

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação numérica do escoamento de superfície livre sobre estrutura geradora de ondas

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

Autor

Pedro Rodrigo Barreto Mota

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, Fevereiro, 2017

“Waves are inspiring not because they rise and fall, but because each time they
fall they never fail to rise again.”

Ralph Waldo Emerson

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e irmãs, pelo apoio e confiança que transmitiram ao longo da minha etapa académica.

Ao Professor António Gameiro Lopes, pelo auxílio, orientação científica, ideias e sugestões, os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço à Professora Juana Conceição Fortes, pela disponibilidade e amabilidade que demonstrou ao longo deste trabalho.

À minha família, pela compreensão, preocupação, apoio e carinho.

Por último, agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo, entusiasmo e pelos momentos inesquecíveis.

Resumo

O objetivo desta dissertação de mestrado consiste no estudo computacional utilizando o ANSYS® CFX®, do escoamento de superfície livre sobre uma estrutura geradora de ondas de modo a avaliar o seu funcionamento hidrodinâmico para a prática do surf.

Com o aumento do número de praticantes do surf, os recifes artificiais demonstram ser uma opção válida para a criação de novos locais para a sua prática. Portanto, o estudo computacional realizado, sobre a interação destas estruturas com as ondas, é fundamental para a sua viabilidade e, reduz também os recursos humanos e financeiros comparativamente à via experimental.

Para as simulações computacionais realizadas recorreu-se à teoria de Stokes de segunda ordem e à teoria *wavemaker*. Foram simulados dois casos: (i) escoamento sem estrutura geradora de ondas e (ii) escoamento com estrutura geradora de ondas.

Para as simulações sem recife artificial, as ondas foram geradas utilizando, separadamente, as teorias em estudo. Concluiu-se que o *wavemaker* do tipo pistão produz ondas com melhor aproximação à realidade.

Na situação do escoamento com recife artificial, foi calculada a altura significativa da onda ao longo do eixo horizontal do domínio, para ondas geradas pelo *wavemaker* do tipo pistão. Verificou-se que o recife artificial amplifica a onda incidente. No entanto, os resultados obtidos não são coincidentes com os da literatura e, não ocorre a rebentação da onda sobre este.

Palavras-chave: Recife artificial, ANSYS® CFX®, Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), Teoria de Stokes de segunda ordem, Teoria *wavemaker*.

Abstract

The main objective of this master's thesis consists of the computational study using ANSYS® CFX® of the free surface flow on a wave generating structure in order to evaluate its hydrodynamic functioning for surfing.

With the increase in the number of surfers, artificial reefs prove to be a valid option for the creation of new places for their practice. Therefore, the computational study carried out on the interaction of these structures with the waves is fundamental for their viability and also reduces the human and financial resources compared to the experimental route.

The computational simulations were performed using Stokes second-order theory and wavemaker theory. Two cases were simulated: (i) flow without wave generating structure and (ii) flow with wave generating structure.

For the simulations without artificial reef, the waves were generated using, separately, the theories under study. It was concluded that the piston-type wavemaker produces waves with better approximation to reality.

In the situation of flow with wave generating structure, the significant wave height along the horizontal axis of the domain was calculated for waves generated by the piston-type wavemaker. It was verified that the artificial reef amplifies the incident wave. However, the results obtained do not agree with those of the literature, and does not occur wave breaking on the reef.

Keywords Artificial Reef, ANSYS® CFX®, Computacinal Fluid Dynamics (CFD), Stokes second-order theory, wavemaker theory.

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Modelação computacional da dinâmica de fluidos.....	2
1.2. ANSYS® CFX®	3
1.3. Revisão bibliográfica	4
1.3.1. Desenvolvimento da teoria.....	4
1.3.2. Tanques de ondas numéricos.....	6
2. Fundamentação teórica.....	11
2.1. Teoria linear da onda (Teoria de Airy)	11
2.1.1. Potencial de velocidade.....	12
2.2. Teoria de Stokes de segunda ordem	15
2.2.1. Potencial de velocidade.....	16
2.2.2. Confirmação da utilização da teoria de Stokes de segunda ordem	17
2.3. Teoria wavemaker.....	18
2.4. Altura significativa da onda	19
2.5. Modelo Homogéneo.....	20
3. Caso de estudo	23
3.1. Simplificação.....	23
3.2. Onda de projeto	24
3.3. Geometria	24
3.3.1. Situação A	24
3.3.2. Situação B	25
3.4. Malha de cálculo.....	26
3.5. Situação A – escoamento sem estrutura geradora de ondas	30
3.5.1. Condições de fronteira	30
3.5.2. Condições iniciais	33
3.5.3. Parâmetros de simulação.....	34
3.6. Situação B – escoamento com estrutura geradora de ondas.....	34
3.6.1. Condições de fronteira	35
3.6.2. Condições iniciais	35
3.6.3. Parâmetros de simulação.....	36
4. Análise de resultados.....	37
4.1. Situação A – escoamento sem estrutura geradora de ondas	37
4.1.1. Situação A – (SSR).....	37
4.1.2. Situação A – (PSR).....	39

4.1.3. Conclusão preliminar	41
4.2. Situação B – Escoamento com estrutura geradora de ondas	42
5. Conclusões	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação de um recife artificial. Adaptado de Vieira et al. (2006)	1
Figura 1.2. Estrutura do Workbench do programa ANSYS®.....	3
Figura 1.3. Limites de validação para várias teorias da onda. (Le Mehaute, 1976).	5
Figura 2.1. Estrutura de um problema de valor de fronteira para duas dimensões. Dalrymble & Dean (1984)	12
Figura 2.2. Onda progressiva bidimensional. (Sorensen, 2006).....	13
Figura 2.3. Teoria simplificada de Galvin para <i>wavemaker</i> do tipo pistão. Adaptado de Dalrymble & Dean (1984).	18
Figura 2.4. Exemplo de um registo de ondas irregulares. (Goda, 1985) adaptado por Sancho (2002).	19
Figura 3.1. Vista em perspetiva do recife artificial, instalado no tanque de ondas do INPH. (Aguiar et al., 2014).	23
Figura 3.2. Geometria da situação A (Dimensões em metros).....	25
Figura 3.3. Planta e cortes do recife artificial. Adaptado de Aguiar et al. (2014).	25
Figura 3.4. Geometria da situação B (Dimensões em metros).	26
Figura 3.5. Malha 1) com 82636 elementos (Situação A) e com 82704 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.	27
Figura 3.6. Malha 2) com 158296 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.	28
Figura 3.7. Malha 3) com 220100 elementos (Situação A) e com 218146 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.	29
Figura 3.8. Representação das condições de fronteira para a Situação A – (SSR).....	31
Figura 3.9. Representação das condições de fronteira para a Situação A – (PSR).....	32
Figura 3.10. Representação das condições de fronteira para a Situação B.	35
Figura 4.1. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 5$ segundos – Situação A – (SSR).....	37
Figura 4.2. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 10$ segundos – Situação A – (SSR).....	38
Figura 4.3. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, com $t = 20$ segundos – Situação A – (SSR).....	38

Figura 4.4. Contorno da velocidade superficial horizontal e vertical da água, com $t = 20$ segundos – Situação A – (SSR).....	39
Figura 4.5. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas – Situação A – (PSR).	40
Figura 4.6. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 20$ segundos – Situação A – (PSR).	41
Figura 4.7. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 30$ segundos – Situação A – (PSR).	41
Figura 4.8. Comparação da elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para as duas situações, para $t = 30$ segundos.....	42
Figura 4.9. Posição das linhas de amostragem.....	43
Figura 4.10. Altura significativa da onda (HS) ao longo do eixo horizontal, para três malhas.	44
Figura 4.11. Componente horizontal do campo de velocidades para a malha 3) e 2).....	45
Figura 4.12. Altura significativa da onda (HS) ao longo do eixo horizontal, para $t = 20$ segundos e $t = 30$ segundos.	45
Figura 4.13. Altura significativa da onda (HS) ao longo do eixo horizontal, para três passos de tempo.	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros da onda de projeto.	24
Tabela 3.2. Parâmetros calculados para a onda de projeto.....	24
Tabela 3.3. Parâmetros de malha	26
Tabela 3.4. Condições de fronteira Situação A – (SSR).....	31
Tabela 3.5. Condições de fronteira Situação A – (PSR).....	32
Tabela 3.6. Condições iniciais Situação A – (SSR).....	33
Tabela 3.7. Condições iniciais Situação A – (PSR).....	33
Tabela 3.8. Parâmetros de simulação – Situação A.....	34
Tabela 3.9. Parâmetros de simulação – Situação B.....	36

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

C – Celeridade da onda, ($m s^{-1}$)

d – Profundidade da água, (m)

g – Aceleração gravítica, ($m s^{-2}$)

H – Altura da onda, (m)

H_{rms} – Raiz quadrada da média dos quadrados das alturas das ondas, (m)

H_S – Altura significativa da onda, (m)

$H_{\frac{1}{3}}$ – Altura significativa da onda, (m)

k – Número de onda, ($rad m^{-1}$)

L – Comprimento da onda, (m)

N_p – Número total de fases, (–)

p – Pressão, (Pa)

r – Fração volúmica, (–)

S – Amplitude de oscilação do pistão (*stroke*), (m)

S – Termo fonte, (–)

T – Período da onda, (s)

t – Tempo, (s)

U – Vetor velocidade, ($m s^{-1}$)

u – Componente da velocidade segundo Ox , ($m s^{-1}$)

v – Componente da velocidade segundo Oy , ($m s^{-1}$)

w – Componente da velocidade segundo Oz , ($m s^{-1}$)

x – Coordenada, (m)

y – Coordenada, (m)

z – Coordenada, (m)

α – Fase dos fluidos, (–)

Γ – Coeficiente difusivo, (–)

ε – Coordenada horizontal da partícula de água, (m)

ζ – Coordenada vertical da partícula de água, (m)

η – Elevação da superfície livre, (m)

ρ – Massa volúmica, ($kg\ m^{-3}$)

σ – Frequência angular da onda, ($rad\ s^{-1}$)

φ – Variável escalar geral, ($-$)

ϕ – Potencial de velocidade, ($m^2\ s^{-1}$)

Siglas

ANSYS – Analysis System

CEL – CFX Expression Language

CFD – Computational Fluid Dynamics

GGI – General Grid Interface

HOBEM – High-order Boundary Element Method

INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

MVF – Método dos Volumes Finitos

PSR – Pistão Sem Recife

PVF – Problema de Valor de Fronteira

SSR – Stokes Sem Recife

VOF – Volume of Fluid

WAVETUB – Wave simulation code developed at Technical University Berlin

1. INTRODUÇÃO

Uma estrutura geradora de onda, ou recife artificial é, de forma genérica, uma estrutura submersa em profundidades consideráveis, que altera a topografia do fundo do mar e conseqüentemente as características das ondas incidentes na sua zona de ação.

A onda ao propagar-se sobre o recife concentra a sua energia num determinado ponto (ponto I, Figura 1.1) diminuindo assim a velocidade nessa secção relativamente às adjacentes. Visto que a altura da onda depende da profundidade, esta será maior na secção central, atingindo o valor máximo compatível com a profundidade onde ocorre a rebentação. Assim, no recife, este fenómeno acontece primeiramente no ponto II e só depois, de forma gradual, ao longo das secções adjacentes (Vieira et al., 2006).

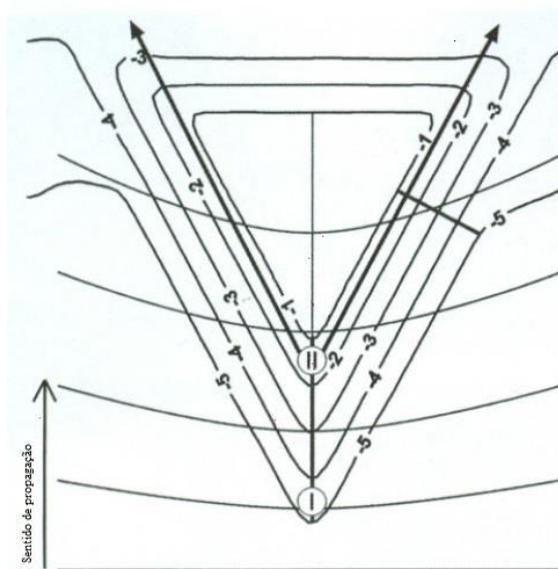


Figura 1.1. Representação de um recife artificial. Adaptado de Vieira et al. (2006)

A implementação deste tipo de estruturas tem demonstrado bons argumentos. Em zonas em que a prática do surf é reduzida ou mesmo impossível, a aplicação do recife artificial oferece um aumento da altura da onda na rebentação, induzindo-a num dado local (sobre o recife ou logo depois do mesmo) e fazendo com que se efetue de forma gradual ao longo da crista da onda. Conjuntamente ocorre um aumento da proteção costeira, uma vez que funciona como quebra-mar submerso, reduzindo a energia da onda que chega à costa (Vieira et al., 2006). Os recifes artificiais são também benéficos para o desenvolvimento de

diversos ecossistemas e constituem excelente substrato para a flora marinha. Contudo existem algumas desvantagens que ocorrem não só pela falta de experiência dos engenheiros costeiros na aplicação de sistemas geotêxteis, como pela reduzida resistência mecânica deste material e pela falta de guias para *design* de estruturas costeiras em geotêxteis (Mendonça et al., 2012).

Esta dissertação tem como objetivo a realização de simulações computacionais do escoamento com superfície livre sobre um recife artificial, recorrendo ao *software* ANSYS® CFX®, por forma a avaliar o funcionamento hidrodinâmico, mais concretamente a amplificação que este induz à onda.

O trabalho encontra-se dividido em cinco partes. O primeiro capítulo é dedicado à introdução do tema, apresentação do programa em apreço e revisão bibliográfica. No segundo capítulo são desenvolvidas fundamentações teóricas da propagação da onda e é descrito o fenómeno utilizado para avaliar a estrutura. Por sua vez, o terceiro capítulo é destinado às especificações das duas situações em estudo: (i) escoamento sem estrutura geradora de ondas e (ii) escoamento com estrutura geradora de ondas. Neste capítulo é apresentada a simplificação adotada, as geometrias e malhas utilizadas, as condições de fronteira e iniciais, e ainda os parâmetros de simulação. O quarto capítulo debruça-se sobre a apresentação de resultados e discussão. É realizada uma análise separada para os dois casos em estudo. Por fim, no quinto capítulo, são expostas as conclusões retiradas deste trabalho de investigação e algumas propostas futuras.

1.1. Modelação computacional da dinâmica de fluidos

A modelação computacional da dinâmica de fluidos, mais conhecida por CFD, é uma ferramenta de resolução de equações complexas que governam em sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas, entre outros (Ansys®, 2013).

Os recentes avanços na tecnologia computacional permitem o maior recurso a este tipo de modelação aquando comparado com os métodos experimentais. Devido ao menor dispêndio de tempo e menor necessidade de recursos humanos e materiais, a aplicação do CFD resulta num esforço financeiro reduzido.

Com o uso do CFD, as equações diferenciais de conservação podem ser discretizadas e resolvidas numericamente (transformadas em equações aproximadas resolúveis), através do Método dos Volumes Finitos (MVF). Para tal a região de interesse, designada por domínio, é dividida em volumes mais pequenos (volumes de controlo, VC) onde as equações de conservação são usadas para calcular uma aproximação do valor de uma variável nas interfaces dos VC. Esta abordagem faz do MVF um método conservativo (Westphalen et al., 2012).

1.2. ANSYS® CFX®

ANSYS® CFX® é um programa CFD que faz uso de uma configuração intuitiva construída com menus e gráficos avançados, de um *solver* viável e robusto, e ainda de módulos de pré e pós processamento com elevadas capacidades, tendo assim despertado o interesse de muitos investigadores.

O programa ANSYS® usufrui de uma interface geral, que se intitula de Workbench. Trata-se duma interface simples que possui um número de ferramentas divididas em cinco separadores: os sistemas de análise, como o Fluent® e o CFX®, componentes, tais como os módulos de criação de geometrias (DesignModeler) e malhas (Meshing), sistemas personalizados, sistemas de exploração de *design* e sistemas de conexão externa. É também apresentado o esquema do projeto, o progresso deste e ainda as suas propriedades.

Para melhor perceção desta ferramenta, a Figura 1.2 ilustra a estrutura do Workbench.

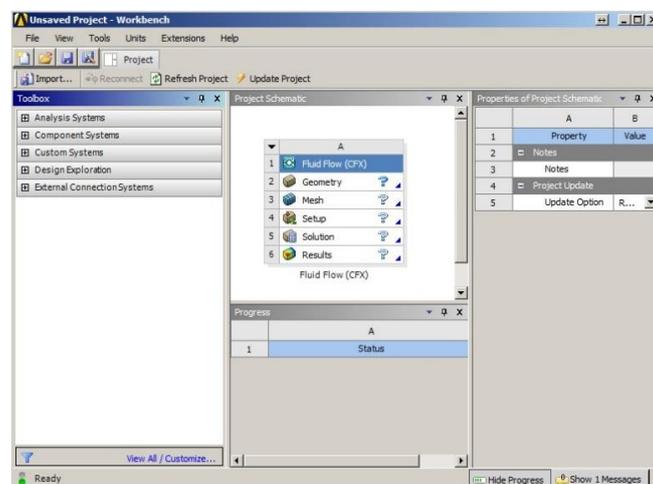


Figura 1.2. Estrutura do Workbench do programa ANSYS®.

Relativamente ao ANSYS® CFX®, é uma ferramenta que utiliza o MVF e consiste em quatro módulos: o ANSYS® CFX-Pre, o ANSYS® CFX-Solver, o ANSYS® CFX-Solver Manager e o ANSYS® CFD-Post. No ANSYS® CFX-Pre as simulações do projeto em estudo são definidas, ou seja, os parâmetros de escoamento, condições de fronteira, condições iniciais e os parâmetros do *solver*. Por sua vez o *solver* possui dois módulos. O primeiro resolve todas as variáveis usando um *solver* acoplado, o que faz com que as equações hidrodinâmicas sejam solucionadas num único sistema, necessitando de menor número de iterações para obter convergência. O segundo módulo por sua vez serve para promover o aumento do controlo da simulação, tendo como funções de especificar o tipo de ficheiros de saída do *solver*, iniciar e terminar a tarefa de solucionar o projeto e monitorizar o progresso da simulação. Por fim, o ANSYS® CFD-Post é uma ferramenta gráfica interativa que analisa e apresenta os resultados provenientes da simulação realizada no ANSYS® CFX®. Estão presentes funcionalidades como o processamento quantitativo, criação de relatórios e uma variedade de gráficos, seja com linhas/faces do objeto e/ou variáveis (ANSYS®, 2013).

1.3. Revisão bibliográfica

O subcapítulo que se inicia apresenta um resumo da pesquisa bibliográfica realizada para sustentar o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. São citados autores cujo trabalho científico permitiu a evolução da compreensão das ondas gravitacionais de superfície, dos meios de estudo e geração, e ainda da interação com estruturas.

1.3.1. Desenvolvimento da teoria

Primeiramente Airy (1845) desenvolveu uma teoria simples e útil para ondas de pequena amplitude, dita teoria linear da onda. Esta formula equações que definem, quase por completo, propriedades cinemáticas e dinâmicas das ondas gravitacionais de superfície (Dalrymple & Dean, 1984).

Mais tarde, Stokes (1847) apresenta uma teoria para ondas de amplitudes finitas fazendo uso do método de perturbação. Assim, os termos não lineares são tidos em consideração e surge a teoria de Stokes de segunda ordem.

Ordens superiores de aproximação da teoria de Stokes foram então desenvolvidas. Autores como Skjelbreia (1959) e Skjelbreia & Hendrickson (1961) elevaram a teoria de stokes para a terceira ordem e quarta ordem, respetivamente. Em 1974, Schwartz com a utilização de um supercomputador, elevou esta teoria para ordens ainda superiores (Sorensen, 2006).

Uma aproximação do intervalo em que determinada teoria da onda é válida foi sugerida por Le Mehaute (1976), mostrada na Figura 1.3. Essa aproximação foi estabelecida para ondas periódicas bidimensionais, e é limitada por um critério de rebentação.

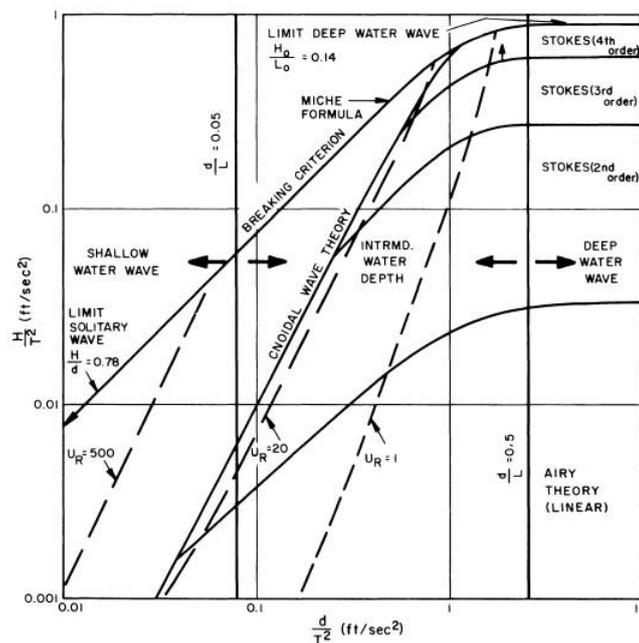


Figura 1.3. Limites de validação para várias teorias da onda. (Le Mehaute, 1976).

A fundamentação teórica de mecanismos de criação de ondas em laboratórios foi desenvolvida em pormenor por Biesel (1951), utilizando um escoamento bidimensional e irrotacional em canais prismáticos de secção retangular. A partir da teoria *wavemaker* de Havelock (1929) derivada da teoria linear, Biesel (1951) resolveu as equações hidrodinâmicas linearizadas de primeira ordem, de modo a determinar o movimento da onda causado por dois tipos de *wavemaker* (pistão e *flap*) na extremidade do canal. Realizou também estudos comparativos sobre a qualidade de onda gerada para esses dois tipos, o *stroke* dos *wavemakers* e a força hidrodinâmica total aplicada a estes (Hyun 1976).

Posteriormente, Ursell et al. (1960) conduziram ensaios experimentais com o intuito de validar a teoria *wavemaker*. Constataram ainda que o aumento da declividade da

onda produzida pelo pistão resultava numa altura menor que os valores previstos pela teoria linear da onda. (Anbarsooz et al., 2013).

Uma década depois, em 1978, Sorensen elabora uma obra literária introdutória à mecânica da onda e processos costeiros, muito útil não só para a compreensão das diversas teorias da onda como também dos fundamentos da prática da engenharia costeira.

Com a contribuição científica destes autores, e outros, Dalrymple & Dean (1984) escrevem um livro, em que explicam pormenorizadamente as teorias das ondas, fenómenos adjacentes e problemas relacionados com os *wavemakers*.

1.3.2. Tanques de ondas numéricos

Clauss et al. (2005) realizaram simulações de ondas extremas para analisar a sua interação com estruturas, utilizando quatros códigos comerciais: ANSYS® CFX®, ANSYS® FLUENT®, COMET e WAVETUB. Nessa investigação, constataram que os três primeiros, usando o método *volume of fluid* (VOF), permitiam melhores resultados na rebentação das ondas, enquanto o WAVETUB, ao fazer uso da teoria potencial, era mais apropriado para o estudo da propagação de ondas sem rebentação. Assim, para beneficiar de todos os códigos, utilizaram os resultados das simulações da propagação das ondas produzidas pelo WAVETUB como valores iniciais para a realização das simulações da rebentação das ondas com os restantes códigos. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância com os experimentais.

Ning & Teng (2006) efetuaram, num tanque de ondas tridimensional, simulações de ondas lineares e não-lineares utilizando o HOBEM (*high-order boundary element method*). A sua investigação baseou-se em duas teorias para a geração de ondas: (i) teoria linear e (ii) teoria de Stokes de segunda ordem. Os autores concluíram que os resultados produzidos pelo HOBEM iam de encontro aos teóricos e que o modelo poderia ser alargado para problemas de interação onda-corpo. Por outro lado, concluíram que adicionando uma zona de amortecimento no fim do domínio, para dissipar a energia da onda na direção de propagação, esta apresentava menor reflexão.

Vieira et al. (2006) utilizaram uma das geometrias de recife artificial estudadas por Aguiar (2006) e através dos modelos numéricos REFDIF e FUNWAVE determinaram parâmetros de surfabilidade e de proteção costeira. Nas suas conclusões, com recurso ao modelo REFDIF, afirmam que com a implementação do recife as ondas passam a rebentar

mais longe da linha de costa, reduzindo a energia das ondas e, conseqüentemente, o seu efeito na praia. Assim, o recife artificial origina uma faixa de proteção costeira com cerca de 250 metros de comprimento. No entanto para a prática do surf a geometria não era a mais adequada pois, apesar das alturas das ondas na rebentação encontrarem-se nos valores pretendidos, os parâmetros como o ângulo de quebra e número de Iribarren (representa o tipo de rebentação da onda) situam-se fora dos intervalos desejáveis. Adicionalmente, concluem com o uso do FUNWAVE, a existência de ondas refletidas pelo recife artificial, aspecto que dificulta a prática do surf.

Ning et al. (2008) prosseguiram o estudo de ondas lineares e não-lineares em tanques numéricos, com base no HOBEM, para profundidades infinitas. Neste estudo, utilizaram fontes distribuídas verticalmente no centro do tanque e, ao impor a componente horizontal da velocidade de partícula, facultada tanto pela teoria linear como pela teoria de Stokes de quinta ordem, geraram ondas lineares e não-lineares, respetivamente. A título de conclusão, os autores comprovaram que os resultados numéricos possuíam boa concordância com os teóricos para ondas de pequena amplitude.

Silva et al. (2010) utilizaram o ANSYS® CFX® para a realização de simulações computacionais de geração e propagação de ondas monocromáticas. Como tal, para a geração de ondas, os autores usaram um mecanismo do tipo *flap*. Nessa investigação, avaliaram a influência dos esquemas de discretização temporal e espacial, do passo de tempo e diferentes malhas na elevação da superfície livre. Comparativamente com a teoria de Stokes de segunda ordem, concluíram que: (1) o esquema *high order* e *second order backward Euler* para discretização espacial e temporal, respetivamente, apresentavam menor índice de erro; (2) passos de tempo elevados apresentavam maior amortecimento da superfície livre; (3) as malhas refinadas na direção vertical e horizontal ostentavam melhores resultados.

Mendonça et al. (2012) investigaram também um recife multifuncional, a ser implementado na praia da Leirosa, com recurso ao modelo numérico COULWAVE. Nessa investigação, usaram duas geometrias, que diferiam no ângulo do recife (66° e 45°), com o intuito de analisar o seu desempenho na proteção costeira e nas condições de surfabilidade. Os autores concluíram que os vetores da velocidade perto da linha costeira convergiam indicando assim, numa análise preliminar, a sedimentação nessa zona, que conseqüentemente aumentava a proteção costeira e melhorava as condições para a prática

do surf. Adicionalmente, constataram que as geometrias adotadas promoviam longas linhas de rebentação com alturas elevadas e ângulos de quebra tanto para surfistas principiantes como para surfistas avançados/profissionais.

Paralelamente a estudos de ondas regulares, Elangovan (2011) realizou uma investigação de ondas irregulares, utilizando o ANSYS® CFX®. Novamente, o mecanismo de geração utilizado foi um *wavemaker* do tipo *flap*. Nesse estudo, realizou simulações com diferentes inclinações na zona da praia. Verificou então que, para inclinações mais pequenas, o amortecimento da onda era feito de forma gradual ocorrendo rebentação, o que evitava a reflexão da mesma. Por outro lado, em inclinações mais elevadas o amortecimento era mais brusco.

No seguimento do estudo de ondas lineares, Finnegan & Goggins (2012) utilizaram o ANSYS® CFX® para simulações computacionais, sendo uma vez mais o *wavemaker* do tipo *flap* o mecanismo de geração. Nas suas investigações realizaram estudos da inclinação da praia e da otimização da altura do domínio. Os autores concluíram que a inclinação de 1:5 correspondia ao melhor amortecimento da onda e a altura do domínio deveria ser quatro/três vezes maior que a profundidade de água. Paralelamente estudaram o efeito da turbulência através do modelo κ - ε , concluindo que a elevação da superfície livre não diferia do modelo laminar. Os resultados obtidos por Finnegan & Goggins (2012) foram comparados com a teoria linear mostrando uma boa aproximação.

Um estudo comparativo entre simulações em CFD dos *wavemakers* do tipo pistão e *flap*, e resultados experimentais, foi realizado por Anbarsooz et al. (2013). No seu trabalho efetuaram ensaios experimentais num canal de ondas de secção retangular com um mecanismo do tipo *flap* de forma a validar os resultados numéricos obtidos por esse mecanismo. Por outro lado, os resultados computacionais do mecanismo do tipo pistão foram comparados com resultados obtidos por Ursell et al. (1960), através da via experimental. Concluíram então que ondas com pequena declividade apresentavam resultados favoráveis em relação aos valores experimentais e teóricos, para ambos os casos. Constataram ainda que, para ondas com grande declividade, os resultados numéricos e experimentais produziam alturas de onda 10% inferiores às da via analítica.

Aguiar et al. (2014) estudaram um recife artificial com recurso aos modelos numéricos REFDIF e COULWAVE, e através de ensaios experimentais. Na sua investigação, calcularam a altura significativa na secção central do recife por forma a estudar

o desempenho da estrutura. Os autores concluíram que o recife cumpria o objetivo para o qual foi projetado, ou seja, este amplificava as ondas incidentes. Adicionalmente, constataram que os modelos numéricos apresentavam resultados satisfatórios em relação aos experimentais, apenas com diferenças relativas percentuais mínimas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são enunciados os princípios que governam as características das ondas gravitacionais de superfície, que se propagam do alto-mar para a costa.

Numa primeira fase serão abordadas as teorias que sustentam a propagação da onda, no que diz respeito às ondas de pequena amplitude e finitas. Para o estudo mais detalhado sobre o tema, recomenda-se a leitura de Ursell (1953), Sorensen (2006) e Dalrymple & Dean (1984).

Posteriormente será abordada a teoria que sustenta a criação de ondas em tanques, sejam estes experimentais ou numéricos. Para um estudo mais aprofundado sobre esta temática, sugere-se a leitura de Dalrymple & Dean (1984) e Ursell et al. (1960).

Também será apresentado o parâmetro utilizado para avaliar o recife artificial, bem como o modelo adotado no ANSYS® CFX® para o escoamento de duas fases (fluidos).

2.1. Teoria linear da onda (Teoria de Airy)

A teoria linear da onda é aplicável se a altura da onda for pequena quando comparada com o seu comprimento e profundidade da água. Este pressuposto permite a linearização das condições de fronteira da superfície livre (Sorensen, 2006).

As equações que regem as características da onda, como a elevação da superfície livre e a cinemática das partículas de água, são derivadas a partir da função potencial de velocidade. Por sua vez, o potencial de velocidade pode ser descrito a partir da linearização das equações que definem as condições de fronteira da superfície livre, e da condição de fronteira do fundo. Bastará por fim, de maneira a definir o potencial, ter presente os pressupostos de que o fluido é considerado incompressível e o escoamento irrotacional. De facto, os efeitos viscosos estão normalmente concentrados em finas camadas perto da interface ar-água e do fundo (Dalrymple & Dean, 1984).

2.1.1. Potencial de velocidade

Em muitos problemas de engenharia é necessário encontrar soluções da equação diferencial que governa o caso em estudo, que satisfazem certas condições nos pontos de fronteira de um domínio considerado (seja intervalo, semirreta ou reta). Tais problemas são conhecidos por problemas de valores de fronteira (PVFs), sendo a Figura 2.1 exemplo deste.

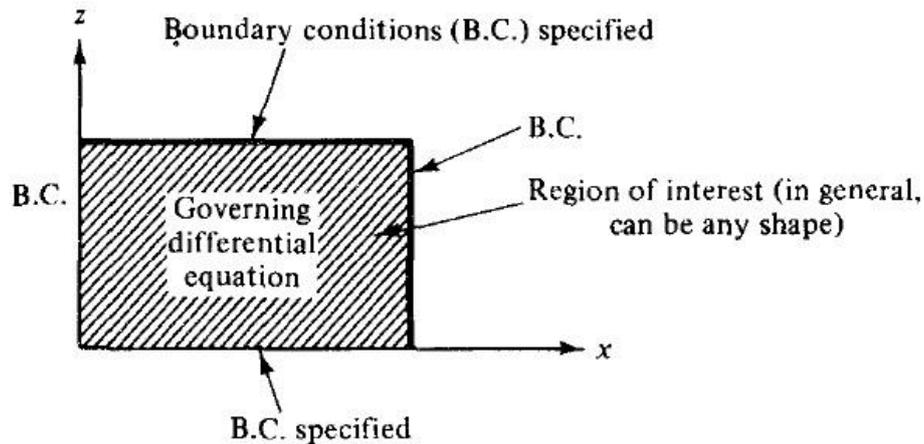


Figura 2.1. Estrutura de um problema de valor de fronteira para duas dimensões. Dalrymple & Dean (1984)

A equação diferencial ordinária, no caso da onda, é tal que o potencial de velocidade, a partir do pressuposto da secção 2.1 (fluido incompressível e escoamento irrotacional), satisfaz a equação de continuidade.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$

Por outro lado, o divergente de um gradiente leva à equação de Laplace para um escoamento bidimensional, que se mantém ao longo do domínio do fluido.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2)$$

Na expressão (2.2), o x e z representam a coordenada horizontal e vertical respetivamente.

A Figura 2.2 representa uma onda progressiva monocromática que se propaga com celeridade C em profundidade d , sendo esta representativa do domínio a que a equação diferencial ordinária rege (expressão (2.2)). O eixo dos x representa o nível de água, u e w representam a componente horizontal e vertical da velocidade da partícula de água, respetivamente e ε e ζ representam as coordenadas horizontal e vertical da partícula de água a cada instante, respetivamente. De notar, que estas coordenadas estão referenciadas ao

centro da orbital que a partícula descreve. L representa o comprimento da onda, H a sua altura e η representa o perfil da superfície livre da onda, ou elevação da superfície livre. Esta é função do espaço e tempo. Os vetores na crista, na cava, e no nível de água representam as direções do movimento da partícula de água na superfície (Sorensen, 2006).

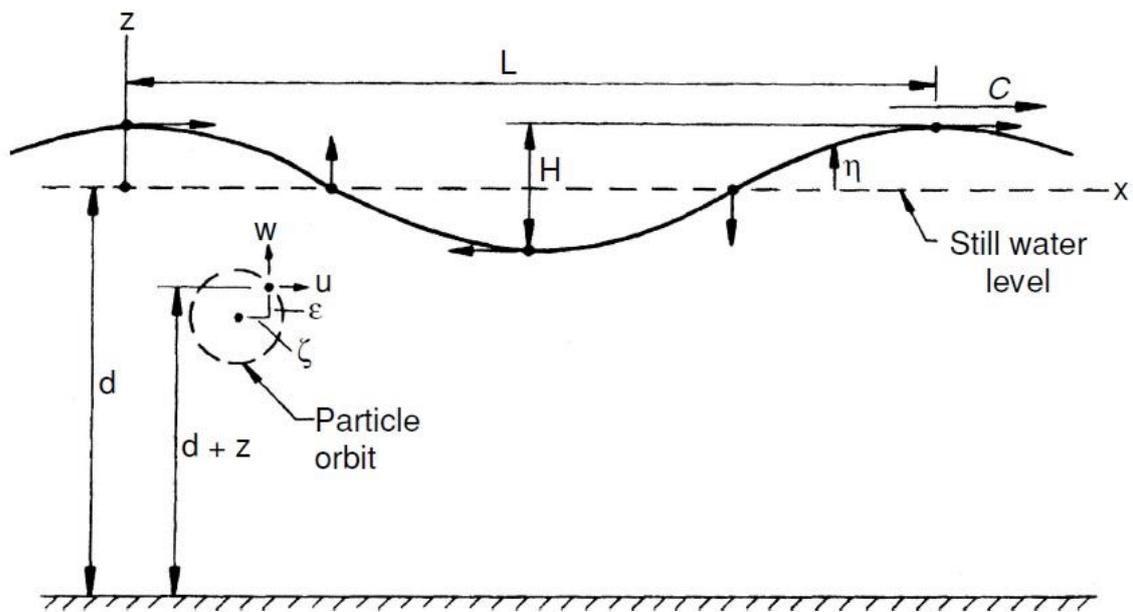


Figura 2.2. Onda progressiva bidimensional. (Sorensen, 2006)

Num fundo horizontal, não havendo velocidade vertical da partícula, a condição de fronteira é dada por:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 ; z = -d \quad (2.3)$$

Na superfície livre existem duas condições de fronteira: cinemática e dinâmica. A condição de fronteira cinemática relaciona a componente vertical da velocidade da partícula de água na superfície com a posição da superfície livre (expressão (2.4)). Quanto à condição de fronteira dinâmica, é obtida a partir da equação de Bernoulli (expressão (2.5)), em que g representa a aceleração gravítica.

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} ; z = \eta \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0; z = \eta \quad (2.5)$$

Posteriormente, a linearização das expressões (2.4) e (2.5) e aplicando ao nível de água, permite transformar as condições de fronteira da superfície livre nas expressões (2.6) e (2.7).

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t}; z = 0 \quad (2.6)$$

$$g\eta + \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0; z = 0 \quad (2.7)$$

Assim, segundo Sorensen (2006), ao empregar as expressões (2.2), (2.3) e (2.7), obtemos a forma mais usual do potencial de velocidade (expressão (2.8)).

$$\phi = \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.8)$$

Na expressão (2.8), k representa o número de onda e σ representa a frequência angular da onda. Visto que k e σ dependem do período de onda e da profundidade (secção 2.1.1.2.), se conhecermos estes dois parâmetros, juntamente com a altura da onda, é possível definir totalmente a onda, e calcular as suas características.

2.1.1.1. Elevação da superfície livre da onda

Na teoria linear, a superfície livre da onda produz um perfil sinusoidal. Ao aplicar o potencial de velocidade à expressão (2.7), este perfil é dado por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

A expressão (2.9) é aplicável para pequenas amplitudes de onda. À medida que a amplitude aumenta, o perfil da superfície livre deixa de ser simétrico verticalmente. (Sorensen, 2006).

2.1.1.2. Número de onda e frequência angular da onda

Com recurso à onda representada na Figura 2.2, o número de onda (k) pode ser determinado com base na expressão (2.10).

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.10)$$

A frequência angular (σ) pode ser determinada com recurso à expressão (2.11) ou (2.12). A primeira expressão é a forma mais usual e relaciona esta com o período de onda, T . A expressão (2.12) obtém-se ao combinar as condições de fronteira da superfície livre, substituindo na equação o potencial de velocidade (expressão (2.8)) e posteriormente derivar (Sorensen, 2006). Nesta, a frequência angular depende do número de onda e da profundidade da água.

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.11)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kd} \quad (2.12)$$

As expressões (2.10), (2.11) e (2.12) são válidas para a teoria de Stokes de segunda ordem (secção 2.2).

2.1.1.3. Campo de velocidades

A componente horizontal e vertical da velocidade de partícula deriva do potencial de velocidade (expressões (2.13) e (2.14)), constituindo, assim, condição necessária e suficiente para o escoamento do fluido (neste caso incompressível e bidimensional) ser irrotacional (Oliveira & Lopes, 2012).

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{T} \left[\frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \right] \cos(kx - \sigma t) \quad (2.13)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \left[\frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \right] \sin(kx - \sigma t) \quad (2.14)$$

Nas expressões (2.13) e (2.14), cada componente do campo de velocidades pode ser dividida em três partes. O termo $\frac{\pi H}{T}$ representa a velocidade superficial da partícula de água. O termo em parenteses reto traduz a variação da velocidade da partícula sobre a coluna vertical de água numa dada posição, traduzindo ainda a variação da velocidade da partícula causada pela onda, ao propagar-se de águas profundas para a costa. O último representa o termo de fase dependente da posição da onda e do tempo (Sorensen, 2006).

2.2. Teoria de Stokes de segunda ordem

A teoria de Stokes de segunda ordem é uma teoria não linear para a modelação de ondas regulares de amplitudes finitas, que é aplicável a profundidades elevadas e

intermédias. Com esse intuito, é necessário que o cociente entre a altura de onda e a profundidade $\left(\frac{H}{d}\right)$ seja pequeno (Sorensen, 2006).

A teoria de Stokes concebe expressões das características da onda, como o campo de velocidade das partículas, elevação da superfície livre, entre outras. Estas são formuladas pelo método de perturbação, que consiste em apresentar soluções em séries de expansão da declividade da onda $\left(\frac{H}{L}\right)$, parâmetro de perturbação (Maâtoug & Ayadi, 2016).

Existem ordens superiores da teoria de Stokes, sendo a segunda e quinta ordens as mais usuais em aplicações de engenharia. Neste trabalho a segunda ordem é utilizada pois, comparativamente à quinta ordem, implica uma menor complexidade de aplicação.

2.2.1. Potencial de velocidade

Na teoria de Stokes de segunda ordem, o potencial de velocidade da onda é obtido pela expressão (2.15).

$$\phi = \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3\pi CH}{16} \left(\frac{H}{L}\right) \frac{\cos 2k(d+z)}{\sinh^4(kd)} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.15)$$

Ao comparar as expressões (2.8) e (2.15), nota-se que o primeiro termo da última traduz o potencial de velocidade da teoria linear da onda. Por outro lado, o segundo termo da expressão (2.15) tem uma magnitude que é dependente da declividade da onda. De realçar que este termo tem o dobro da frequência do primeiro.

2.2.1.1. Elevação da superfície livre da onda

O perfil da superfície livre da onda ou elevação da superfície livre, consoante a teoria de Stokes de segunda ordem, é dado por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{\pi H}{8} \left(\frac{H}{L}\right) \frac{\cosh kd}{\sinh^3(kd)} (2 + \cosh 2kd) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.16)$$

Uma análise idêntica à expressão (2.15) pode ser feita relativamente à expressão (2.16). O efeito produzido pelo facto do termo de segunda ordem possuir o dobro da frequência do termo de primeira, é de que os dois termos estão em fase na crista da onda e opõem-se na cava desta. Assim, o perfil da superfície livre é verticalmente assimétrico, ou seja, a crista tornar-se-á mais pontiaguda e a cava mais achatada com o aumento da declividade da onda (Sorensen, 2006).

2.2.1.2. Campo de velocidades

À semelhança da teoria linear, o campo de velocidades deriva do potencial que, para um escoamento bidimensional, divide-se em componente horizontal e vertical. De acordo com Dalrymple & Dean (1984), estas componentes são definidas pelas equações (2.17) e (2.18).

$$v = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{H g k}{2 \sigma} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cos(ky - \sigma t) + \frac{3 H^2 \sigma k}{16} \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \cos 2(ky - \sigma t) \quad (2.17)$$

$$w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{H g k}{2 \sigma} \frac{\sinh k(d-z)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3 H^2 \sigma k}{16} \frac{\sinh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.18)$$

Os termos de segunda ordem das expressões (2.17) e (2.18) também têm o dobro da frequência dos termos de primeira ordem, originando assim assimetria na velocidade da partícula ao completar uma orbital. A presença do termo de segunda ordem aumenta a velocidade, que varia ao longo da onda devido ao termo de fase ($\sin 2(kx - \sigma t)$) (Dalrymple & Dean, 1984). A componente horizontal da velocidade é máxima na crista e cava da onda (mas com sentidos opostos) e, nula no nível médio da água. A componente vertical é o inverso (Sorensen, 2006).

2.2.2. Confirmação da utilização da teoria de Stokes de segunda ordem

No início do capítulo, refere-se que a teoria de Stokes deve ser usada para profundidades elevadas e intermédias. Dalrymple & Dean (1984) sugerem que, para profundidades pequenas de água, a teoria de Stokes não constitui uma boa aproximação, pelo menos a de segunda ordem. De forma a confirmar se a teoria se ajusta ao caso em estudo, Ursell (1953) desenvolveu um critério, que se intitula de parâmetro de Ursell. Este critério, segundo Lambert (2012), indica também a não linearidade de grandes ondas gravitacionais de superfície.

$$\frac{L^2 H}{d^3} < \frac{8\pi^3}{3} \quad (2.19)$$

A expressão (2.19) representa uma forma simplificada do parâmetro de Ursell (Dalrymple & Dean, 1984). Nesta dissertação, os parâmetros da onda de projeto cumprem o parâmetro de Ursell.

2.3. Teoria wavemaker

Em laboratórios, são realizados em tanques estudos sobre estruturas submersas, perfis de praias e outros fenômenos relacionados. Estes são utilizados para simular a propagação de ondas, sendo caracterizados por serem longos e possuírem, numa das extremidades, um mecanismo de criação de ondas, *wavemaker*.

Qualquer corpo dotado de movimento num fluido com superfície livre é capaz de produzir ondas. Assim existe uma variedade de *wavemakers* nos quais o pistão é dos mais utilizados. O movimento periódico de um pistão ou de uma parede normal à superfície livre, constitui um método simples para a criação de ondas.

Tanto o movimento da onda induzido pelo *wavemaker*, como a potência requerida por este, são determinados, razoavelmente, pela teoria linear da onda (Dalrymple & Dean, 1984).

De forma a compreender melhor este conceito, Galvin (1964) desenvolveu uma teoria simplificada para a geração de ondas a partir do *wavemaker*, em pequenas profundidades, na qual a água deslocada pelo *wavemaker* deve ser igual ao volume debaixo da crista da onda. A Figura 2.3 ilustra este fenômeno, onde S representa a amplitude de oscilação do pistão (*stroke*).

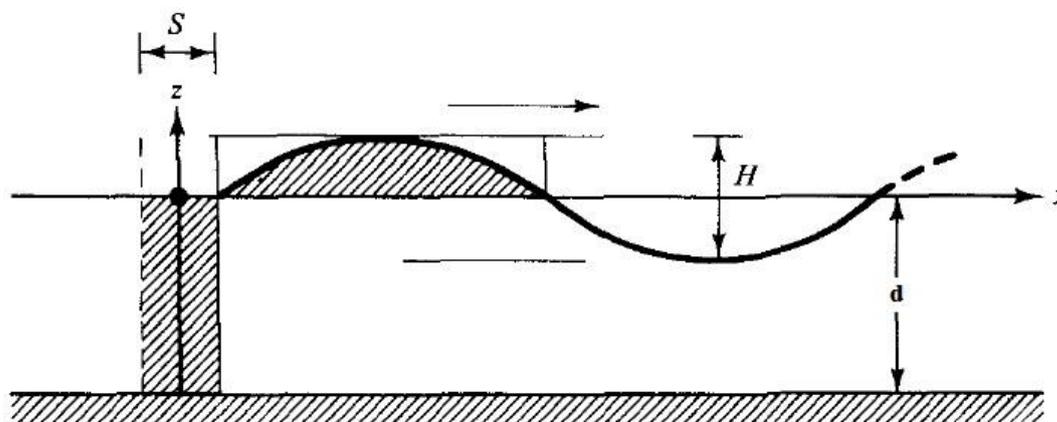


Figura 2.3. Teoria simplificada de Galvin para *wavemaker* do tipo pistão. Adaptado de Dalrymple & Dean (1984).

A teoria completa *wavemaker* é deduzida do mesmo problema de valor de fronteira da teoria linear. Assim, de acordo Dalrymple & Dean (1984), a deslocamento horizontal do *wavemaker* tipo pistão é descrito pela expressão (2.20), em que σ é a frequência angular da onda.

$$y = \frac{S}{2} \sin \sigma t \quad (2.20)$$

A análise da expressão (2.20), mostra que é necessário conhecer o *stroke* do *wavemaker* para obter o deslocamento imposto por este (partindo do pressuposto que o período da onda, altura da onda e profundidade são conhecidos). A expressão (2.21) constitui assim o rácio entre a altura de onda e o *stroke*, tornando-se útil para a determinação do último.

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{\text{Pistão}} = \frac{2(\cos(2kd - 1))}{\sinh 2kd + 2kd} \quad (2.21)$$

2.4. Altura significativa da onda

A altura significativa (H_S) da onda corresponde à média do terço de ondas mais elevadas do registo. Esta é usada para caracterizar a amplitude das ondas de um estado do mar, sendo o seu valor aproximadamente igual à altura de onda observada visualmente (Martins, 2012).

A Figura 2.4 representa um registo da variação da superfície livre com o tempo. Ao usar o método zero ascendente é possível determinar as alturas de cada onda individual bem como o seu período. Este método consiste em obter os pontos de intersecção da superfície livre com o nível médio da água, quando a onda está em ascensão, ou seja, quando se forma a crista (Melo et al., 2006). Dois pontos sucessivos deste método formam assim uma onda.

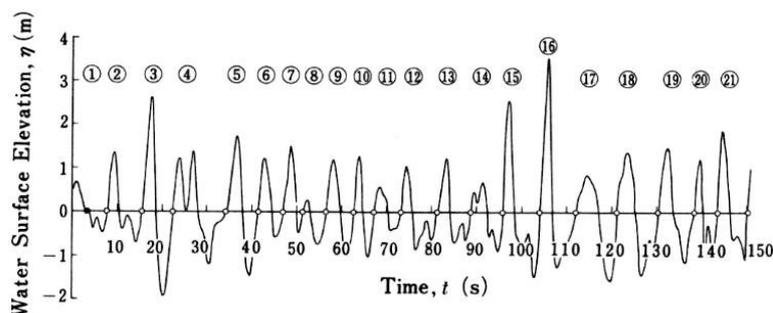


Figura 2.4. Exemplo de um registo de ondas irregulares. (Goda, 1985) adaptado por Sancho (2002).

As alturas (H), obtidas pelo método zero ascendente, de um estado de mar completamente desenvolvido, considerando um elevado número de ondas de registo, obedece à distribuição de Rayleigh (Sancho, 2012). Deste modo, através da função densidade de probabilidade de Rayleigh (expressão (2.22)) é possível relacionar a altura significativa com a raiz quadrada da média dos quadrados das alturas de onda de um registo (H_{rms}) (expressão (2.23)).

$$f(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp \left[- \left(\frac{H}{H_{rms}} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

$$H_S = H_1 = \sqrt{2} H_{rms} \quad (2.23)$$

Na presente dissertação o cálculo da altura significativa será realizado com recurso a um programa desenvolvido em MATLAB[®] por Neumeier, que faz uso dos métodos descritos.

2.5. Modelo Homogéneo

O ANSYS[®] CFX[®] dispõe de dois modelos para simulação computacional de escoamento com dois ou mais fluidos: (i) modelo *Eulerian-Eularian* e (ii) modelo *Lagrangian Particle Tracking*.

O modelo *Eulerian-Eularian*, por sua vez é constituído pelo modelo homogéneo e heterogéneo, sendo o primeiro utilizado nesta dissertação.

Com a aplicação do modelo homogéneo o campo de velocidade, temperatura e turbulência são partilhados entre todos os fluidos. É também assumido, para um processo de transporte, que as quantidades transportadas, à exceção da fração volúmica, são idênticas para todas as fases (ANSYS[®], 2013) (expressão (2.24)).

$$\varphi_\alpha = \varphi ; 1 \leq \alpha \leq N_p \quad (2.24)$$

Na expressão (2.24), φ representa uma variável escalar geral, α representa uma fase dos fluidos e N_p representa o número total de fases.

Assim, os campos partilhados são solucionados a partir de uma única equação diferencial de transporte (expressão (2.25)), que é derivada do somatório das equações diferenciais de transporte de cada fase (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla(\rho U\varphi - \Gamma\nabla\varphi) = S \quad (2.25)$$

Onde:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha}\rho_{\alpha} \quad (2.26)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha} \quad (2.27)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_{\alpha}\Gamma_{\alpha} \quad (2.28)$$

Na expressão (2.25), ρ representa a massa volúmica do fluido, U representa o vetor velocidade do escoamento, Γ representa o coeficiente difusivo e S representa o termo de fonte.

A análise à expressão (2.25) permite constatar que $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi)$ representa a taxa de variação da variável escalar no elemento de fluido, $\nabla(\rho U\varphi)$ representa o fluxo líquido da variável através do elemento de fluido, $\nabla(\Gamma\nabla\varphi)$ representa taxa de variação da variável por difusão e S representa a taxa de variação da variável devido a fontes.

Nas expressões (2.26), (2.27) e (2.28), r_{α} representa a fração volúmica de cada fase.

3. CASO DE ESTUDO

Na presente dissertação, o objeto de estudo assenta na análise do escoamento de superfície livre para duas situações: (A) sem recife artificial e (B) com recife artificial (estrutura geradora de ondas). Os resultados produzidos pela situação B servirão para a comparação com os valores experimentais e computacionais, apresentados em Aguiar et al. (2014). A Figura 3.1 apresenta o modelo à escala 1/15 do recife artificial, contruído no tanque de ondas regulares e irregulares no Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH, Caju, Brasil.



Figura 3.1. Vista em perspectiva do recife artificial, instalado no tanque de ondas do INPH. (Aguiar et al., 2014).

3.1. Simplificação

Por forma a reduzir os custos computacionais admite-se escoamento bidimensional, para todas as simulações. Segundo Silva et al. (2010), simulações em domínio bidimensional para geração e propagação de ondas, apresentam bons resultados em relação à teoria. No entanto, o CFX[®] não possui um *solver* para domínios bidimensionais, o que conduz assim à utilização de uma espessura bastante reduzida. O valor utilizado é de 0,01 metros.

3.2. Onda de projeto

Aguiar *et al.* (2014) consideraram a onda de projeto como sendo a onda mais frequente na Praia Campista (Macaé, Brasil), com base numa análise estatística de ondas medidas nessa região. O recife artificial foi assim dimensionado com o intuito de promover a amplificação dessa mesma onda de incidência frontal. Na Tabela 3.1 é apresentada a altura significativa (H) e o período da onda (T) de projeto, bem como a profundidade de água (d). De realçar que todas as dimensões (recife, tanque e onda) estão à escala utilizada no modelo experimental e numérico por Aguiar *et al.* (2014).

Tabela 3.1. Parâmetros da onda de projeto.

H (m)	T (s)	d (m)
0,0667	1,55	0,533

Posteriormente, com recurso às expressões (2.10), (2.11) e (2.12) foram calculados os parâmetros em falta, com vista à caracterização da onda (Tabela 3.2). σ representa a frequência angular, k representa o número de onda e L representa o comprimento desta.

Tabela 3.2. Parâmetros calculados para a onda de projeto.

σ (rad s ⁻¹)	k (rad m ⁻¹)	L (m)
4,0537	2,083	3,0164

3.3. Geometria

3.3.1. Situação A

Na situação de ausência de recife artificial, o domínio criado no ANSYS® DesingModeler encontra-se representado na Figura 3.2. O declive do fundo, de acordo Aguiar *et al.* (2014), equivale ao declive médio do leito marinho da Praia Campista. Os trechos de declives 1:50, 1:30 e 1:17, juntamente com o trecho horizontal de menor dimensão representam a praia, enquanto o outro trecho horizontal representa a zona mais afastada da

costa. Foi adotada a altura de 2,75 metros, pois segundo Clauss et al. (2005) e Finnegan et al. (2012) esta situa-se no intervalo em que o topo deixa de influenciar o escoamento. A geometria foi dividida em nove blocos para auxiliar na criação da malha e posteriormente na implementação do pistão.



Figura 3.2. Geometria da situação A (Dimensões em metros).

3.3.2. Situação B

As dimensões do recife artificial, usadas na presente dissertação, são dadas por Aguiar et al. (2014), apresentadas na Figura 3.3 (esta figura tem uma rotação de 180° em relação à Figura 3.4). O recife situa-se no trecho horizontal de maior dimensão.

De modo a conseguir desenvolver simulações bidimensionais, é usada a vista de frente do recife (Figura 3.3). De salientar que não só o fundo mas também a altura do domínio, nesta situação, são equivalentes aos utilizados na secção 3.3.1 (Figura 3.4).

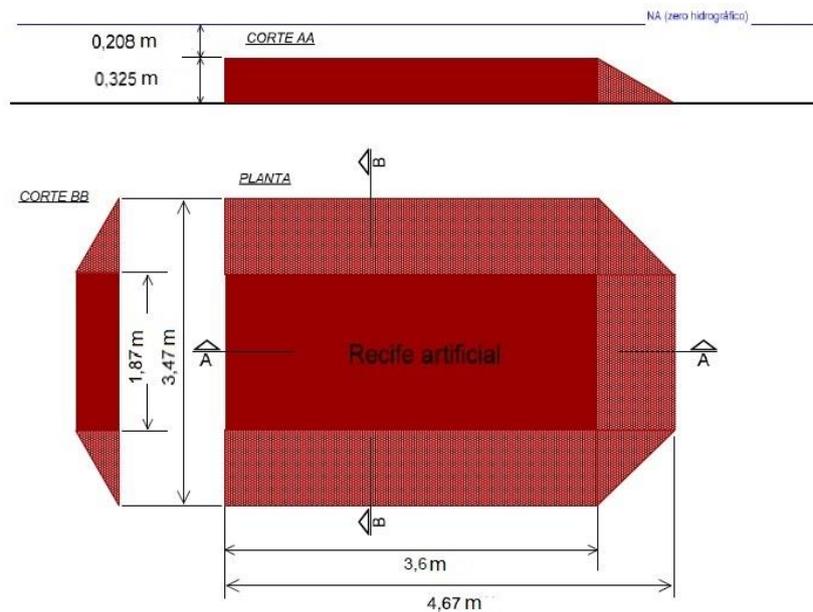


Figura 3.3. Planta e cortes do recife artificial. Adaptado de Aguiar et al. (2014).

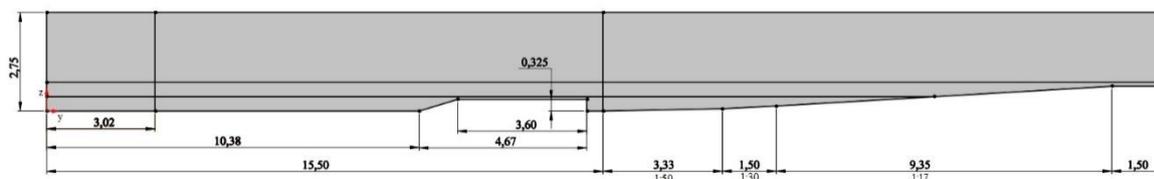


Figura 3.4. Geometria da situação B (Dimensões em metros).

3.4. Malha de cálculo

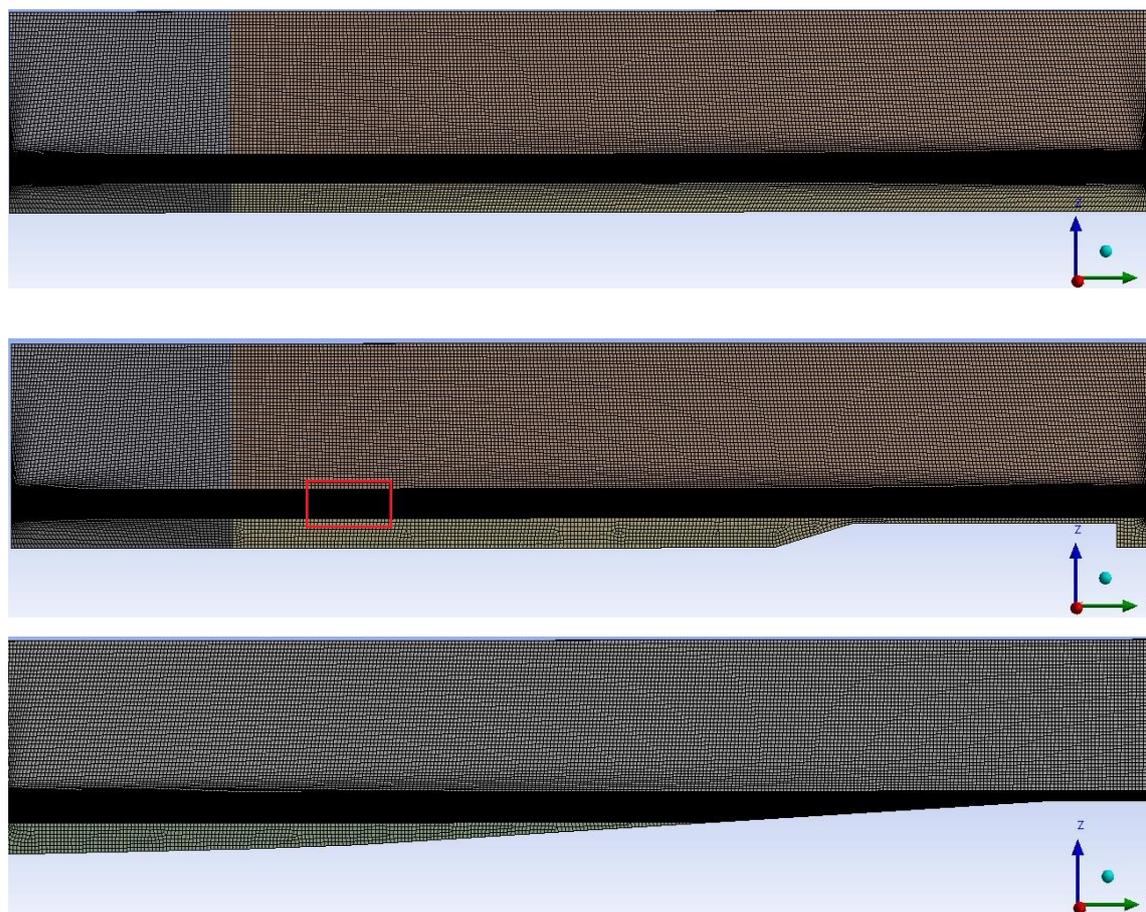
A criação da malha foi realizada através da ferramenta ANSYS® Meshing. Nesta ferramenta é utilizado o método *sweep*, que pressupõe a divisão do domínio de cálculo em blocos. Posteriormente, esses blocos são divididos no tipo de elemento à escolha, neste caso quadriláteros, com a atribuição da dimensão máxima da face do elemento, dando assim origem a uma malha estruturada (Figura 3.5(a)).

Uma vez que o pretendido é estudar a posição da superfície livre em cada instante, a malha precisa de ser refinada onde esta oscila. Para tal, foi aplicado o *edge sizing* aos blocos intermédios, especificando o número de divisões. Havn (2011) indica certos parâmetros que devem ser respeitados nessa zona (Tabela 3.3).

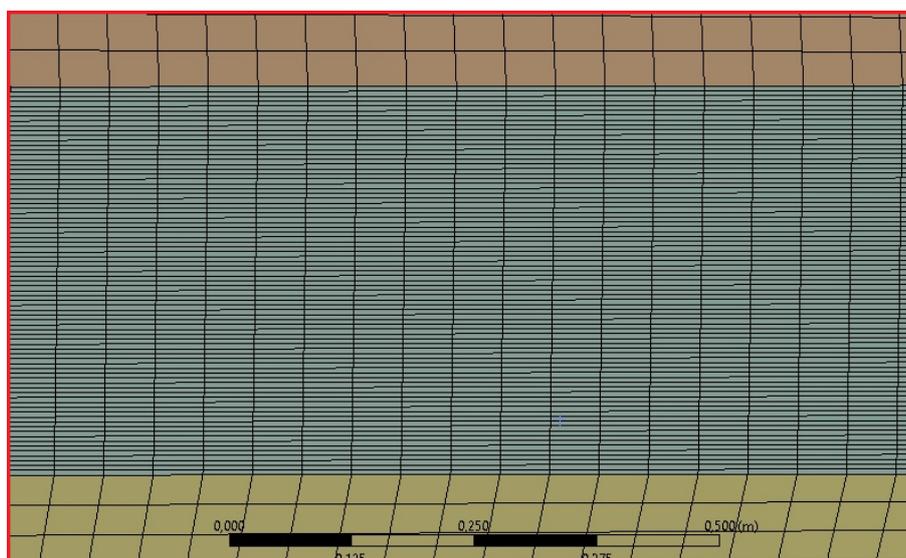
Tabela 3.3. Parâmetros de malha

Parâmetro	Valor
Elementos por comprimento de onda	$\frac{L}{\Delta y} \geq 100$
Elementos por altura de onda	$\frac{H}{\Delta z_{min}} > 10$
Aspect ratio	$\frac{\Delta y}{\Delta z_{min}} < 10$

Foram construídas três malhas diferentes, apresentadas nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, com o objetivo de estudar a dependência dos resultados relativamente à malha. A malha 3) e 2) foram geradas por forma a respeitar os parâmetros indicados na Tabela 3.3 nos blocos intermédios. A malha 2) distingue-se da malha 3) na zona da interface do ar, onde é mais grosseira relativamente à última.

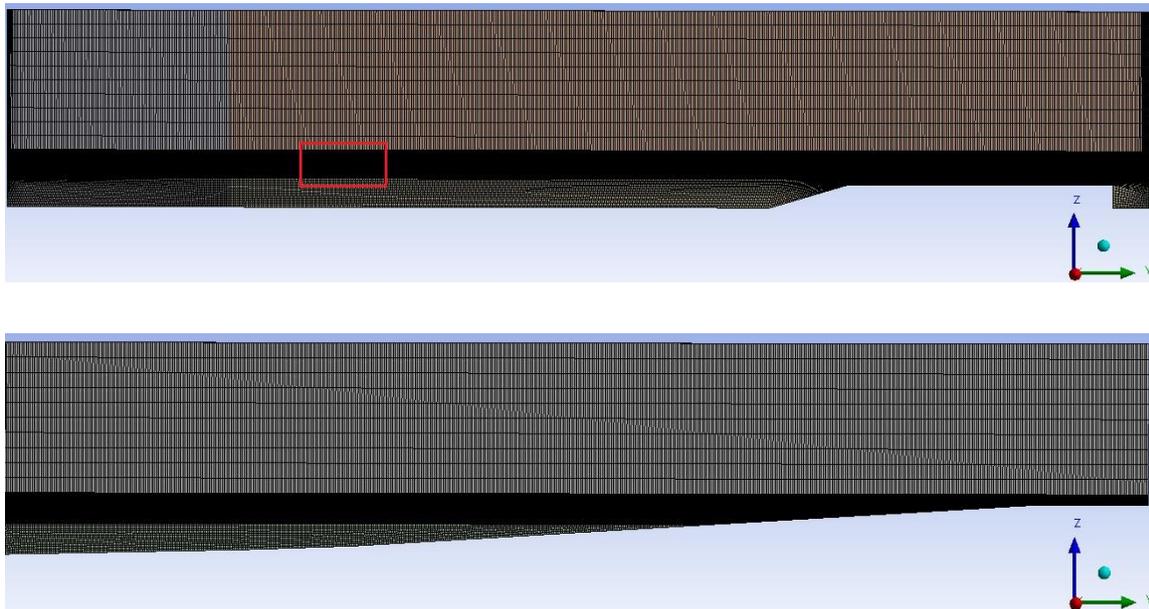


(a)

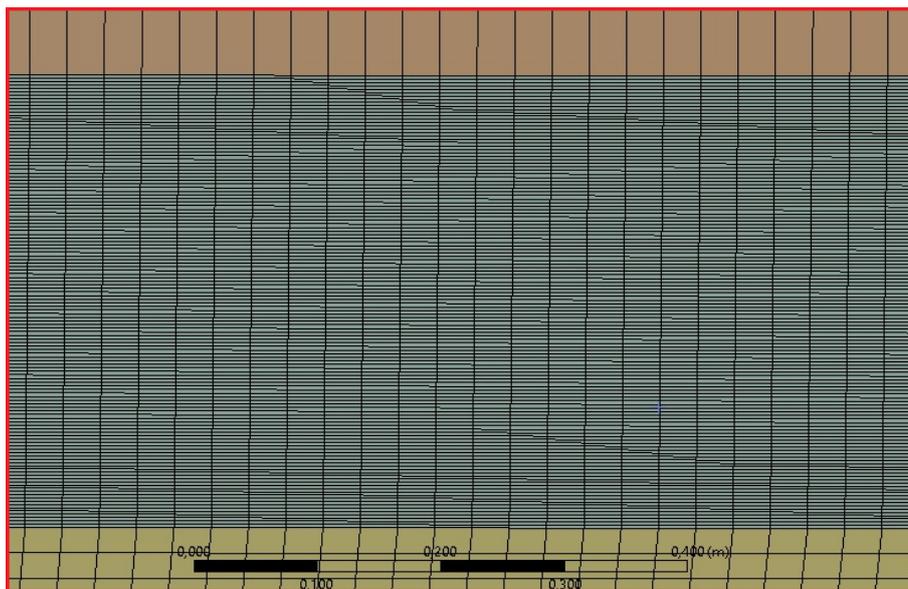


(b)

Figura 3.5. Malha 1) com 82636 elementos (Situação A) e com 82704 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.

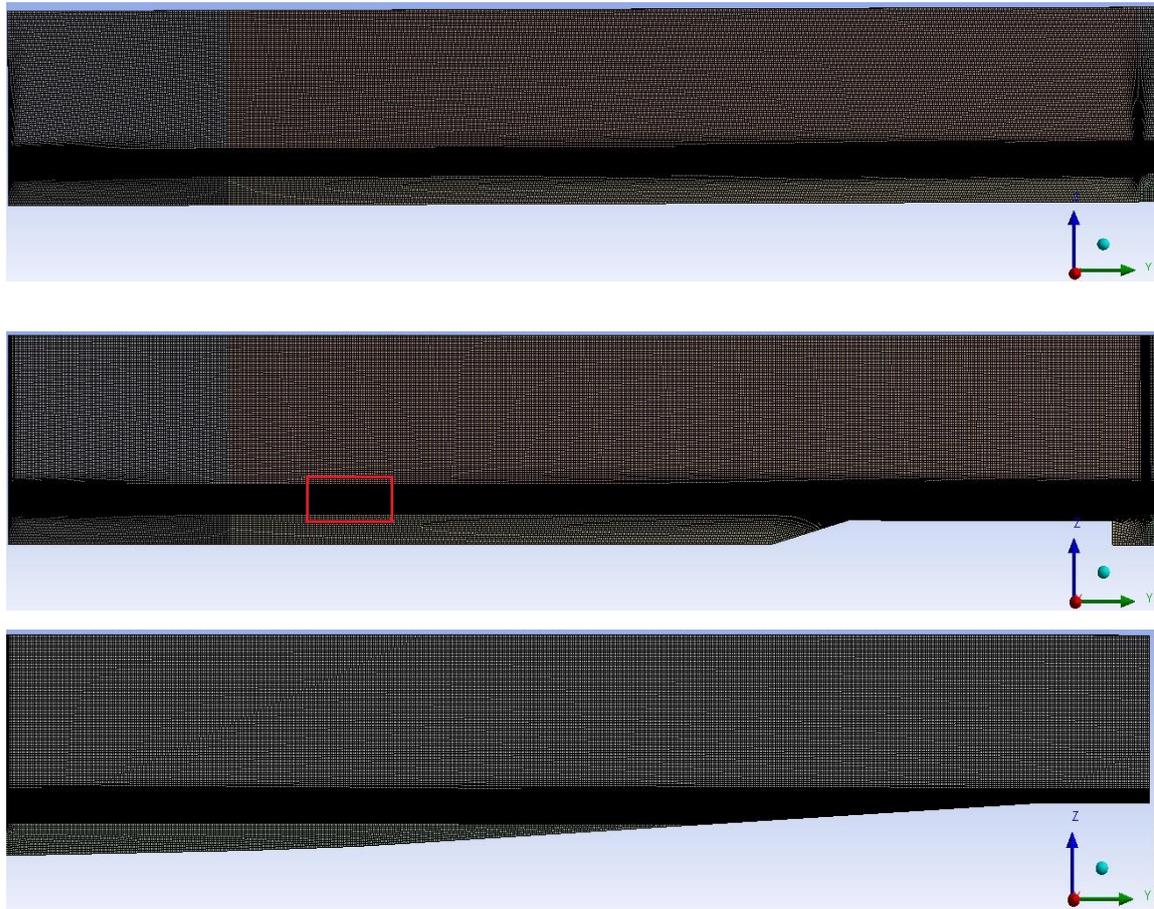


(a)

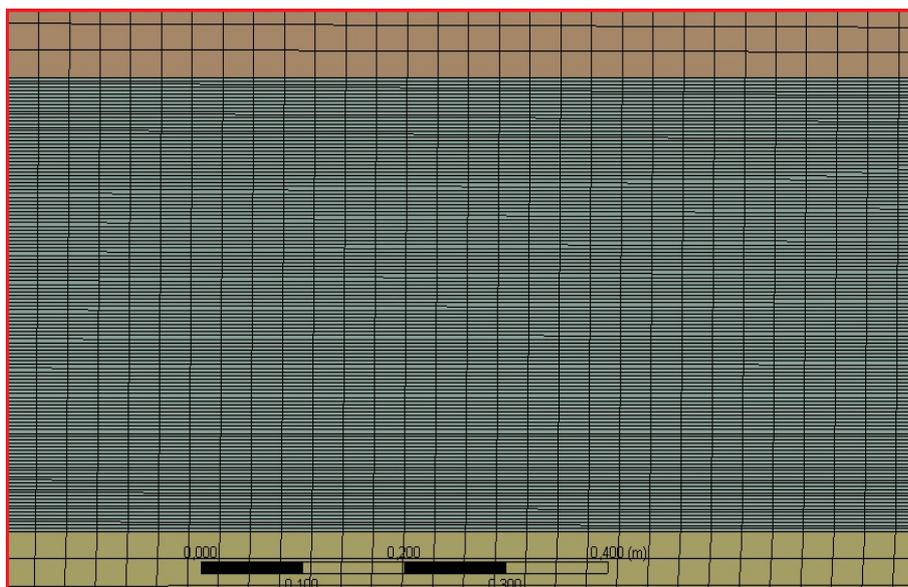


(b)

Figura 3.6. Malha 2) com 158296 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.



(a)



(b)

Figura 3.7. Malha 3) com 220100 elementos (Situação A) e com 218146 elementos (Situação B). (a) vistas da totalidade do domínio e (b) vista ao pormenor da malha.

3.5. Situação A – Escoamento sem estrutura geradora de ondas

Para a situação A, foram testados dois métodos para a criação de ondas: (1) com base nas expressões (2.16), (2.17) e (2.18) da teoria de Stokes de segunda ordem (Stokes Sem Recife - SSR) e (2) através do movimento do pistão desenvolvido na teoria *wavemaker* (Pistão Sem Recife - PSR). O objetivo desta abordagem visa a obtenção do método que produz os resultados mais aproximados à real propagação da onda.

Aqui, foram consideradas condições de escoamento bidimensional, isotérmico e regime transiente. Realizaram-se simulações com a malha 1) e com a malha 3).

3.5.1. Condições de fronteira

Nas condições de fronteira é necessário especificar a fração volúmica de cada fluido (ar e água). Atendendo que o ANSYS® CFX-Pre possui uma ferramenta de criação de expressões, CFX Expression Language (CEL), as frações volúmicas são determinadas a partir das expressões (3.1) e (3.2) para o método (SSR), e das expressões (3.3) e (3.4) para o método (PSR). A função *step* avalia o resultado dentro de parenteses, atribuindo o valor 0 se o resultado for negativo, o valor 1 se o resultado for positivo e o valor 0,5 se o resultado for 0. Assim consoante a cota z , a fração volúmica em cada ponto do domínio é conhecida.

$$\text{Fração volúmica de ar (SSR)} = \text{step}\left(\frac{z - \eta}{1[m]}\right) \quad (3.1)$$

$$\text{Fração volúmica de água (SSR)} = 1 - \text{Fração volúmica de ar (SSR)} \quad (3.2)$$

$$\text{Fração volúmica de ar (PSR)} = \text{step}\left(\frac{z - d}{1[m]}\right) \quad (3.3)$$

$$\text{Fração volúmica de água (PSR)} = 1 - \text{Fração volúmica de ar (PSR)} \quad (3.4)$$

3.5.1.1. Situação A – (SSR)

As condições de fronteira encontram-se representadas na Figura 3.8 e especificadas na Tabela 3.4.

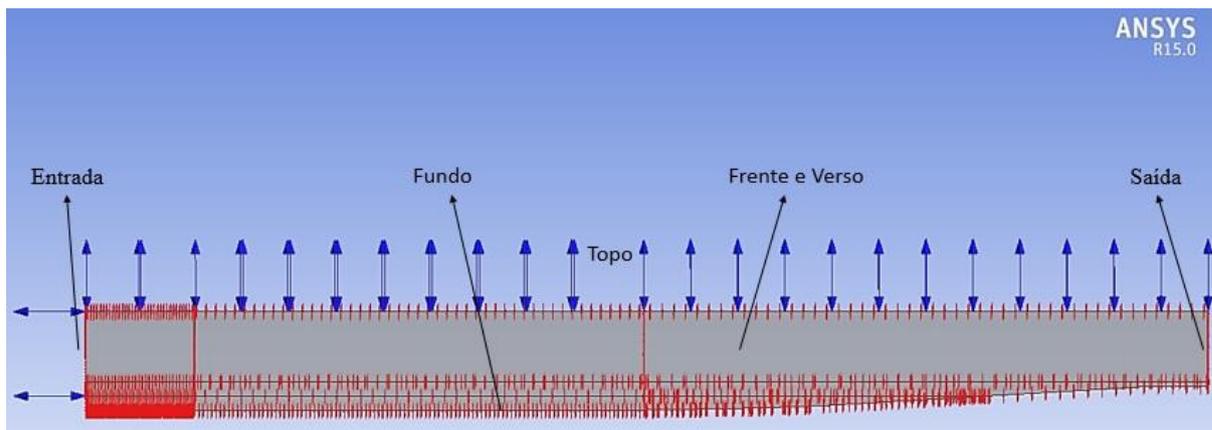


Figura 3.8. Representação das condições de fronteira para a Situação A – (SSR).

Tabela 3.4. Condições de fronteira Situação A – (SSR).

Região	Tipo	Detalhes de Fronteira		Fração volúmica de água	Fração volúmica de ar
Entrada	<i>Opening</i>	<i>Cart. Vel. Components</i>	$u = 0 [m s^{-1}]$ $v = \text{expressão (2.17)}$ $w = \text{expressão (2.18)}$	Expressão (3.2)	Expressão (3.1)
Saída	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	-	-	-
Frente e Verso	<i>Symmetry</i>	-	-	-	-
Topo	<i>Opening</i>	<i>Entrainment</i>	Pressão relativa $0 [Pa]$	0	1
Fundo	<i>Wall</i>	<i>No Slip Wall</i>	-	-	-

3.5.1.2. Situação A – (PSR)

O movimento do pistão resulta na simulação de escoamento com variação de geometria. Deste modo, foi necessário ativar a opção *mesh deformation*, que é uma funcionalidade que permite o movimento de paredes de fronteira e subdomínios, ou seja, uma malha dinâmica. Foi ainda criado um subdomínio para limitar o movimento da malha a

uma pequena parte do domínio total. O subdomínio foi conectado ao resto do domínio pela opção GGI (*General Grid Interface*) tendo este um comprimento igual ao da onda. O topo por sua vez foi dividido em dois uma vez que a opção *opening* não permite o movimento da malha na fronteira. A Figura 3.9 representa as condições de fronteira, e estas estão especificadas na Tabela 3.5.

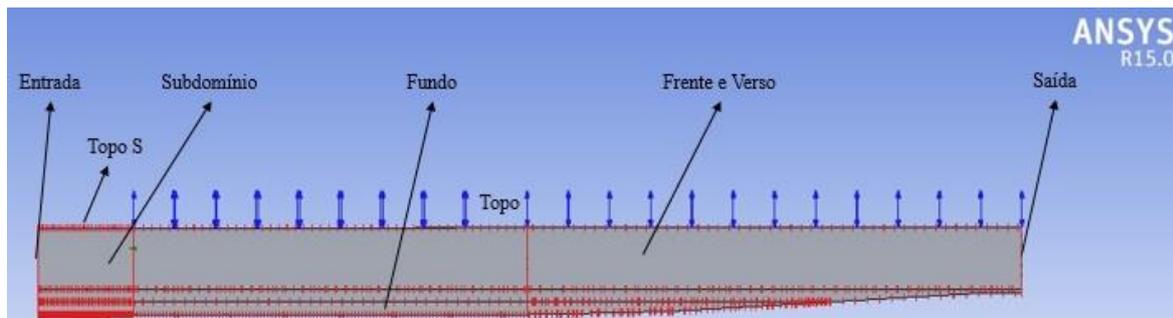


Figura 3.9. Representação das condições de fronteira para a Situação A – (PSR).

Tabela 3.5. Condições de fronteira Situação A – (PSR).

Região	Tipo	Detalhes de Fronteira	Movimento da malha		Fração volúmica de água	Fração volúmica de ar
Entrada	Wall	No Slip Wall	Specified Displacement (Cartesian Components)	$x = 0 [m]$ $y =$ expressão (2.20) $z = 0 [m]$	-	-
Saída	Wall	No Slip Wall	unspecified	-	-	-
Frente e Verso	Symmetry	-	unspecified	-	-	-
Topo	Opening	Entrainment	stationary	Pressão relativa $0 [Pa]$	0	1
Topo S	Wall	No Slip Wall	unspecified	-	-	-
Fundo	Wall	No Slip Wall	unspecified	-	-	-

3.5.2. Condições iniciais

Para que seja possível definir as condições iniciais, o campo de velocidades, a pressão estática e as frações volúmicas de cada fluido têm de ser especificadas (Tabela 3.6 e Tabela 3.7). A pressão estática utilizada na inicialização da simulação, do mesmo modo que na secção 3.5.1., foi criada com recurso ao CEL e, consiste na pressão hidrostática (expressões (3.5) e (3.6)).

$$p_{(1)} = \rho_{\text{água}} \times g \times \text{Fração volúmica de água(SSR)} \times (\eta - z) \quad (3.5)$$

$$p_{(2)} = \rho_{\text{água}} \times g \times \text{Fração volúmica de água(PSR)} \times (d - z) \quad (3.6)$$

As expressões (3.5) e (3.6) são multiplicadas pela fração volúmica da água para definir o campo de pressões apenas nesta fase, isto é, apenas atribuir pressão estática à água.

Tabela 3.6. Condições iniciais Situação A – (SSR).

Propriedade	Valor
Campo de velocidade	$u = 0 [m s^{-1}]$ $v = \text{expressão (2.17)}$ $w = \text{expressão (2.18)}$
Pressão estática	Expressão (3.5)
Fração volúmica de água	Expressão (3.2)
Fração volúmica de ar	Expressão (3.1)

Tabela 3.7. Condições iniciais Situação A – (PSR).

Propriedade	Valor
Campo de velocidade	$u = 0 [m s^{-1}]$ $v = 0 [m s^{-1}]$ $w = 0 [m s^{-1}]$
Pressão estática	Expressão (3.6)
Fração volúmica de água	Expressão (3.4)
Fração volúmica de ar	Expressão (3.3)

3.5.3. Parâmetros de simulação

Os parâmetros de simulação encontram-se apresentados na Tabela 3.8. Nas simulações numéricas realizadas por Aguiar et al. (2014) foi utilizado o número de Courant igual a 0,1. Assim, foi utilizado o passo de tempo indicado na Tabela 3.8 por forma a realizara simulações com o mesmo número de Courant.

Tabela 3.8. Parâmetros de simulação – Situação A

Propriedade	Valor/Método
Massa volúmica da água ($kg\ m^{-3}$)	997
Massa volúmica do ar ($kg\ m^{-3}$)	1,185
Passo de tempo (s)	0,005
Tempo total simulado (s)	30
Modelo multifásico	Homogéneo
Temperatura dos fluidos ($^{\circ}C$)	20
Transferência interfase	<i>Free Surface</i>
Modelo de turbulência	Laminar
Esquema de discretização espacial	<i>High Resolution</i>
Esquema de discretização temporal	<i>Second Order Backward Euler</i>
Fração volúmica	Acoplada

3.6. Situação B – Escoamento com estrutura geradora de ondas

Na situação de escoamento com recife artificial, foi utilizado o pistão como método de geração de ondas. O objetivo desta simulação é comprovar se a onda ao propagar-se sobre o recife é amplificada e se os resultados se ajustam aos obtidos por Aguiar et al. (2014).

Foram aplicadas condições de escoamento bidimensional, regime transiente e isotérmico. Realizaram-se testes de independência de malha, tendo-se considerado as três malhas. Por fim, foram simulados três passos de tempo para a malha 3) de forma a estudar a dependência dos resultados em relação a este parâmetro.

3.6.1. Condições de fronteira

As condições de fronteira são idênticas à situação apresentada na secção 3.5.1.2, descritas na Tabela 3.5. Estas encontram-se representadas na Figura 3.10.

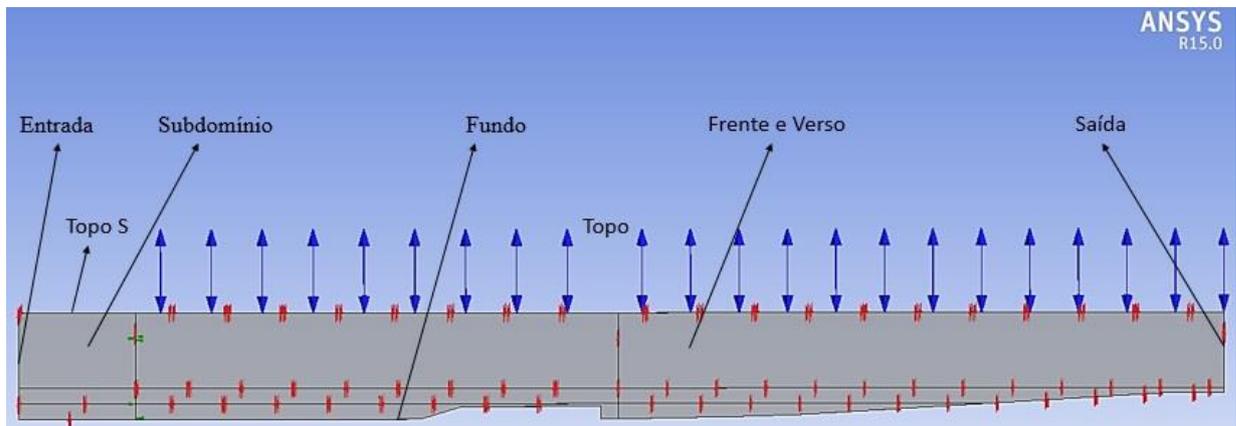


Figura 3.10. Representação das condições de fronteira para a Situação B.

3.6.2. Condições iniciais

As condições iniciais utilizadas nesta situação são iguais às especificadas na Tabela 3.7.

3.6.3. Parâmetros de simulação

Os parâmetros referentes a esta simulação encontram-se especificados na Tabela 3.9

Tabela 3.9. Parâmetros de simulação – Situação B

Propriedade	Valor/Método
Massa volúmica da água ($kg\ m^{-3}$)	997
Massa volúmica do ar ($kg\ m^{-3}$)	1,185
Passo de tempo (s)	0,005; 0,02; 0,01
Tempo total simulado (s)	30
Modelo multifásico	Homogéneo
Temperatura dos fluidos ($^{\circ}C$)	20
Transferência interfase	<i>Free Surface</i>
Modelo de turbulência	Laminar
Esquema de discretização espacial	<i>High Resolution</i>
Esquema de discretização temporal	<i>Second Order Backward Euler</i>
Fração volúmica	Acoplada

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às duas situações em estudo: (A) escoamento sem estrutura geradora de ondas e (B) escoamento com estrutura geradora de ondas.

4.1. Situação A – Escoamento sem estrutura geradora de ondas

Nesta secção será analisada a elevação da superfície livre de modo a determinar qual dos métodos de geração de ondas numéricas produz resultados mais aproximados à teoria de Stokes de segunda ordem.

4.1.1. Situação A – (SSR)

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam a elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal (y) obtida com duas malhas, para 5, 10 e 20 segundos de simulação.

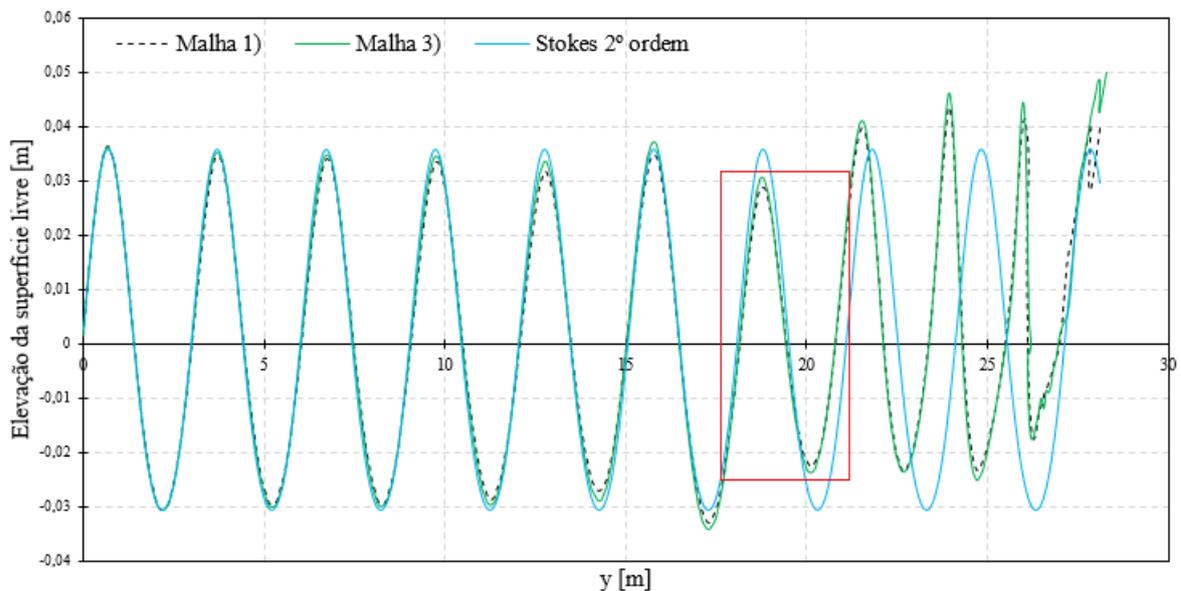


Figura 4.1. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 5$ segundos – Situação A – (SSR).

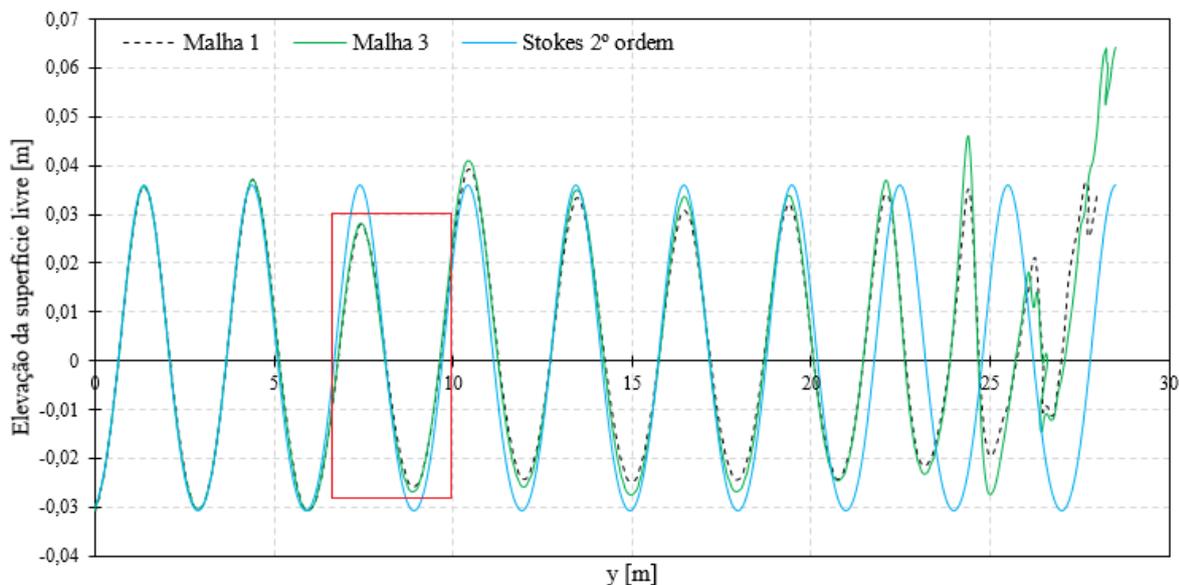


Figura 4.2. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 10$ segundos – Situação A – (SSR).

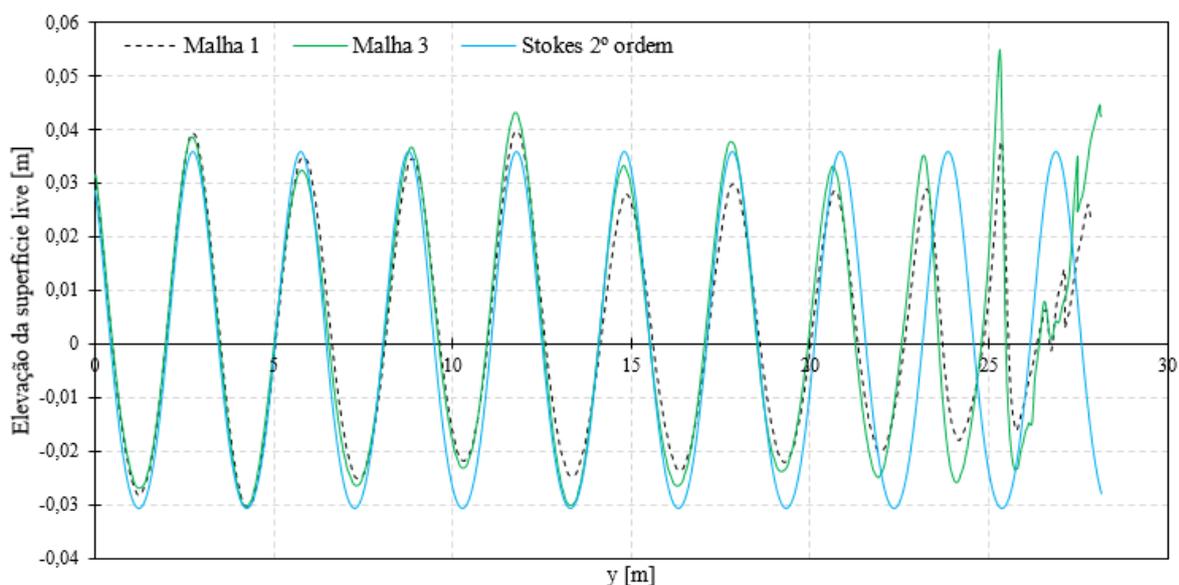


Figura 4.3. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 20$ segundos – Situação A – (SSR).

A análise à elevação da superfície livre (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3) permite avaliar a sensibilidade dos resultados em relação à malha. Constata-se que, na malha com menor número de elementos a altura de onda é inferior, que se torna mais evidente à medida que a simulação progride. Adicionalmente, na malha 3) a onda encontra-se em fase até $y = 15$ metros em relação à teoria, sendo que o mesmo não acontece com a malha 1).

Nas Figuras 4.1 e 4.2 pode observar-se uma onda com amplitude inferior às restantes, inserida nos retângulos vermelhos. Verifica-se que, ao fim de 5 segundos esta encontra-se situada na zona de inclinação e com $t = 10$ segundos na zona de alto-mar, indicando que as ondas estarão a ser refletidas pela praia. Deste modo, os resultados obtidos da elevação da superfície livre apresentam-se mais aproximados à teoria de Stokes aos 5 segundos. Com o aumento do tempo de simulação, os resultados começam a divergir. De notar que, a elevação da superfície livre a partir dos 20 metros está desfasada da teoria, pois esta não é válida para as profundidades em questão nem para o fenómeno da rebentação (Figura 1.3).

A Figura 4.4 apresenta um contorno da velocidade superficial horizontal e vertical da água para a malha 3), com $t = 20$ segundos de simulação. Como seria de esperar a componente horizontal é maior debaixo da crista e da cava da onda, e nula no nível médio da água. Por sua vez, a velocidade vertical é mais elevada no nível médio da água, e nula na crista e cava da onda.

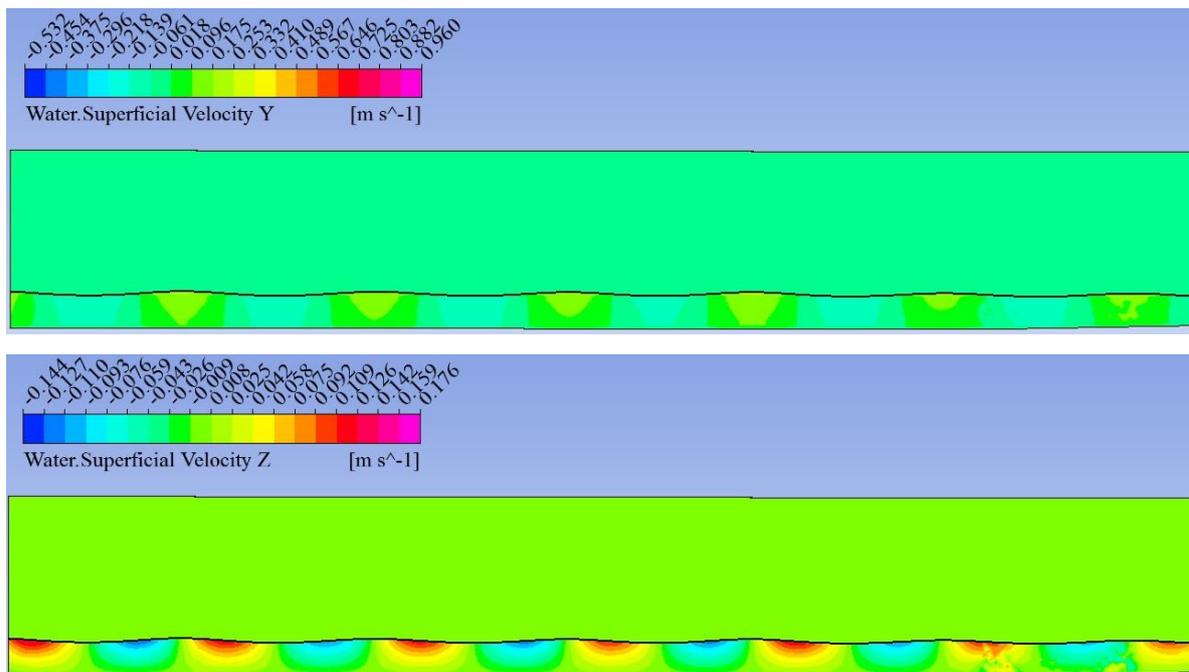


Figura 4.4. Contorno da velocidade superficial horizontal e vertical da água, com $t = 20$ segundos – Situação A – (SSR).

4.1.2. Situação A – (PSR)

A Figura 4.5 apresenta a elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal (y) com 5, 10 e 15 segundos de simulação. Verifica-se que, com $t = 15$ segundos a primeira

onda gerada pelo pistão encontra-se perto do fim do domínio. Assim, ao adotar tempos de simulação superiores a este último garante que esta se propague até à praia. Adicionalmente, a malha 1), por possuir menos elementos, apresenta menor elevação da superfície livre comparativamente à malha 3).

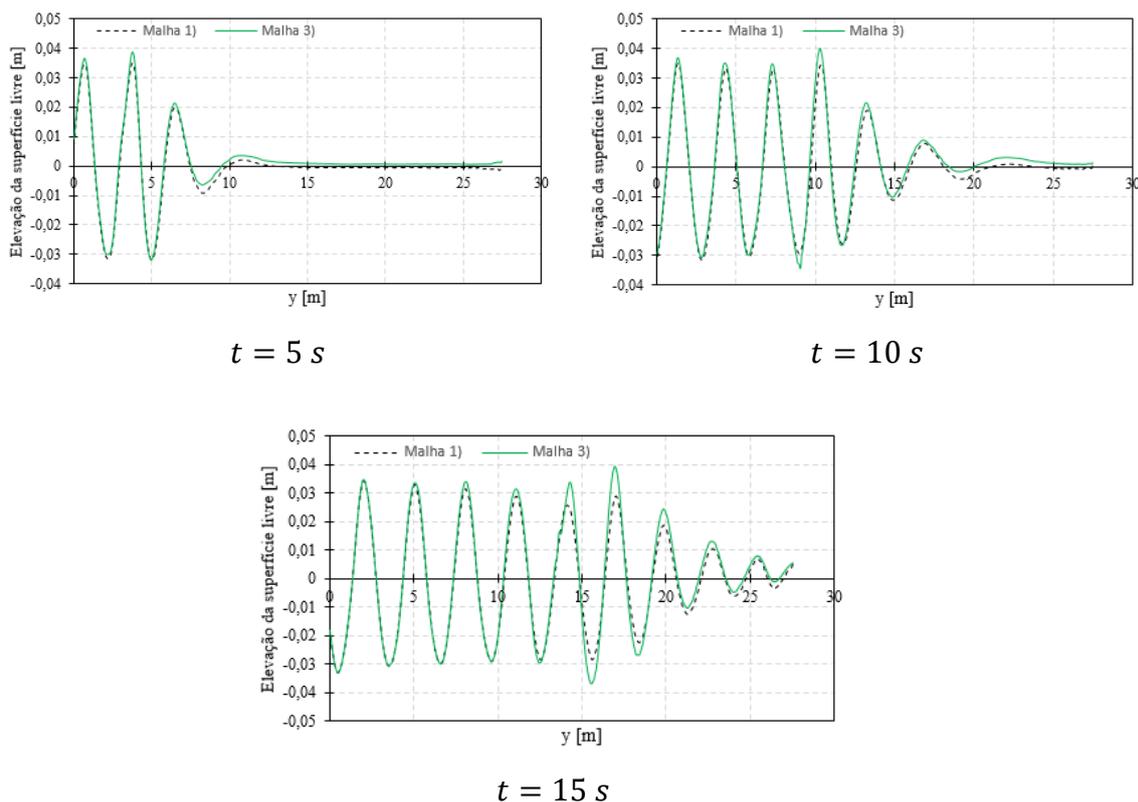


Figura 4.5. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas – Situação A – (PSR).

As figuras 4.6 e 4.7 permite a análise, para duas malhas distintas, dos resultados obtidos da elevação da superfície livre em relação à teoria de Stokes, para $t = 20$ e $t = 30$ segundos de simulação. Verificou-se novamente a dependência da elevação da superfície livre com a malha, sendo esta amortecida na malha mais grosseira. Constata-se também que entre $t = 20$ segundos e $t = 30$ segundos a amplitude de onda pouco varia, no entanto com o aumento do tempo de simulação a onda apresenta-se em fase com a teoria, aspeto que não se evidencia para $t = 20$ segundos. Adicionalmente, na zona de inclinação do domínio ($y > 15,5$ metros) verifica-se a maior discrepância dos resultados da altura de onda em relação à teoria. Assim, a inclinação (praia) estará a refletir as ondas.

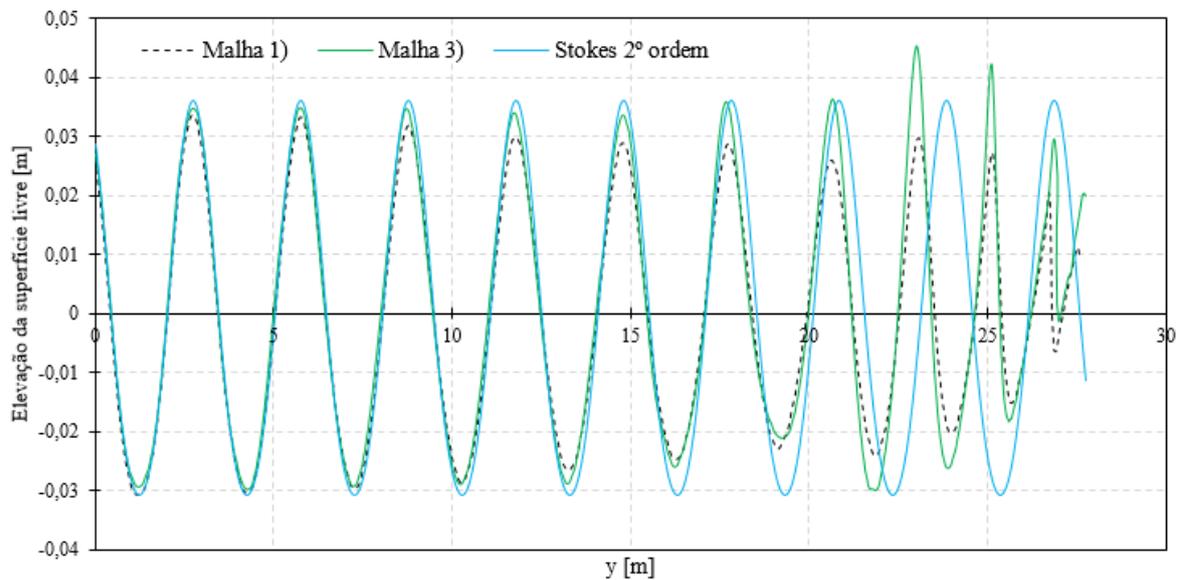


Figura 4.6. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 20$ segundos – Situação A – (PSR).

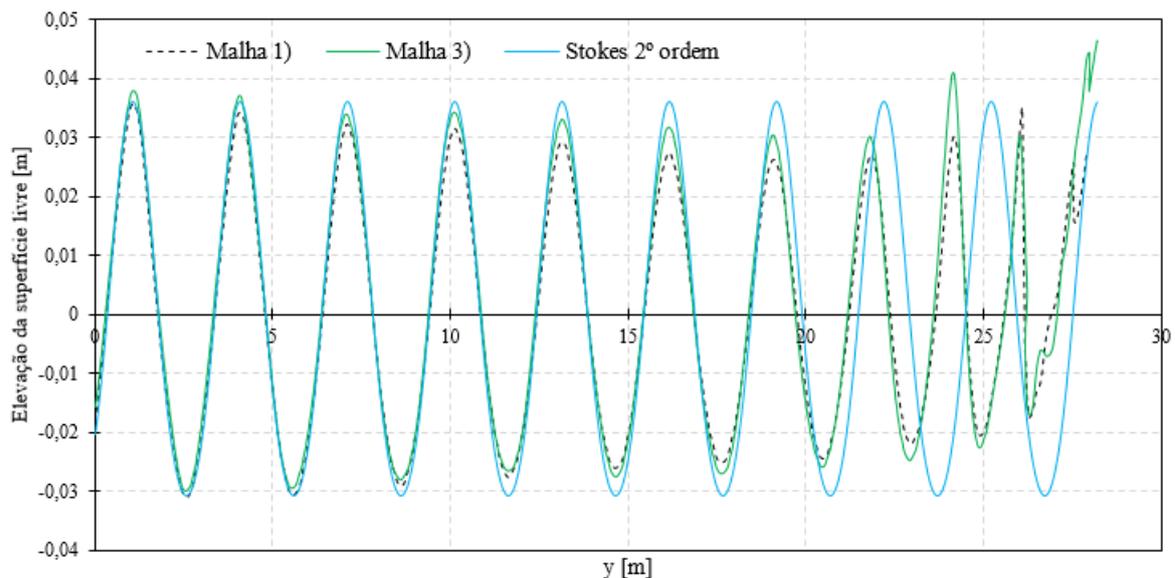


Figura 4.7. Elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para duas malhas, para $t = 30$ segundos – Situação A – (PSR).

4.1.3. Conclusão preliminar

Após a avaliação da elevação da superfície livre para ambos os métodos de geração de ondas, verifica-se que o pistão constitui um método mais preciso, ainda que não coincidente com a teoria. A figura 4.8 apresenta a comparação entre os dois métodos, com $t = 30$ segundos de simulação. Constata-se que na situação A – (2) a crista da onda é superior à esperável pela teoria e, a onda não se apresenta em fase com esta. Deste modo,

as simulações com o recife artificial deverão ser produzidas com o pistão, como condição de entrada.

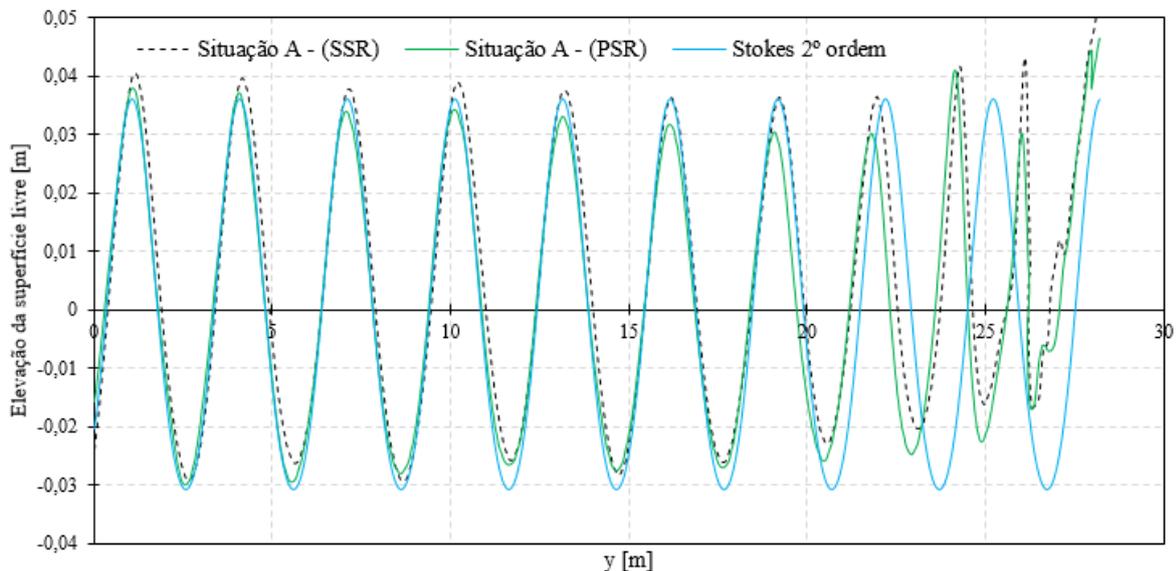


Figura 4.8. Comparação da elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal para as duas situações, para $t = 30$ segundos.

4.2. Situação B – Escoamento com estrutura geradora de ondas

Neste subcapítulo será analisado a altura significativa da onda por forma a avaliar o desempenho do recife artificial.

A Figura 4.9 apresenta a posição das linhas de amostragem. Foram consideradas trinta e quatro linhas. Estas funcionam como sondas, tendo o intuito de captar a elevação da superfície livre a cada passo de tempo. Cada linha tem 0,25 metros de comprimento. Os valores obtidos através das linhas serão processados com recurso a um programa em Visual Basic® desenvolvido pelo Professor António Gameiro Lopes, que realiza interpolações de modo a determinar a posição exata da superfície livre em cada instante, ou seja, quando o valor da fração volúmica da água for igual a 0,5.

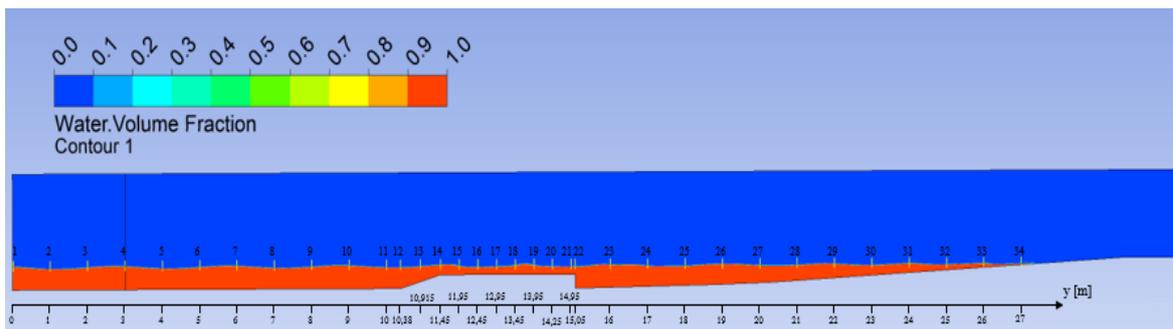


Figura 4.9. Posição das linhas de amostragem.

A Figura 4.10 apresenta a altura significativa da onda ao longo do eixo horizontal (y), para três malhas, com $t = 20$ segundos de simulação e a altura obtida por Aguiar et al. (2014) com o modelo numérico COULWAVE. Numa primeira análise, verifica-se que os resultados obtidos à entrada do domínio, para todas as malhas, estão de acordo com a literatura. Ao chegar ao recife, constata-se que a onda é amplificada, no entanto os resultados começam a divergir comparativamente aos de Aguiar et al. (2014), apresentado resultados distintos tanto dos numéricos como dos experimentais. Adicionalmente, verifica-se a sensibilidade dos resultados em relação à malha. A malha 1) produz a menor altura significativa, ao passo que a malha 2) a maior. A diferença entre as alturas obtidas para as malhas 3) e 2) será analisada em seguida.

De notar que, na zona final do recife (Figura 4.10) ocorre um amortecimento brusco nas malhas 2) e 3). Este deve-se ao facto do declive do recife ser muito acentuado (faz 90° com a horizontal), provocando assim um aumento instantâneo da profundidade.

Ainda na análise à Figura 4.10, constata-se que não ocorre rebentação da onda sobre o recife pois o maior valor da altura significativa, malha 2), é de aproximadamente 0,1 metros. De facto, para que ocorra rebentação a relação entre a altura da onda e a profundidade de água tem de atingir o valor de 0,78 (Vieira et al., 2006). Assim para a profundidade em apreço, o valor da altura para que ocorra rebentação será de aproximadamente 0,16 metros, não coincidente com os resultados obtidos.

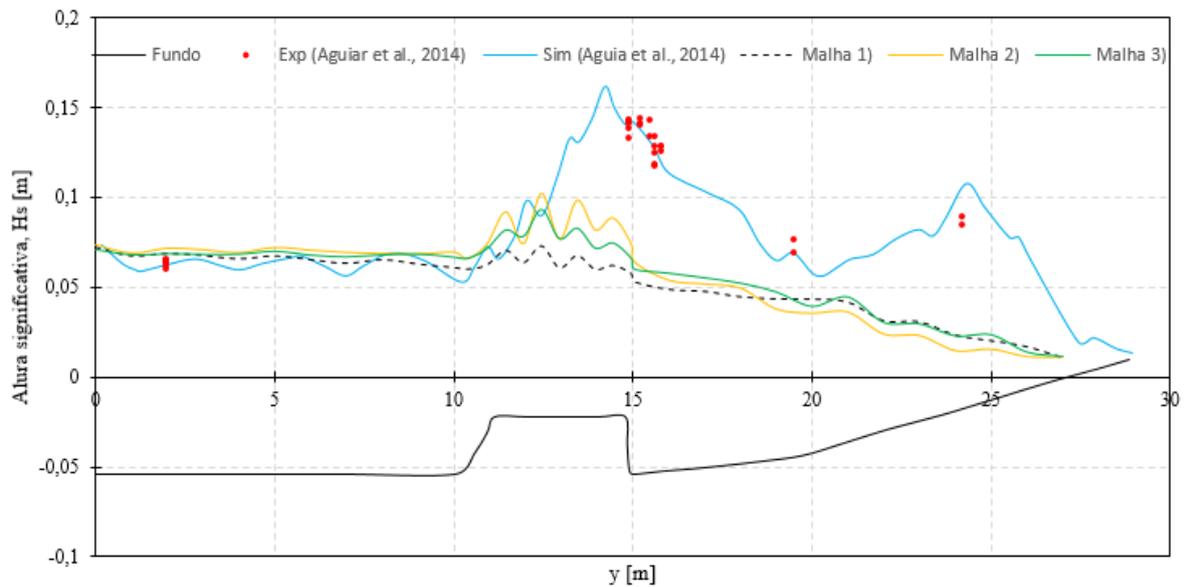
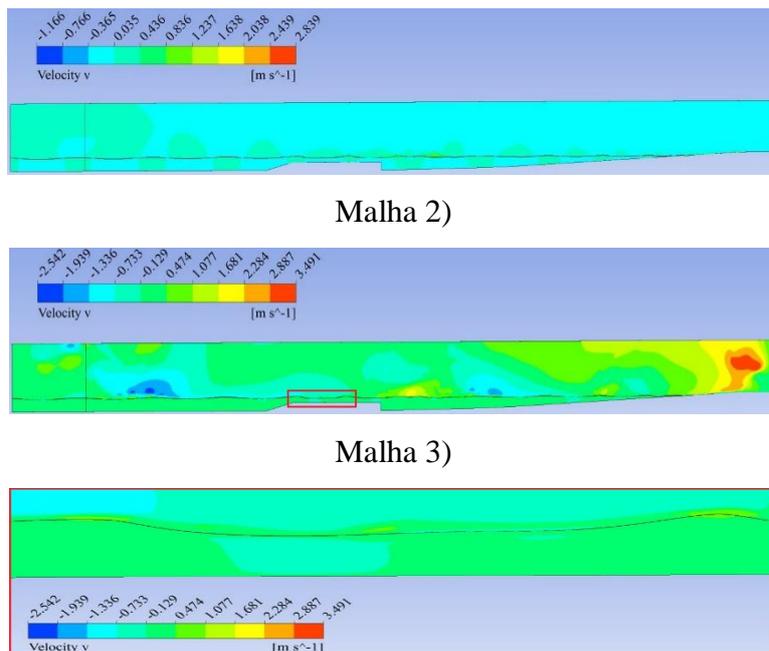


Figura 4.10. Altura significativa da onda (H_s) ao longo do eixo horizontal, para três malhas.

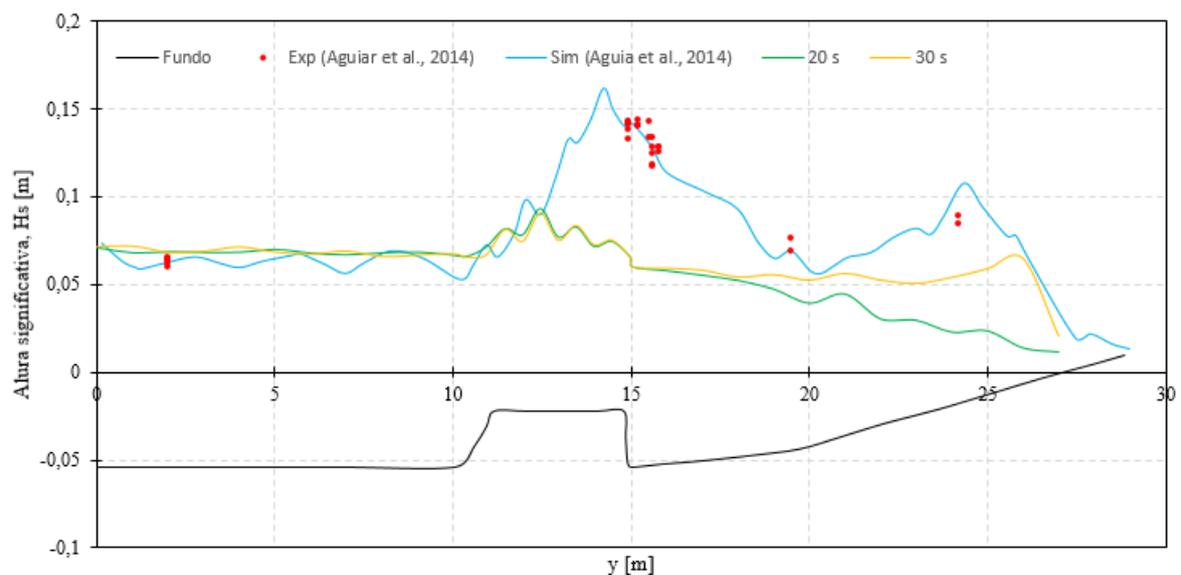
A diferença entre a altura significativa nas malhas 3) e 2) é deduzível do contorno da componente horizontal do campo de velocidades (Figura 4.11), com $t = 20$ segundos. Verifica-se que, para a malha 3), a velocidade horizontal no ar apresenta valores mais elevados, promovendo o amortecimento da altura da onda. Adicionalmente, na imagem em detalhe é perceptível que na crista da onda (interface ar-água) esta componente atinge valores superiores a 1 metro por segundo, conferindo assim um entrave à livre propagação da onda. Na malha 2) as velocidades são inferiores devido a esta possuir uma malha grosseira na zona do ar. Constata-se ainda que o modelo homogêneo adotado, por utilizar um campo de velocidades partilhado, promove velocidades na interface do ar indesejadas.



Promenor na zona do recife – Malha 3)

Figura 4.11. Componente horizontal do campo de velocidades para a malha 3) e 2).

A Figura 4.12 apresenta os resultados da altura significativa da onda, para a malha 3), com $t = 20$ segundos e $t = 30$ segundos. Constata-se que, ao aumentar o tempo de simulação, a altura da onda quase não altera desde o início do domínio até ao fim do recife. Na aproximação à praia, a altura significativa começa a divergir entre os tempos de simulação, mostrando para $t = 30$ segundos uma aproximação aos resultados da literatura ($y > 20$ metros), no entanto ainda divergentes.

**Figura 4.12.** Altura significativa da onda (H_s) ao longo do eixo horizontal, para $t = 20$ segundos e $t = 30$ segundos.

Um estudo da dependência dos resultados com o passo de tempo é apresentado na Figura 4.13. Verifica-se que, para $\Delta t = 0,02$ segundos a altura significativa apresenta um valor inferior em todo o domínio comparativamente aos restantes. Entre os passos de tempo de 0,01 e 0,005 segundos não ocorre diferenças significativas na altura. O passo de tempo de 0,01 segundos é portanto aquele que apresenta melhor compromisso qualidade-custo.

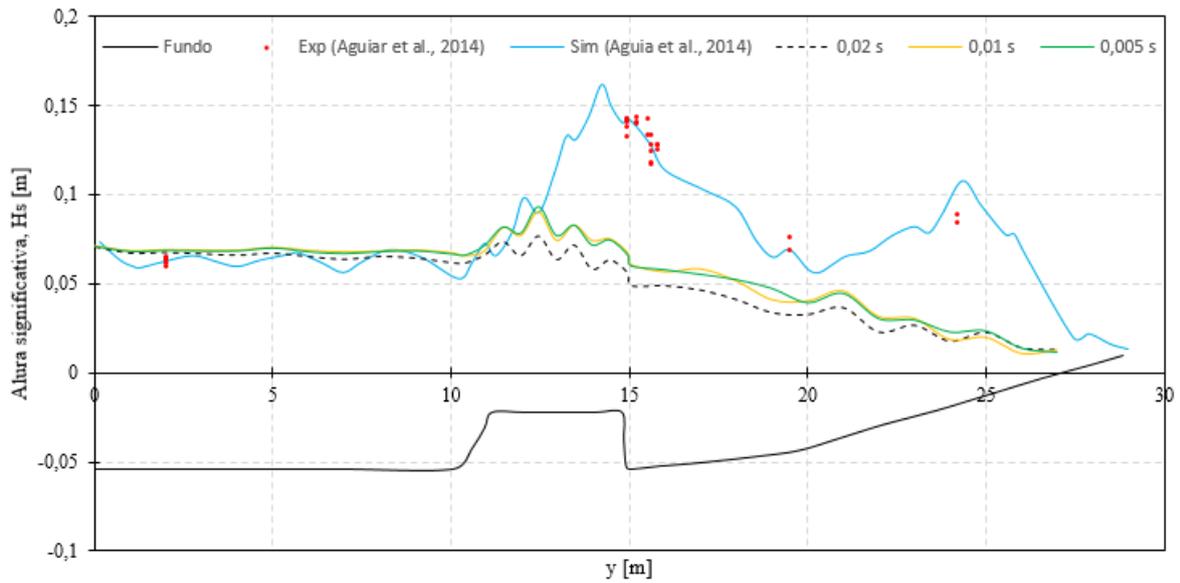


Figura 4.13. Altura significativa da onda (H_s) ao longo do eixo horizontal, para três passos de tempo.

5. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo o estudo de um escoamento com superfície livre sobre uma estrutura geradora de ondas, com recurso a simulações computacionais no *software* ANSYS® CFX®.

Realizaram-se simulações para duas situações: (i) escoamento sem estrutura geradora de ondas e (ii) escoamento com estrutura geradora de ondas.

Para a situação de escoamento sem estrutura foram adotados dois métodos para geração de ondas. O primeiro constitui na implementação das expressões do campo de velocidades e da elevação da superfície livre, conforme a teoria de Stokes de segunda ordem, e o segundo através do movimento do pistão de acordo com a teoria *wavemaker*. Em ambos os métodos, foi registada a elevação da superfície livre ao longo do eixo horizontal. Procedeu-se também, ao estudo da sensibilidade deste parâmetro com a malha, utilizando duas malhas distintas.

Conclui-se que o pistão constitui o método de geração de ondas mais aproximado à teoria e consequentemente à real propagação da onda. Adicionalmente, verificou-se que a malha 3) é aquela que apresenta menor amortecimento na altura da onda.

Na situação com o recife artificial, a geração de ondas foi efetuada com o *wavemaker* do tipo pistão, sendo calculada a altura significativa da onda para cada linha de amostragem de forma a avaliar o seu desempenho. Foram realizados testes da dependência dos resultados com a malha, tempo de simulação e passo de tempo.

Concluiu-se que a onda ao propagar-se sobre o recife artificial é amplificada, isto é, ocorre um aumento da altura da onda, no entanto os resultados obtidos divergem daqueles utilizados para a validação do modelo, obtidos por Aguiar *et al.* (2014). Verifica-se também que não ocorre rebentação da onda sobre o recife. Adicionalmente, constata-se que existe velocidade horizontal na interface do ar indesejável ao escoamento, pois provoca o amortecimento da altura da onda. Conclui-se ainda que, com o aumento do tempo da simulação, a altura significativa aproxima-se da apresentada na literatura na zona da praia, e que o passo de tempo de 0,01 segundos constitui o melhor compromisso qualidade-custo.

Para trabalhos futuros sugere-se a implementação de zonas de amortecimento da onda à entrada do domínio e na praia, por forma a reduzir a reflexão desta. Para além disso, sugere-se testar malhas mais refinadas, aumentar o tempo de simulação e ainda testar outro modelo multifásico, por exemplo o modelo heterogéneo, para reduzir a velocidade obtida para o ar na interface água-ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. G. M. (2006), “Em busca da geometria ideal de um fundo artificial para surfe”. Tese de Mestrado em Ciências Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Aguiar, L. G. M., Rosman, P. C. C. & Fortes, C. J. E. M. (2014), “Recife artificial de amplificação de ondas de vento: Modelação numérica e física”, atas do 12º Congresso da água, do 16º Encontro de Engenharia Sanitária e Ambiental e do XVI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Lisboa, 5-8 March 2014.
- Airy, G. B. (1845), “On tides and waves”, In: *Encyclopedia Metropolitan*, London. pp. 241-396.
- 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.* Acedido em Janeiro de 2016, em: <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>.
- Biesel, F. (1951), “Etude theorique d’un certain type d’appareil a houle”, *La Houille Blanche*, 2. English Translation in: Project Rept. 39, 1954, St. Falls Hydraulic Lab., University of Minnesota.
- Clauss, G. F., Schmittner, C. E. & Stück, R. (2005), “Numerical wave tank – Simulation of extreme waves for the investigation of structural responses”. Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, 12-17 June 2005, pp. 1-8.
- Dalrymple, R. A. & Dean, R. G. (1984), “Water wave mechanics for engineers and scientists”, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 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, 23-31.
- Galvin, C. J. Jr. (1964), “Wave-height prediction for wave generators in shallow water”, Tech. Memo 4, US Army Coastal Engineering Research Center.
- Havelock, T. H. (1929), “Forced surface-waves on water”, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 8(51), 569-576.
- 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.

- Hyun, J. M. (1976), “Theory for hinged wavemakers of finite draft in water of constant depth”, *Journal of Hydronautics*, 10, 2-7.
- 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.
- Le Mehaute, B. (1976), “An introduction to hydrodynamics and water waves” (1.^a ed.), *Springer Science & Business Media*, New York.
- Maâtoug, M. A. & Ayadi, M. (2016), “Numerical simulation of the second-order Stokes theory using finite difference method”, *Alexandria Engineering Journal*, 55, 3005-3013.
- Martins, A. J. F. (2012), “Análise da rebentação de ondas com ensaios em laboratório”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Melo, E., Straioto, K. M. G. T., Franco, D. & Romeu, M. A. R. (2006), “Distribuição estatística de alturas de ondas individuais em Santa Catarina: resultados preliminares”, 2º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande, November 2006.
- Mendonça, A., Fortes, C. J., Capitão, R., Neves, M. G., Moura, T. & Carmo, J. S. A. (2012), “Wave hydrodynamics around a multi-functional artificial reef at Leirosa”, *Journal of Coastal Conservation Planning and Management*, 16, 543-553.
- Ning, D. Z. & Teng, B. (2006), “Numerical simulation of fully nonlinear irregular wave tank in three dimension”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53, 1847-1862.
- Ning, D. Z., Teng, B., Eatock Taylor, R. & Zang, J. (2008), “Numerical simulation of non-linear regular and focused waves in an infinite water-depth”, *Ocean Engineering*, 35, 887-899.
- Oliveira, L. A. & Lopes, A. G. (2012), “Mecânica dos fluidos” (4.^a ed.), *LIDEL*
- Sancho, F. (2002), “Hidráulica Marítima – V Conceitos fundamentais de agitação marítima”. Acedido a 30 de Janeiro de 2017, em: http://www.ci.uc.pt/mhidro/edicoes_antigas/PFC_acetatos_11.pdf
- Schwartz, L. W. (1974), “Computer extension and analytical continuation of Stoke’ expansion for gravity waves”, *Journal of Fluid Mechanics*, 62, 552-578.
- Silva, M. C., Vitola, M. A., Pinto, W. T. & Levi, C. A. (2010), “Numerical simulation of monochromatic wave generated in laboratory: Validation of CFD code”, atas do 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro, Brasil, 25-29 October 2010, pp 1-12.
- Skjelbreia, L. & Hendrickson, J. A. (1961), “Fifth order gravity waves theory”. Proceedings of 7th Conference on Coastal Engineering, Council on Wave Research, Engineering Foundation, University of California, Berkeley, pp. 184-196.

- Skjelbreia, L. (1959), "Gravity waves, Stokes third order approximations, table of functions", Council on Wave Research, Engineering Foundation, University of California, Berkeley.
- Sorensen, R. M. (2006), "Basic coastal engineering" (3.^a ed.), *Springer*.
- Stokes, G. G. (1847), "On the theory of oscillatory waves", *Transactions, Cambridge Philosophical Society*, Vol. 8, pp. 441-445.
- Ursell, F. (1953), "The long-wave paradox in the theory of gravity waves". Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Cambridge, Reino Unido, October 1953, 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, 33-52.
- Vieira, F., Fortes, C. & Aguiar, L. G. M. (2006), "Recifes Artificiais para a prática do surf", *Engenharia e Vida*, 23, 30-37.
- 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, 9-21.

