estática</i>	Expressão (5.5)
<i>Fração volúmica de ar</i>	Expressão (5.1)
<i>Fração volúmica de água</i>	Expressão (5.2)

**Tabela 5.6.** Condições iniciais para o Caso 1A.

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
<i>Campo de velocidades</i>	$u = 0$ [m s <sup>-1</sup> ] $v = 0$ [m s <sup>-1</sup> ] $w = 0$ [m s <sup>-1</sup> ]
<i>Pressão estática</i>	Expressão (5.6)
<i>Fração volúmica de ar</i>	Expressão (5.3)
<i>Fração volúmica de água</i>	Expressão (5.4)

Tabela 5.7. Condições iniciais para o Caso 1B.

### 5.2.3. Parâmetros de simulação

Os restantes parâmetros de simulação estão esquematizados na Tabela 5.8, sendo idênticos nos Casos 1A e Caso 1B.

<i>Propriedade</i>	<i>Valor/Método</i>
<i>Massa volúmica de ar/água</i> [kg m <sup>-3</sup> ]	1.2/1000
<i>Regime</i>	Transiente
<i>Tempo total de simulação</i> [s]	30
<i>Passo de tempo</i> [s]	0.02s (ver 5.2.4.1)
<i>Transferência interfase</i>	<i>Free surface</i>
<i>Modelo de turbulência</i>	Nenhum (Laminar)
<i>Esquema de discretização espacial</i>	<i>High Resolution</i>
<i>Esquema de discretização temporal</i>	<i>Second Order Backward Euler</i>
<i>Resíduo</i>	1E - 4

Tabela 5.8. Parâmetros de simulação.

No que diz respeito ao modelo de turbulência, vários autores estudaram a sua influência na geração e propagação de ondas regulares. Finnegan & Goggins (2012) e Lal & Elangovan (2008) compararam vários modelos de turbulência, tais como os modelos  $k - \varepsilon$  e SST, concluindo que os resultados não variam quando comparados com o regime laminar.

O esquema de discretização espacial *High Resolution* e temporal *Second Order Backward Euler* são os esquemas que menor índice de erro apresentam, segundo o estudo realizado por Silva *et al.* (2010).

Por fim, uma revisão da literatura indica que o valor do resíduo deve ser suficientemente reduzido de modo a permitir uma boa convergência da solução. Foi provado em Havn (2011) e em Maguire (2011) que o valor escolhido neste trabalho é suficiente.

#### **5.2.4. Otimização do tanque numérico (Caso 1B)**

Estudos de influência de alguns parâmetros são realizados e analisados, de maneira a otimizar o tanque numérico. Dentro dos parâmetros que serão testados, encontram-se o passo de tempo, comprimento do tanque numérico e o declive da praia. Esta análise é feita apenas para o Caso 1B.

##### **5.2.4.1. Passo de tempo**

A definição do passo de tempo depende do período da onda e é um parâmetro que adquire enorme influência na qualidade da solução. Passos de tempo grosseiros provocam amortecimento na altura da superfície livre. No entanto, passos de tempo excessivamente reduzidos aumentam, de forma significativa, o tempo de cálculo da solução. Desta forma, a escolha do passo de tempo tem que ser corretamente avaliada. O número de Courant é assim controlado, de modo a não atingir valores superiores a 1.

Vários autores recomendam valores de referência para o passo de tempo. Finnegan & Goggins (2012) concluíram que o valor ótimo é atingido dividindo o período da onda em cinquenta intervalos ( $T/50$ ). Este valor está de acordo com o proposto por Ning & Teng (2007), que referem um valor máximo de  $T/40$ . No entanto, autores como Silva *et al.* (2010) e Havn (2011) recomendam valores de passo de tempo inferiores ou iguais à relação  $T/100$ .

Diferentes passos de tempo são aqui testados: 0.02s ( $\approx T/100$ ), 0.01s ( $\approx T/200$ ) e 0.005s ( $\approx T/400$ ).

##### **5.2.4.2. Comprimento do tanque numérico**

Como mencionado em 5.2.1.2, o aumento do comprimento do tanque é utilizado como forma de reduzir a ação das ondas refletidas nas ondas localizadas na zona de estudo.

Uma vez mais, a conjugação entre o comprimento ideal e o esforço computacional é importante, visto que a escolha de um comprimento excessivamente grande aumenta o tempo de cálculo da solução. Morgan *et al.* (2010) recomendam estender o comprimento do tanque para o dobro da região de interesse de estudo. A influência do comprimento do tanque numérico é alvo de estudo neste trabalho.

#### 5.2.4.3. Declive da praia

A implementação de uma praia no fim do domínio é uma forma de promover a absorção das ondas incidentes e reduzir a reflexão das mesmas, conforme descrito em 5.2.1.2. Para tal, a definição do seu declive é um parâmetro importante. Este assunto foi alvo de discussão em análises realizadas por vários autores.

Maguire (2011) recomenda, no seu estudo, valores de declives superiores a 1:10. Finnegan & Goggins (2012) estudaram declives entre 1:3 e 1:6, concluindo que 1:5 é o valor ideal, contradizendo os valores obtidos por Lal & Elangovan (2008) e Elangovan (2011). Nestes estudos, um declive de 1:3 mostrou ser capaz de absorver melhor as ondas.

Uma análise de influência de declives entre 1:3 e 1:6 é realizada.

### 5.3. Caso 2: Demonstração de quebra de ondas regulares numa praia

Pretende-se, neste caso, provar que o ANSYS® CFX® é capaz de simular a rebentação de vários tipos de ondas. Três tipos de quebra de ondas são modelados, conforme apresentado na Tabela 5.9.

<i>Caso</i>	<i>Tipo de quebra</i>	<i>Surf similarity <math>\xi_0</math></i>
<b>2A</b>	<i>Spilling</i>	0.15
<b>2B</b>	<i>Plunging</i>	0.91
<b>2C</b>	<i>Surging</i>	3.64

**Tabela 5.9.** Parâmetro *surf similarity*  $\xi_0$  relativo a cada quebra de onda simulada.

Em todos os casos as ondas são geradas pela Teoria *Wavemaker* do tipo pistão. A geometria modelada, ao contrário dos casos 1A e 1B, é mantida inalterada relativamente

ao apresentado em 5.1.2, sendo as condições de fronteira as mesmas que foram apresentadas na Tabela 5.3.

Do mesmo modo, a malha computacional usada nestes casos tem as mesmas características da Malha 2), apresentadas em 5.2.1, mudando apenas o número de elementos em consequência das diferentes geometrias. Na Tabela 5.10 estão indicados o número de elementos presentes em cada malha computacional, para cada caso de estudo.

<i>Caso</i>	<i>Número de elementos</i>
<b>2A</b>	168910
<b>2B</b>	175525
<b>2C</b>	155235

**Tabela 5.10.** Número de elementos da malha computacional para os casos 2A, 2B e 2C.

As condições iniciais são do mesmo modo idênticas ao apresentado na Tabela 5.7. Tal acontece com os parâmetros de simulação ilustrados na Tabela 5.8, com algumas exceções. O tempo total de simulação é estendido para 45 segundos, com um passo de tempo de 0.005 segundos.

## 5.4. Tempo de cálculo computacional

Todas as simulações foram realizadas através de um computador com um processador Intel® core i7-5930k, de 3.5 GHz e uma memória RAM de 16 GB. Os tempos de cálculo computacional variam nos diferentes casos definidos, conforme apresentado na Tabela 5.11.

---

<i>Caso</i>	<i>Tempo de cálculo computacional</i>
<i>1A</i>	<i>4 dias, 21 horas e 1 minuto</i>
<i>1B (otimizado)</i>	<i>4 dias, 20 horas e 45 minutos</i>
<i>2A</i>	<i>5 dias, 12 horas e 17 minutos</i>
<i>2B</i>	<i>5 dias, 17 horas e 39 minutos</i>
<i>2C</i>	<i>3 dias, 20 horas e 43 minutos</i>

**Tabela 5.11.** Tempo de cálculo computacional nos diversos casos de estudo.





## 6. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 6.1. Caso 1: Geração e propagação de ondas regulares num tanque numérico com fundo plano

A validação dos resultados é feita através da comparação da elevação da superfície livre obtida com o perfil teórico dado pela Teoria de Stokes de Segunda Ordem (expressão (2.1)). Os resultados são analisados nos primeiros 20 metros, sendo esta a região de interesse de estudo.

#### 6.1.1. Caso 1A: Método *Inlet Velocity*

O perfil da superfície livre referente ao instante  $t = 30\text{s}$  é apresentado na Figura 6.1:

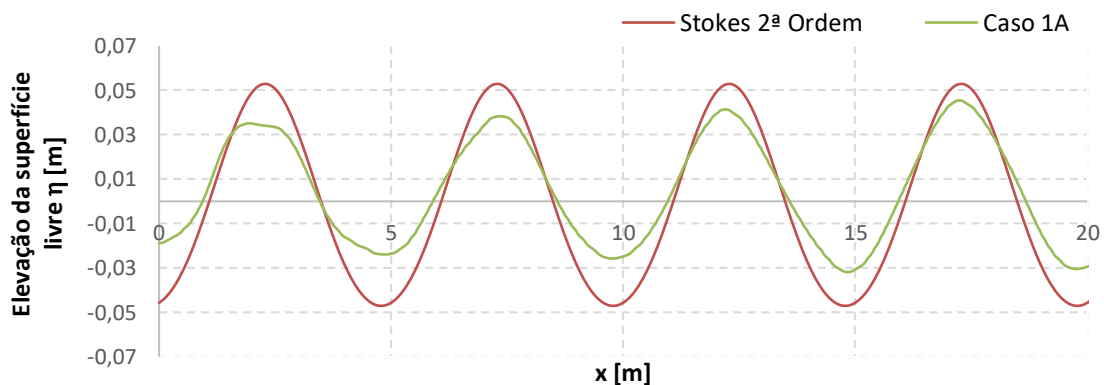
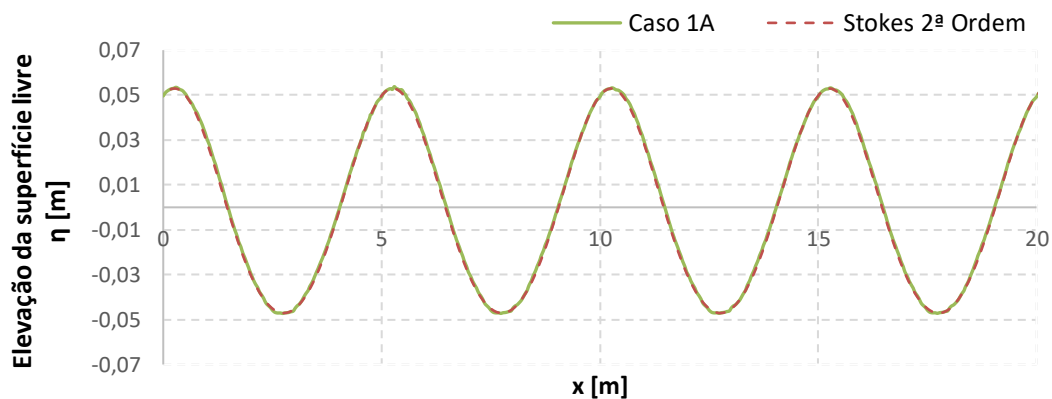


Figura 6.1. Perfil da superfície livre no caso 1A, para o instante  $t = 30\text{s}$ .

Como se pode observar, regista-se um grande amortecimento na altura da superfície livre em relação à elevação teórica. Para a compreensão deste resultado, apresenta-se a Figura 6.2, que ilustra o perfil da superfície livre no instante  $t = 0\text{s}$ .

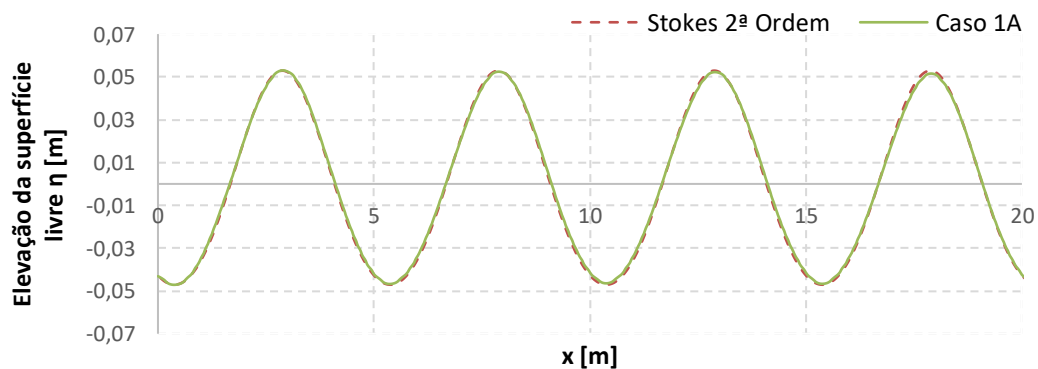


**Figura 6.2.** Elevação da superfície no Caso 1A, no instante  $t = 0$ s.

Através da implementação deste método, a elevação da superfície livre é definida para todo o domínio no instante inicial, de acordo com a teoria de Stokes de Segunda Ordem. Isto faz com que a última onda esteja em contato com a praia desde o início de simulação, originando a reflexão imediata da onda e a perturbação das ondas a montante. Desta forma, a existência da praia no fim do domínio não é eficiente na prevenção da reflexão das ondas, e o controlo do tempo de simulação para prevenir que as ondas atinjam o fim do domínio também não é possível.

Deste modo, o aumento do comprimento do domínio pode ser uma solução, mas dadas as condições teria que ser aumentado consideravelmente, não sendo uma opção eficaz em termos de tempo de cálculo computacional.

Outra opção resume-se à diminuição de tempo de simulação. No entanto, não é viável para casos em que sejam necessárias análises mais demoradas. A Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5, e apresentam a elevação da superfície livre para os instantes  $t = 5$ , 10 e 15 segundos, respetivamente:



**Figura 6.3.** Elevação da superfície no Caso 1A, no instante  $t = 5$ s.

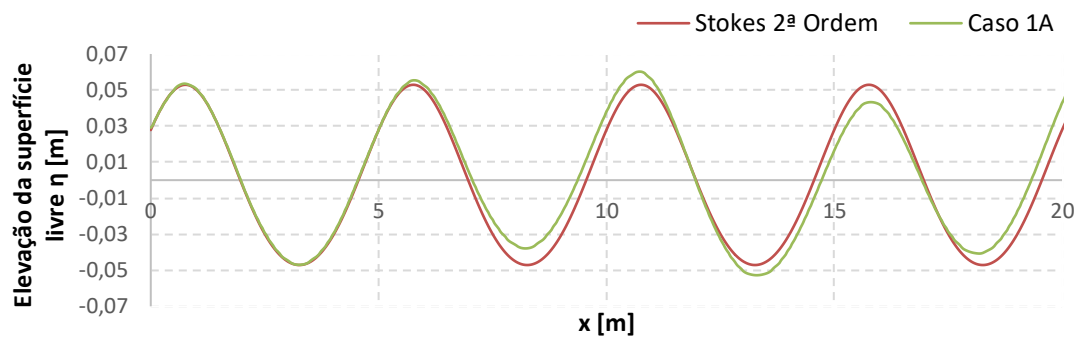


Figura 6.4. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante  $t = 10s$

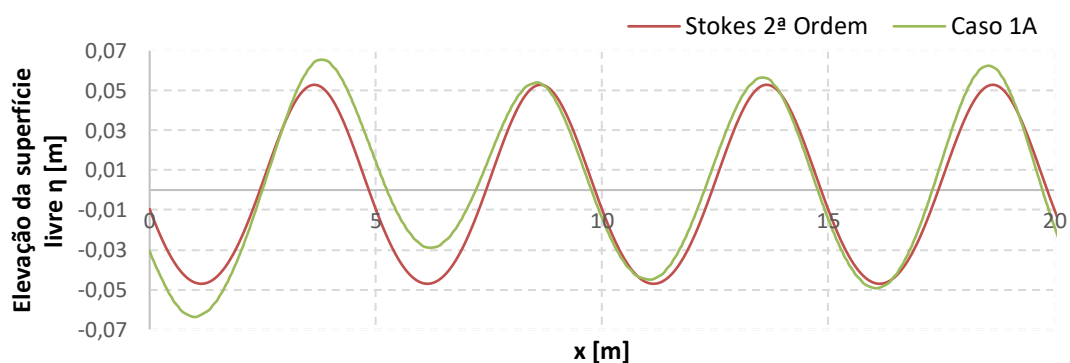


Figura 6.5. Elevação da superfície no Caso 1A, no instante  $t = 15s$

Como se observa, a reflexão das ondas faz-se sentir a partir do instante  $t = 5s$ , sendo que depois desse instante os resultados apresentam uma diferença relevante em relação à teoria.

### 6.1.2. Caso 1B: Teoria *Wavemaker* (Pistão)

Ao contrário do que acontece no método *Inlet Velocity*, com a implementação de um pistão o controlo do tempo de simulação pode ser feito de modo a diminuir a reflexão das ondas. A Figura 6.6 mostra a elevação da superfície livre no instante  $t = 20s$ , correspondente ao instante em que a primeira onda gerada está prestes a atingir a praia.

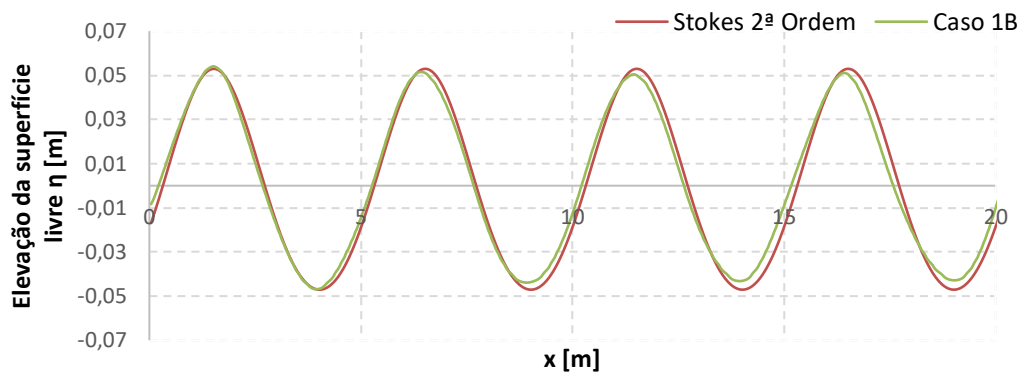


Figura 6.6. Elevação da superfície livre para o Caso 1B, no instante  $t = 20s$

Como se pode observar, após uma análise à Figura 6.6, os resultados obtidos por este método mostram uma boa concordância face à curva teórica. Nota-se que as ondas estão em fase com a teoria, registando-se, porém, uma pequena diferença nas alturas da superfície livre. Várias causas podem estar na origem desta discrepância: um passo de tempo elevado, uma malha demasiado grosseira, um comprimento do tanque demasiado reduzido ou um declive da praia demasiado íngreme. Uma análise será feita em 6.3 de modo a se otimizar a solução.

#### 6.1.2.1. Geração de ondas no início do tanque

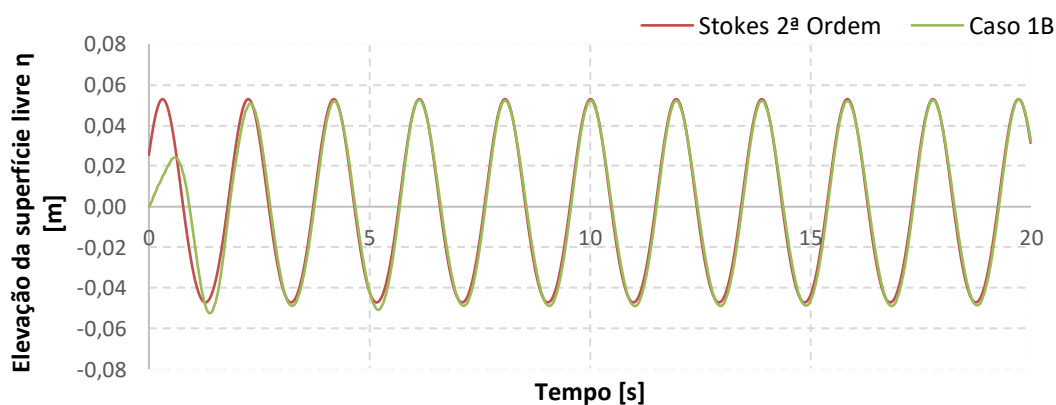


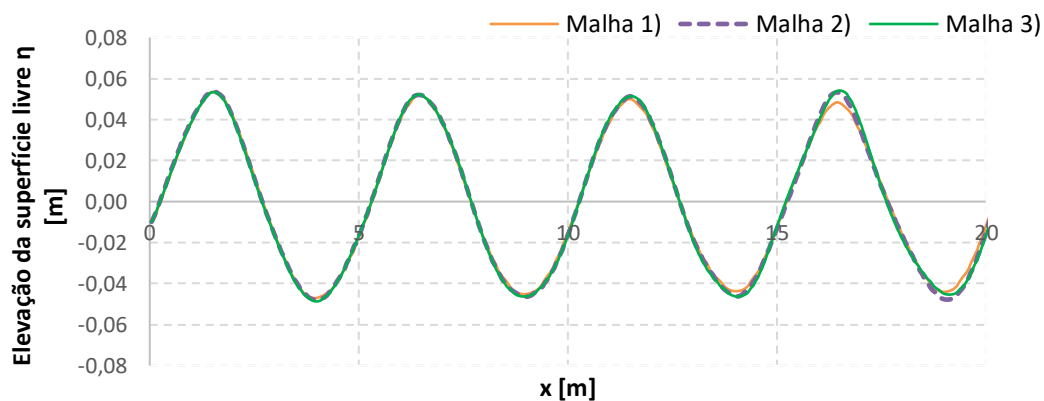
Figura 6.7. Elevação da superfície livre no início do tanque, no Caso 1B.

Com o auxílio da Figura 6.7, observa-se que o pistão cria ondas que coincidem com o previsto teoricamente. As primeiras três ondas geradas sofrem de uma ligeira discordância com a teoria, fruto do próprio mecanismo de iniciação do pistão, sendo que as

ondas seguintes são produzidas corretamente. Fica assim demonstrado que o método *Wavemaker* do tipo pistão é capaz de gerar ondas corretamente.

## 6.2. Teste de influência da malha (Caso 1B)

Como mencionado em 5.2.1, a malha 2) foi escolhida para as simulações do Caso 1A e Caso 1B. Um teste de influência da malha é agora feito para o caso 1B, visto que foi o método que apresentou melhores resultados. A Figura 6.8 apresenta os resultados obtidos nas simulações feitas com a Malha 1) e Malha 3), sendo feita uma análise comparativa com a Malha 2).



**Figura 6.8.** Elevação da superfície livre obtida com três malhas computacionais diferentes, no instante  $t = 20s$ .

Na Figura 6.8 é visível que o aumento das dimensões da malha 1) resulta em amortecimento da altura da superfície livre, fornecendo resultados menos precisos. Por outro lado, observa-se que o refinamento da malha 3) não se reflete em melhoria significativa da solução, tendo em conta a malha 2). Deste modo, não se justifica a escolha da malha 3) no que diz respeito ao aumento de tempo de cálculo computacional.

Os resultados obtidos através desta análise vão de encontro aos valores recomendados por Havn (2011) (ver 5.2.1).

### 6.3. Otimização do tanque numérico (Caso 1B)

Tal como mencionado em 6.1.2, a diferença nas alturas das ondas registada na Figura 6.6 pode ter várias causas. Com o intuito de otimizar a solução, testes de influência foram feitos aos seguintes parâmetros: Passo de tempo, Comprimento do tanque e declive da praia.

#### 6.3.1. Passo de tempo

Uma análise foi realizada tendo em conta a diminuição do passo de tempo escolhido em 6.1.2. São agora efetuadas simulações com passos de tempo de 0.01s ( $\approx T/200$ ) e 0.005s ( $\approx T/400$ ) e comparadas com os resultados obtidos anteriormente com um passo de tempo de 0.02s ( $\approx T/100$ ). Os resultados estão apresentados na Figura 6.9.

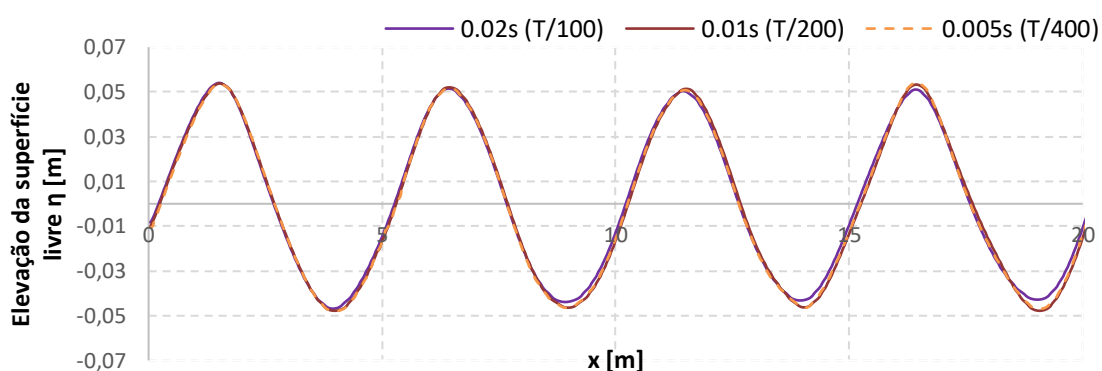


Figura 6.9. Elevação da superfície livre para diferentes passos de tempo, no instante  $t = 20$ s.

Como se pode observar, a elevação da superfície livre na cava e na crista da onda são coincidentes nos passos de tempo mais reduzidos.

A diferença registada entre o passo de tempo de 0.01s e 0.005s não é significativa, não se justificando a escolha deste último tendo em conta o tempo de cálculo.

O número de Courant registado para o passo de tempo de 0.02s é de 0.67. Para os passos de tempo de 0.01s e 0.005s o número de Courant registado é de 0.47 e 0.15, respetivamente.

Assim, estes resultados vão de encontro aos propostos por Havn (2011) e Silva *et al.* (2010), visto que se provou que passos de tempo inferiores a  $T/100$  fornecem boas aproximações. No entanto, os resultados obtidos não corroboram os de Finnegan & Goggins

(2012) e Ning & Teng (2007), visto que passos de tempo na ordem de  $T/50$  projetam-se como bastante elevados, conforme apresentado na Figura 6.10. A escolha deste passo de tempo apresenta um número de Courant de 3.07, significativamente superior ao valor de referência.

Deste estudo resulta que o passo de tempo ótimo equivale à relação  $T/200$ .

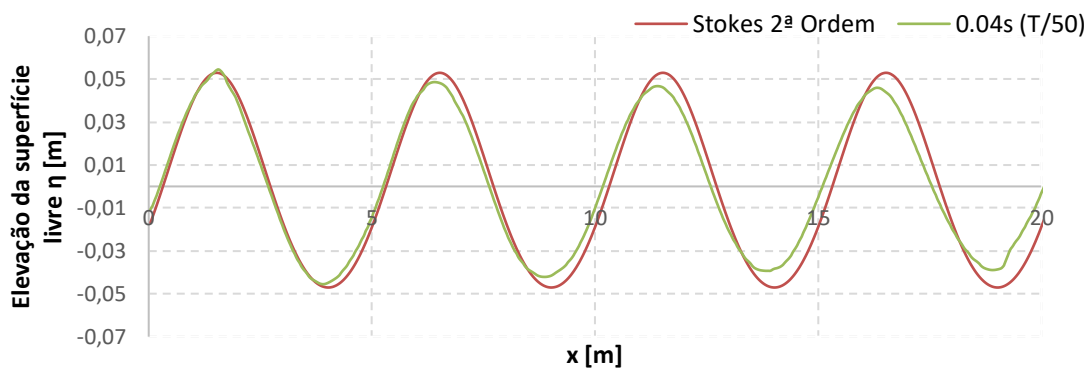


Figura 6.10. Elevação da superfície livre para um passo de tempo de 0.04s, no instante  $t = 20s$ .

### 6.3.2. Comprimento do tanque

Dois testes foram feitos tendo em conta a diminuição e o aumento do comprimento do tanque numérico usado em 6.1.2. Foi feito o estudo para um comprimento de 30 metros e 50 metros. Os resultados estão expostos na Figura 6.11.

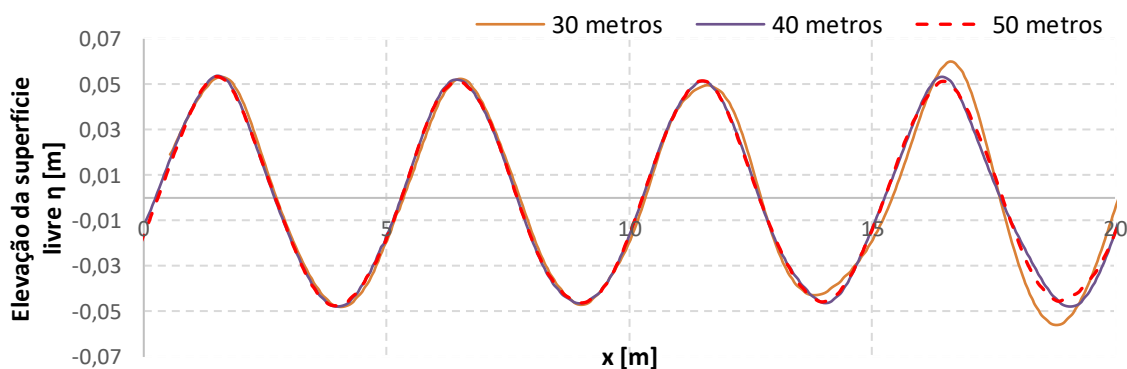


Figura 6.11. Elevação da superfície livre para vários comprimentos do tanque numérico, no instante  $t = 20s$ .

É visível pela Figura 6.11 que reduzir o comprimento do tanque para 30 metros faz com que alguma reflexão prejudique a elevação da superfície livre perto do fim da zona

de interesse. Por outro lado, aumentar para 50 metros provou ser uma medida que não melhora os resultados. Deste modo, esta análise vai de encontro o valor indicado por Morgan *et al.* (2010). Aumentar o comprimento do tanque para o dobro mostra ser suficiente para impedir que a reflexão causada no fim do tanque atinja a zona de estudo referente aos primeiros 20 metros.

### 6.3.3. Declive da praia

Simulações com praias de declives entre 1:3 e 1:6 foram realizadas de modo a investigar qual deles origina menor reflexão das ondas. Como se pode observar na Figura 6.12, os resultados dos diferentes declives não diferem em praticamente todo o domínio, à exceção da última cava de onda em  $x \approx 19\text{m}$ . Neste ponto, regista-se uma ligeira diferença na altura da cava da onda no caso do declive 1:3.

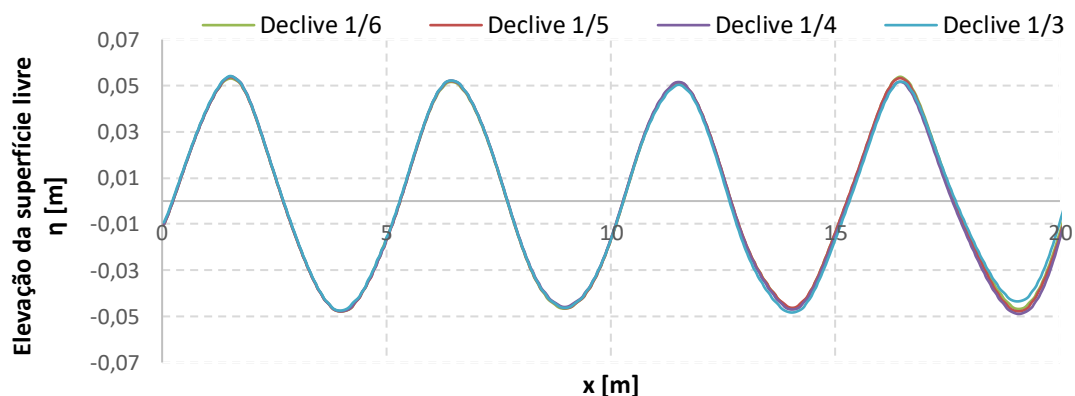


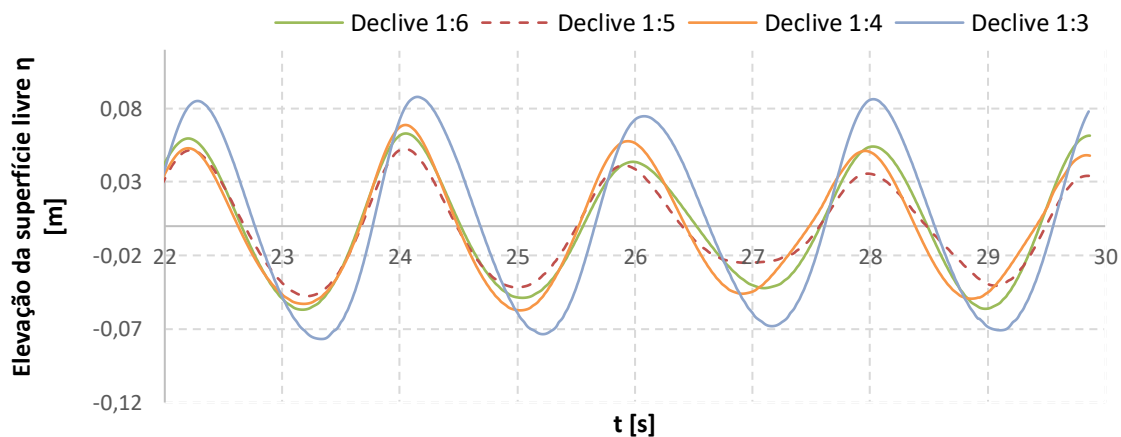
Figura 6.12. Elevação da superfície livre obtida para vários declives da praia, no instante  $t = 20\text{s}$ .

Esta homogeneidade de resultados registada deve-se ao facto de, em todas as simulações, se controlar o tempo de simulação de maneira a que as ondas não atinjam o fim do domínio. Deste modo, tendo também em conta o aumento do comprimento do tanque numérico, a reflexão das ondas não difere de forma significativa consoante o declive escolhido.

Não obstante, um estudo é efetuado sobre qual dos declives origina uma melhor absorção de ondas e, conseqüentemente, uma menor reflexão das mesmas em simulações mais longas. Para isso, à semelhança das análises feitas por Elangovan (2011), Finnegan &



Goggins (2012) e Lal & Elangovan (2008), o tempo de simulação é estendido para 30s e é estudada a altura das ondas num ponto da praia comum aos quatro declives. A zona de estudo é, então, definida em  $x = 32\text{m}$ , e são analisadas ondas incidentes entre os 22s e os 30s.



**Figura 6.13.** Elevação da superfície livre em  $x = 32\text{m}$ , para vários declives da praia.

Como se pode observar na Figura 6.13, a altura das ondas é menor para um declive de 1:5, provando assim que é o que melhor absorve as ondas. Desta forma, para simulações que sejam necessários maiores tempos de simulação, um declive de 1:5 deve ser o escolhido de maneira a reduzir o efeito das ondas refletidas.

Os resultados vão de encontro aos obtidos por Finnegan & Goggins (2012), não concordando, no entanto, com o declive ideal de 1:3 apresentado por Elangovan (2011) e Lal & Elangovan (2008).

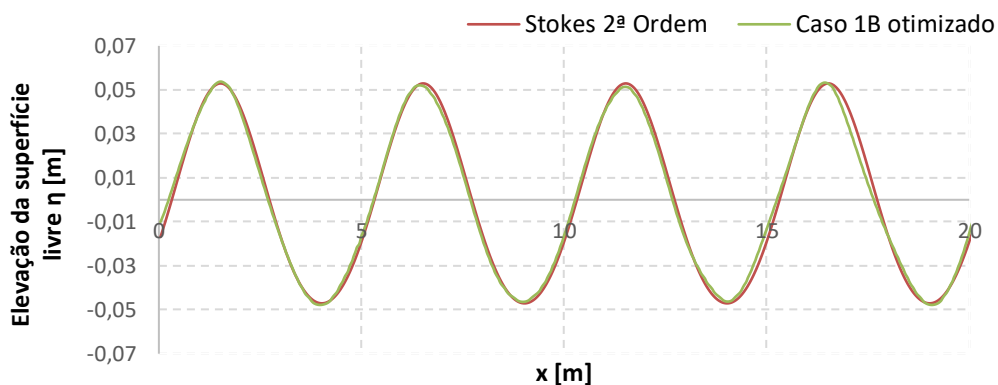
#### 6.3.4. Tanque numérico otimizado

Apresenta-se, na Figura 6.14, os resultados relativos ao tanque de ondas numérico otimizado, tendo em conta os parâmetros testados. Conclui-se que simulações usando a malha 2), com o um passo de tempo de 0.01s, comprimento do tanque de 40 metros e um declive da praia de 1:5 são os parâmetros que fornecem uma solução mais próxima da ideal. Como é visível na Figura 6.14, os resultados mostram uma excelente concordância com os formulados teoricamente.

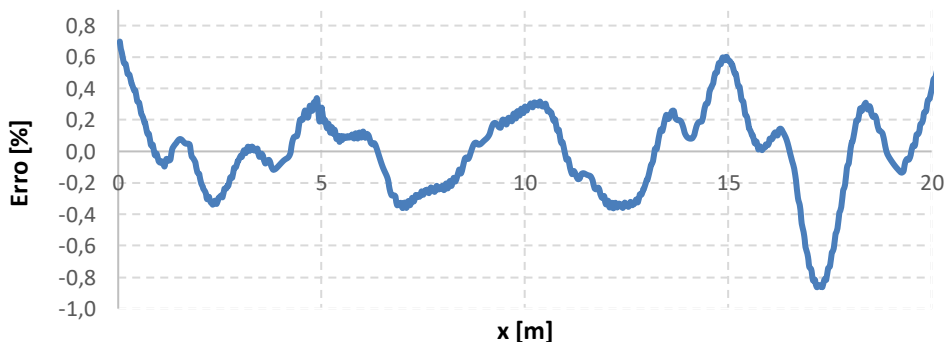
Na Figura 6.15 regista-se a percentagem de erro entre as alturas da elevação da superfície livre obtidos numericamente e através da teoria. Pela sua visualização, salienta-se

que o erro ao longo do domínio é bastante reduzido, sendo o seu máximo cerca de 0.9%, aproximadamente em  $x = 17\text{m}$ .

A obtenção destes resultados prova que o ANSYS® CFX® é capaz de modelar corretamente a geração e propagação de ondas progressivas regulares em profundidades intermédias.



**Figura 6.14.** Elevação da superfície livre relativas ao tanque de ondas numérico otimizado, no instante  $t = 20\text{s}$ .



**Figura 6.15.** Percentagem de erro entre as alturas de ondas numéricas e teóricas no instante  $t = 20\text{s}$ , relativo ao Caso 1B.

#### 6.3.4.1. Velocidade superficial da água e do ar

A Figura 6.16 ilustra a velocidade superficial horizontal e vertical da água. De notar que a velocidade vertical  $w$  é máxima na altura do SWL e nula na crista e cava da onda. Por outro lado, a velocidade horizontal  $u$  é nula ao nível do SWL, sendo máxima na

crista e cava da onda. O perfil de velocidades está de acordo com o esperado teoricamente, conforme apresentado na Figura 2.2.

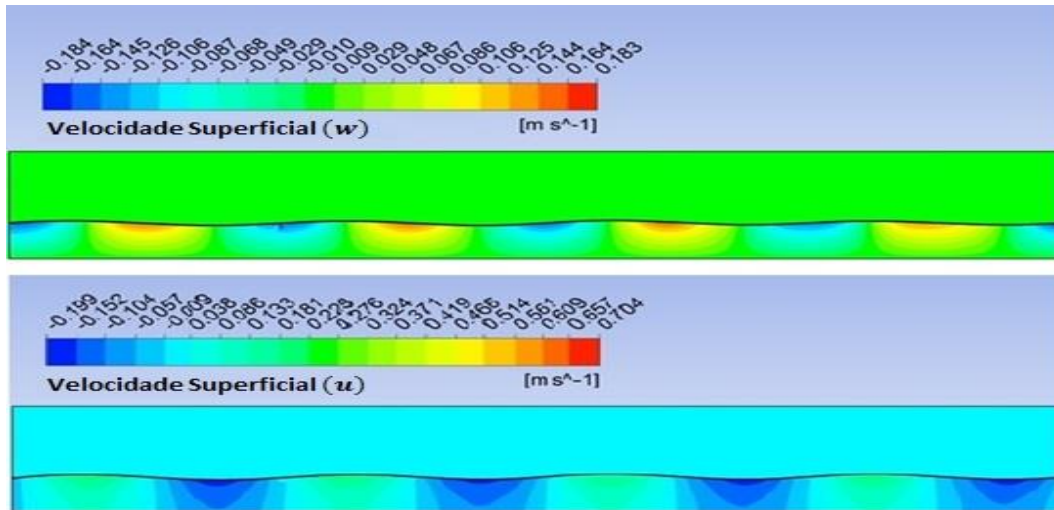


Figura 6.16. Velocidade superficial vertical  $w$  e horizontal  $u$  da água referente ao Caso 1B, para o instante  $t = 20$ s.

#### 6.4. Resultados obtidos por Lambert (2012)

Nesta secção realiza-se uma breve comparação com os resultados obtidos por Lambert (2012). O seu estudo envolveu a modelação do mesmo caso através do programa OpenFOAM, tendo concluído que o programa modela com sucesso ondas progressivas regulares. Na Figura 6.17 são apresentados os resultados obtidos:

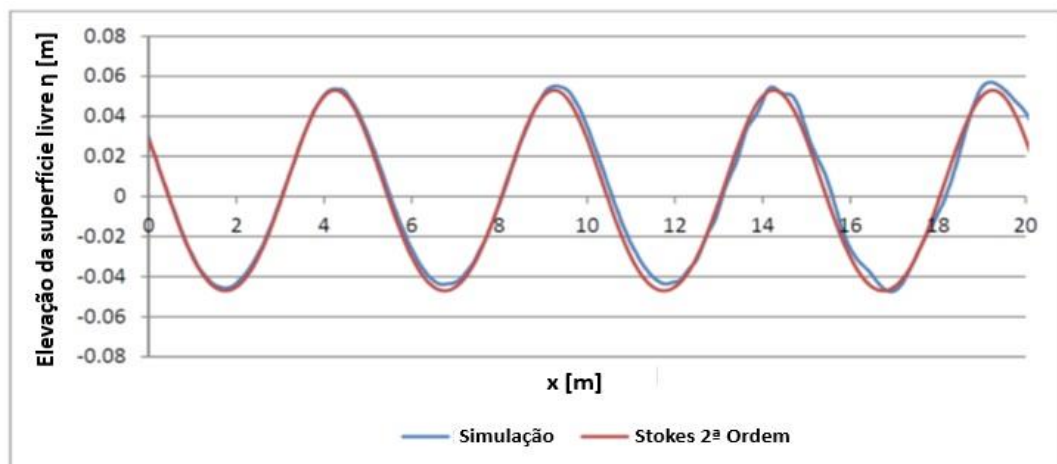


Figura 6.17. Elevação da superfície livre obtida por Lambert (2012). Adaptado de Lambert (2012)

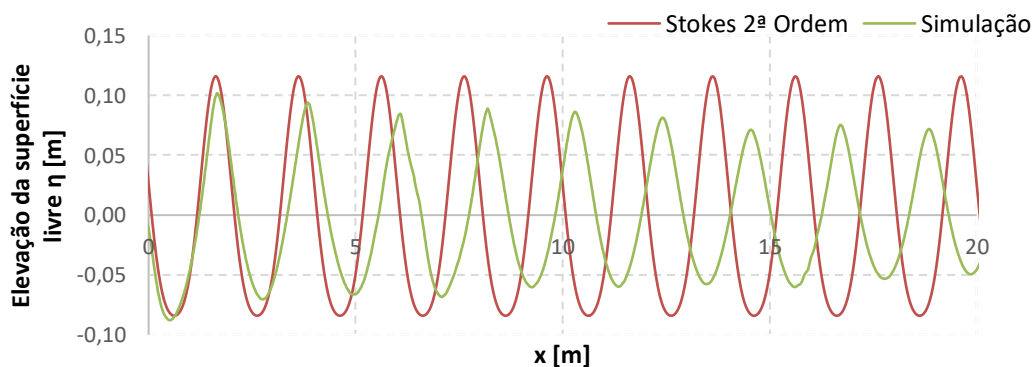
Pela visualização da Figura 6.17 percebe-se que o OpenFOAM apresenta limitações na descrição da superfície livre. Observa-se uma diferença de alturas em comparação com a teoria, bem como um desfasamento em relação ao comprimento de onda teórico. Em adição, as curvas não apresentam um comportamento harmónico perfeito, a partir de  $x = 12m$ , aproximadamente.

Comparando os resultados obtidos por Lambert (2012) com os relativos aos do tanque numérico otimizado, realça-se que o ANSYS® CFX® se adequa melhor para a modelação de ondas progressivas regulares.

#### 6.4.1. Limitações no uso do OpenFOAM

No seu estudo, Lambert (2012) notou outras limitações no uso do OpenFOAM. O mais relevante foi o facto de as ondas amortizarem e quebrarem em águas profundas, abaixo do valor crítico de declividade (ver 2.1.4). Tal foi registado através da modelação de ondas com uma altura  $H = 0.2m$  e um comprimento  $L = 2m$ , numa profundidade  $h = 1m$ . Assim, as ondas apresentam uma declividade de 0.1, estando próximas do valor limite 0.142.

Neste âmbito, realiza-se o mesmo teste de modo a se perceber se o ANSYS® CFX® partilha da mesma limitação. Na Figura 6.18 apresentam-se os resultados obtidos.



**Figura 6.18.** Elevação da superfície livre de ondas com uma declividade de 0.1 ( $H = 0.2m$ ;  $L = 2m$ ;  $h = 1m$ ).

Pela visualização da Figura 6.18 percebe-se que, ao contrário do registado no programa OpenFOAM, as ondas modeladas em ANSYS® CFX® não apresentam quebra em valores próximos do valor crítico. No entanto, as ondas modeladas nesta situação apresentam um elevado amortecimento, bem como um grande desfasamento em relação à curva teórica.

---

Estes são fenómenos que se tornam evidentes a partir de declividades de 0.05, fazendo com que o ANSYS® CFX® não seja uma boa escolha para uma correta representação de ondas acima desse valor.

## 6.5. Caso 2

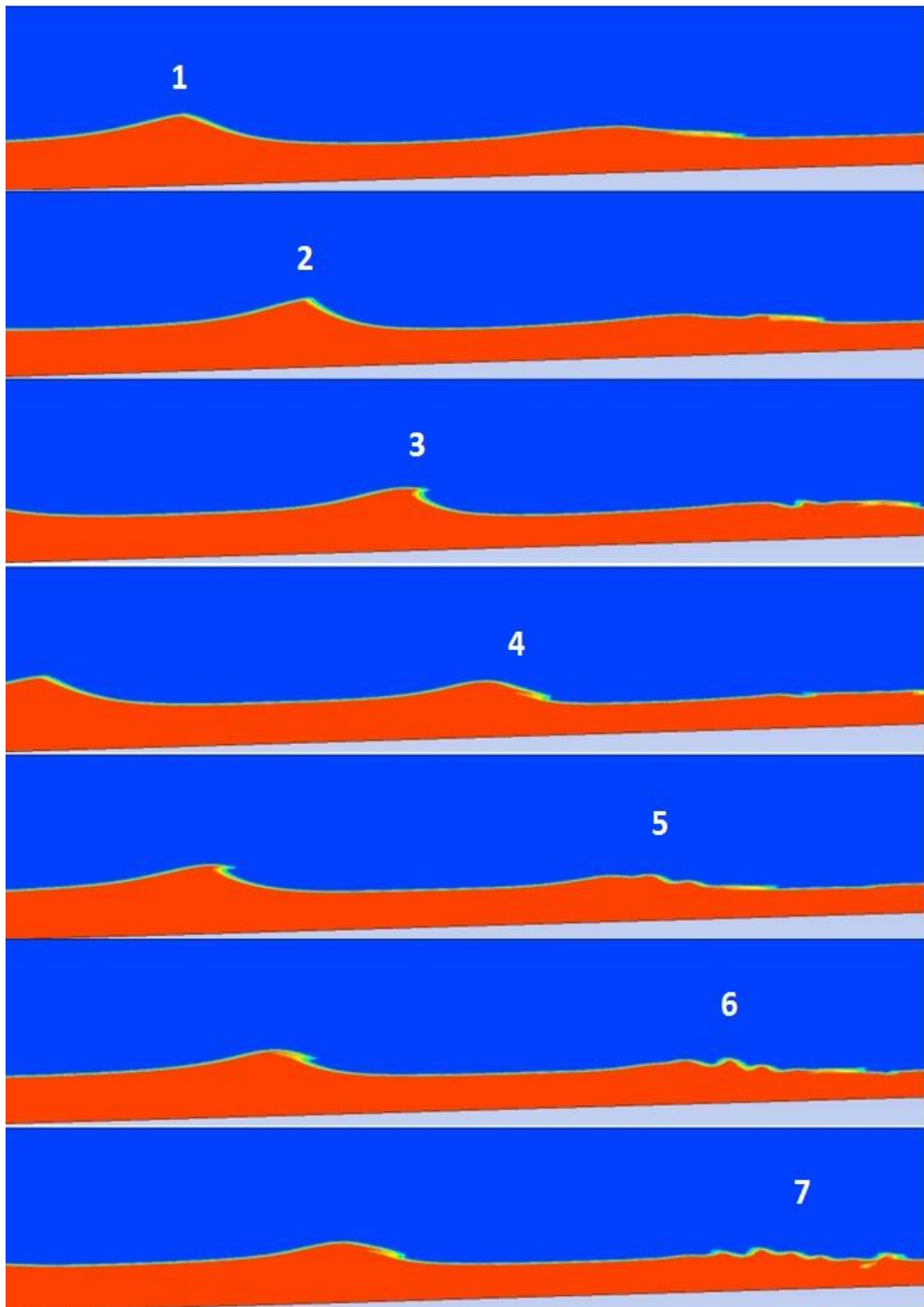
O modelo numérico usado para simular a quebra de ondas é o mesmo que foi aplicado no Caso 1B, visto que foi comprovado que este consegue replicar o comportamento da geração e propagação de ondas corretamente.

A Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21 apresentam os três tipos de quebra de ondas modelados pelo ANSYS® CFX®. Através da sua visualização, demonstra-se que este é capaz de modelar a quebra de ondas na zona de *surf*, de acordo com o previsto pelo parâmetro *surf similarity*.

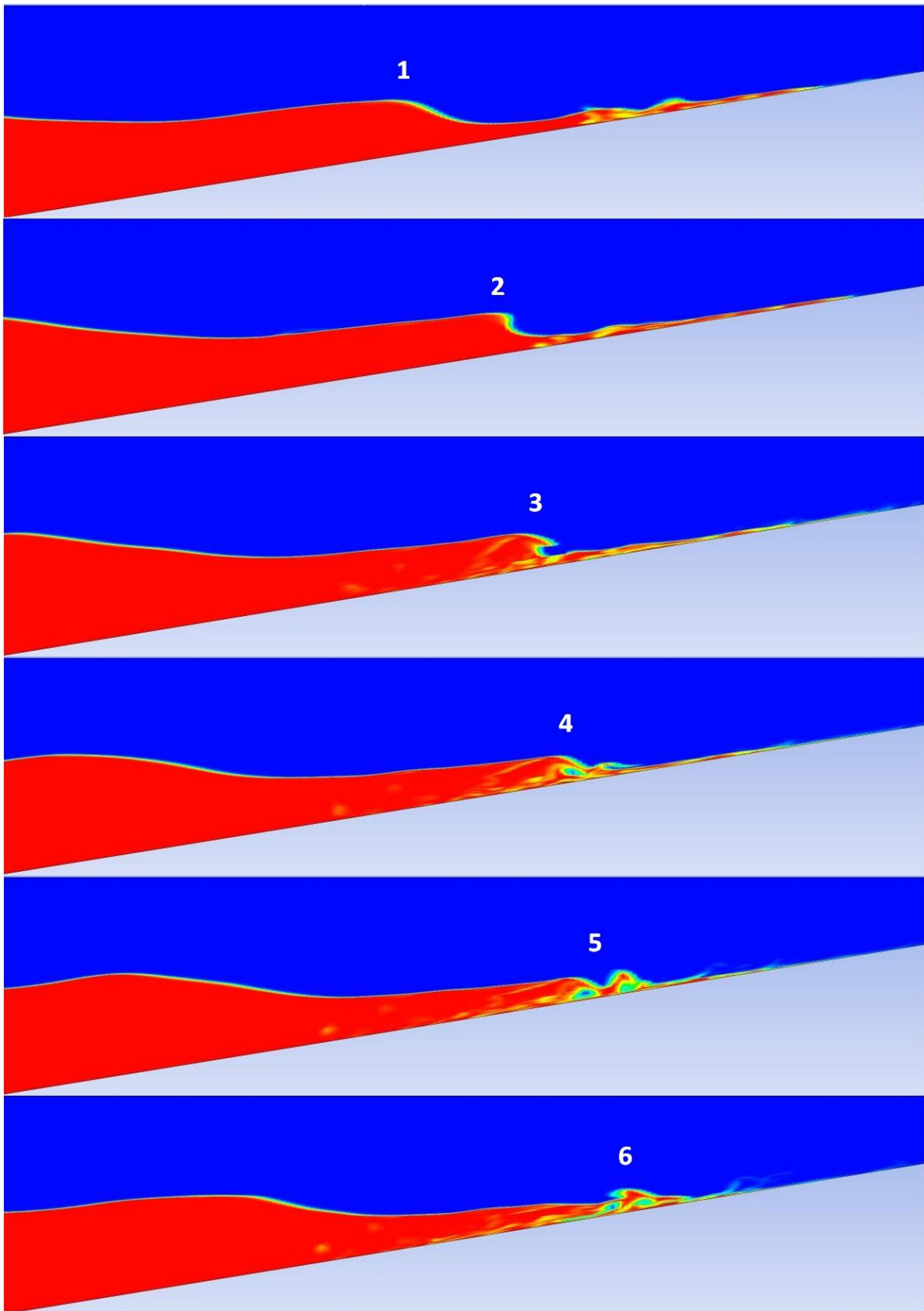
A Figura 6.19 mostra as várias fases de uma quebra de onda do tipo *spilling*, onde se deteta a crista a cair sobre a face da onda na fase 3, originando uma zona de turbulência que faz com que a onda perca altura a um ritmo reduzido

A Figura 6.20 representa as várias fases de uma quebra do tipo *plunging*, sendo notório na fase 3 o movimento típico de mergulho da crista da onda que caracteriza este tipo de quebra.

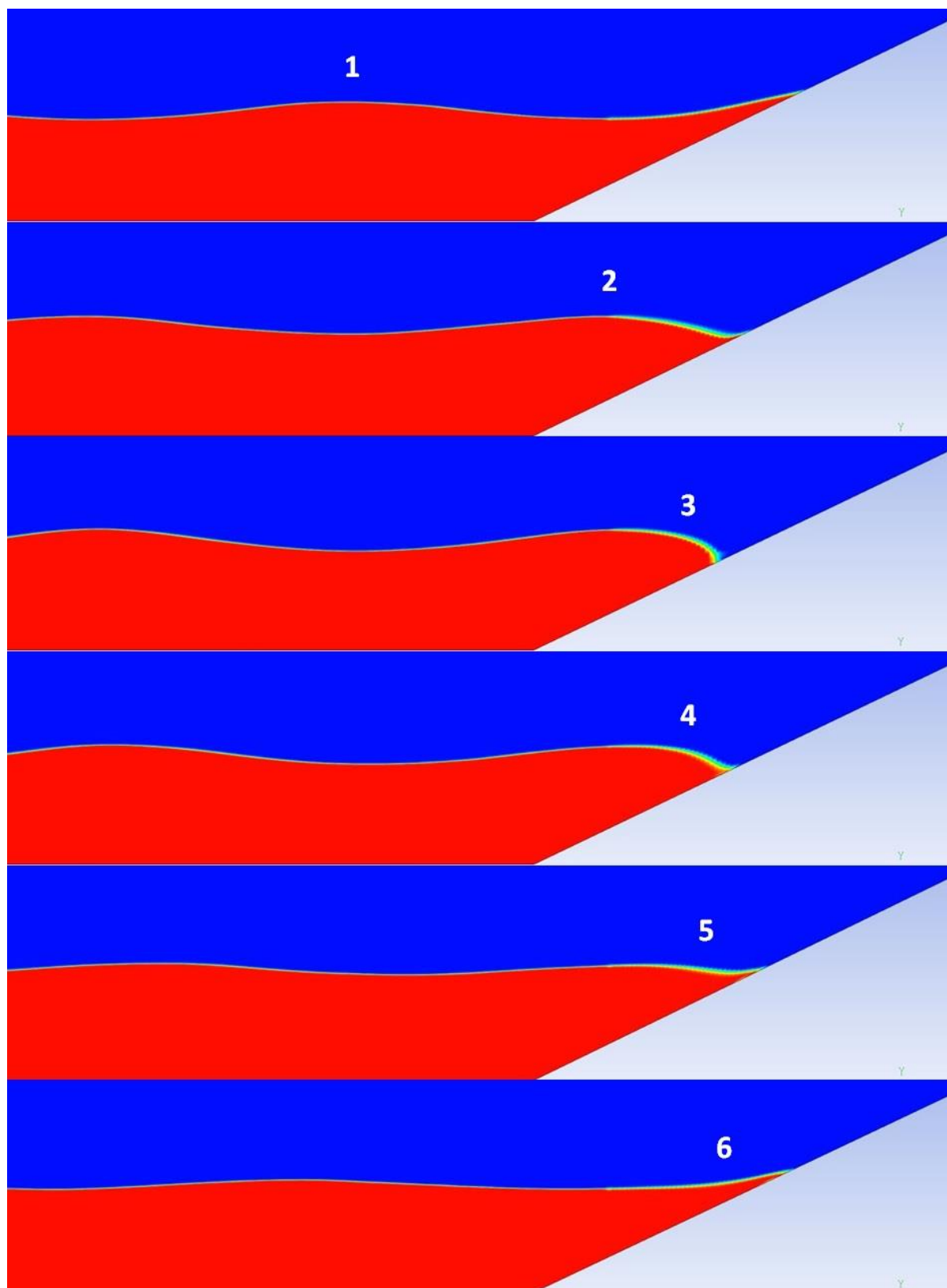
Por fim, a Figura 6.21 ilustra uma quebra do tipo *plunging*, na qual em todas as suas fases não ocorre rebentação.



**Figura 6.19.** Caso 2A: Formação de quebra de onda do tipo *spilling*, usando ANSYS® CFX®.



**Figura 6.20.** Caso 2B: Formação de quebra de onda do tipo *plunging*, usando ANSYS® CFX®.



**Figura 6.21.** Caso 2C: Formação de quebra de onda do tipo *surging*, usando ANSYS® CFX®.



## 7. CONCLUSÃO

A presente dissertação demonstrou que o ANSYS® CFX® pode ser uma importante ferramenta de auxílio às engenharias oceânica e costeira. Ficou mostrado que o ANSYS® CFX® modela numericamente, de uma forma precisa, o comportamento de ondas progressivas regulares e a quebra de ondas em zonas costeiras.

De modo a simular o comportamento de ondas regulares, foi criado um tanque numérico de ondas, sendo os resultados comparados com a Teoria de Stokes de Segunda Ordem. Foram testadas duas formas de criação de ondas: através do método *inlet velocity* e através da teoria *Wavemaker*, do tipo pistão. O primeiro não fornece resultados de acordo com a formulação teórica. Isto deve-se ao facto de a elevação da superfície livre ser definida para todo o domínio no instante inicial, causando reflexão de ondas a partir do início da simulação. A implementação de um pistão revelou ser um método que fornece bons resultados, criando ondas que revelam elevada concordância com a teoria.

Foram tomadas medidas de maneira a prevenir a reflexão de ondas. Para o efeito, foi implementada uma praia no fim do domínio e aumentou-se o comprimento do tanque numérico. Além disso, o tempo de simulação foi controlado de modo a impedir que as ondas atingissem o fim do domínio. Estas medidas provaram ser eficazes.

Vários parâmetros foram também testados de modo a otimizar o tanque numérico de ondas: passo de tempo, comprimento do tanque e declive da praia. Demonstrou-se que um passo de tempo ideal corresponde à relação  $T/200$  e que o valor máximo não deve ser superior à relação  $T/100$ . Para além disso, aumentar o comprimento para o dobro da dimensão da zona de análise revelou-se ser suficiente para não haja perturbação causada por reflexão proveniente do fim do tanque. Por fim, uma praia com um declive de 1:5 mostrou ser a que melhor absorve as ondas. Além disso, testes de influência da malha computacional foram realizados envolvendo três malhas de dimensões diferentes. Mostrou-se que a malha 2) apresenta a melhor solução.

A solução otimizada apresentou-se de acordo com a teoria, apresentando um erro relativamente reduzido em comparação com a elevação teórica da superfície livre. A maior percentagem de erro registada foi de 0.9%.

Foram registadas, no entanto, limitações do ANSYS® CFX® em modelar ondas regulares perto do valor crítico de quebra em águas profundas. Resultados obtidos em simulações de ondas com declividades de 0.1 apresentaram um amortecimento acentuado da elevação da superfície livre e um elevado desfasamento em relação à curva teórica. Assim, não se recomenda o uso do ANSYS® CFX® para modelação de ondas que apresentem declividades superiores a 0.05.

Por último, foram simulados numericamente vários tipos de quebra de ondas em zonas de *surf*. Ficou demonstrado que o ANSYS® CFX® é capaz de modelar quebras do tipo *spilling*, *plunging* e *surging*, previstos pelo parâmetro *surf similarity*.

Baseado no trabalho desenvolvido nesta dissertação, são propostas melhorias para trabalhos futuros. Assim, sugere-se a implementação de uma zona de dissipação numérica no fim do tanque para absorção de ondas, permitindo deste modo maiores tempos de simulação. Além disso, sugere-se o estudo da influência da fronteira superior do tanque numérico de ondas, mais concretamente a influência que a velocidade de circulação do ar adquire no amortecimento da superfície livre.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeyemo, M. D. (1968). "Effect of Beach Slope and Shoaling on Wave Asymmetry." In *Proceedings, 11th Conference on Coastal Engineering*, American Society of Civil Engineers, London, pp. 145-172.
- Anbarsooz, M., Passandideh-Fard, M., & Moghiman, M. (2013). "Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks." *Ocean Engineering*, 59, 73–85.
- Ansys. (2013). "Ansys CFX Documentation", *SAS IP, Inc.* Retrieved March 2017, from <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>.
- Astariz, S., & Iglesias, G. (2015). "The economics of wave energy: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 397–408.
- Battjes, J. A. (1947). Surf Similarity. In *Proceedings, 14th International Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, Denmark, pp. 446-480
- Brito, A. (2009). "Portuguese Pilot Zone." Presentation: *Energiuka*, Oslo, 4-5 February 2009.
- Chenari, B., Saadatian, S. S., & Ferreira, A. D. (2015). "Numerical Modelling of Regular Waves Propagation and Breaking Using Waves2Foam." *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(4), pp. 276–281.
- Clauss, G. F., Schmittner, C. E., & Stuck, R. (2005). "Numerical wave tank - Simulation of extreme waves for the investigation of structural responses." In *Proceedings, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Halkidiki, Greece, pp. 1-8
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists." *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Drew, B., Plummer, A., & Sahinkaya, M. N. (2009). "A review of wave energy converter technology". *Journal of Power and Energy*, 223, 887–902.
- Elangovan, M. (2011). "Simulation of irregular waves by CFD." *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 5(7), 1379-1383.
- Finnegan, W., & Goggins, J. (2012). "Numerical simulation of linear water waves and wave-structure interaction." *Ocean Engineering*, 43, pp. 23–31.
- Galvin, C. J. J. (1964). "Wave-height prediction for wave generators in shallow water." *Tech. Memo 4, US Army Coastal Engineering Research Center*.
- Galvin, C. J. J. (1968). "Breaker type classification on three laboratory beaches." *Journal of Geophysical Research*, 73(12), pp. 3651–3659.
- Havn, J. (2011). "Wave loads on underwater protection covers." Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology (NTU), Trondheim, Norway..

- Iribarren, C. R., & Nogales, C. (1949). "Protection des Ports." *XVIIth International Navigation Congress*, Lisbon, Portugal: Section II, Communication, pp. 31-80.
- Kim, S., Kim, K., Park, J., Jeon, G., & Chun, H. (2016). "Numerical simulation of wave and current interaction with a fixed offshore substructure." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8, pp. 188–197.
- Koo, W. C., & Kim, M. H. (2007). "Fully nonlinear wave-body interactions with surface-piercing bodies." *Ocean Engineering*, 34(7), pp. 1000–1012.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2017). Retrieved April 14, 2017, from <http://www.lnec.pt/pt/estudos/detalhes.php?tipo=0&id=233>
- Lal, A., & Elangovan, M. (2008). "CFD Simulation and Validation of Flap Type Wave-Maker." *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 2(10), pp. 708–714.
- Lambert, R. J. (2012). "Development of a numerical wave tank using OpenFOAM". Tese de Mestrado em Energia para a sustentabilidade, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Maguire, A. E. (2011). "Hydrodynamics , control and numerical modelling of absorbing wavemakers." The University of Edinburgh.
- Michell, J. H. (1893). "On the highest waves in water." *Philosophical Magazine*, 5th Series, 36, pp. 430–437.
- Ministério da Economia e da Inovação. (2007). "Decreto lei n.º 225/2007 de 31 de Maio." *Diário Da República*, 1ª Série-Nº105.
- Morgan, G. C. J., Zang, J., Greaves, D., Heath, A., Whitlow, C. D., & Young, J. R. (2010). "Using the rasInterFoam CFD model for wave transformation and coastal modelling." ICCE No 32 (2010): *In Proceedings, 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, 2010.
- Mustapa, M. A., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., Rheem, C.-K., Koh, K. K., & Adnan, F. A. (2017). "Wave energy device and breakwater integration: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, pp. 43–58.
- Ning, D. Z., & Teng, B. (2007). "Numerical simulation of fully nonlinear irregular wave tank in three dimension." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53, pp. 1847–1862.
- Oliveira, L. A., & Lopes, A. G. (2016). "Mecânica dos Fluidos." 5ª Edição, *LIDEL*.
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2009). "Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009." *Jornal Oficial Da União Europeia*.
- Prasad, D. D., Ahmed, M. R., Lee, Y.-H., & Sharma, R. N. (2017). "Validation of a piston type wave-maker using Numerical Wave Tank." *Ocean Engineering*, 131, pp. 57–67.

- Richardson, J. E. (1996). "Surf Similarity." *Flow Science Technical Note FSI-96-00-TN44*.
- Saincher, S., & Banerjee, J. (2015). "Design of a numerical wave tank and wave flume for low steepness waves in deep and intermediate water." *Procedia Engineering*, 116, pp. 221-228.
- Sarmento, A. (2010). "Offshore Energy in Portugal." Presentation: *WavEC Energy Seminar*, May 14, 2010.
- Silva, M. C., Vitola, M. de A., Pinto, W. T., & Levi, C. A. (2010). "Numerical simulation of monochromatic wave generated in laboratory: Validation of a CFD code." atas do 23<sup>o</sup> Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval E Offshore, Rio de Janeiro, Brasil, 25-29 October 2010, pp. 1–12.
- Sorensen, R. M. (2006). "Basic Coastal Engineering." 3<sup>a</sup> edição, *Springer*.
- Thorpe, T. W. (1999). "A Brief Review of Wave Energy." May 1999.
- Ursell, F. (1953). "The long-wave paradox in the theory of gravity waves." *In Proceedings, Cambridge Philosophical Society*, 49(4), pp. 685–694.
- Ursell, F., Dean, R. G., & Yu, Y. S. (1960). "Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment." *Journal of Fluid Mechanics*, 7, pp. 33–52.
- U.S Army Coastal Engineering Research Center. (1984). "Shore Protection Manual", 4<sup>th</sup> Edition, 2 vols, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Westphalen, J., Greaves, D. M., Williams, C. J. K., Hunt-Raby, A. C., & Zang, J. (2012). "Focused waves and wave-structure interaction in a numerical wave tank." *Ocean Engineering*, 45, pp. 9–21.
- World Energy Council. (2017). Retrieved April 2017, from <https://www.worldenergy.org/data/resources/country/portugal/marine/>

