



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento Engenharia Mecânica e Indústria

Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia

Tiago Garcia Barreiro

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção
do Grau de Mestre em **Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil
Co-orientador: Prof. Doutor Eric Didier

Dezembro de 2009

Agradecimentos

Quero neste momento agradecer a todos os que sempre me apoiaram, com a sua motivação, orientação e disponibilidade.

Ao Professor Luís Gil, orientador desta dissertação, pela possibilidade que me ofereceu em realizar este trabalho, pela sua orientação, apoio na redacção da tese e ainda pela sua fantástica forma de estar que possibilitou o criar de uma boa amizade.

Ao Professor Eric Didier, co-orientador desta dissertação, pela sua disponibilidade, orientação, apoio ao nível de trabalho numérico e transmissão de conhecimentos.

Ao Wavec-Wave Energy Centre pela possibilidade que me deram em poder contribuir com os meus conhecimentos, no estudo de desenvolvimento de um conversor de energia das ondas e pela documentação disponibilizada.

Gostaria também de agradecer a todos os meus amigos e colegas de faculdade por todo o apoio dado ao longo destes últimos cinco anos na minha vida académica, pois sem eles tudo teria sido muito mais difícil.

Por fim, o principal agradecimento recai sobre os meus pais que me possibilitaram esta formação. O seu apoio foi fundamental a todos os níveis. Agradeço-lhes do fundo do coração. Obrigado Mãe e Pai.

Resumo

A agitação marítima representa um importante recurso energético a nível mundial, e em particular em Portugal.

Neste trabalho estuda-se a interacção de ondas monocromáticas com um conversor de energia do tipo absorção pontual, cujo ante-projecto se baseou em resultados lineares obtidos para fluído perfeito.

Inicialmente realiza-se o estudo do escoamento no interior da bóia, de forma a otimizar o seu movimento oscilatório, aferindo-se sobre a influência das dimensões do reservatório interior e da conduta de alimentação.

O aparecimento de resultados relativos à evolução da superfície livre interior não previstos inicialmente (o movimento da superfície livre no interior do dispositivo não é sinusoidal, aparecendo modelado) que resultam do facto de se estar muito próximo da frequência de ressonância do dispositivo e de se utilizar uma técnica não linear, levou a que o estudo fosse alargado. Devido a tal situação, simularam-se diferentes frequências da onda incidente, afastadas e próximas da de ressonância, de forma a determinar a curva que caracteriza a resposta da coluna de água interior.

Este estudo é realizado recorrendo a simulações numéricas efectuadas com o código não linear FLUENT-ANSYS, que resolve numericamente as equações RANS e recorre à técnica VoF para a modelação da superfície livre.

Os resultados obtidos permitiram constatar a utilidade de códigos não lineares e viscosos baseados nas equações RANS na simulação de dispositivos de extracção de energia das ondas, nomeadamente na caracterização da sua resposta em frequência e geometria interior e exterior.

Abstract

The marine agitation is an important energy resource worldwide, and particularly in Portugal.

In this study, the interaction between monochromatic waves and an point-absorption energy-converter is investigated. The previous project was based on linear results obtained for perfect fluid.

Initially, the flow inside the float is studied, in order to optimise its oscillatory motion, checking on the influence of the inner dimensions of the container and of the supply line.

The achievement of non linear results respecting the evolution of the free inside surface, not originally planned, motivated a characterization study about the disposal frequency response. Then, different incident wave frequencies were simulated, remote and close to the resonance one, in order to determine the curve which describe the inside water column response.

The numerical simulations are carried out with the FLUENT-ANSYS non-linear code, which numerically solves RANS equations using the VoF method to model the free surface.

The final results show the usefulness of non-linear codes based on RANS equations in the simulation of devices for extracting wave's energy, particularly in the of its frequency response and inside and outside geometry.

SIMBOLOGÍA

$\vec{V}$	campo de velocidades
∇	gradiente
Φ	função potencial
η	elevação da superfície livre
∇^2	operador laplaciano
$\vec{n}$	direcção normal ao plano
ρ	densidade volúmica do fluído
a	amplitude da onda
c	celeridade da onda
g	aceleração gravítica
H	altura da onda
k	frequência angular
L	comprimento de onda
m	número de onda
p	pressão
t	tempo
T	período
u	componente da velocidade segundo x
v	componente da velocidade segundo y
w	componente da velocidade segundo z
ζ_x	deslocamento na direcção x
ζ_z	deslocamento na direcção z

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização	3
Capítulo 2 – Estudo bibliográfico	5
2.1 Breve revisão das tecnologias existentes para extracção de energia das ondas	5
2.2 Teoria linear das ondas	8
Capítulo 3 – Modelação numérica	17
3.1 Descrição do modelo numérico	17
3.2 Equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)	18
3.3 Modelos de turbulência	20
3.4 Problemas multifásicos – Método VoF	22
3.5 Esquemas numéricos	24
3.6 Geração da malha	24
3.7 Sensibilidade à integração no tempo	25
Capítulo 4 – Validação do modelo numérico	30
4.1 Propagação de uma onda bidimensional sobre um fundo horizontal	30
4.2 Propagação de uma onda tridimensional sobre um fundo horizontal	33
4.3 Interação entre uma onda e um cilindro vertical fixo ao fundo	36
4.3.1 Deformação da superfície livre	36
4.3.2 Esforços	38
Capítulo 5 – Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia	47
5.1 Apresentação do dispositivo	48
5.2 Parâmetros gerais do estudo numérico	50
5.3 Dispositivo standard	53

5.4 Resposta em frequência.....	61
5.5 Variação de dimensões internas.....	65
5.6 Variação da forma exterior.....	69
Capítulo 6 – Conclusões.....	72
Referências Bibliográficas.....	76

ÍNDICE DE FÍGURAS

Figura 2.1 – Sistemas da família dos corpos oscilantes.....	8
Figura 2.2 – Perfil adimensional de velocidade horizontal e vertical.....	14
Figura 2.3 – Trajectórias das partículas da água numa onda progressiva para água profunda.....	15
Figura 3.1 – Teste ao passo de tempo – Elevação da superfície livre em dois instantes.....	26
Figura 3.2 – Velocidade vertical.....	27
Figura 3.3 – Resíduo para 5 iterações não lineares.....	27
Figura 3.4 – Resíduo para 15 iterações não lineares.....	28
Figura 3.5 – Comparação do perfil vertical da componente horizontal da velocidade na onda.....	29
Figura 3.6 – Comparação da componente vertical da velocidade no interior do dispositivo.....	29
Figura 4.1 – Domínio de cálculo e condições fronteira.....	31
Figura 4.2 – Deformação da superfície livre 2D.....	33
Figura 4.3 – Aspecto da superfície livre tridimensional.....	34
Figura 4.4 – Deformadas de superfície livre obtidas numericamente e pela teoria linear.....	35
Figura 4.5 – Perfil da componente horizontal da velocidade obtido numericamente e pela teoria linear.....	35
Figura 4.6 – Interação superfície livre cilindro.....	37
Figura 4.7 – Deformada da superfície livre no plano de simetria longitudinal....	38
Figura 4.8 – Deformada da superfície livre no plano perpendicular à direcção de propagação.....	38

Figura 4.9 – Superfícies predefinidas para determinação dos esforços.....	40
Figura 4.10 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 4.....	42
Figura 4.11 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 5.....	42
Figura 4.12 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 6.....	43
Figura 4.13 – Comparação do esforço total para a simulação 4.....	44
Figura 4.14 – Comparação do esforço total para a simulação 5.....	44
Figura 4.15 – Comparação do esforço total para a simulação 6.....	45
Figura 5.1 – Dispositivo conversor de energia.....	49
Figura 5.2 – Pormenor da malha no plano de simetria do dispositivo.....	51
Figura 5.3 – Pormenor da malha no dispositivo e na sua vizinhança.....	51
Figura 5.4 – Superfícies predefinidas para o cálculo dos esforços.....	53
Figura 5.5 – Posição relativa da superfície livre no interior e exterior do dispositivo.....	53
Figura 5.6 – Elevação da superfície livre no interior e exterior do dispositivo....	54
Figura 5.7 – Evolução dos esforços horizontais nas superfícies e esforço total.....	55
Figura 5.8 – Evolução dos esforços verticais nas superfícies e esforço total.....	56
Figura 5.9 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=0s$	56
Figura 5.10 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=2s$	56
Figura 5.11 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=4s$	57
Figura 5.12 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=6s$	57
Figura 5.13 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=8s$	57
Figura 5.14 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=10s$	57

Figura 5.15 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=12s$	57
Figura 5.16 – Ampliação da zona de entrada do dispositivo no instante $t=0s$	58
Figura 5.17 – Ampliação da zona de entrada do dispositivo no instante $t=12s$	59
Figura 5.18 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes.....	59
Figura 5.19 – Elevação da superfície livre no interior e exterior do dispositivo.....	63
Figura 5.20 – Relação entre as amplitudes eficazes da excitação e da resposta.....	64
Figura 5.21 – Atraso da resposta em relação à excitação.....	66
Figura 5.22 – Comparação da elevação da superfície livre interior com a variação da dimensão b	66
Figura 5.23 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $b=7m$	66
Figura 5.24 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $b=8m$	67
Figura 5.25 – Comparação da elevação da superfície livre interior com a variação da dimensão k	68
Figura 5.26 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $k=4m$	68
Figura 5.27 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $k=3m$	69
Figura 5.28 – Dispositivo alterado.....	70
Figura 5.29 – Comparação dos campos de vorticidade e de pressão dinâmica.....	71

ÍNDICE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais sistemas de conversão de energia e classificação.....	7
Tabela 2.2 – Equações do caso geral particularizadas para o caso de profundidade infinita.....	16
Tabela 4.1 – Características dos ensaios realizados.....	39
Tabela 4.2 – Comparação do esforço máximo.....	45

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os desafios impostos pela necessidade de implementar políticas que assegurem um desenvolvimento sustentável são particularmente pertinentes no domínio da energia. Cada vez mais somos confrontados com a exigência de encontrar nas energias renováveis uma alternativa real e fiável às formas convencionais não renováveis de produção de energia eléctrica, responsáveis por sérias agressões ao meio ambiente. As obrigações legais impostas pelas directivas comunitárias e pelo protocolo de Quioto apenas reforçam esta necessidade. Os oceanos, contendo o maior de todos os recursos naturais, albergam um potencial energético enorme, que pode contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia a um nível global.

Neste contexto a energia das ondas assume especial relevância. Esta tem origem essencialmente no efeito do vento na superfície do oceano, e em menor escala da acção gravitacional dos corpos celestes mais próximos. Depois de geradas, as ondas podem propagar-se milhares de quilómetros em alto mar com perdas de energia muito pequenas. A sua energia (não reflectida) é dissipada junto da costa, por interacção com o fundo do mar cada vez menos profundo. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período.

Os primeiros sistemas para aproveitamento da energia das ondas datam do final do século XVIII, no entanto apenas em meados do século XX foi construída, no Japão, a primeira aplicação industrial com recurso à utilização da energia das ondas, em bóias de sinalização marítima [1]. O desenvolvimento de tecnologia de aproveitamento de energia das ondas para a produção de energia eléctrica em mais larga escala teve início anos mais tarde, em meados da década de 1970, na sequência do primeiro choque petrolífero. Inicialmente a investigação focou-se nos aspectos teóricos tendo evoluído para

a construção de modelos destinados a experiências laboratoriais essencialmente realizadas em Universidades. Actualmente realizam-se testes com protótipos, frutos da aplicação de diferentes tecnologias em alto mar. A investigação é agora liderada por empresas que visam explorar economicamente o recurso energético das ondas marítimas.

As tecnologias de transformação da energia contida nas ondas marítimas integram grande multidisciplinaridade de conhecimentos. Independentemente da tecnologia usada, numa primeira fase transforma-se a energia da onda (cinética, potencial ou derivada do seu campo de pressão) em energia mecânica que seguidamente é transformada em energia eléctrica. A interacção entre engenheiros mecânicos e electrotécnicos é aqui evidente. A localização, construção e/ou ancoragem da instalação e o estudo das características locais da agitação, justifica o alargamento às áreas das engenharias civil, naval e costeira. Os estudos de impacte ambiental ampliam a multidisciplinaridade à engenharia do ambiente e à oceanografia.

Toda a problemática associada à energia das ondas é particularmente pertinente no caso português. Portugal continental e insular tem uma invejável extensão de costa utilizável, classificando-se este recurso energético como médio-alto que corresponde a uma potência média entre 45 e 30 kW/m (alto mar na batimétrica de 30m, no continente, [1]. Estudos financeiros estimam viabilidade económica a partir de 15 kW/m [2].

1.2 Objectivos

Neste trabalho pretende-se contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia particular de extracção de energia das ondas.

O dispositivo em estudo (apresentado no Capítulo 5) é da família dos sistemas dos corpos oscilantes, de absorção pontual. Actualmente existem dispositivos deste tipo em fase comercial, dos quais se destaca o AquaBuoy da AquaEnergy Group, Ltd.

A maximização da energia extraída depende da natureza do movimento oscilatório do dispositivo ou do movimento relativo dos seus componentes.

Interessa assim adaptar dinamicamente a frequência de ressonância do dispositivo às características da agitação incidente. O controlo da frequência de ressonância pode ser feito alterando as características elásticas do sistema ou alternativamente variando a sua massa oscilante. Neste trabalho explora-se a segunda estratégia. Para tal utiliza-se um canal existente na base do sistema flutuante, que permite a entrada de água para um reservatório interior ao dispositivo, figura 5.1. Assim o caudal de entrada pode ser controlado, o que permite a alteração da massa oscilante e consequentemente o ajuste da frequência de ressonância.

O objectivo deste trabalho consiste no estudo do escoamento da água no interior da bóia, de forma a otimizar o seu movimento oscilatório. Neste contexto estuda-se a influência das dimensões do reservatório interior e da condução de alimentação.

Este estudo é realizado recorrendo a simulações numéricas efectuadas com o código FLUENT. Este programa resolve as equações de Navier-Stokes em valor médio (equações de Reynolds) através de uma técnica de volumes finitos utilizando o método VoF (Volume of Fluid) na identificação da superfície livre. Este código é actualmente comercializado pela ANSYS, Inc.

A malha é gerada utilizando o programa GAMBIT, que permite a discretização do domínio de cálculo.

1.3 Organização

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos: introdução, estudo bibliográfico, modelação numérica, validação do modelo numérico, estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia e conclusões.

No Capítulo Estudo bibliográfico é apresentada uma breve revisão das tecnologias existentes para extracção da energia das ondas e uma descrição matemática das equações da teoria linear das ondas. No Capítulo 3, Modelação numérica, é feita uma descrição do modelo numérico utilizado, das

equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes, dos modelos de turbulência, dos problemas multifásicos – método VoF, dos esquemas numéricos utilizados e das formas de geração da malha no domínio de cálculo.

No Capítulo 4, Validação do modelo numérico, são apresentados os resultados de simulações realizadas da propagação de uma onda num canal bidimensional e posteriormente tridimensional e os resultados da interacção de uma onda regular com um cilindro vertical fixo ao fundo.

No Capítulo 5, Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia, é apresentado o dispositivo estudado, bem como os resultados obtidos deste estudo.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e perspectivas de futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Estudo bibliográfico

Este Capítulo é dedicado ao estudo bibliográfico de temas que assumem especial realce no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente apresentam-se as principais tecnologias existentes para extracção da energia das ondas notoriamente a dos corpos oscilantes de absorção pontual. Funcionando este tipo de dispositivos em zonas onde se verificam condições de profundidade finita ou intermédia, a teoria linear das ondas ajusta-se a este estudo pelo que é também aqui apresentada.

Também foi realizado um estudo bibliográfico no que diz respeito aos métodos numéricos utilizados, estando incluído no Capítulo 3 que é dedicado apenas a esse tema.

2.1 Breve revisão das tecnologias existentes para extracção de energia das ondas

As tecnologias de conversão de energia das ondas baseiam-se em diferentes princípios de funcionamento. A diversidade de concepções está intimamente ligada às três formas de energia transportadas por uma onda:

- energia potencial relacionada com a posição da superfície livre;
- energia cinética correlacionada com o respectivo campo de velocidade;
- variação de pressão correlacionada com o respectivo campo de pressão.

A natureza, ondulatória e estocástica, da agitação marítima confere ainda maior complexidade e diversidade aos sistemas de conversão.

Um conjunto tão amplo de variáveis a otimizar, aliado à juventude destas tecnologias resulta num grande número de modelos com aspecto e características bem distintas. Tal facto é típico de uma tecnologia não estabilizada. Evidentemente, só as soluções construtivas mais eficientes sobreviverão e posteriormente serão optimizadas, permitindo assim que a tecnologia atinja uma fase estabilizada.

Actualmente a maioria dos autores opta por classificar as tecnologias de conversão de energia utilizando dois critérios:

- distância relativamente à costa a que o dispositivo é instalado (na realidade é mais importante a profundidade embora ambas as variáveis estejam relacionadas);
- modo de conversão da energia.

Relativamente ao primeiro critério Cruz e Sarmento [2] agrupam os dispositivos em três classes:

- dispositivos sobre a costa, denominados costeiros (na nomenclatura inglesa: shoreline);
- dispositivos próximos da costa (near-shore), instalados em locais com profundidade inferior a 20m e assentes no fundo do mar;
- dispositivos ao largo (offshore), flutuantes e em geral ancorados.

Estas tecnologias, do ponto de vista cronológico, tiveram também origem pela mesma ordem pelo que podem também ser citadas como: de primeira, segunda ou terceira geração.

Utilizando o critério de modo de conversão de energia, as tecnologias são agrupadas em três classes:

- Coluna de água oscilante, CAO (OWC - Oscillating Water Column);
- Corpos oscilantes, podendo ser de absorção pontual (Point Absorbers) ou progressivos (Surging devices);
- Galgamento (Overtopping devices).

Aplicando o anterior critério de classificação apresenta-se, na tabela 2.1, várias variantes de cada classe de dispositivos.

Dos vários modelos apresentados na tabela 2.1, optou-se por descrever apenas os dispositivos flutuantes de translação, por estes pertencerem à família dos sistemas dos corpos oscilantes, de absorção pontual, à qual pertence a bóia em estudo. A descrição dos restantes modelos pode ser consultada em [3], [1] e [2].

Classe	Posicionamento	Protótipos/modelos
Coluna de água oscilante	Linha de costa: isoladas ou em estruturas costeiras (quebra-mar). Móveis flutuantes.	Pico – Portugal – Costeira (400 kW) Limpet – Escócia – Costeira (500 kW) Sakata – Japão – Quebra-mar (60 kW) Trivandrum – Índia – Quebra-mar (150 kW) Migthy Whale – Japão (110 kW) -Flutuante Energetech – Flutuante
Corpos oscilantes	Ancorado: flutuante ou submerso.	AquaBuoy – Flutuante – translação Wavebob – Flutuante – translação PowerBuoy – Flutuante – translação Seewec – Flutuante – translação AWS – Submerso – translação Pelamis – Flutuante – rotação Wave Roller - Submerso - rotação
Galgamento	Estrutura costeira com ou sem concentração (TAPCHAN). Estrutura flutuante com concentração.	Toftstalleni – Noruega – costeira (350 kW) WaveDragon – Consórcio europeu – Flutuante

Tabela 2.1 – Principais sistemas de conversão de energia e classificação

No que se refere ao seu posicionamento, este tipos de dispositivos são colocados em alto mar e numa posição vertical.

Apesar de apresentarem formas distintas, são fixos por amarrações ou ancorados por bóias auxiliares que permitem o seu movimento vertical. Os seus princípios de funcionamento baseiam-se essencialmente no movimento relativo entre componentes do sistema, que pode induzir a bombagem de água (através de um tubo interno) no interior do dispositivo ou então mover um pistão interno que bombeia fluido hidráulico que por sua vez acciona um gerador eléctrico.

O AquaBuoy (figura 2.1a) é um dispositivo que permite a entrada de água no seu interior, que ao ser bombeada sai em jacto incidindo nas pás de uma turbina Pelton.

O Wavebob (figura 2.1b) ajusta a frequência natural do seu movimento de oscilação ao estado do mar incidente (por variação da sua distribuição de massa e componente de amortecimento).

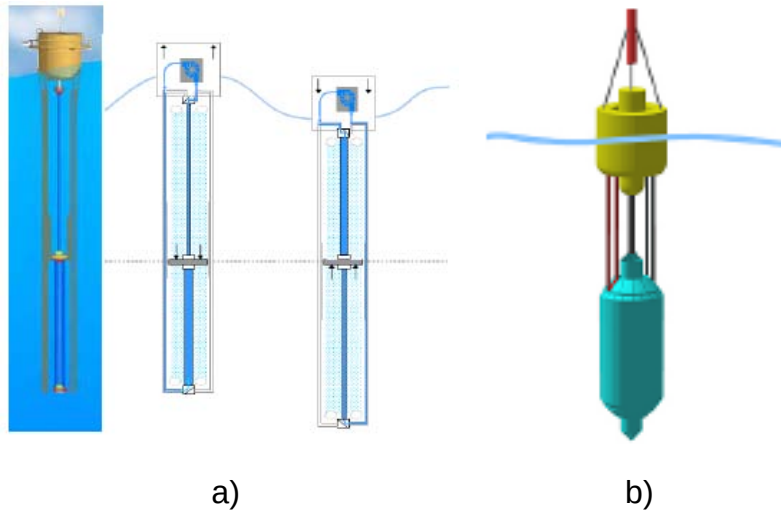


Fig.2.1 – Sistemas da família dos corpos oscilantes a) AquaBuoy b) Wavebob

O dispositivo em estudo, apresentado no Capítulo 5, também permite a entrada de água no seu interior funcionando depois como uma CAO. O movimento oscilatório da superfície livre no interior é aproveitado recorrendo a uma turbina hidráulica ou a um gerador linear.

Os sistemas flutuantes de translação, nos quais se insere a bóia em estudo, possibilitam o agrupamento de várias unidades numa mesma área, permitindo a construção de “parques de energia das ondas”. Tal situação proporciona a concentração dos meios de transporte da energia para terra.

2.2 Teoria linear das ondas

O estudo analítico de problemas envolvendo ondas marítimas iniciou-se no final do século XVIII graças aos trabalhos de L. Euler (1707-1783) e de P. Laplace (1749-1827). Estes dois investigadores introduziram o formalismo matemático que possibilitou o estudo analítico deste fenómeno mas as equações diferenciais a que chegaram não permitem uma solução geral para o mesmo.

O primeiro modelo matemático de ondas de gravidade foi proposto por G. Airy (1801-1892) e resulta da linearização das equações fundamentais. Este modelo é vulgarmente designado pela "teoria das ondas de pequena amplitude". G. Stokes (1819-1903), aplicando os conceitos de função potencial

e função de corrente, por si desenvolvidos, deduz a agora denominada "teoria de Stokes das ondas curtas". Esta teoria não linear permite obter a anterior teoria linear de Airy como resultado de 1ª ordem. Este modelo descreve assim, com particular eficácia, a propagação de ondas em profundidade infinita, apresentando no entanto grandes limitações para pequenas profundidades.

Le Méhauté [4] e Dean & Dalrymple [5] apresentam uma análise cuidada das hipóteses e domínios de aplicação das diversas teorias de propagação de ondas de gravidade.

No que se segue, apenas se apresenta a teoria linear das ondas visto esta ser suficiente para o presente estudo. Começa-se por referir as hipóteses simplificativas e condições fronteiras necessárias para a sua dedução, seguindo-se a apresentação das equações diferenciais fundamentais. Por fim, resumem-se os principais resultados (para profundidade intermédia), particularizando-os para a condição de profundidade infinita.

Para facilitar a dedução da teoria linear das ondas, introduz-se o formalismo matemático típico dos problemas de valores fronteira. A conservação da massa tem de ser verificada em conjunto com condições estabelecidas sobre a fronteira limitadora de uma dada região do espaço.

Considerando o fluido invíscido e incompressível, e que o escoamento é irrotacional, é possível assim definir-se um potencial de velocidade:

$$\vec{V} = \nabla \Phi \quad (2.1)$$

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (2.3)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2.4)$$

em que $\vec{V}$ é o campo de velocidades, u a componente da velocidade segundo x , v a componente da velocidade segundo y , w a componente da velocidade segundo z e Φ a função potencial.

Considerando a equação da continuidade sob estas hipóteses, e substituindo nela as componentes da velocidade, equações (2.2), (2.3) e (2.4), obtém-se a conhecida equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi = 0 \text{ (no domínio fluído)} \quad (2.5)$$

A resolução do problema consiste então na determinação do potencial Φ que verifique conjuntamente a equação de Laplace e as condições sobre a fronteira e iniciais.

Admitindo que o fundo é horizontal e impermeável, a velocidade normal é nula:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (2.6)$$

Em que $\vec{n}$ é a direcção normal ao plano.

A par do potencial de velocidades, a superfície livre também é uma incógnita. Esta tem uma forma variável no tempo. Em termos de superfície livre impõem-se duas condições fronteira. Uma das quais de carácter dinâmico, que resulta do facto de a pressão sobre a superfície livre ser constante, a menos que o raio de curvatura seja suficientemente pequeno para que se façam sentir os efeitos da tensão superficial. A segunda condição fronteira, de carácter cinemático, refere que qualquer partícula pertencente à superfície livre, $z=\eta(x,y,t)$, num determinado instante faz parte desta mesma superfície num instante posterior.

A primeira condição tem a forma:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \Phi)^2 + gz = c(t) \quad \text{para } z=\eta \quad (2.7)$$

onde $c(t)$ é uma função dependente apenas da variável tempo, que é nula se a cota média da superfície livre não se alterar com o decorrer do tempo.

Tomando em conta as hipóteses de escoamento potencial, para a 2ª condição tem-se:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \text{para } z=\eta \quad (2.8)$$

A principal dificuldade na obtenção de uma solução geral deve-se, não só à não linearidade das duas últimas equações, mas também ao facto das próprias serem escritas para a superfície livre η , sendo ela própria uma incógnita do problema.

Linearizando as referidas equações, admitindo a hipótese de ondas de pequena amplitude (amplitude infinitesimal do ponto de vista matemático), obtém-se da 1ª condição:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=0} + g\eta = 0 \quad (2.9)$$

e da 2ª condição:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (2.10)$$

É de referir que os termos quadráticos sendo uma ordem de grandeza inferior à dos restantes termos, foram desprezados.

O potencial Φ tem ainda que obedecer a duas condições adicionais. Como estamos interessados em soluções destas equações periódicas (no espaço e no tempo), introduz-se as seguintes condições:

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x, z, t + T) \quad (2.11)$$

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x + L, z, t) \quad (2.12)$$

em que T é o período e L o comprimento de onda.

O problema de valores fronteira linearizado, considerando que a propagação se efectua segundo a direcção x , consiste na resolução das equações (2.5), (2.6), (2.9), (2.10), (2.11) e (2.12).

Os pormenores matemáticos da resolução deste anterior sistema de equações estão descritos em [4] e [5]. No que se segue resumem-se apenas os principais resultados para uma onda progressiva. A superfície livre tem a forma sinusoidal:

$$\eta = \frac{H}{2} \sin(kt - mx) \quad (2.13)$$

e o potencial

$$\Phi = -\frac{H}{2} \frac{k}{m} \frac{\cosh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx) \quad (2.14)$$

onde a H representa a altura da onda, k a frequência angular e m o número de onda.

Da resolução do sistema de equações obtém-se ainda a relação de dispersão:

$$k^2 = gm \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right) \quad (2.15)$$

e as suas formas equivalentes

$$C = \left[\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right]^{1/2} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.17)$$

que permite obter a celeridade C e o comprimento de onda L .

Note-se que a velocidade de propagação das ondas depende da sua frequência, ou seja, o meio é dispersivo.

Completa-se assim a resolução do problema de valores fronteira.

Os anteriores resultados permitem obter as componentes da velocidade, o campo de pressão sobre a onda e as trajectórias das partículas.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{H}{2} k \frac{\cosh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \sin(kt - mx) \quad (2.18)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{H}{2} k \frac{\sinh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx) \quad (2.19)$$

A figura 2.2 exemplifica o perfil horizontal e vertical da velocidade das partículas da água numa onda progressiva idêntica à utilizada no estudo descrito no Capítulo 5. A profundidade foi adimensionalizada pelo comprimento de onda. É possível observar que ambas as velocidades diminuem com a profundidade, sendo que a horizontal é máxima sobre uma crista e a vertical é máxima entre a crista e a cava. Como poderá ser visto no Capítulo 5, parte do dispositivo em estudo está imerso até uma profundidade de 35 metros. Os valores numéricos apresentados correspondem às velocidades na entrada do dispositivo e na base do flutuador (figura 5.1).

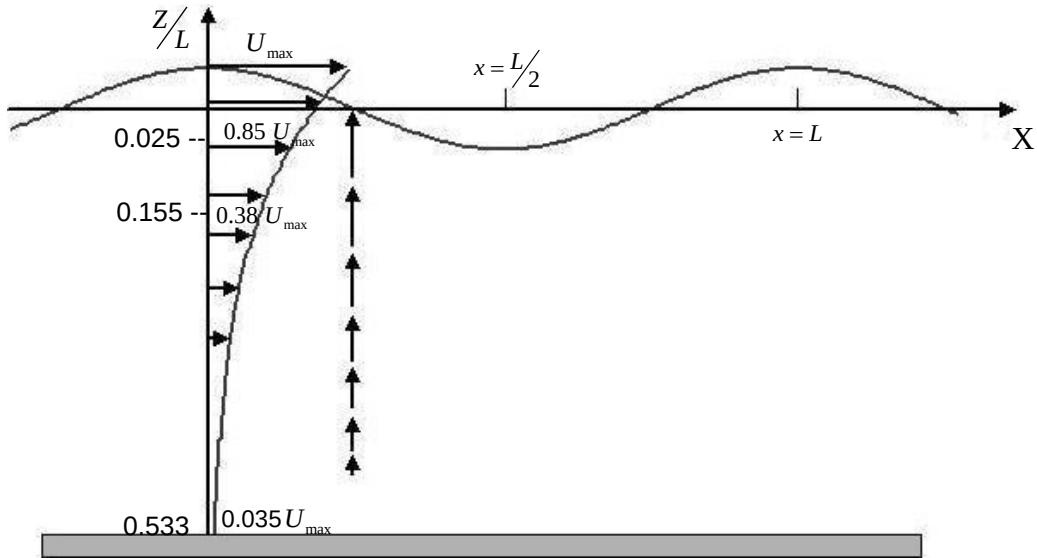


Fig.2.2 – Perfil adimensional de velocidade horizontal e vertical (T=12s e Z=120m)

Admitindo pressão nula na superfície livre e aplicando a equação de Bernoulli entre a superfície livre η e um ponto a uma profundidade z , obtém-se o campo de pressão, p , sobre a onda:

$$\left(\frac{p}{\rho} + gz + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_z = g\eta + \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{\eta=0} \quad (2.20)$$

Introduzindo na última equação as equações (2.13) e (2.14) obtém-se:

$$p = -\rho gz + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[m(h+z)]}{\cosh(mh)} \sin(kt - mx) \quad (2.21)$$

Pode observar-se que a variação de pressão apresenta uma componente hidrostática constante e uma componente dinâmica sinusoidal, cuja amplitude diminui com profundidade.

Uma partícula que ocupa a posição média (x_1, z_1) desloca-se por efeito dos campos de pressão e de velocidade para a posição $(x_1 + \zeta_x, z_1 + \zeta_z)$. A trajectória pode então ser determinada integrando a sua velocidade no tempo. Substituindo os valores das componentes da velocidade, considerando a

hipótese linear de ondas de pequena amplitude e integrando, obtém-se para os deslocamentos:

$$\zeta_x = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[m(h+z_1)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx_1) \quad (2.22)$$

$$\zeta_z = \frac{H}{2} \frac{\sinh[m(h+z_1)]}{\sinh(mh)} \sin(kt - mx_1) \quad (2.23)$$

onde ζ_x é o deslocamento segundo a direcção x e ζ_z segundo z.

A figura 2.3 exemplifica as trajectórias das partículas da água numa onda progressiva para diferentes profundidades, para uma condição de água profunda. Como na figura 2.3 apresentam-se valores numéricos relevantes para o estudo do dispositivo, representando-se neste caso a amplitude dos deslocamentos.

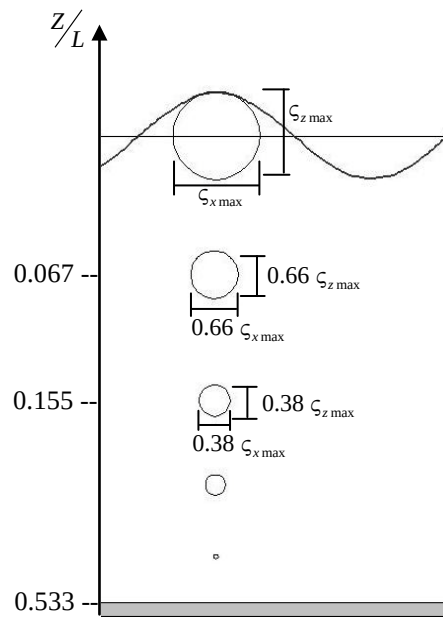


Fig.2.3 – Trajectórias das partículas da água numa onda progressiva para água profunda

O estudo desenvolvido nesta dissertação é realizado considerando ondas em condições de profundidade infinita. Particulariza-se assim na tabela 2.2 as equações anteriormente apresentadas para águas profundas:

Caso geral	Água profunda $h/L > 0,5$
$\eta = \frac{H}{2} \sin(kt - mx)$	$\eta = \frac{H}{2} \sin(kt - mx)$
$\Phi = -\frac{H}{2} \frac{k}{m} \frac{\cosh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx)$	$\Phi = -\frac{H}{2} \frac{k}{m} \exp(mz) \cos(kt - mx)$
$k^2 = gm \tanh\left(\frac{2\pi}{L}\right)$	$k^2 = gm$
$C = \left[\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right]^{1/2} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$	$C = \left[\frac{gL}{2\pi} \right]^{1/2} = \frac{gT}{2\pi} = \frac{g}{k}$
$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
$u = \frac{H}{2} k \frac{\cosh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \sin(kt - mx)$	$u = \frac{2\pi}{T} \frac{H}{2} \exp(mz) \sin(kt - mx)$
$w = \frac{H}{2} k \frac{\sinh[m(h+z)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx)$	$w = \frac{2\pi}{T} \frac{H}{2} \exp(mz) \cos(kt - mx)$
$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[m(h+z)]}{\cosh(mh)} \sin(kt - mx)$	$p = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \exp(mz) \sin(kt - mx)$
$\zeta_x = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[m(h+z_1)]}{\sinh(mh)} \cos(kt - mx_1)$	$\zeta_x = -\frac{H}{2} \exp(mz_1) \cos(kt - mx_1)$
$\zeta_z = \frac{H}{2} \frac{\sinh[m(h+z_1)]}{\sinh(mh)} \sin(kt - mx_1)$	$\zeta_z = \frac{H}{2} \exp(mz_1) \sin(kt - mx_1)$

Tabela 2.2 – Equações do caso geral particularizadas para o caso de profundidade infinita

Capítulo 3

Modelação numérica

A modelação numérica sofreu uma grande evolução nas últimas décadas, abrangendo problemas cada vez mais complexos. Tornou-se assim uma ferramenta útil na engenharia tanto na actividade de projecto como na investigação, prevendo fenómenos e podendo substituir alguns ensaios experimentais e consequentemente reduzindo gastos. É assim possível simular numericamente a interacção entre uma onda de superfície e uma estrutura.

Nesta dissertação estuda-se a interacção entre uma onda regular e um dispositivo de energia das ondas. Para tal utiliza-se um programa numérico que simula escoamentos com superfície livre. O código FLUENT permite realizar este tipo de simulações.

Seguidamente apresenta-se uma breve descrição do modelo numérico utilizado no FLUENT, do modelo de turbulência, da técnica VoF (Volume of Fluid), dos esquemas numéricos, da malha gerada e da sensibilidade de integração no tempo nas simulações realizadas.

3.1 Descrição do modelo numérico

O código FLUENT (versão 6.3.26) [6], utilizado nesta dissertação, é actualmente comercializado pela ANSYS, Inc e contém diversos módulos que permitem simular vários tipos de escoamentos resolvendo numericamente as equações fundamentais da mecânica dos fluidos. É possível simular problemas envolvendo escoamentos térmicos (convecção, condução e radiação), combustão, fluidos não Newtonianos, escoamentos compressíveis e multifásicos (opção utilizada em problemas com superfície livre) entre outros. A simulação de escoamentos com superfície livre é realizada aplicando uma técnica de captura de superfície livre, designada por VoF (Volume of Fluid), que foi desenvolvida inicialmente por Hirt e Nichols [7]. As equações da quantidade de movimento e da massa são resolvidas na água e no ar, o que permite assim introduzir o efeito do vento ou de um campo de pressões variável. O código

FLUENT aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade, as equações de Navier-Stokes / Navier-Stokes-Reynolds e as equações do modelo de turbulência, utilizando o Método dos Volumes Finitos (MVF) [8]. Este método numérico teve origem a partir do Método das Diferenças Finitas (MDF). O MDF foi fortemente utilizado no passado em problemas de escoamento de fluidos e transferência de calor. Este método apresenta deficiências quando as geometrias são complexas, o que ocorre em grande parte de problemas práticos. Este facto justifica-se, pois todo o desenvolvimento do método foi baseado em sistemas de coordenadas ortogonais (cartesianas, cilíndricas e esféricas). A utilização de coordenadas curvilíneas e de técnicas multi-blocos permitiria resolver problemas complexos, mas os programas existentes não têm a flexibilidade dos códigos desenvolvidos e baseados no método MVF.

A aplicação do MDF tem por base a representação das derivadas espaciais e temporais através de expressões algébricas, sendo essas expressões obtidas usando as séries de Taylor. Esse tipo de aproximação gera inevitáveis erros de arredondamento, conseguindo-se porém manter um controlo sobre esses erros e as suas influências. A partir do MDF foi desenvolvido o MVF, onde as equações discretas são obtidas através do balanço da conservação da propriedade (massa, quantidade de movimento e entalpia) no volume de controlo. Desta forma é possível garantir a conservação da massa e da quantidade de movimento no volume de controlo, o que é uma grande vantagem do MVF relativamente ao MDF.

3.2 Equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações da velocidade do fluido no tempo e no espaço. A resolução directa das equações de transporte instantâneas de Navier-Stokes permitiria, na teoria, obter toda a informação acerca dos fenómenos físicos que ocorrem no escoamento, bem como na interacção entre o fluido e estruturas. Porém, a resolução completa dessas equações instantâneas para números de Reynolds grandes é ainda

limitada por questões ligadas ao processamento e cálculo computacional e ao erro associado aos métodos numéricos.

No entanto, as equações de Navier-Stokes podem ser modificadas de forma a obter um grupo de equações médias. Independentemente da metodologia considerada, surgem novos termos que devem ser modelados, necessitando da introdução de modelos de turbulência.

As equações médias de Navier-Stokes são conhecidas na literatura como RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) e representam apenas as grandezas médias do escoamento, sendo todas as escalas de turbulência modeladas. Este tipo de aproximação pode ser aplicado tanto para escoamentos transientes como permanentes. As equações RANS são vulgarmente utilizadas nas simulações de problemas de engenharia e estão acopladas a vários modelos de turbulência (Spalart-Allmaras, $k-\varepsilon$, $k-\omega$, entre outros).

Considerando então a abordagem média das equações de Navier-Stokes, a componente da variável velocidade (u_i) pode ser decomposta numa média ($\bar{u}_i$) e numa componente de flutuação (u'_i):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (3.1)$$

Analogamente, outras grandezas escalares (Φ = pressão, energia, etc.), podem ser também decompostas num valor médio e flutuante:

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (3.2)$$

Para facilitar a notação, prescinde-se, no que se segue, da barra na notação da média da velocidade.

Considerando um tempo médio nas equações instantâneas e aplicando a decomposição anterior às equações da continuidade e da quantidade de movimento, obtêm-se em coordenadas cartesianas, as equações seguintes (utilizando notação de Einstein):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (3.4)$$

Onde ρ é a densidade, u a velocidade, p a pressão e μ a viscosidade.

As equações (3.3) e (3.4) são chamadas RANS e têm a mesma forma geral das equações instantâneas de Navier-Stokes, sendo as suas variáveis representadas por um valor numa média temporal. Note-se também o aparecimento de um termo adicional $(-\rho \overline{u_i u_j})$ ligado aos efeitos de turbulência e denominado de tensor de Reynolds. São necessários modelos de turbulência para o descrever, e assim “fechar” o sistema de equações.

Um método geralmente utilizado para relacionar os tensores de Reynolds com os gradientes de velocidade do escoamento, consiste na hipótese de Boussinesq [9] representada pela equação seguinte:

$$(-\rho \overline{u_i u_j}) = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}(\rho k) \delta_{ij} \quad (3.5)$$

A hipótese de Boussinesq é fundamental para o desenvolvimento dos modelos de turbulência, entre os quais o modelo $k-\epsilon$. A viscosidade turbulenta é considerada como um escalar e posta na dependência da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação de turbulência (ϵ). A desvantagem na utilização desta hipótese reside no facto da mesma considerar a viscosidade turbulenta como uma grandeza escalar isotrópica, hipótese nem sempre verificada na prática.

3.3 Modelos de turbulência

O modelo $k-\epsilon$ padrão foi proposto por Launder et al. [10], tornando-se num dos mais utilizados nos projectos de engenharia, envolvendo escoamentos

industriais e transferência de calor. Este modelo popularizou-se rapidamente devido à sua robustez, economia e precisão satisfatória na simulação de escoamentos turbulentos. O modelo k - ε standard (padrão) é um modelo semi-empírico baseado num modelo de equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e para a sua taxa de dissipação (ε). O modelo de equações de transporte para k deriva das equações exactas, enquanto que o modelo de equações de transporte para ε se obtém usando um raciocínio físico, tendo semelhança matemática com o respectivo homólogo.

Na derivação do modelo k - ε , supõem-se que o fluxo é totalmente turbulento e que os efeitos de viscosidade molecular são desprezáveis. Este modelo standard é assim válido apenas para fluxos totalmente turbulentos.

Equações de transporte para o modelo k - ε standard

A energia cinética turbulenta, k , e a sua taxa de dissipação, ε , são obtidas a partir das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.6)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.7)$$

em que G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes de velocidade; G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuação; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes; σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε , respectivamente.

Modelação da viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta, é calculada através da combinação de k e ε da seguinte forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

As constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ε do modelo têm por defeito os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon}=1.44; C_{2\varepsilon}=1.92; C_\mu=0.09; \sigma_k=1.0; \sigma_\varepsilon=1.3$$

Estes valores predefinidos foram determinados a partir de experiências com ar e água para fluxos turbulentos, incluindo fluxos homogêneos e turbulência isotrópica descendente.

Modelação da produção de turbulência no modelo k - ε

Por fim, G_k , calcula-se através da equação exacta para o transporte de k , descrito em [6].

3.4 Problemas multifásicos – Método VoF

Os problemas com superfície livre representam um caso particular de escoamento multifásico. O tratamento numérico destes problemas pode ser feito através de dois métodos: Euler-Lagrange e Euler-Euler.

Nesta dissertação utiliza-se o método de Euler-Euler. As diferentes fases são tratadas como meios interpenetrantes separados por uma interface. Surge assim a necessidade de se introduzir o conceito da fracção de volume, de forma a definir essa interface.

A fracção volumétrica é a fracção de volume que um determinado fluido ocupa dentro de um volume de controlo, ou célula. Na modelagem Euler-Euler, as

fracções volumétricas são funções contínuas no espaço e no tempo, e uma fase não pode ocupar o volume da outra [6].

Um escoamento multifásico, pode ser homogéneo, no qual todos os fluidos compartilham os mesmos campos e as fases interagem por meio de termos de transferência através das interfaces; ou não homogéneo, onde os campos de velocidade são separados para cada fluido e, apenas o campo de pressão é comum. Dentre os modelos Euler-Euler, um método muito utilizado é o método VoF (Volume of Fluid).

Para cada fase, são utilizadas as mesmas equações do movimento, sendo as características próprias do fluido, como a massa específica e a viscosidade devidamente assimiladas no cálculo.

Uma das formas de definir uma interface entre dois fluidos (superfície livre no presente caso) é utilizar um escalar (fracção de volume) C que toma um valor diferente para cada uma das fases. Classicamente este escalar toma o valor 0 no ar e 1 na água.

$$C = \begin{cases} 0 & \text{para o ar} \\ 1 & \text{para a água} \end{cases} \quad (3.9)$$

O movimento da interface em problemas sem mudança de fases é dado por:

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + u \cdot \nabla(C) = 0 \quad (3.10)$$

que é a chamada equação de transporte da fracção volumétrica, onde u é o vector velocidade e t o tempo.

A posição da superfície livre define-se pelo valor 0.5. Os valores intermédios, entre 0 e 1, indicam a presença de uma mistura entre água e ar. A dificuldade deste método reside na conservação numa transição reduzida entre os dois fluidos.

Para o balanço de quantidade de movimento, usam-se as equações de Cauchy. Os termos de forças capilares e tensão superficial são desprezados. As únicas propriedades descontínuas através da interface são: a massa

específica e a viscosidade. Assim, longe da interface o método VoF trabalha como um método de solução convencional para um problema monofásico.

3.5 Esquemas numéricos

Nesta dissertação o algoritmo de acoplamento entre velocidade e pressão utilizado é o SIMPLEC adaptado para simulações transientes. O acoplamento é feito através de uma relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração de velocidade. Este algoritmo tem uma estrutura similar ao SIMPLE, diferindo apenas na expressão da correcção da pressão. Convém referir que a interpolação da pressão é feita pelo algoritmo PRESTO, visto ser o esquema aconselhado no manual do FLUENT para modelação de escoamentos com superfície livre; o termo convectivo das equações de Navier-Stokes é modelado pelo esquema MUSCL, de 3ª ordem, o que permite obter melhores resultados em comparação com a utilização, por exemplo, do esquema UDS de 1ª ordem; para evitar a difusão numérica, e devido ao uso do método VoF, o FLUENT aconselha a utilização do esquema HRIC [11] para o termo de convecção da equação de transporte da fracção de volume. Este é uma mistura de esquemas que dependendo da variação local da fracção de volume, utiliza o mais indicado.

3.6 Geração da malha

A geração de malha é citada frequentemente como uma parte crítica e que consome um maior tempo na modelação numérica. Os resultados numéricos devem ser independentes da malha, ou seja, a sua precisão está intimamente ligada à sua qualidade. Adicionalmente, os códigos CFD são mais robustos e eficientes quando usam uma malha bem construída. É assim fundamental conhecer em detalhe os métodos de geração de malha.

Nesta dissertação, a malha gerada para a discretização do domínio de cálculo é feita através do programa GAMBIT (versão 2.2.30). Actualmente, este programa tem disponíveis os métodos de malha estruturada e não estruturada.

O método de malha estruturada possui este nome devido ao facto da malha ser disposta num padrão regular repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros em 2D e elementos hexaédricos em 3D. A malha estruturada possibilita um bom controlo durante a geração da malha, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos.

Os métodos de malha não-estruturada utilizam uma colecção arbitrária de elementos para preencher o domínio de cálculo. Como o arranjo de elementos não tem nenhum padrão fixo, a malha é chamada não-estruturada. Este tipo de malhas utiliza triângulos em 2D e tetraedros em 3D no GAMBIT. Como acontecem com as malhas estruturadas, os elementos podem sofrer deformações para se ajustar ao domínio. O uso da malha não-estruturada permite gerar malhas em torno de geometrias complexas.

3.7 Sensibilidade à integração no tempo

O passo de tempo e o número de iterações não lineares são parâmetros importantes na precisão de uma simulação numérica. O uso de valores inadequados pode provocar perda de informação bem como a não convergência residual da velocidade, fracção de volume, conservação da massa. Desta forma foi necessário testar o passo de tempo e o número de iterações não lineares definidas previamente. Com este objectivo efectuaram-se alguns casos fazendo variar estes dois parâmetros individualmente, comparando os resultados de teste obtidos.

O passo de tempo foi testado através da simulação de um cilindro vertical aberto, que permite a entrada de água no seu interior. O cilindro tem dimensões similares às máximas do dispositivo em estudo (Capítulo 5) e encontra-se num tanque idêntico ao descrito no Capítulo 4. A onda utilizada tem período $T=12s$ e comprimento $L=225m$. Na figura 3.1 compara-se, em dois instantes diferentes, a superfície livre no plano de simetria longitudinal do canal para dois passos de tempo: $T/600$ e $T/300$, ou seja, $12/600$ e $12/300$ segundos.

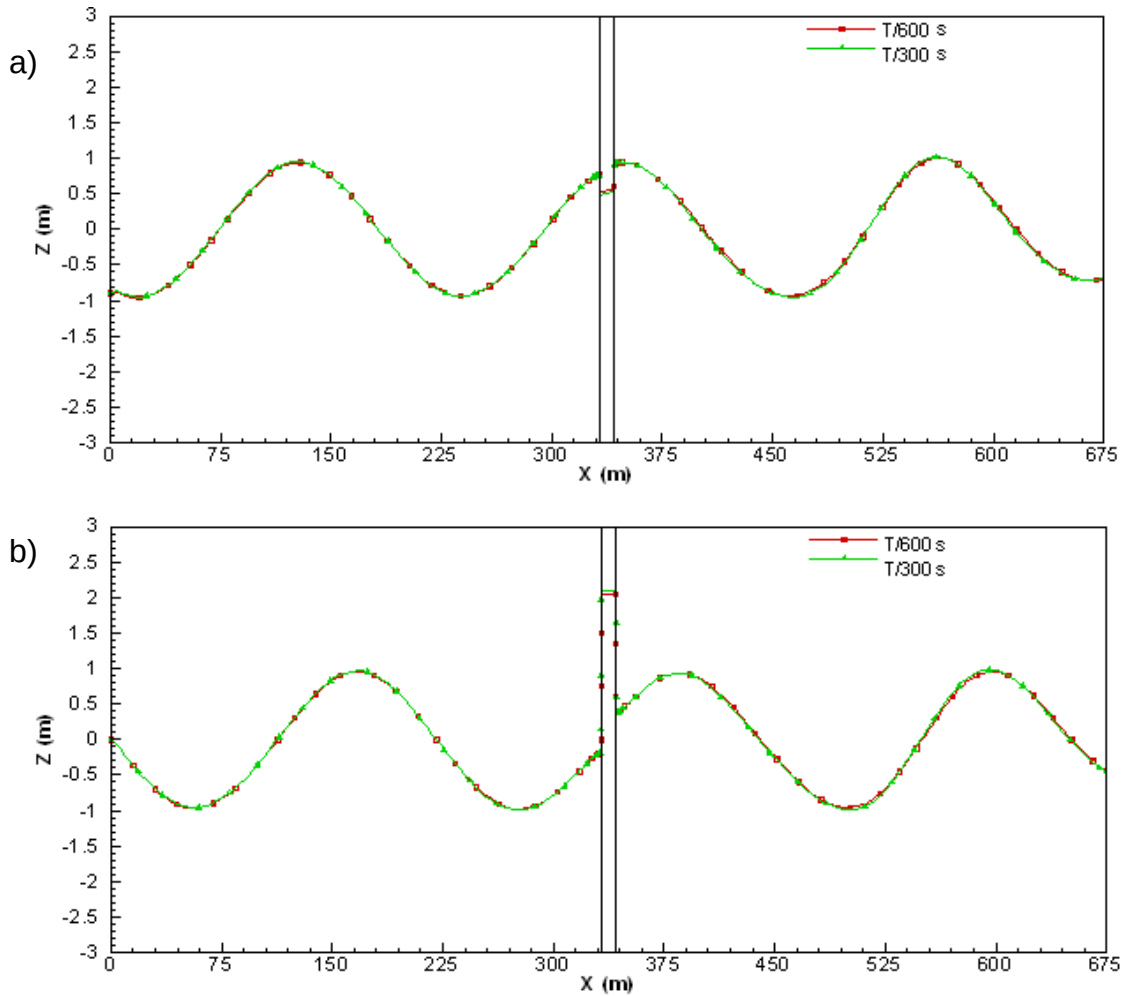


Fig.3.1 – Influência do passo de tempo: elevação da superfície livre em dois instantes a) e b)

Da observação das figuras 3.1 a) e b) é possível verificar que existe uma ligeira diferença entre as superfícies livres, principalmente dentro do cilindro. No entanto essa diferença (máxima) é apenas de 3% na superfície livre interior e 1% na exterior (fora do cilindro), considerando a amplitude da onda. Em qualquer uma das discretizações temporais a conservação da amplitude da onda e o seu comprimento conservam-se, verificando-se também que o período é idêntico nos dois casos.

Na figura 3.2 compara-se a velocidade vertical no plano de simetria para os mesmos instantes, para o passo de tempo de $T/600$ e $T/300$ segundos, sendo possível identificar uma ligeira diferença no campo de velocidade vertical no interior do cilindro.

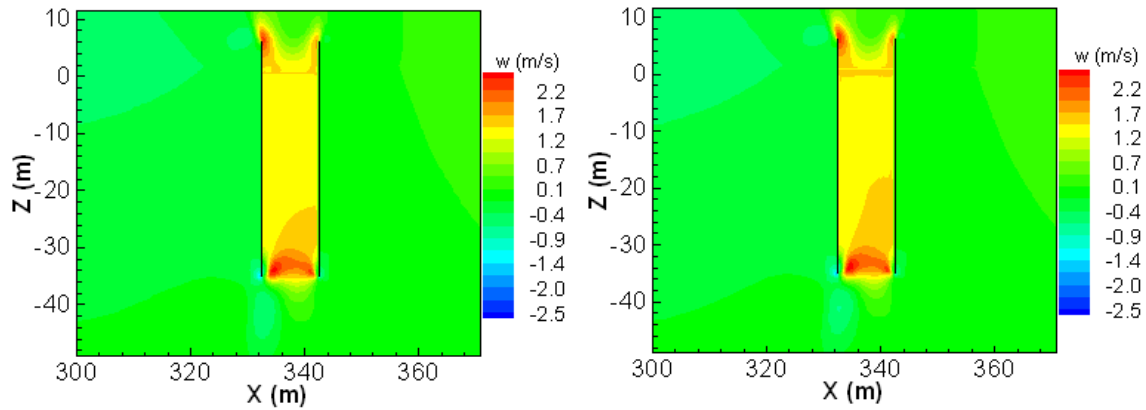


Fig.3.2 – Velocidade vertical

Parece assim que o passo de tempo predefinido de $T/600$ segundos é uma escolha mais prudente para o estudo a desenvolver.

De modo a verificar a sensibilidade dos resultados ao número de iterações não lineares, simulou-se o caso do cilindro da secção 5.3 (Capítulo 5) impondo 5 e 15 iterações não lineares por cada passo de tempo. Nas figuras 3.3 e 3.4 apresenta-se o resíduo da continuidade, das componentes da velocidade, dos valores da turbulência e da fracção de volume.

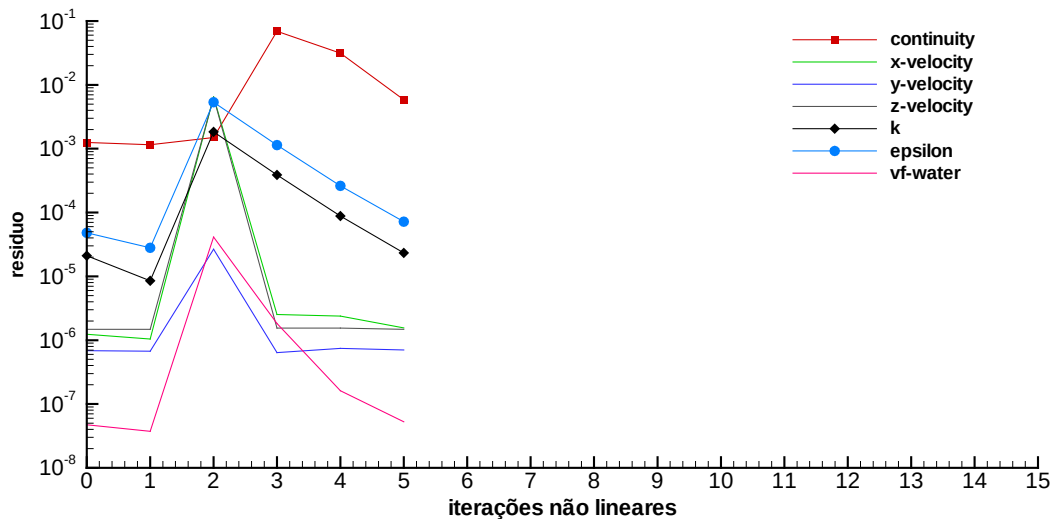


Fig.3.3 – Resíduo para 5 iterações não lineares

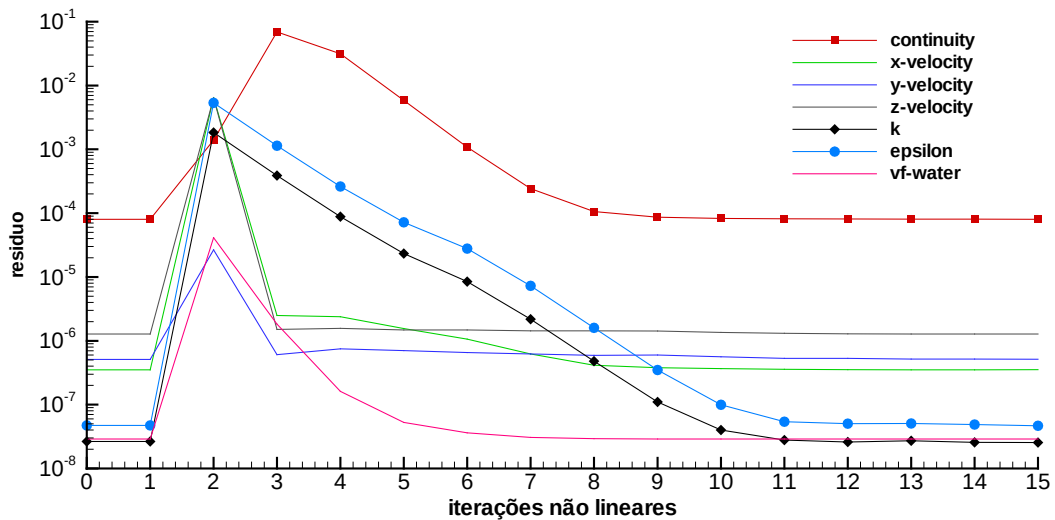


Fig.3.4 – Resíduo para 15 iterações não lineares

Da observação das figuras 3.3 e 3.4, verifica-se que para 15 iterações não lineares alguns dos resíduos atingem patamares de convergência não atingidos no caso das 5 iterações. No caso da continuidade a redução do resíduo para 5 iterações não lineares é cerca de 10^{-1} (10^{-1} para 10^{-2}) enquanto que para 15 iterações não lineares é cerca de 10^{-3} (10^{-1} para 10^{-4}); para k - ϵ a redução do resíduo é cerca de 10^{-2} e 10^{-4} , respectivamente para 5 e 15 iterações não lineares; no caso da velocidade e da fracção de volume o resíduo para 5 iterações não lineares é praticamente o mesmo que impondo 15 iterações não lineares. Apesar da diferença que se verifica no resíduo da continuidade e de k - ϵ , esta em nada altera o nível de precisão para o estudo pretendido.

De modo a se comprovar tal facto, apresentam-se nas figuras 3.5 e 3.6 a comparação do perfil vertical da componente horizontal da velocidade na onda e da componente vertical da velocidade no interior do dispositivo, para 5 e 15 iterações não lineares.

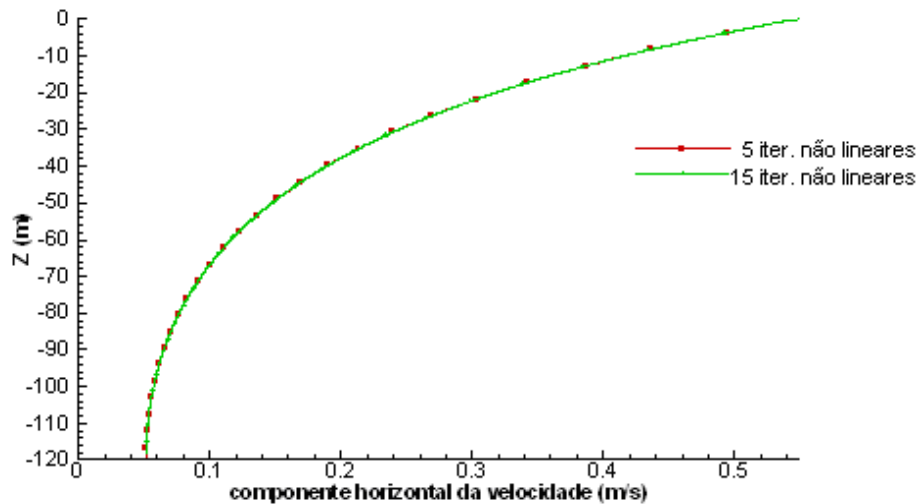


Fig.3.5 – Comparação do perfil vertical da componente horizontal da velocidade na onda

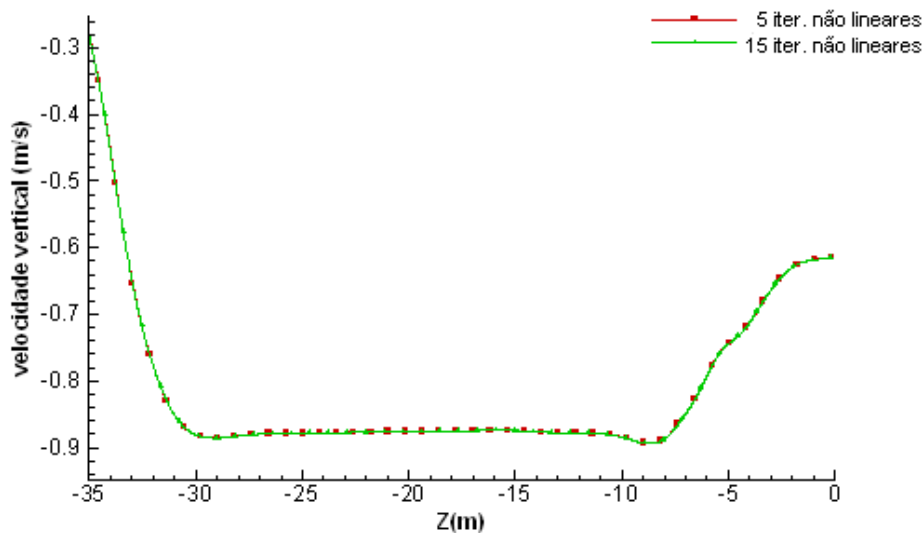


Fig.3.6 – Comparação da componente vertical da velocidade no interior do dispositivo

Da observação das figuras 3.5 e 3.6 pode-se concluir que a escolha de 5 iterações não lineares é satisfatória, pois não existe diferenças significativas nos resultados. O facto de impor 15 iterações não lineares leva a que o tempo de cálculo seja três vezes superior ao de 5 iterações não lineares, o que tornaria a simulação muito longa e pesada. Havendo uma real necessidade de se chegar a patamares onde a convergência é praticamente constante, bastaria impor cerca de 8-9 iterações não lineares, que levaria a que o tempo de cálculo fosse o dobro que o de 5 iterações não lineares.

Capítulo 4

Validação do modelo numérico

A validação do modelo numérico foi efectuada de forma sequencial, em três etapas de complexidade crescente:

- i) Simulação da propagação de uma onda num canal bidimensional com fundo horizontal.
- ii) Simulação da propagação de uma onda num tanque tridimensional com um fundo horizontal.
- iii) Simulação da interacção de uma onda regular com um cilindro fixo vertical assente no fundo horizontal do tanque.

4.1 Propagação de uma onda bidimensional sobre um fundo horizontal

A fase inicial de validação teve por objectivo estimar a precisão das simulações da propagação de uma onda monocromática. Pretendeu definir-se: a discretização longitudinal e em profundidade (número de elementos por comprimento de onda e distribuição de elementos em profundidade), o passo de tempo, o método de geração da onda, as condições de fronteira e a eficácia de uma zona de absorção que evite a reflexão da onda do lado oposto ao de geração desta.

Testou-se também os esquemas numéricos utilizados: SIMPLEC para o acoplamento entre a velocidade e pressão, PRESTO para a interpolação da pressão, MUSCL para a modelação do termo convectivo da equação Navier-Stokes e HRIC para o termo convectivo da equação de transporte da fracção de volume do método VoF. Todos eles foram aplicados em todas as simulações posteriores.

A geração da onda é feita através de um batedor numérico [12] definido por uma UDF (User Define Function), que permite programar condições limites. O batedor numérico consiste na imposição de uma condição de fronteira nas componentes horizontal e vertical de velocidade, $u(t)$ e $v(t)$, e a correspondente amplitude da deformação da superfície livre, $\eta(t)$.

A onda considerada tem as seguintes características: período $T=12s$, amplitude $a=1.0m$ e comprimento $L=225 m$. O canal considerado tem profundidade $120m$ e comprimento $1350m$ (equivalente a aproximadamente 6 comprimentos de onda).

O domínio de cálculo divide-se em duas partes (segundo o seu comprimento), a primeira corresponde inicialmente à zona de desenvolvimento da onda a que se segue uma região onde a onda está estabilizada (região onde os corpos que interagem com a onda devem ser posicionados), a segunda parte é destinada à absorção da onda.

No que diz respeito a condições de fronteira impôs-se no fundo uma condição de deslizamento (parede sem aderência) e na extremidade direita uma condição de parede. Na parte superior, onde se encontra o ar, uma condição de pressão atmosférica constante. A fronteira esquerda do canal é utilizada como gerador numérico de ondas impondo-se a deformação de superfície livre e correspondentes perfis de velocidades horizontal e vertical, calculados de acordo com a teoria linear das ondas. Na figura 4.1 apresenta-se o domínio de cálculo e resumem-se as condições de fronteira, bem como as zonas importantes do canal.

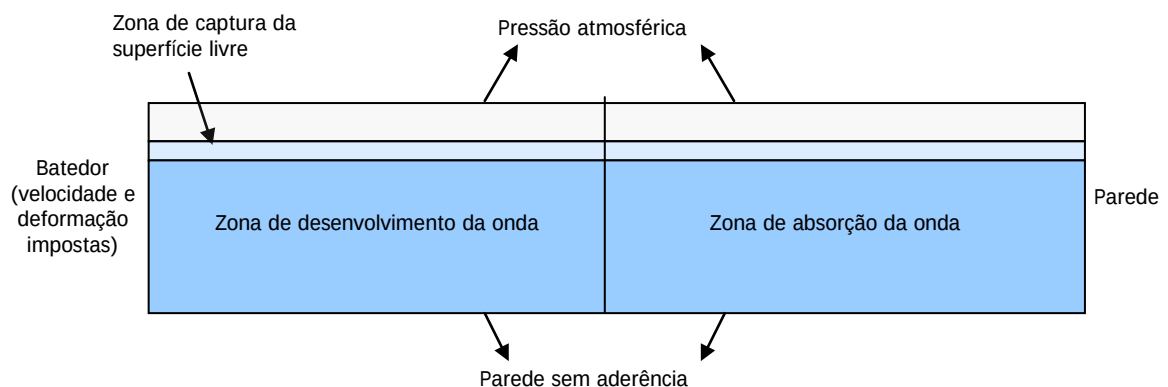


Fig.4.1 – Domínio de cálculo e condições fronteira

Na Figura 4.1 identifica-se ainda a região em que a superfície livre evolui. Nesta zona, definida entre a profundidade 1.5m na água e a cota de 1.5m no ar (que portanto ultrapassa um pouco a altura entre a crista e a cava da onda, a onda a simular tem 1.0m de amplitude) é necessário identificar a posição da superfície livre ou seja capturar a interface água ar. A respectiva construção de malha necessita de especial atenção. Um estudo realizado por Didier et al. [12] mostrou que a malha deve ter uma discretização vertical de 20 elementos entre a cava e a crista da onda. Esta discretização é suficiente para assegurar a propagação da onda sem perda de amplitude ou alteração de período.

Na direcção vertical desde a superfície livre até ao fundo aplica-se um estiramento progressivo da malha com 90 elementos, da superfície livre até ao superior da camada de ar utiliza-se a mesma técnica usando 35 elementos.

O estudo realizado por Didier et al. [12] mostrou também que a malha deve ter uma discretização horizontal na ordem dos 45-50 elementos por comprimento de onda (isto para casos de propagação de onda). Tratando-se de casos de propagação de onda, a malha tem de ser do tipo estruturada. Uma malha não estruturada com elementos triangulares, por exemplo, na zona da superfície livre, induz instabilidades e difusão numérica da fracção de volume. Devido a tal facto, impôs-se 45 elementos por comprimento de onda na zona de desenvolvimento e de onda estabilizada. Não obstante, na zona de absorção a malha é progressivamente estirada para atenuar gradualmente a amplitude da onda.

O número total de elementos da malha 2D é de 22475, dos quais 15500 correspondem a água e 6975 a ar.

No que diz respeito à discretização temporal, simulações preliminares em 2D da propagação de uma onda num canal do mesmo tipo, permitiram definir um passo de tempo adequado para modelar este tipo de escoamentos transientes com superfície livre utilizando o método VoF. Como se mostra na secção 3.7, o passo de tempo mais adequado é $T/600$ segundos, assim como a utilização satisfatória de 5 iterações não lineares. O passo de tempo foi então definido como $T/600$ segundos, o que corresponde a 0.02 segundos.

Na figura 4.2 mostra-se a deformação da superfície livre (num determinado instante) obtida numericamente, resultante de uma simulação efectuada com os parâmetros atrás definidos.

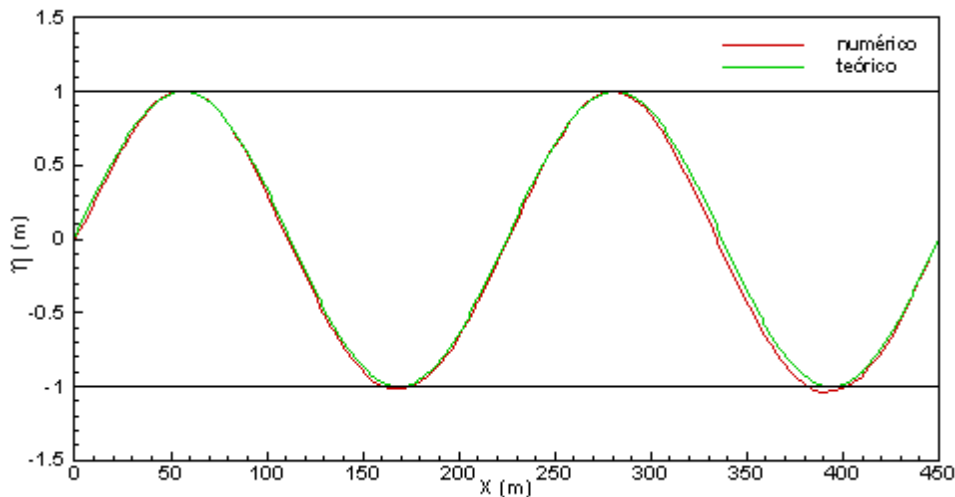


Fig.4.2 – Deformação da superfície livre 2D

Como se pode verificar pela figura durante a propagação da onda a dissipação numérica é compatível com o estudo proposto.

4.2 Propagação de uma onda tridimensional sobre um fundo horizontal

Tendo no ponto anterior sido definidos alguns parâmetros numéricos ligados à discretização, é agora necessário verificar se estes continuam válidos numa situação tridimensional. É também necessário definir a discretização adequada na direcção transversal à propagação da onda.

A deformação de superfície livre e o perfil de velocidade vertical são comparados com a teoria linear. Testa-se ainda o método de geração e afere-se sobre a dissipação numérica. Note-se que resultados ao nível de propagação de ondas em 3D, fazendo uso do método VoF, são escassos.

O tanque agora definido tem profundidade 120m, comprimento 1350m e largura 50m. Todas as condições fronteira mantêm-se, tendo-se imposto nas paredes laterais uma condição de deslizamento (parede sem aderência).

A onda considerada é idêntica à utilizada no ponto anterior: período $T=12s$, uma amplitude $a=1.0m$ e comprimento $L=225 m$.

As discretizações na direcção longitudinal e na vertical mantêm-se inalteráveis. Na direcção transversal da zona de desenvolvimento, a largura dos elementos foi escolhida de forma a ser igual à sua dimensão longitudinal resultando assim elementos paralelepípedicos com duas das faces horizontais quadradas. Na zona de absorção manteve-se a dimensão transversal dos elementos.

O número total de elementos da malha 3D é de 239250, dos quais 165000 correspondem a água e 74250 ao ar.

O passo de tempo foi também de 0.02s.

Na figura 4.3 representa-se a superfície livre obtida através de uma simulação efectuada com os parâmetros atrás definidos em que para melhor visualização foi efectuada uma distorção (amplificação) na escala vertical.

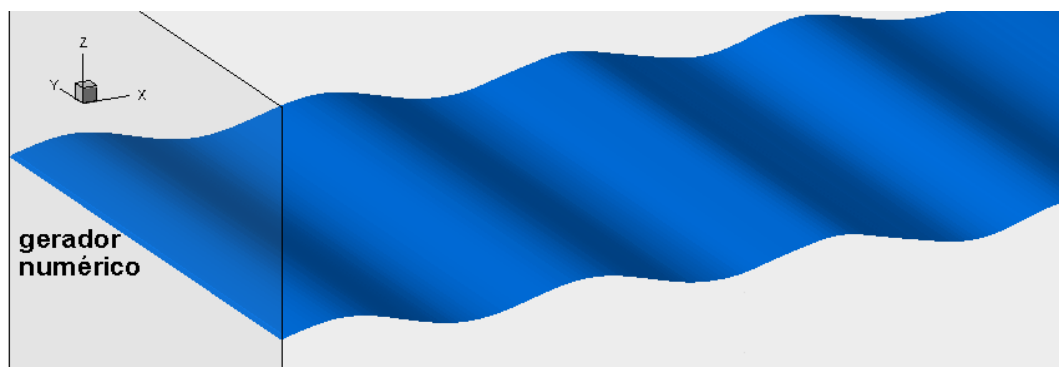


Fig.4.3 – Superfície livre tridimensional (com distorção vertical)

Para avaliar com maior precisão a qualidade da onda gerada e a dissipação numérica comparam-se na figura 4.4 as deformações da superfície livre no plano de simetria longitudinal obtidas numericamente e pela teoria linear das ondas. Na figura 4.5 efectua-se uma comparação análoga mas para o perfil da componente horizontal da velocidade sobre uma crista.

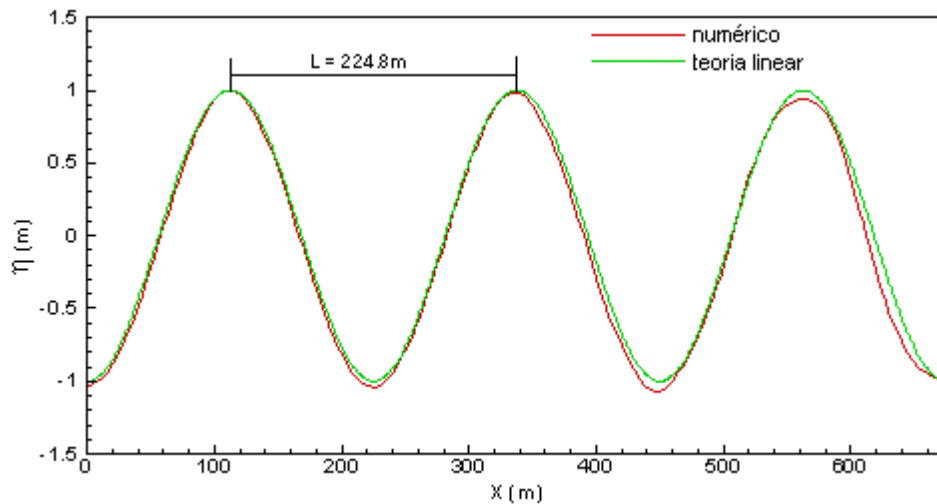


Fig.4.4 – Deformadas de superfície livre obtidas numericamente e pela teoria linear

A comparação da deformação da superfície livre, representada na figura 4.4, permite constatar que a dissipação numérica ao longo da propagação é reduzida não pondo em causa o estudo que se pretende efectuar. A onda apresenta-se já estável na vizinhança da superfície de geração o que valida a escolha feita para a localização do dispositivo, a um comprimento e meio de onda do gerador numérico. O comprimento de onda e o período obtidos a partir dos resultados da simulação, respectivamente 224.8m e 12s, garantem ainda que a celeridade da onda, $c=L/T$, é também simulada com elevada precisão.

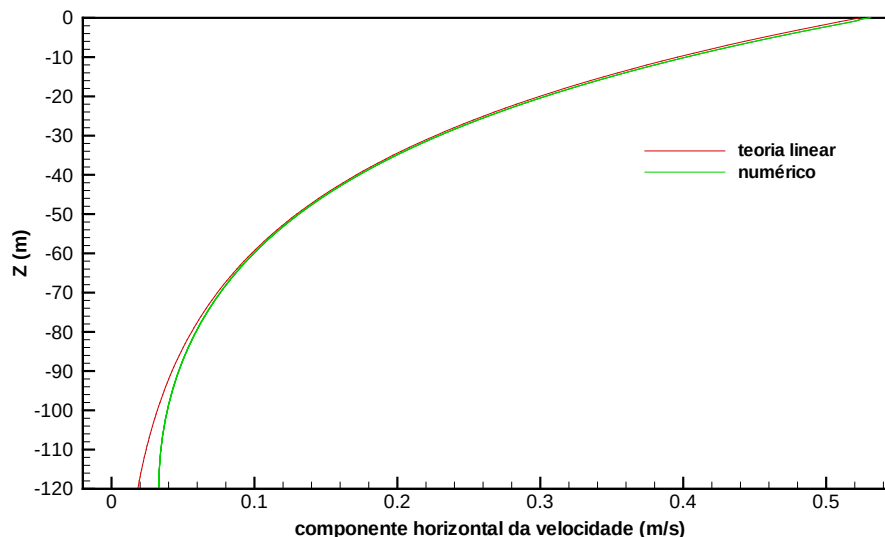


Fig.4.5 – Perfil da componente horizontal da velocidade obtido numericamente e pela teoria linear

A distribuição da componente horizontal da velocidade numérica e analítica apresenta também boa concordância exibindo diferença apenas junto ao fundo. Note-se que o resultado analítico é deduzido sob a hipótese de escoamento potencial, portanto o fluido é assumido como inviscido. Nas simulações numéricas foi utilizada uma malha que junto ao fundo tem elementos de dimensão excessiva para simular a camada limite; estes factos justificam as diferenças obtidas.

Fica assim validado o tanque numérico do ponto de vista da geração e propagação da onda.

Na utilização de outros períodos de onda, deverão ser sempre mantidas as relações número de elementos/profundidade, número de elementos/comprimento de onda e discretização temporal utilizadas nesta validação.

4.3 Interação entre uma onda e um cilindro vertical fixo ao fundo

A terceira etapa de validação teve por objectivo comparar resultados obtidos com o modelo numérico utilizado (com todos os parâmetros definidos anteriormente), com resultados existentes na bibliografia.

Os resultados obtidos referentes à deformada de superfície livre são comparados com resultados experimentais e numéricos apresentados em [13].

Os resultados obtidos referentes aos esforços hidrodinâmicos são comparados com resultados numéricos obtidos através do programa WAMIT.

4.3.1 Deformação da superfície livre

Uma vez testada a geração e propagação da onda, segue-se uma fase de validação que tem por objectivo aferir sobre a qualidade da simulação na região de interacção onda-corpo [14]. Para tal reproduziram-se os ensaios apresentados em [13]. A onda gerada tem uma amplitude $a=0.0635\text{m}$, um período $T=0.902\text{s}$ a que corresponde o comprimento de $L=1.27\text{m}$, o tanque tem fundo horizontal e profundidade de 0.7m . O domínio de cálculo tem por extensão total 6 comprimentos de onda e largura 2.54m . A zona com ar tem

uma altura de 0.7m relativamente ao nível da superfície livre no repouso. O cilindro está fixo ao fundo e colocado a uma distância do batedor de uma vez e meia o comprimento de onda, tendo um diâmetro de $D=0.508\text{m}$ e uma altura total correspondente à do domínio. As propriedades de simetria longitudinal do escoamento são aproveitadas para reduzir o domínio de cálculo para metade o que permite diminuir significativamente o tempo de cálculo.

A discretização do domínio caracteriza-se por uma zona mais refinada em torno do cilindro e na zona de evolução da superfície livre. O número total de elementos da malha 3D é de 705342, dos quais 423172 correspondem à água e 282170 ao ar. O passo de tempo utilizado é $T/600$, correspondendo a 0.0015s. Na figura 4.6 apresenta-se um pormenor da superfície livre na zona em que interage com o cilindro podendo observar-se que a sua distorção é mais visível a jusante.

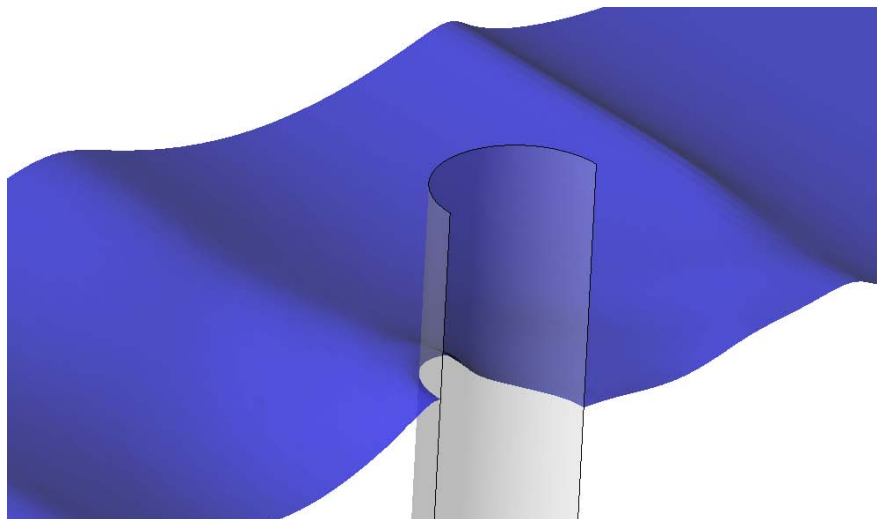


Fig.4.6 – Interacção superfície livre cilindro

Na figuras 4.7 a) e b) compara-se a deformada da superfície livre no plano de simetria longitudinal obtida numericamente utilizando dois modelos (laminar e turbulento, $k-\varepsilon$) com os dados experimentais [13]. Os instantes escolhidos correspondem respectivamente à elevação máxima e mínima da superfície livre na parede a montante do cilindro. O traço interrompido sobre o cilindro indica a posição média da superfície livre.

Representa-se na figura 4.8 a) e b) a superfície livre obtida no plano perpendicular à direcção de propagação que passa pelo eixo do cilindro.

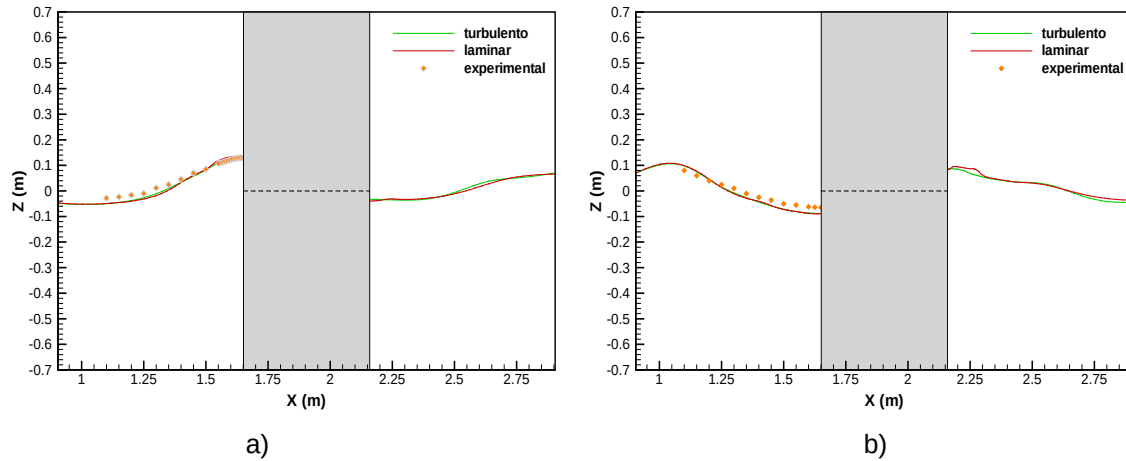


Fig.4.7 – Deformada da superfície livre no plano de simetria longitudinal: a) elevação máxima; b) elevação mínima

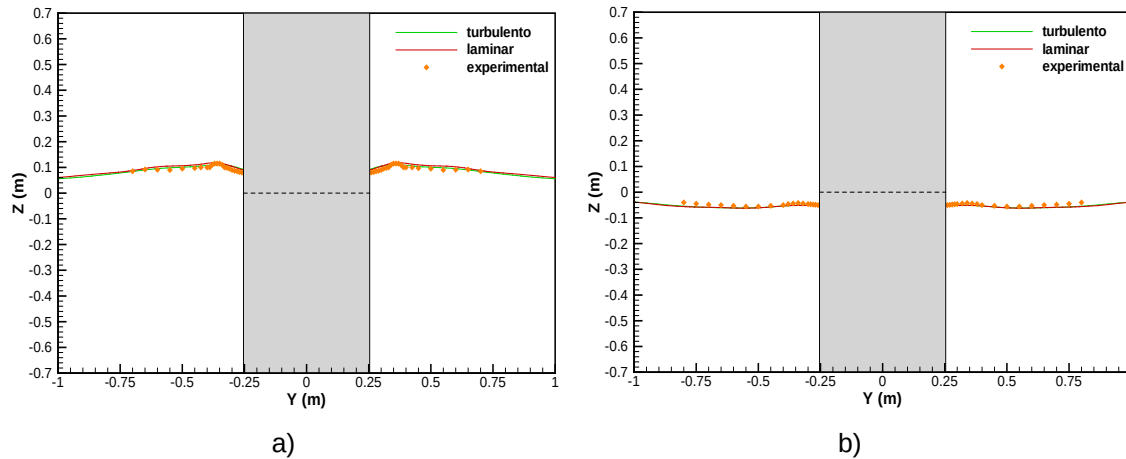


Fig.4.8 – Deformada da superfície livre no plano perpendicular à direcção de propagação: a) elevação máxima; b) elevação mínima

Os dois modelos numéricos permitem obter resultados muito semelhantes observando-se apenas pequenas diferenças na zona de esteira do cilindro onde os efeitos rotacionais são mais intensos (figura 4.7 b). Os resultados numéricos são consistentes face aos experimentais.

4.3.2 Esforços

Testada a qualidade da simulação na região de interacção onda-corpo, a próxima fase de validação tem por objectivo aferir sobre a importância dos efeitos não lineares nos esforços. Idealizou-se então um conjunto de ensaios (tabela 4.1) em que se variam as relações: D/L (diâmetro do cilindro/comprimento de onda) e a/L (amplitude da onda/comprimento de onda).

	D(m)	a(m)	D/L	a/L
Simulação 1	1,5	0.3	0.032	0.0064
Simulação 2	2	0.3	0.042	0.0064
Simulação 3	3	0.3	0.064	0.0064
Simulação 4	4	0.3	0.084	0.0064
Simulação 5	4	0.6	0.084	0.0128
Simulação 6	4	1.2	0.084	0.0256

Tabela 4.1 – Características dos ensaios realizados

O domínio de cálculo tem uma extensão total de 6 comprimentos de onda e de largura 5 vezes o diâmetro do cilindro estando este posicionado à distância do gerador de ondas de 1.5 comprimentos de onda. A profundidade é constante e igual a 10 m. A zona com ar tem uma altura de 2.45m relativamente ao nível da superfície livre no repouso.

As propriedades de simetria longitudinal do escoamento são aproveitadas para reduzir o domínio de cálculo para metade o que permite diminuir significativamente o tempo de cálculo.

As ondas geradas têm amplitude variável e período fixo de $T=5.5s$, a que corresponde, para a profundidade considerada, um comprimento de onda de $L=47.2m$.

A discretização do domínio caracteriza-se por uma zona mais refinada em torno do cilindro e na zona de evolução da superfície livre. O número total de elementos da malha 3D é de 779290, dos quais 620180 correspondem à água e 151110 ao ar. O passo de tempo utilizado é $T/600$, que corresponde a $9,2 \times 10^{-3}s$. As simulações foram realizadas com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$.

O código numérico permite determinar os esforços parcelares em superfícies do cilindro que foram predefinidas durante o processo de geração de malha. Na figura 4.9 definem-se essas superfícies.

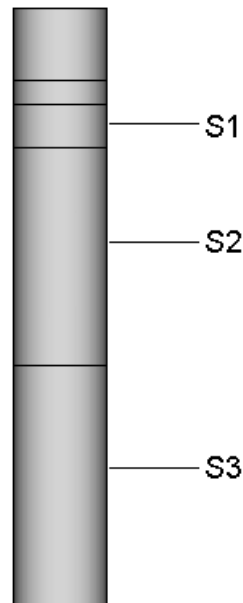


Fig.4.9 – Superfícies predefinidas para determinação dos esforços

A superfície livre evolui exclusivamente sobre a superfície S1, a superfície S2 está sempre submersa e corresponde à zona em que o campo de pressão sofre variações apreciáveis por acção da passagem de cristas e cavas. A superfície S3 está localizada a maior profundidade onde o campo de pressão tende para hidrostático. A superfície S3 tem uma altura fixa de 5m; a altura da superfície S2 é ajustada em função da altura da superfície S1 que varia na razão de 3 vezes a amplitude da onda.

A importância dos efeitos não lineares induzidos pela geometria em estudo pode ser avaliada comparando aos resultados obtidos com o código FLUENT aqueles que resultam de uma abordagem linear ao problema. Neste sentido é aplicado ao conjunto de ensaios, registados na tabela 4.1, o código numérico tridimensional WAMIT. Este programa foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do Massachusetts Institute of Technology [15] e foi aqui utilizado por ser actualmente adoptado pela maioria das empresas de projecto em Offshore. Este código WAMIT [15], baseado no método dos elementos de fronteira, resolve o problema de difracção e radiação de acordo com a teoria clássica linear das ondas e escoamento potencial. Dada a característica geométrica do sistema em estudo (cilindro fixo ao fundo) o problema a tratar simplifica-se sendo apenas necessário calcular o potencial de difracção. Assim,

através do potencial de difracção, $\hat{\phi}_d$ e da onda incidente, $\hat{\phi}_0$, é possível obter a amplitude complexa da carga de excitação, $\hat{F}_{ext}$, a que o corpo está sujeito através da integração do potencial resultante na superfície (média) submersa do corpo, Γ :

$$\hat{F}_{ext} = i\omega\rho \int_{\Gamma} (\hat{\phi}_0 + \hat{\phi}_d) d\Gamma. \quad (4.1)$$

Esta abordagem linear, apesar de amplamente divulgada, requer uma atenção especial no que respeita à sua aplicação. Neste sentido, é apenas expectável que o código WAMIT permita descrever o processo físico com elevado grau de precisão em casos onde a declividade da onda incidente é reduzida bem como a perturbação do campo de velocidades induzida pelas oscilações no corpo na sua vizinhança (perturbação que não acontece no caso em estudo uma vez que se trata de um cilindro fixo ao fundo).

A distinta concepção dos códigos WAMIT e FLUENT, resolução das equações de RANS em todo o domínio de cálculo face à resolução sobre a fronteira do problema de difracção, tem como consequência uma enorme diferença nos tempos de cálculo. Uma simulação típica com o FLUENT necessitou de aproximadamente 9h por período de onda, num Pc com processador 3.2 GHz e RAM 2 Gb. Comparativamente pode afirmar-se que o WAMIT permite obter soluções instantâneas.

Na apresentação dos resultados [16] referentes aos esforços é dada especial atenção às características não lineares. Para se poder aferir sobre a sua importância nos esforços a que o cilindro está sujeito representa-se nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 os esforços nas superfícies S1, S2 e S3, definidas na figura 4.9, para as simulações 4, 5 e 6.

Escolheram-se estas simulações para se poder observar a evolução dos esforços de natureza não linear com o aumento da amplitude da onda.

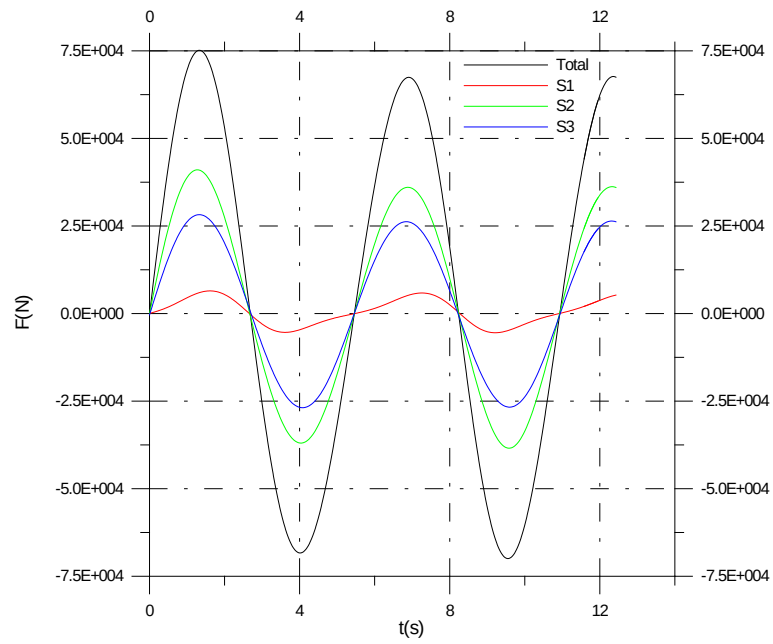


Figura 4.10 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 4.

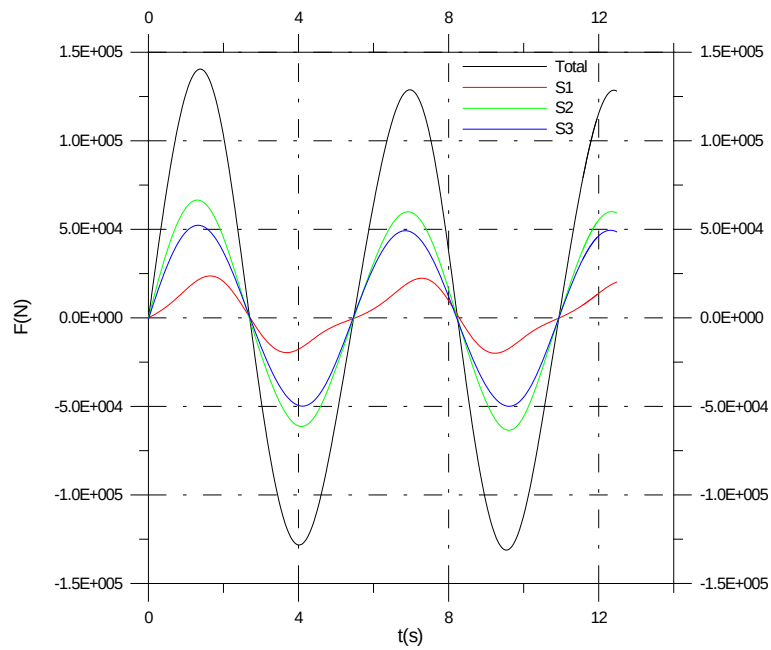


Figura 4.11 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 5.

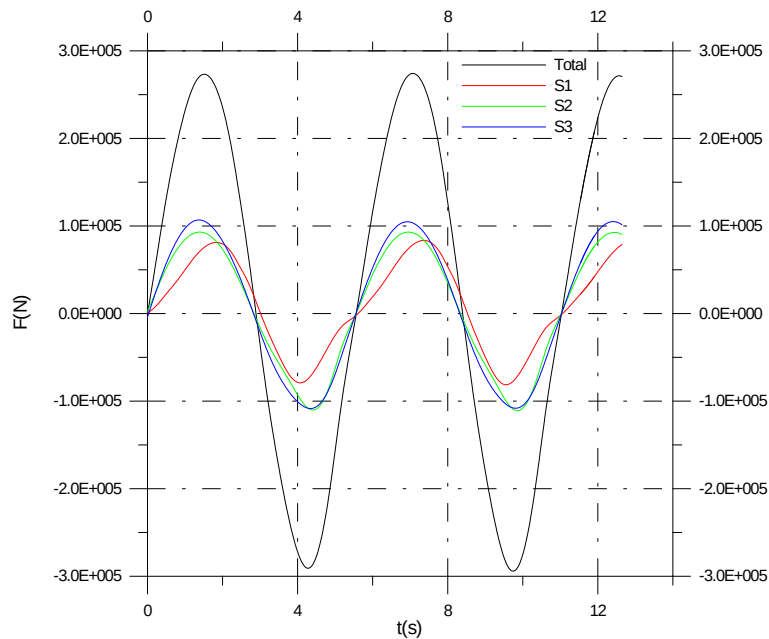


Figura 4.12 – Esforços total e nas superfícies S_1 , S_2 e S_3 para a simulação 6.

A observação das figuras 4.10, 4.11 e 4.12 permite constatar que o esforço na secção S_1 é o único em que se consegue identificar características diferentes de uma sinusóide, apresentando uma variação na sua curvatura na passagem por zero positiva.

Constata-se ainda que os máximos e os mínimos não são coincidentes com os dos esforços nas secções S_2 e S_3 . O aumento da importância relativa da componente S_1 (que evolui de cerca de 30% na simulação 4 até 95% na simulação 6) face às componentes S_2 e S_3 ilustra bem o crescimento dos efeitos não lineares com a amplitude da onda.

Na simulação 6, correspondente à onda de maior amplitude, é também identificável que o esforço correspondente a S_2 apresenta ligeiras diferenças relativamente a uma forma sinusoidal pura nomeadamente durante a descida para o seu valor mínimo.

A comparação dos esforços totais obtidos com os códigos FLUENT e com o WAMIT para as simulações 4, 5 e 6 é efectuada nas figura 4.13, 4.14 e 4.15.

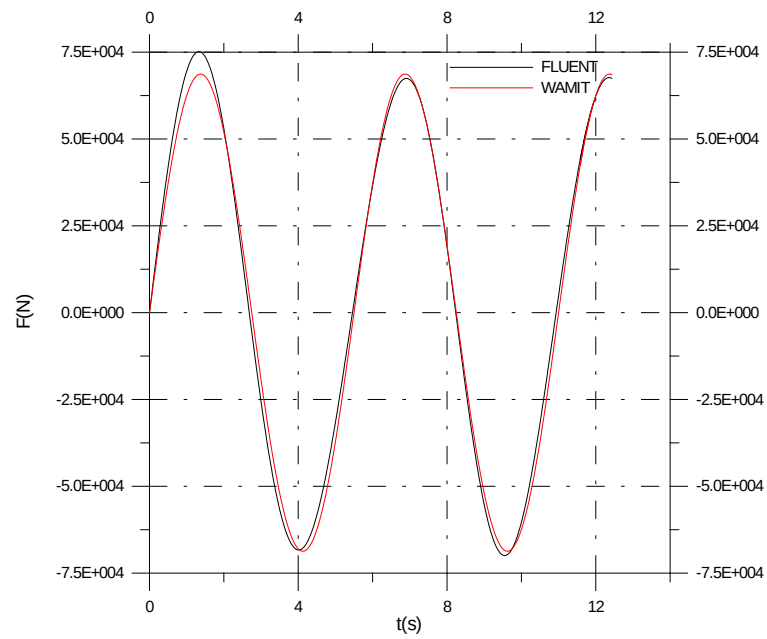


Figura 4.13 – Comparação do esforço total para a simulação 4.

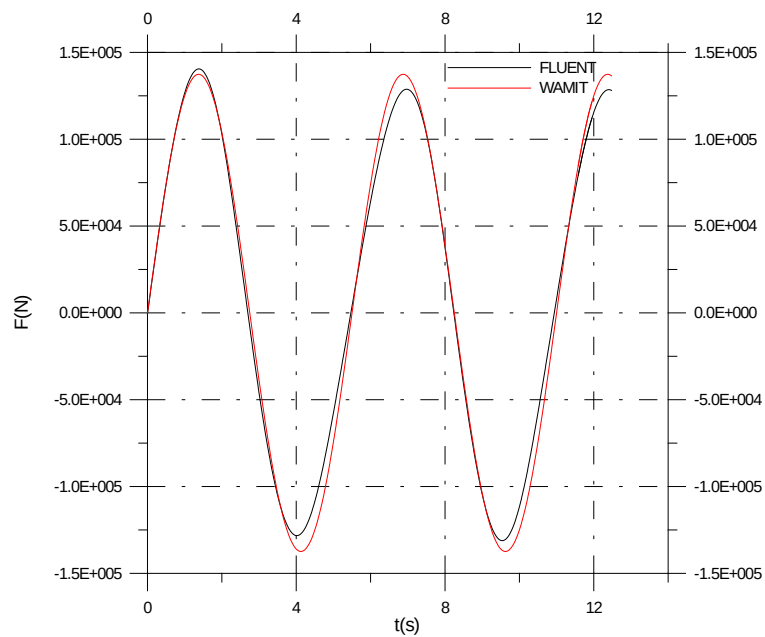


Figura 4.14 – Comparação do esforço total para a simulação 5.

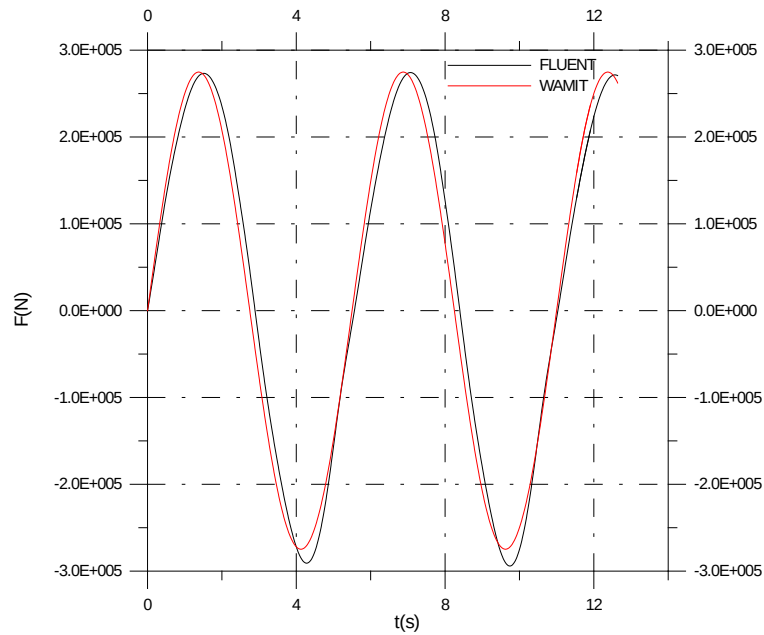


Figura 4.15 – Comparação do esforço total para a simulação 6.

Os resultados obtidos com os dois códigos são muito semelhantes para todas as amplitudes de onda simuladas.

Na tabela 4.2 resume-se para os 6 ensaios realizados os valores do esforço máximo obtido com os códigos numéricos e por aplicação de resultados analítico-experimentais propostos no Coastal Engineering Manual – United States Army Corps of Engineers (U.S.A.C.E.) [17]. Os resultados indicados em [16] foram obtidos para a condição $D/L < 0.05$, como indicado na tabela 4.1 apenas a simulação 1 e 2 respeitam esta exigência.

	U.S.A.C.E.	WAMIT (N)	FLUENT (N)
Simulação 1	9×10^3	9.46×10^3	9.38×10^3
Simulação 2	15×10^3	16.91×10^3	16.59×10^3
Simulação 3	-	38.43×10^3	36.93×10^3
Simulação 4	-	68.69×10^3	67.44×10^3
Simulação 5	-	137.39×10^3	128.79×10^3
Simulação 6	-	274.77×10^3	274.21×10^3

Tabela 4.2 – Comparação do esforço máximo.

Como se pode constatar das figuras 4.13, 4.14 e 4.15 e da tabela 4.2 os esforços máximos calculados através dos dois códigos são na prática

coincidentes pois a incerteza na determinação da altura da onda gerada nas simulações com o FLUENT introduz um erro semelhante às diferenças observadas. No que diz respeito ao esforço total e não obstante a existência de efeitos não lineares essencialmente na vizinhança da superfície livre o código WAMIT mostrou-se preciso na sua estimacão. A aproximação efectuada neste código de determinar, ainda que linearmente, o esforço médio na zona onda a superfície livre evolui parece assim capaz de aproximar os efeitos não lineares.

Capítulo 5

Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia

O conversor de energia das ondas (CEO) aqui estudado é da família dos sistemas de corpos oscilantes axissimétricos, nos quais a absorção de energia é pontual e conseguida através da translação vertical da componente que está sujeito a esforços hidrodinâmicos induzidos pela agitação marítima.

Este conversor tem vindo a ser alvo de estudo por parte do *Wave Energy Centre*, através de vários projectos de investigação.

Para este trabalho, previa-se inicialmente a realização do estudo da interacção da onda com o conversor de energia, verificando-se a evolução da superfície livre no interior do dispositivo. Assim o principal objectivo passaria por otimizar o escoamento no interior do dispositivo de forma a maximizar a extracção de energia, para condições de agitação predefinidas. Neste sentido o estudo começaria por um dispositivo com dimensões “standard”, passando depois pela variação individual da dimensão interior da bóia e do canal de entrada (figura 5.1), observando-se as alterações ao nível do escoamento. A forma exterior também é estudada com o objectivo de melhorar a força vertical dinâmica que o dispositivo sofre e a sua hidrodinâmica.

Durante o decorrer do trabalho, o aparecimento de resultados não previstos na evolução da superfície livre interior (logo no primeiro ensaio), levou a que o plano de estudos fosse alterado. O movimento da superfície livre no interior do dispositivo não é sinusoidal, aparecendo modelado. Necessitou-se assim de aumentar o tempo de simulação até um valor que permitisse identificar a periodicidade da solução. Verificou-se então que a modelação do movimento resultaria do facto de se estar muito próximo da frequência de ressonância do dispositivo. Devido a tal situação, decidiu-se então simular diferentes frequências da onda incidente, mais afastadas e próximas da de ressonância,

de forma a determinar a curva que caracterize a resposta da coluna de água interior. Os resultados obtidos permitem aferir sobre o comportamento do escoamento no interior do dispositivo, bem como tirar algumas conclusões para a sua optimização.

Neste capítulo começa-se por apresentar o dispositivo conversor de energia (forma, dimensões), seguindo-se o resumo das características gerais do estudo numérico, ao nível do domínio de cálculo e da sua discretização, e esquemas numéricos. Segue-se a apresentação dos resultados para o dispositivo standard para a onda de projecto, sendo ainda estendido o estudo variando a frequência da onda. Por fim são apresentados os resultados referentes à alteração das dimensões interiores e da forma exterior do dispositivo.

5.1 Apresentação do dispositivo

O sistema em análise é composto essencialmente por duas partes com geometria cilíndrica e topos hemisféricos axialmente ligados por uma conduta. Esta conduta permite o fluxo de água entre o exterior e um reservatório interior como representado na Figura 5.1.

A maximização da energia extraída depende da natureza do movimento oscilatório forçado pelo movimento da superfície livre. Interessa assim adaptar dinamicamente a frequência de ressonância do dispositivo às características da agitação incidente. Neste sistema, o controlo das suas características oscilatórias, nomeadamente da sua frequência de ressonância, é feito através da variação da massa oscilante. Para tal recorre-se a uma conduta, com início na base do sistema flutuante, que permite a entrada de água para um reservatório interior ao dispositivo. O caudal de entrada pode ser controlado, o que permite a alteração da massa oscilante e consequentemente o ajuste da frequência de ressonância. Neste contexto é necessário conhecer a posição da superfície livre do reservatório interno e consequentemente a massa de água no interior do dispositivo.

O corpo é axissimétrico e todas as dimensões podem ser alteradas excepto **a**, **l** e **c** que foram predefinidas. Na figura 5.1, a linha azul representa a linha da superfície livre externa e interna, cuja posição relativa varia com o tempo e é o objecto de estudo.

O dispositivo foi dimensionado para condições médias de funcionamento num clima de ondas ao largo da costa portuguesa, ou seja, ondas regulares com período de 12s que em condições de grande profundidade têm um comprimento de 225m.

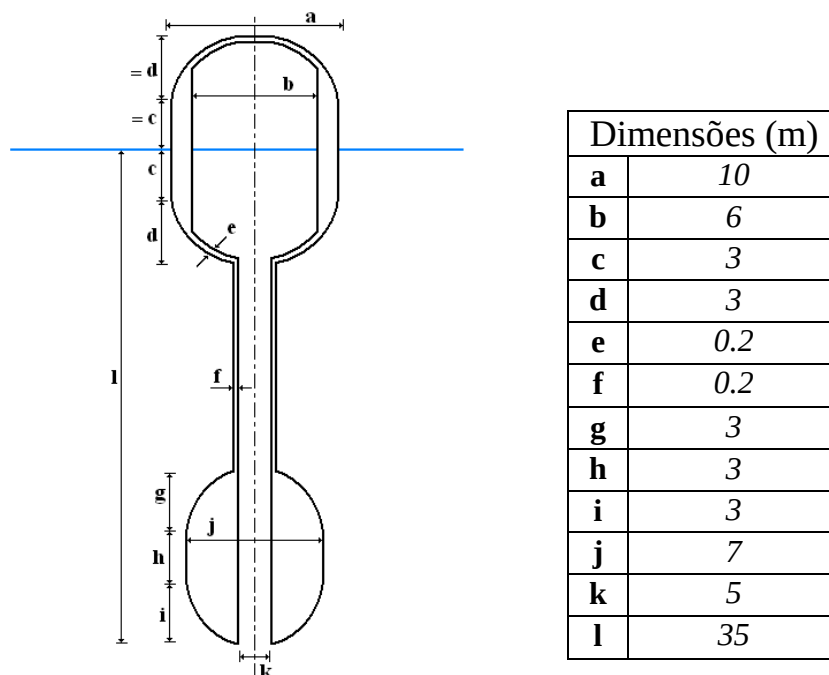


Fig.5.1 – Dispositivo conversor de energia

A partir de agora, o dispositivo com as dimensões anteriormente apresentadas passa a ser denominado por dispositivo standard. Este apresenta bordos arredondados de forma a melhorar o escoamento tanto interior como exterior, evitando também a formação de vórtices. A dimensão $c+d$ que se deseja pequena, visa melhorar o seu movimento vertical quando sujeito a agitação. A distância entre o flutuador e o lastro é definida essencialmente por critérios de estabilidade. A dimensão do orifício de entrada apresenta uma importância acrescida, já que a variação do seu diâmetro irá permitir otimizar o movimento oscilatório do sistema.

Interessa assim realizar o estudo do escoamento da água no interior da bóia, de forma a otimizar o seu movimento oscilatório. Neste contexto estuda-se a influência das dimensões do reservatório interior e da conduta de alimentação.

Para este estudo numérico com o código FLUENT não foi considerado o topo da bóia fechado ou equipado com uma turbina (originando uma perda de carga). O topo da bóia encontra-se assim aberto estando à pressão atmosférica.

5.2 Parâmetros gerais do estudo numérico

Nas simulações efectuadas considerou-se uma onda monocromática com período de 12s propagando-se a uma profundidade constante de 120m, sendo assim verificada a condição de “água profunda” pois $d/L = 120/225 = 0.533 > 0.5$. O dispositivo é introduzido no tanque numérico, anteriormente descrito e validado na secção 4.2, a uma distância correspondente a um comprimento e meio de onda do gerador de onda numérico. Considerou-se ainda que o dispositivo está imóvel e aberto no seu topo superior.

Em termos de malha mantiveram-se, nas zonas em que o escoamento não é afectado pela presença do corpo, as características utilizadas anteriormente na validação (Capítulo 4). Na vizinhança do dispositivo a configuração final da malha foi fruto de um processo iterativo, correlacionado com o gradiente de velocidade, no qual se garantiu que o campo de velocidade era independente da discretização.

A figura 5.2 apresenta em pormenor a malha no plano de simetria do dispositivo sendo facilmente identificada a zona onde a superfície livre vai evoluir a que corresponde uma maior densidade de elementos.

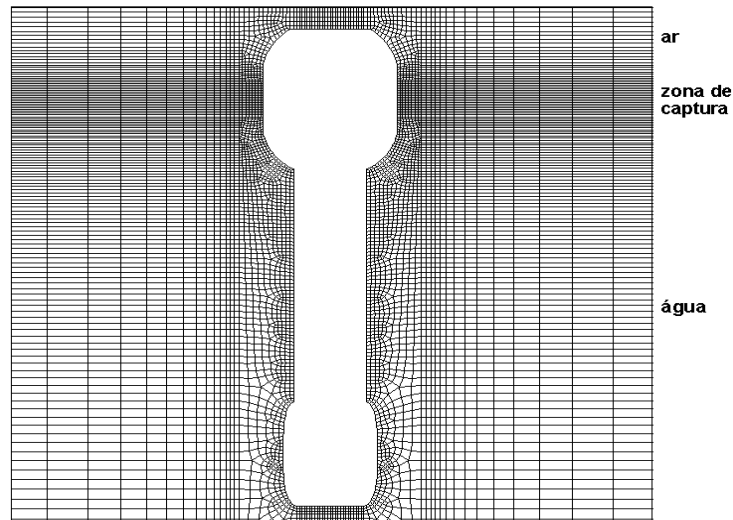


Fig.5.2 – Pormenor da malha no plano de simetria do dispositivo

Por sua vez, a zona próxima da superfície do dispositivo foi também discretizada, tanto no interior como exterior com uma malha de elevada densidade. Esta situação justifica-se com a necessidade de se garantir que não exista perda de informação ao nível do escoamento interior, ao nível de esforços, e que o surgimento de vórtices não advém do facto de os elementos terem um tamanho superior ao necessário. Este facto pode gerar uma má “transição” de informação entre elementos e originar vórtices que não existem na realidade. A figura 5.3 apresenta em pormenor a malha, no interior e exterior, do dispositivo e do plano $Z=0\text{m}$.

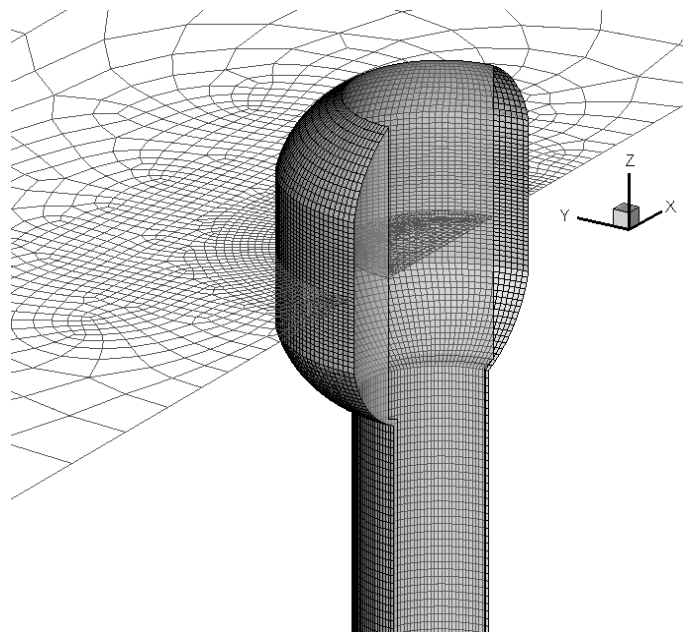


Fig.5.3 – Pormenor da malha no dispositivo e na sua vizinhança

As propriedades de simetria relativamente ao plano longitudinal do escoamento são aproveitadas para reduzir o domínio de cálculo para metade. Desta forma o número total de elementos da malha é de 814102, dos quais 613817 correspondem à água e 200285 ao ar.

No que diz respeito aos esquemas numéricos utilizou-se o SIMPLEC para o acoplamento entre a velocidade e pressão, o PRESTO para a interpolação da pressão, o MUSCL para a modelação do termo convectivo da equação Navier-Stokes e o HRIC para o termo convectivo da equação de transporte da fracção de volume do método VoF. O esquema HRIC é específico para escoamentos com superfície livre e opta por vários esquemas cuja utilização depende da variação local da fracção de volume (C). O modelo de turbulência utilizado foi o k- ϵ standard (padrão).

O tempo de simulação num Pc com processador 3.2 GHz e RAM 2 Gb, foi de aproximadamente 24h por período de onda gerada. Este tempo é claramente muito elevado e próximo do limite dos meios de cálculo disponibilizados.

As simulações permitem conhecer a posição da superfície livre e os campos de velocidade e de pressão e consequentemente os esforços de pressão e viscosos sobre superfícies previamente definidas durante o processo de geração de malha. No contexto deste estudo importa assim conhecer a evolução temporal da posição da superfície livre no interior do dispositivo. Para isso compara-se a elevação da superfície livre no interior do dispositivo e num ponto exterior suficientemente afastado do corpo. O ponto escolhido pertence ao plano de simetria transversal do dispositivo e está situado a 5m da sua parede externa.

Como foi referido, o código numérico permite ainda determinar os esforços parcelares viscosos ou de pressão em superfícies pré-definidas do dispositivo. Na figura 5.4 definem-se essas superfícies.

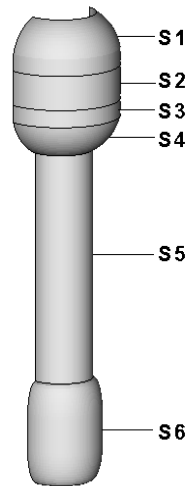


Fig.5.4 – Superfícies predefinidas para o cálculo dos esforços

A definição destas superfícies obedeceu a um critério. A superfície S2 foi definida de forma a que a superfície livre interagisse exclusivamente sobre ela. Sobre a superfície S4 desenvolvem-se os esforços de flutuação dinâmicos. A definição das restantes superfícies não é relevante para o estudo pretendido, tendo estas sido definidas utilizando critérios exclusivamente geométricos.

5.3 Dispositivo standard

Na figura 5.5 representa-se para um instante aleatoriamente escolhido a posição da superfície livre interior e exterior. É ainda possível visualizar a malha na vizinhança do dispositivo e no seu interior.

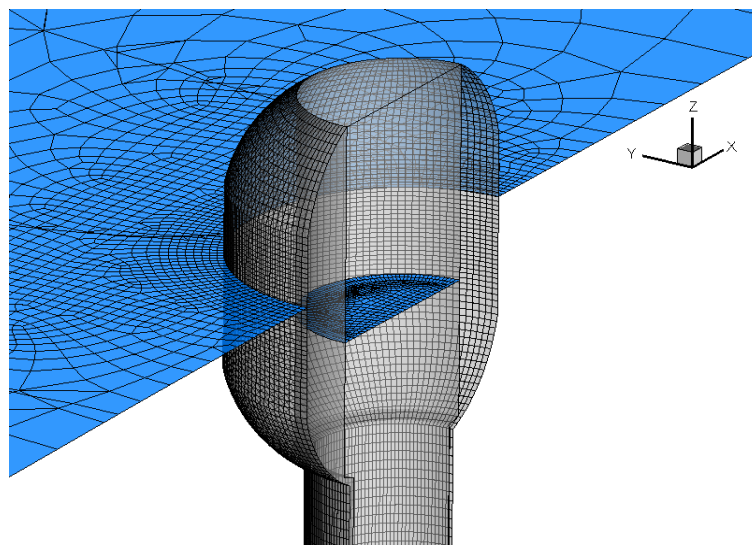


Fig.5.5 – Posição relativa da superfície livre no interior e exterior do dispositivo

A comparação da evolução temporal da elevação da superfície livre no interior do dispositivo e num ponto pertencente ao seu plano de simetria transversal e situado a 5m da sua parede externa (correspondente à onda não perturbada) é apresentada na figura 5.6.

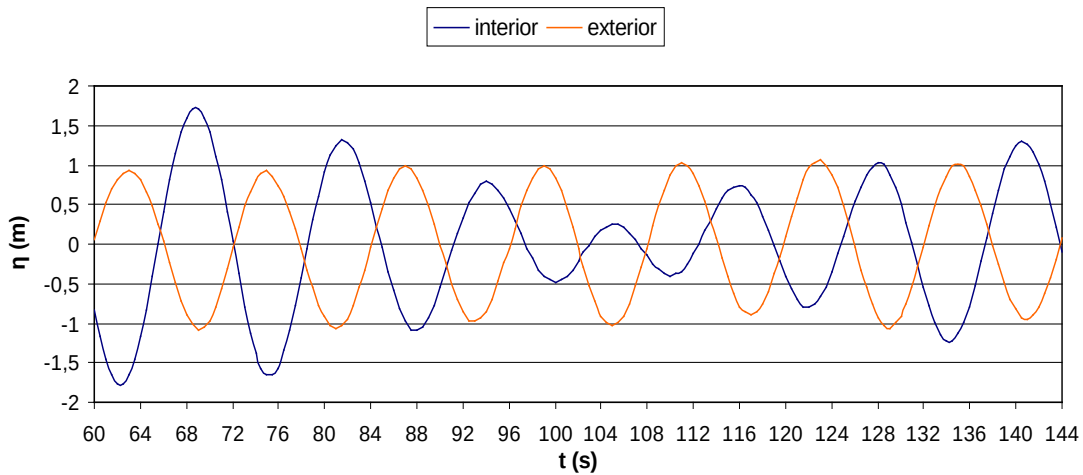


Fig.5.6 – Elevação da superfície livre no interior e exterior (não perturbado) do dispositivo

Esta última figura permite constatar um efeito curioso e não esperado: o movimento da superfície livre interna apresenta-se modelado, a frequência principal é a de excitação (frequência da onda) mas existe uma segunda frequência mais baixa correspondente a um envelope.

De acordo com [18] a frequência de ressonância de um corpo cilíndrico de comprimento l_c que flutua livremente pode ser estimada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l_c}} \quad (5.1)$$

Este resultado foi obtido para fluido ideal e sobre hipóteses de linearidade, e considerando o coeficiente de massa adicionada constante. Não obstante as evidentes diferenças entre um corpo flutuante e uma coluna de água oscilante

a aplicação da expressão anterior permite obter: $\omega = \sqrt{\frac{9.81}{35}} = 0,529 \text{ rad.s}^{-1}$ o que corresponde a um período de $T=11.88\text{s}$.

Ainda que aproximado este resultado parece indicar que a simulação do dispositivo standard foi efectuada em condições próximas às de ressonância. Este facto combinado com os efeitos não lineares (dissipação viscosa no interior do canal e distorção harmónica) pode de facto conduzir a uma resposta pulsada como a obtida.

Na figura 5.7 representa-se a evolução temporal dos esforços horizontais sendo possível constatar que apenas o esforço na superfície S2 apresenta alguma diferença relativamente a uma forma sinusoidal pura. Na respectiva transição entre mínimos e máximos é possível identificar variações que estão ligados à evolução da superfície livre sobre a superfície S2. Note-se que apenas esta superfície não está totalmente imersa na água, este efeito não linear está portanto ligado à onda ter uma amplitude finita e não infinitesimal como considerado na teoria linear.

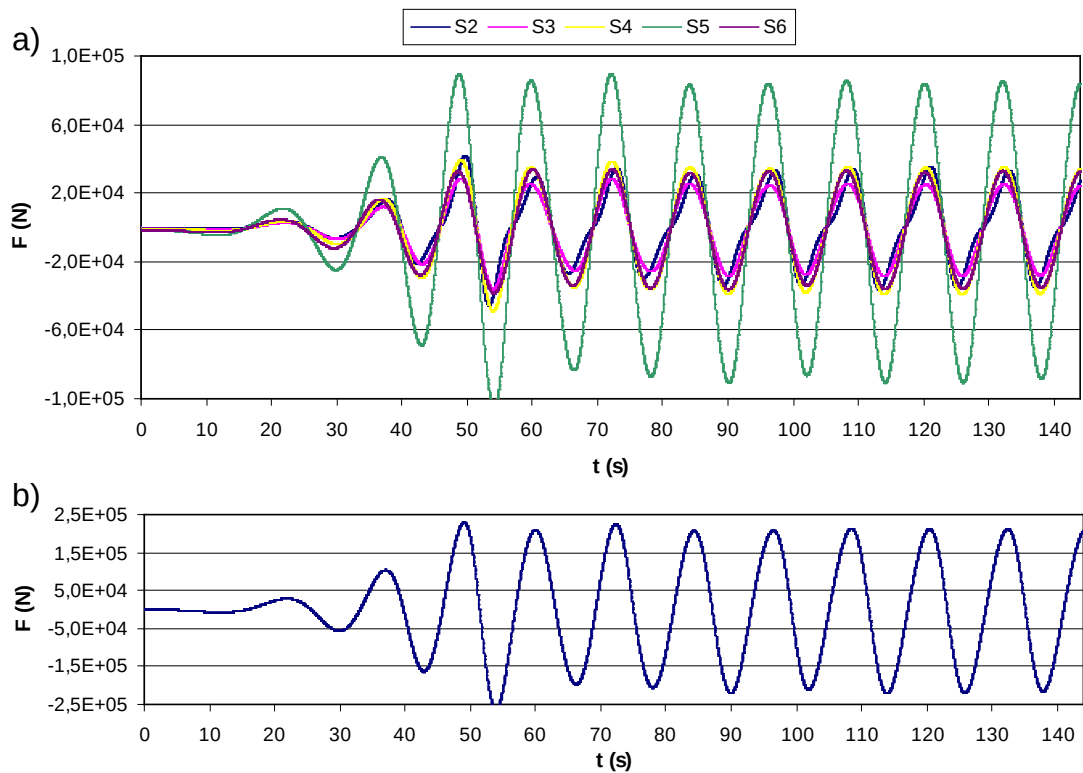


Fig.5.7 – Evolução dos esforços horizontais nas superfícies a) e esforço total b)

O esforço vertical nas superfícies S2, S3 e S5 é apenas de natureza viscosa sendo desprezável face aos esforços em S4 e S6. Optou-se assim por apresentar na figura 5.8 apenas os esforços nestas ultimas superfícies.

Note-se que os esforços foram calculados utilizando os valores estáticos e variáveis da pressão.

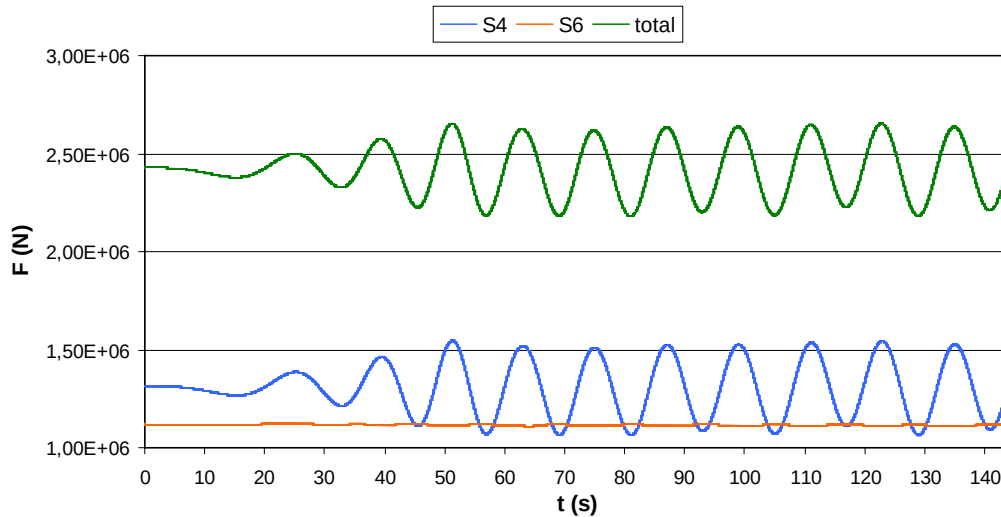


Fig.5.8 – Evolução dos esforços verticais nas superfícies e esforço total

As simulações numéricas permitem também otimizar a hidrodinâmica da bóia pois permitem obter o campo de velocidade e identificar zonas de formação vórtices como ilustrado nas figuras 5.9 até 5.15. Estas dizem respeito ao instante correspondente à oscilação de maior amplitude da superfície livre interna.

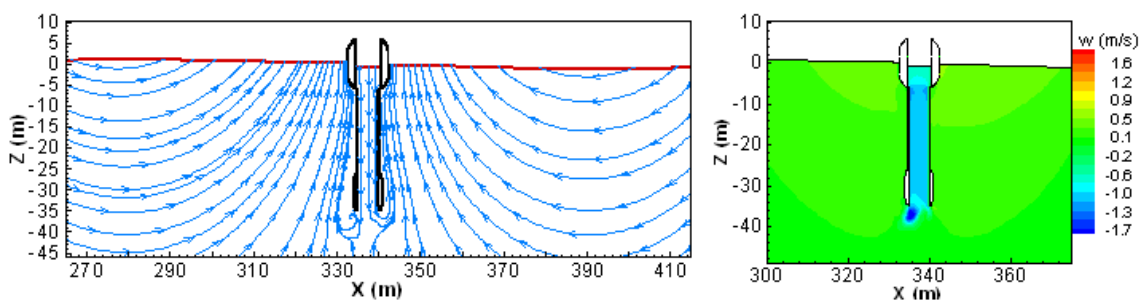


Fig.5.9 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=0s$

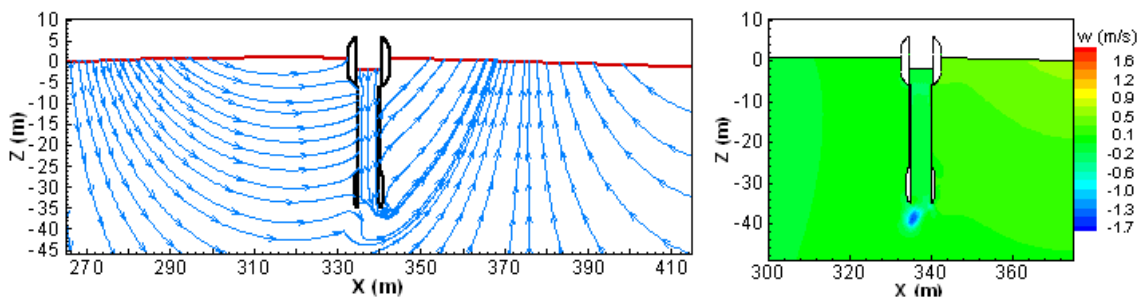


Fig.5.10 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=2s$

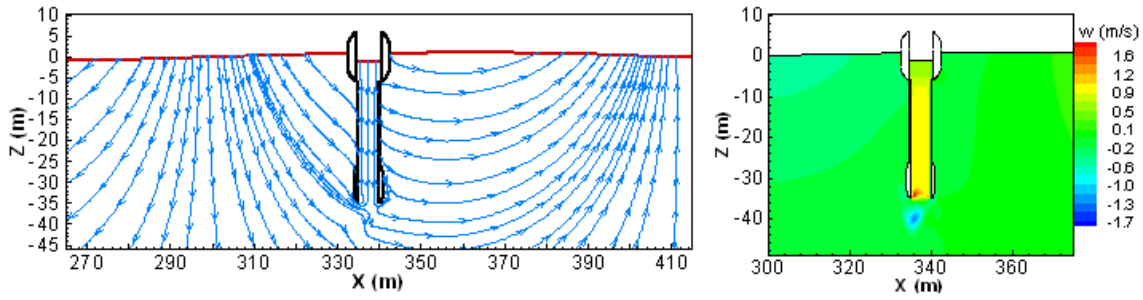


Fig.5.11 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=4s$

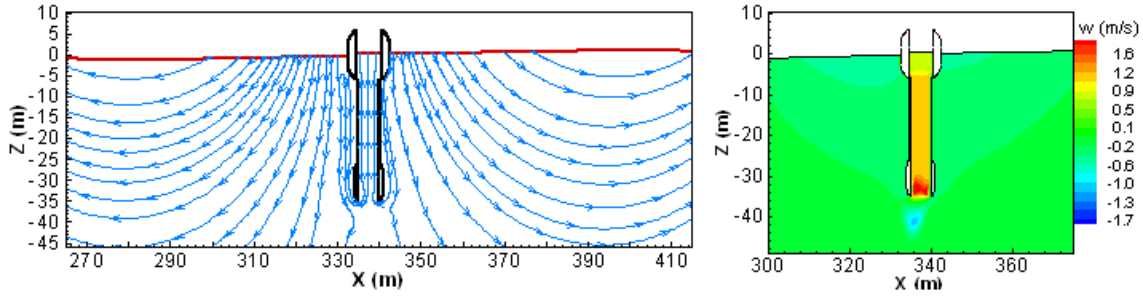


Fig.5.12 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=6s$

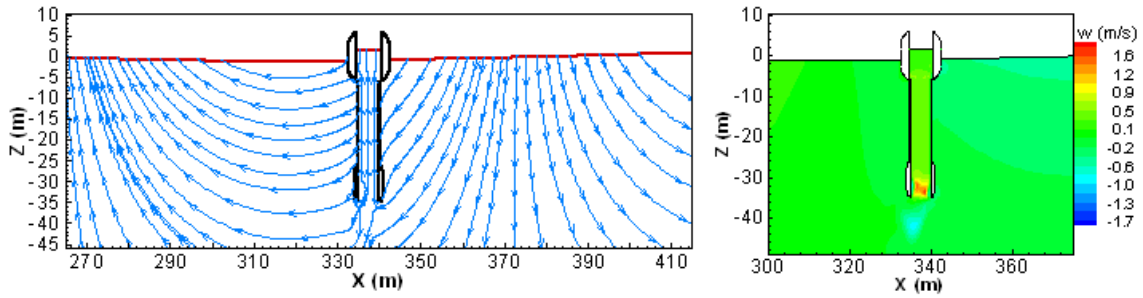


Fig.5.13 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=8s$

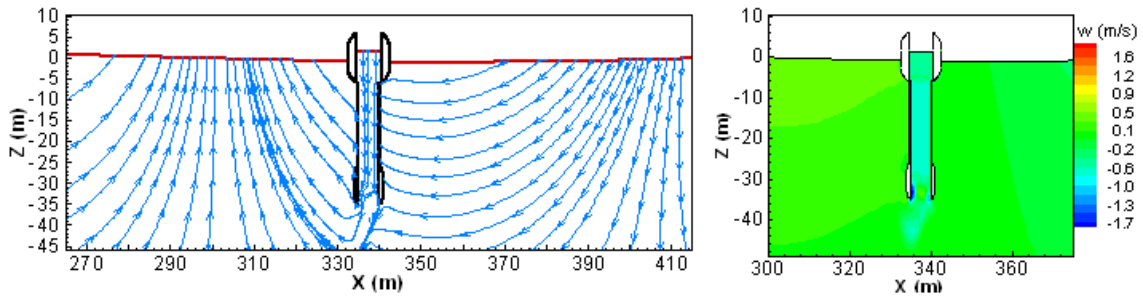


Fig.5.14 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=10s$

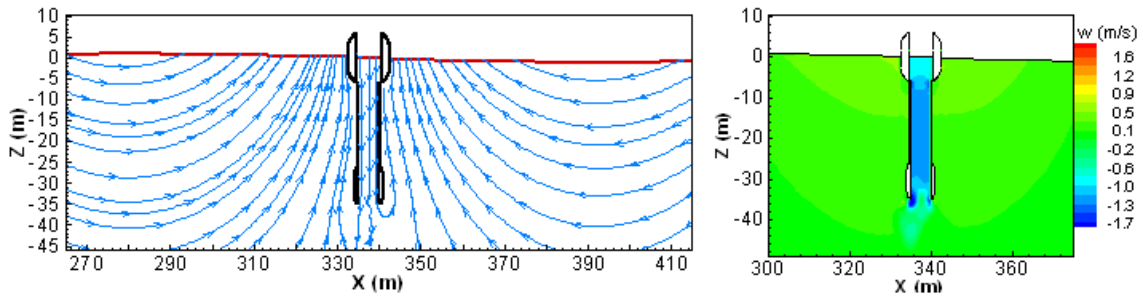


Fig.5.15 – Linhas de corrente e campo da componente vertical da velocidade em $t=12s$

A observação do sentido das linhas de corrente e da velocidade vertical, permite identificar claramente que o escoamento interior e exterior têm sentidos opostos. O campo de velocidade vertical indica que a velocidade no interior do dispositivo é superior à velocidade induzida pela onda. Por exemplo na figura 5.12 identifica-se um factor de ampliação da velocidade na ordem de 5-6 vezes. Este facto comprova que o dispositivo está próximo da sua zona de ressonância.

Note-se ainda que apenas um modelo não linear e viscoso permite obter este tipo de resultados.

Nas figuras 5.16 e 5.17 procedeu-se a uma ampliação da zona de entrada do dispositivo, nos instantes $t=0s$ e $t=12s$, com o objectivo de se identificar estruturas vorticulares e/ou elevadas deflexões nas linhas de corrente. Na extremidade do dispositivo o escoamento é complexo. Observa-se a interacção da água proveniente do canal interior com o escoamento exterior, dando origem a estruturas vorticulares.

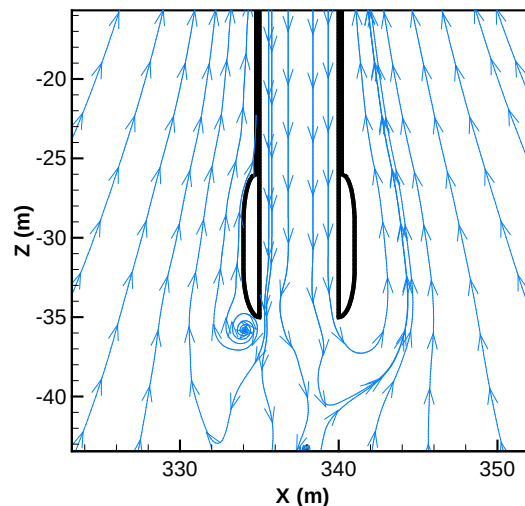


Fig.5.16 – Ampliação da zona de entrada do dispositivo no instante $t=0s$

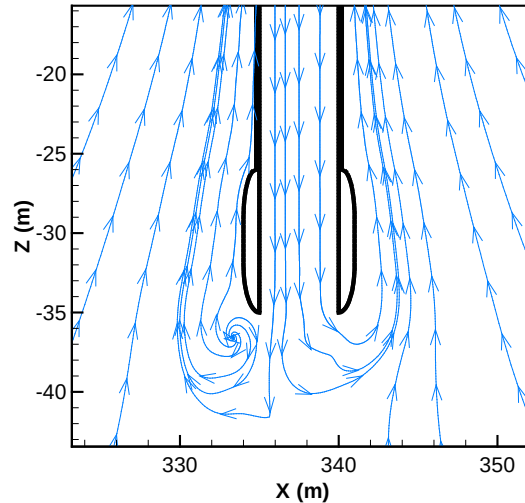


Fig.5.17 – Ampliação da zona de entrada do dispositivo no instante $t=12s$

Na figura 5.18 representa-se a variação da velocidade vertical ao longo do eixo de simetria do dispositivo, para os instantes correspondentes às figuras 5.9 a 5.15.

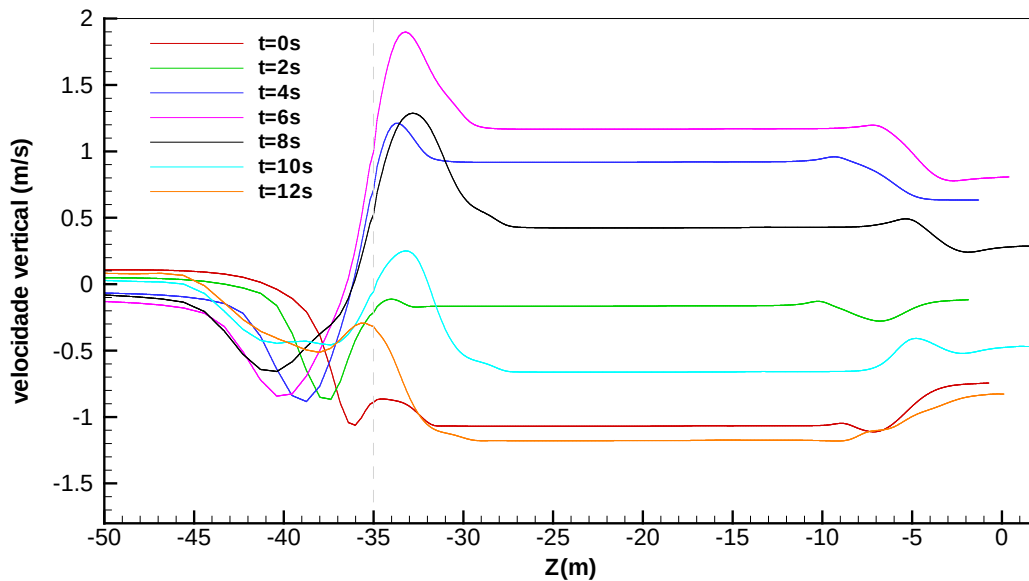


Fig.5.18 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes

Na zona interior do dispositivo (desde $Z=-35m$ até à superfície livre interior) o caudal tem de se manter pois o escoamento é incompressível. Assim as variações sofridas pela velocidade ao longo do eixo estão directamente correlacionadas com variações no perfil de velocidades. Desta forma, observando a figura, identifica-se entre as cotas $Z=-35m$ e $Z=-30m$ importantes perturbações no perfil, decorrentes da interacção entre a onda e o escoamento

na conduta. A evolução da velocidade no exterior do dispositivo (entre $Z=-50\text{m}$ e $Z=-35\text{m}$) permite identificar a zona perturbada por acção do escoamento interior. Também se pode deduzir a existência de vórtices na entrada do canal, pois verifica-se um aumento da componente vertical da velocidade.

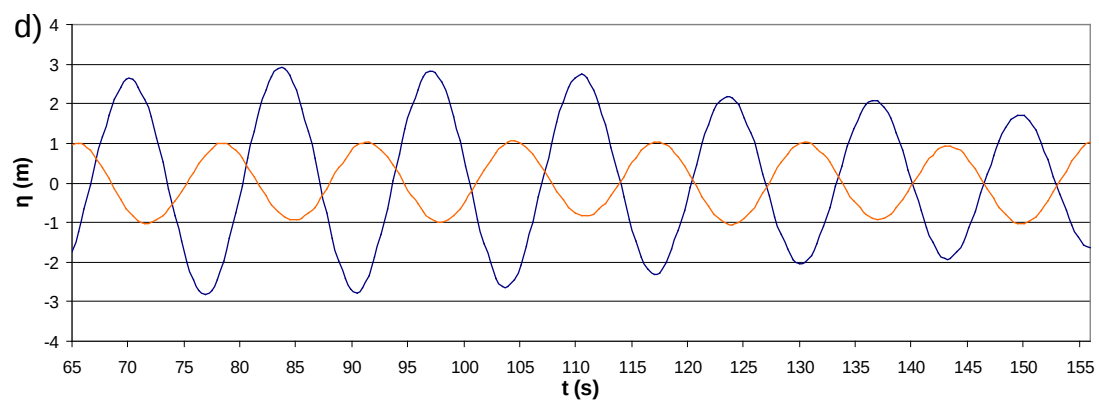
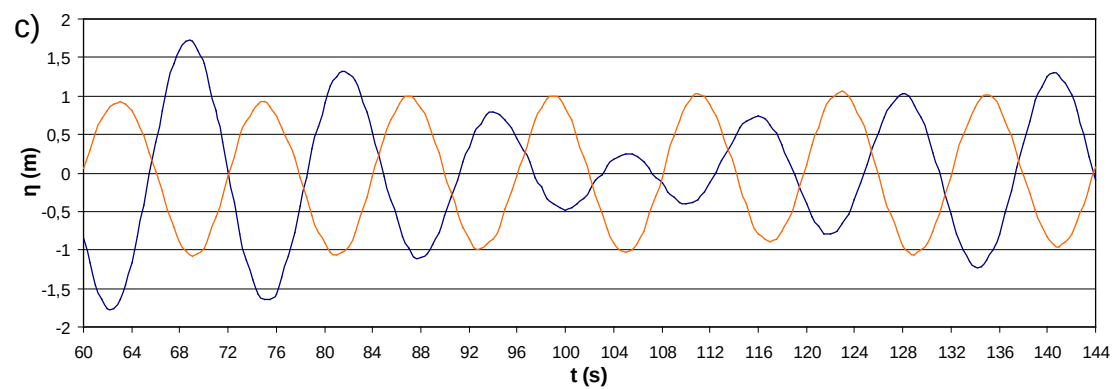
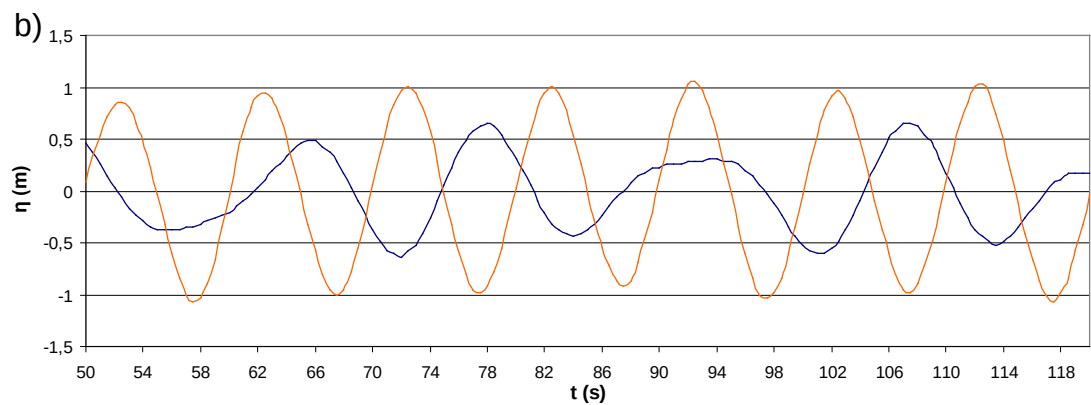
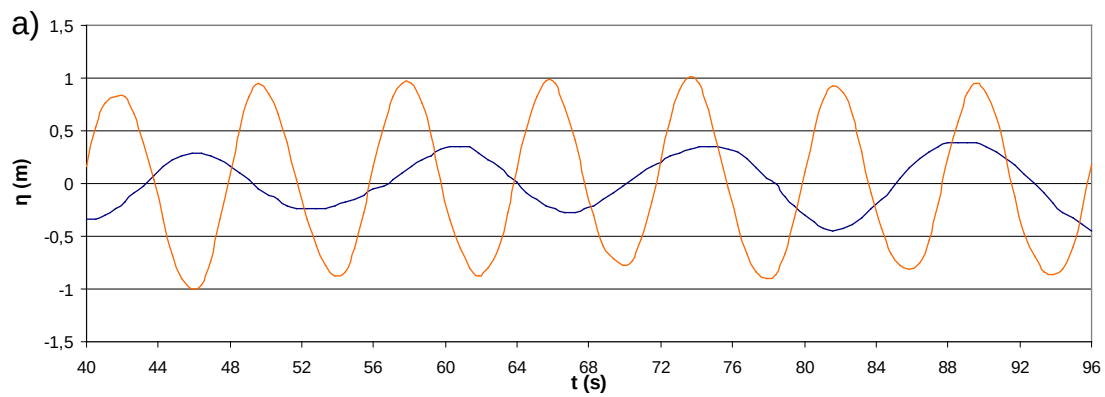
De acordo com estes resultados, a utilização do código FLUENT permitirá a optimização da forma hidrodinâmica da entrada da conduta do dispositivo.

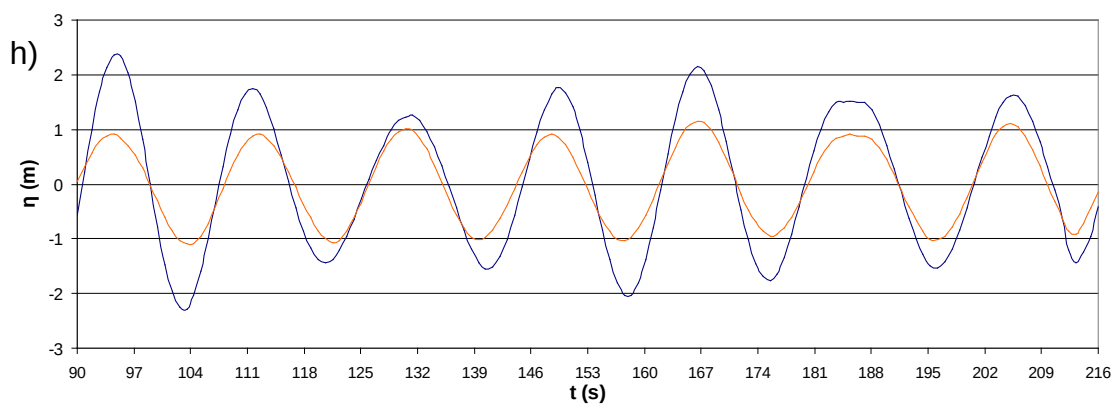
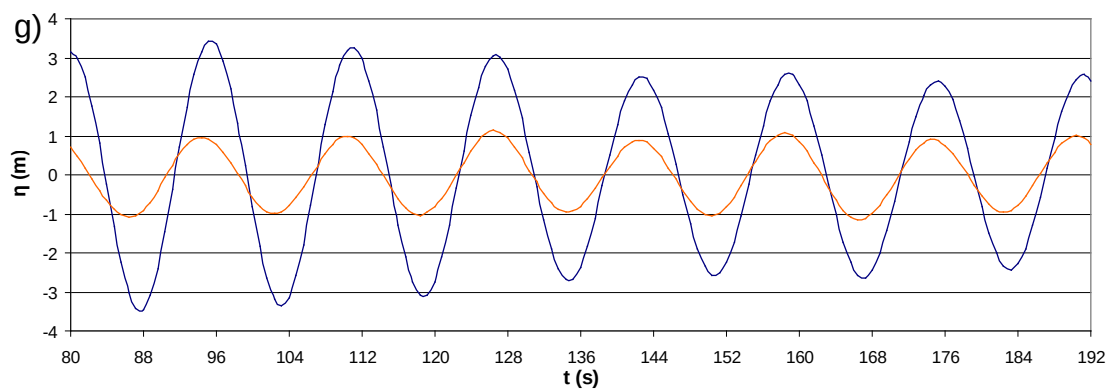
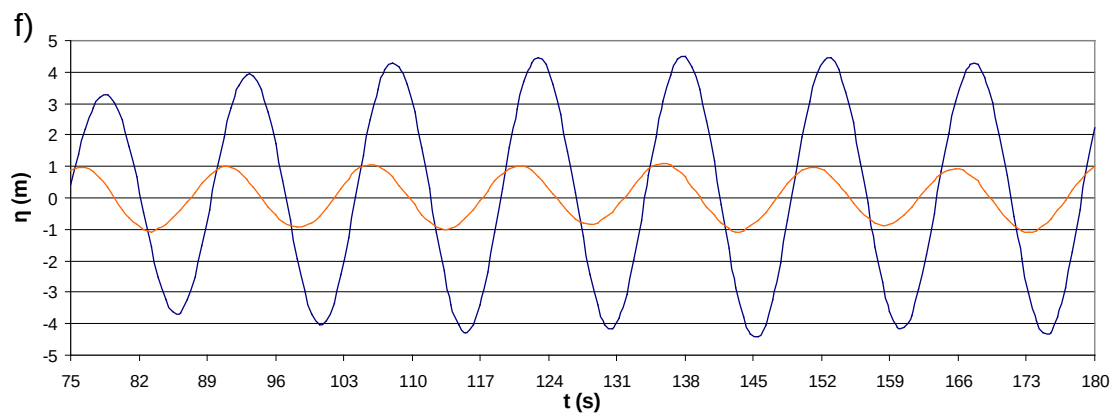
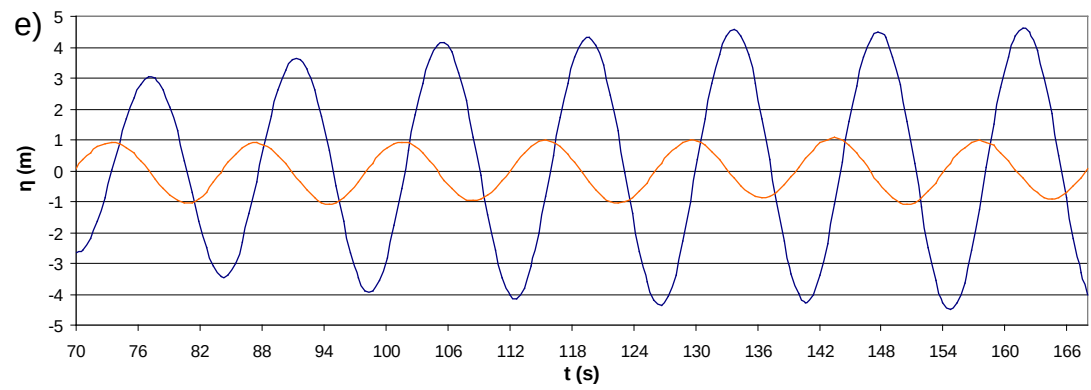
A simulação da geometria standard permitiu constatar que o movimento da superfície livre interior do dispositivo não é harmónico, mas sim modelado. Este facto alterou o plano de estudo inicial baseado em previsões lineares. Optou-se então pela realização de simulações que permitissem caracterizar a resposta em frequência do dispositivo. Tais resultados são apresentados na secção seguinte.

5.4 Resposta em frequência

Para caracterizar a resposta do dispositivo realizou-se um conjunto de ensaios a diferentes frequências. As dimensões do tanque, dependentes do comprimento de onda, são alteradas de forma adequada mantendo-se as relações adimensionais em cada simulação efectuada. As características de malha mantêm-se, sendo que o número de elementos é idêntico ao caso já apresentado na secção anterior. Os pontos de medição são também os utilizados anteriormente.

A simulação correspondente a uma onda de período $T=8\text{s}$, afastada da ressonância, e foi realizada com o objectivo verificar se a resposta pulsada advém do facto de se estar numa zona vizinha da ressonância ou se é devida a outra causa. Com o objectivo de caracterizar a resposta do dispositivo na zona de ressonância e na vizinhança desta, foram realizadas simulações com períodos de onda $T=10\text{s}$, $T=13\text{s}$, $T=14\text{s}$, $T=15\text{s}$, $T=16\text{s}$, $T=18\text{s}$ e $T=20\text{s}$. A figura 5.19 apresenta os respectivos resultados.





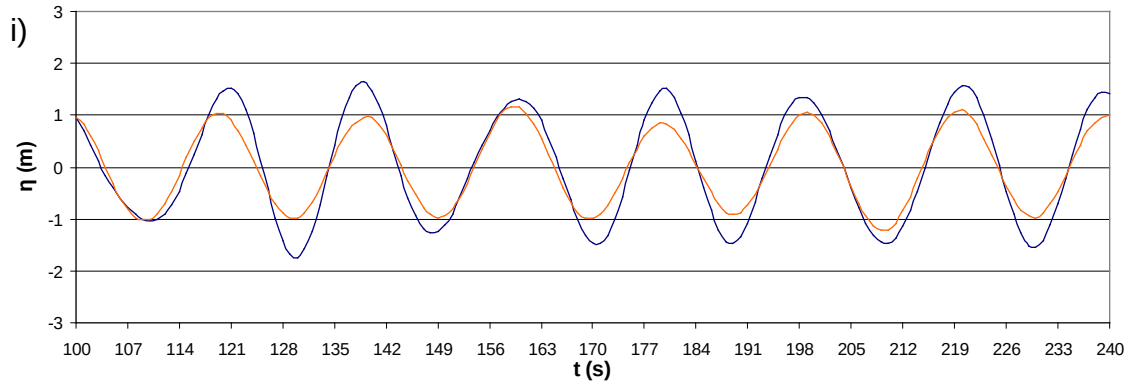


Fig.5.19 – Elevação da superfície livre no — interior e — exterior (não perturbado) do dispositivo para a) T=8s b) T=10s c) T=12s d) T=13s e) T=14s f) T=15s g) T=16s h) T=18s i) T=20s

A observação da figura 5.19 permite identificar efeitos não lineares. O movimento da superfície livre interior não se apresenta harmónico puro, sendo possível facilmente identificar para os períodos T=12s e T=13s uma forte modelação na resposta. As curvas de resposta permitem igualmente verificar diferentes amplificações e fases.

Para T=8s e T=10s verifica-se que a resposta tem período diferente da excitação. Este resultado, a ser correcto, implicaria um comportamento fortemente não linear da resposta do dispositivo nesta gama de frequências. Assim estes dois resultados carecem de uma confirmação, por forma a garantir a sua total independência da malha ou da existência de outro erro. Se após cuidada validação (para a qual não houve tempo), os resultados obtidos se vierem a confirmar então existe um fenómeno físico correctamente modelado mas não identificado.

O comportamento não linear do sistema, excitado com uma frequência, produz uma resposta que não é harmónica pura, conduziu à utilização da amplitude eficaz do sinal (a_{ef}) na caracterização da sua resposta em frequência. Desta forma calculou-se a amplitude eficaz dos sinais correspondentes à excitação (onda propagada) e à resposta (movimento da superfície livre interior) do sistema:

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_i a_i^2 \Delta t}{t_{amost}}} \quad (5.2)$$

em que a_i é a amplitude da deformada da superfície livre, Δt o passo de tempo da amostragem e t_{amost} o tempo total da amostragem.

Na figura 5.20 representa-se a relação entre as amplitudes eficazes da excitação e da resposta (ganho).

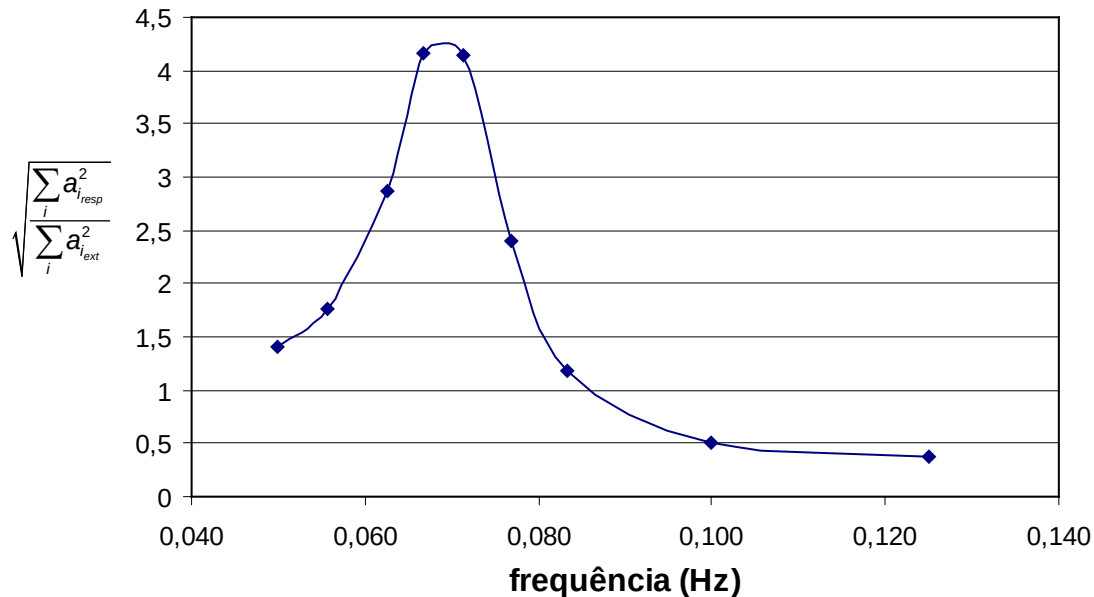


Fig.5.20 – Relação entre as amplitudes eficazes da excitação e da resposta

A observação da figura 5.20 permite verificar que na zona de baixas frequências o movimento da superfície livre interior é muito pouco amplificado. Na zona de altas-frequências o sistema não responde à excitação, ou seja, a superfície livre interior permanece quase em repouso. É possível verificar também uma zona de amplificação típica de um fenómeno ressonante.

Para caracterizar o atraso das respostas, e na impossibilidade de o fazer na forma clássica pois o sistema é não linear, optou-se por representar na figura 5.21 o atraso determinado entre os valores máximos da excitação (correspondente à maior elevação da crista) e da resposta (correspondente ao pico da resposta), α_{pico} .

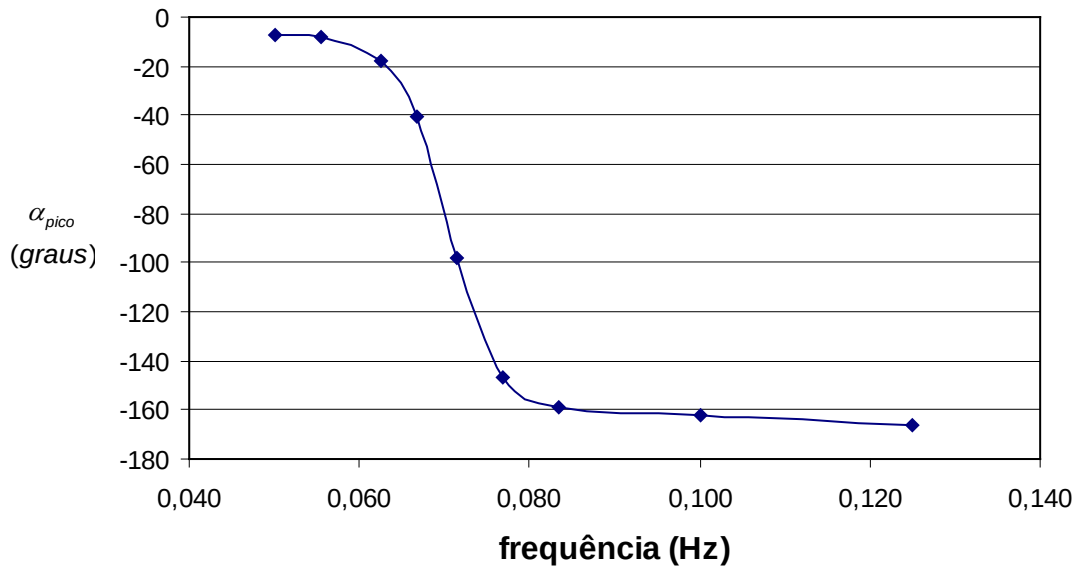


Fig.5.21 – Atraso da resposta em relação à excitação

Por observação da figura 5.21 constata-se que a defasagem é nula para baixas frequências, evoluindo para oposição de fase com o aumento da frequência. Constata-se ainda que a variação entre estes dois valores assintóticos é acentuada e ocorre na zona de ressonância.

5.5 Variação de dimensões internas

No plano de estudos inicialmente previsto, constava a realização de simulações com a alteração de dimensões internas do dispositivo. Uma delas consistia na variação individual da dimensão b , de 6m para 7m e posteriormente para 8m. A outra alteração era a diminuição do diâmetro do canal de entrada, de 5m para 4m e posteriormente para 3m. Com estes ensaios pretende-se inferir sobre a influência da variação da dimensão (b) do reservatório superior e do diâmetro (k) do canal de entrada, no movimento da coluna de água no interior, e testar a potencialidade do modelo numérico neste tipo de estudos.

Nos ensaios numéricos correspondentes, o número de elementos manteve-se idêntico ao caso do dispositivo standard.

A figura seguinte apresenta os resultados obtidos com a alteração da dimensão b . Nela comparam-se a elevação das superfícies livres interiores nos três casos testados.

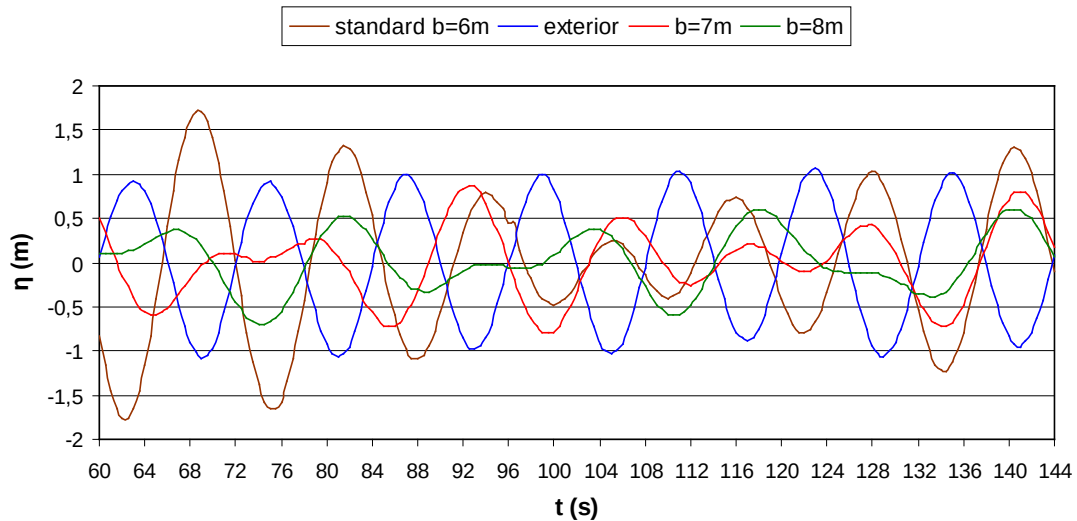


Fig.5.22 – Comparação da elevação da superfície livre interior com a variação da dimensão b

A amplitude máxima da superfície livre no interior do dispositivo, diminui com o aumento da dimensão b . Observa-se igualmente que as curvas para $b=7\text{m}$ e $b=8\text{m}$ apresentam menor modelação.

Nas figuras 5.23 e 5.24 representa-se a variação da velocidade ao longo do eixo de simetria, no intervalo de tempo correspondente à oscilação de maior amplitude da superfície livre interna.

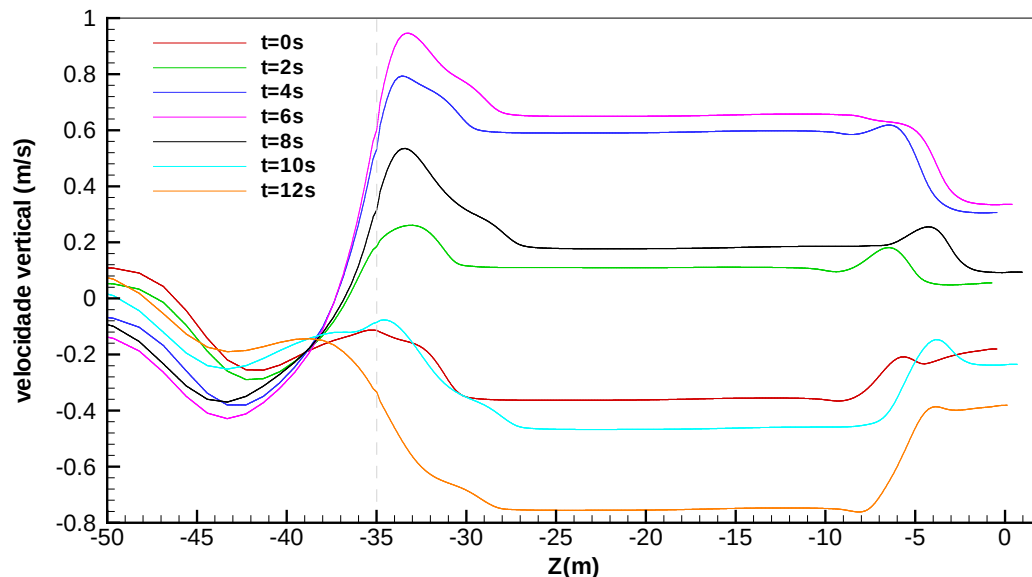


Fig.5.23 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $b=7\text{m}$

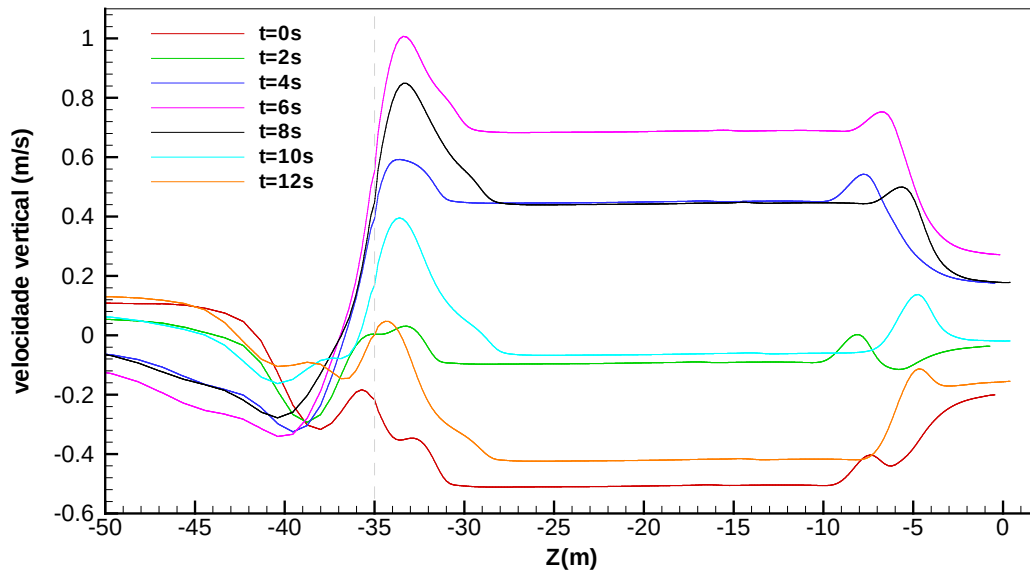


Fig.5.24 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $b=8\text{m}$

A comparação das duas ultimas figuras com a figura 5.18 permite concluir que o aumento do diâmetro do reservatório, traduziu-se numa diminuição do caudal admitido, pois a velocidade máxima na zona de perfil estabilizado (para $b=7\text{m}$ e $b=8\text{m}$) é cerca de 56% ($V_{\text{max}}=0.7\text{m/s}$) da velocidade máxima no caso standard ($V_{\text{max}}=1.2\text{m/s}$).

Esta acentuada variação de caudal, decorrente da menor variação da superfície livre interior, parece indicar que a alteração do diâmetro do reservatório interior alterou as características de ressonância do dispositivo, resultado que à partida não parecia evidente.

Os esforços nestes dois casos não são aqui representados, visto serem muito idênticos ao caso inicial.

Na figura 5.25 apresenta-se os resultados obtidos por alteração do diâmetro de entrada (k). Nela comparam-se a elevação das superfícies livres interiores nos três casos testados.

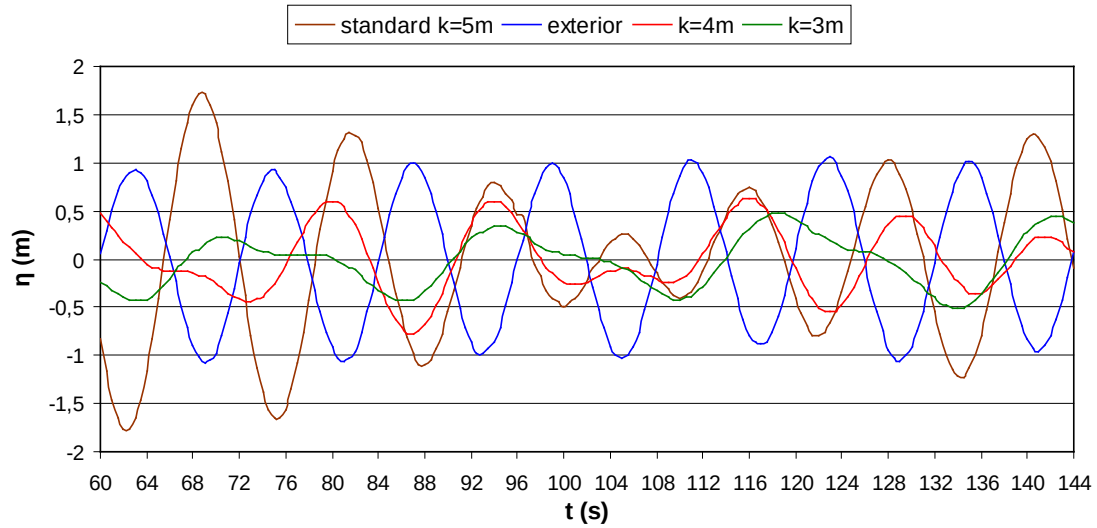


Fig.5.25 – Comparação da elevação da superfície livre interior com a variação da dimensão k

Nas figuras 5.26 e 5.27 representa-se a variação da velocidade vertical ao longo do eixo de simetria do dispositivo. A respectiva variação para o caso standard está representada na figura 5.18.

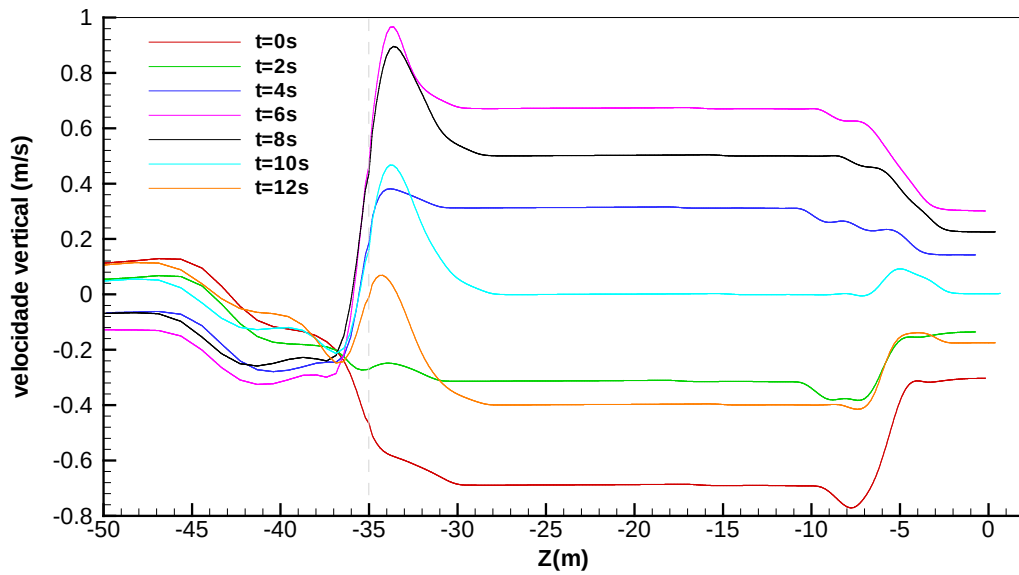


Fig.5.26 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $k=4m$

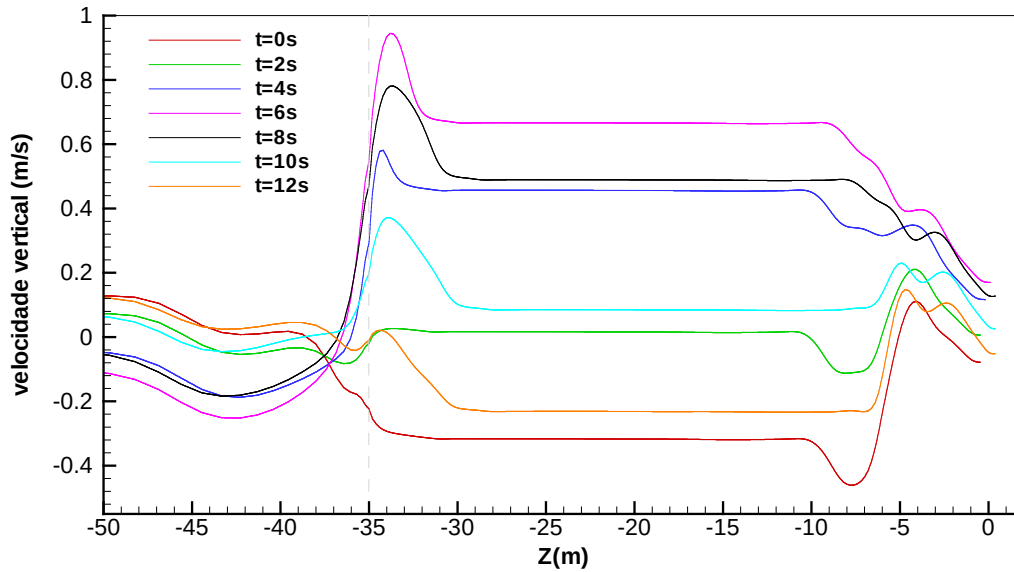


Fig.5.27 – Velocidade vertical no interior do dispositivo em diferentes instantes, para $k=3m$

Os resultados destas simulações permitem concluir que o caudal admitido pelo dispositivo e a elevação da superfície livre diminuem com a redução do diâmetro de entrada. No entanto a ausência de modelação nas curvas de $k=4m$ e $k=3m$ sugerem um afastamento relativamente às condições de ressonância do dispositivo.

Em conclusão, as alterações na geometria interna estudadas parecem condicionar as características de ressonância do dispositivo.

O modelo numérico mostrou-se capaz de descrever o escoamento, permitindo assim no futuro otimizar a resposta do dispositivo.

5.6 Variação da forma exterior

A hidrodinâmica exterior do dispositivo deve também ser otimizada por forma a melhorar o seu movimento de arfagem por acção da onda. Neste contexto estuda-se a alteração da superfície elíptica S4 do dispositivo standard (figura 5.1) por superfícies planas (anéis circulares) designadas por S4 e S6 no dispositivo alterado (figura 5.28).

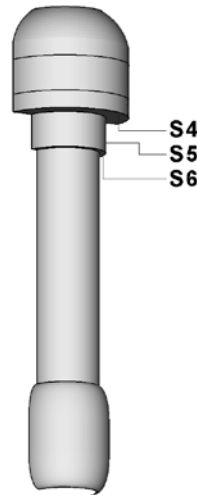


Fig.5.28 – Dispositivo alterado

A introdução da superfície plana S4, posicionada a uma profundidade menor que a superfície elíptica equivalente do dispositivo standard, destina-se a aumentar o esforço vertical de restituição a que o dispositivo fica sujeito quando em flutuação sobre acção da onda. Este aumento deve-se ao facto da variação vertical do campo de pressões ser rapidamente atenuado com o aumento da profundidade, como facilmente se constata por análise da componente não hidrostática da expressão 2.21 para água profunda.

Nas simulações realizadas com o código FLUENT, o dispositivo está fixo, o que não permite testar a eficácia das alterações geométricas atrás referidas. Evidentemente que o código permitiria simular o movimento flutuante do corpo desde que se adoptasse malha móvel, o que não foi possível realizar devido ao tempo limitado para o desenvolvimento desta tese. Assim os resultados obtidos apenas possibilitam aferir sobre o desempenho hidrodinâmico. Desta forma, na figura 5.29 comparam-se os campos do módulo da vorticidade e da pressão dinâmica para as duas geometrias estudadas.

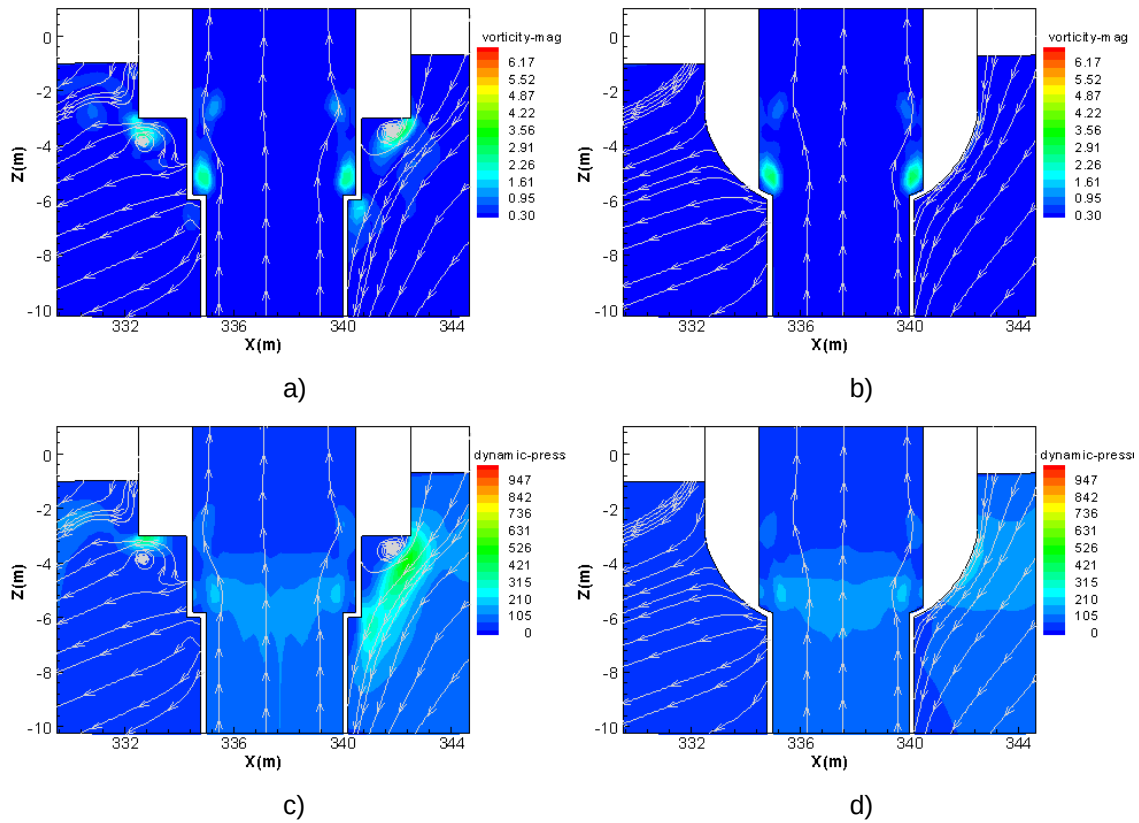


Fig.5.29 – Comparação dos campos de vorticidade a) e b) e de pressão dinâmica c) e d)

As anteriores figuras permitem constatar que a alteração da geometria do dispositivo poderá não provocar um aumento na força vertical de restituição; verifica-se que junto à superfície S4 (plana) ocorre uma grande deflexão das linhas de corrente, que tem como consequência o aumento da vorticidade e a alteração do campo de pressão dinâmica. Assim o aumento dos efeitos dissipativos e a alteração do campo de pressão próximo, poderão anular o efeito conseguido com a introdução da superfície plana a uma menor profundidade.

A utilização do código FLUENT no estudo das formas exteriores do dispositivo passará obrigatoriamente pela adopção de malha móvel.

Capítulo 6

Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta tese centrou-se essencialmente no estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia das ondas.

Neste estudo era essencial conhecer a evolução da superfície livre no interior do dispositivo. Assim o principal objectivo passava por otimizar o escoamento no interior do dispositivo de forma a maximizar a extracção de energia, para condições de agitação predefinidas.

Primeiramente realizou-se a validação do modelo numérico construído tendo por base o programa comercial FLUENT. Através da realização de casos de teste foi possível concluir que o modelo numérico desenvolvido tem capacidade para simular situações de propagação de ondas (tanto em 2D como em 3D), utilizando a técnica VoF para identificação da superfície livre. Ficou também demonstrada a capacidade que o modelo apresenta em situações que envolvam a interacção de uma onda com uma estrutura. A simulação, na região de interacção, apresentou uma precisão consistente com resultados numéricos e experimentais de outros autores. Também a nível dos esforços, os resultados são coerentes, apresentando-se praticamente coincidentes com os resultados obtidos com o código, amplamente validado, WAMIT. É de referir que ao contrário do código WAMIT, e apesar da diferença de tempo de cálculo ser elevada, o código FLUENT permite obter os efeitos não lineares.

Dada a enorme diferença no tempo de cálculo o código FLUENT deve apenas ser aplicado em situações que envolvam fortes efeitos não lineares: ondas de elevada declividade, efeitos viscosos ou turbulentos importantes.

Concluída a validação do código numérico, iniciou-se o estudo principal: a interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia.

A simulação da geometria standard permitiu constatar que o movimento da superfície livre interior do dispositivo não é harmónico, mas sim modelado. Aumentou-se então o tempo de simulação até um valor que permitisse identificar a periodicidade da solução. Feito isto verificou-se que a modelação do movimento resultaria do facto de se estar próximo da frequência de ressonância. Devido a tal situação, decidiu-se então simular diferentes frequências da onda incidente, afastadas e próximas da de ressonância, de forma a determinar a curva que caracteriza a resposta da coluna de água interior. Como referido em 5.4, existem resultados que carecem de confirmação, não obstante os resultados obtidos permitiram aferir sobre o comportamento do escoamento no interior do dispositivo, bem como tirar algumas indicações para a sua optimização.

Convém referir que em consequência do elevado tempo de cálculo não foi possível obter sinais relativos à elevação da superfície livre interior com uma duração compatível com a exigida para a realização da respectiva análise de Fourier e assim identificar com maior precisão as componentes harmónicas da resposta.

De forma a caracterizar a resposta em frequência, calculou-se a amplitude eficaz (a_{ef}) dos sinais correspondentes à excitação (onda propagada) e à resposta do sistema (movimento da superfície livre interior).

Da curva de resposta (figura 5.20) é possível concluir que na zona de baixas frequências o movimento da superfície livre interior é muito pouco amplificado, e que na zona de altas frequências o sistema não responde à excitação, ou seja, a superfície livre interior permanece quase em repouso. Identifica-se ainda a existência de uma zona de ressonância.

Com o intuito de caracterizar o atraso das respostas, e na impossibilidade de o fazer na forma clássica pois o sistema é não linear, optou-se por calcular o atraso determinado entre os valores máximos da excitação e da resposta.

Da curva de atraso das respostas (figura 5.21) é possível concluir que a desfasagem é nula para baixas frequências, evoluindo para oposição de fase com o aumento da frequência. Conclui-se ainda que a variação entre estes dois valores assintóticos é acentuada e ocorre na zona de ressonância.

Os resultados das simulações realizadas variando as dimensões interiores do dispositivo, permitem concluir que: o aumento do diâmetro do reservatório traduz-se numa diminuição do caudal admitido e alteração das características de ressonância do dispositivo; o caudal admitido pelo dispositivo e a elevação da superfície livre diminuem com a redução do diâmetro de entrada provocando a ausência de modelação nas curvas de resposta, sugerindo um afastamento relativamente às condições de ressonância do dispositivo. Em suma, as alterações estudadas na geometria interna parecem condicionar as características de ressonância do dispositivo. No entanto o modelo numérico mostrou-se capaz de descrever o escoamento, demonstrando ser uma ferramenta útil na definição da forma final do dispositivo.

No que respeita a desenvolvimentos futuros seria interessante introduzir o efeito da turbina. Nesta situação a pressão sobre superfície livre interior não é a atmosférica mas sim a resultante da perda de carga introduzida pela turbina. Utilizando o código FLUENT, é possível criar uma zona porosa definindo uma perda de carga de forma a reproduzir a curva da turbina, ou então “calibrando” uma perda de carga numa face fluida. Foram realizadas algumas tentativas com configurações bidimensionais tendo-se identificado como principal dificuldade a compatibilidade de utilização simultânea da técnica VoF com uma das opções citadas. No entanto é minha convicção que a generalização do modelo numérico à anterior situação apenas não foi realizada por falta de tempo decorrente das alterações ao plano de trabalho inicialmente previsto.

De forma a integrar este modelo numérico numa estratégia mais ampla de simulação de corpos flutuantes há que dotá-lo da possibilidade de simular ensaios de radiação. Para tal será necessária a utilização de malha dinâmica, opção existente no FLUENT mas pouco utilizada e documentada em escoamentos com superfície livre. Será assim de prever um esforço considerável.

Depois de realizado o estudo numérico linear (WAMIT) e testadas algumas situações pertinentes que envolvam fortes efeitos não lineares com o FLUENT

estar-se-á em condições de se realizar ensaios experimentais de um protótipo em tanque com várias estratégias de controlo.

Fica assim demonstrado que o código numérico FLUENT pode ser uma ferramenta útil no projecto e desenvolvimento de dispositivos conversores de energia das ondas.

Referências bibliográficas

- [1] Wave Energy Centre, Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal, 2004.
- [2] J.M.B.P. Cruz, A.J.N.A. Sarmiento, Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais, 2004.
- [3] T. Barreiro, L.Gil, Energia das ondas marítimas: Tecnologias e a Experiência Portuguesa, *Anais do Clube Militar Naval*, Vol. CXXXVIII, Julho-Setembro 2008, p. 403-422.
- [4] Le Mahout, An Introduction to Hydrodynamics & Water Waves, 1976.
- [5] R.G. Dean, R.A. Dalrymple, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, 1984.
- [6] ANSYS, FLUENT 6.3 User's Guide, 2008.
- [7] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39, pp 201-225, 1981.
- [8] H. Versteeg and W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method, 1995.
- [9] J. O. Hinze. Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- [10] B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence Academic Press, London, England, 1972.

- [11] M. Peric and J.H. Ferziger, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Second edition, 1997.
- [12] E. Didier, M.G. Neves, L. Gil, Modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura marginal costeira porosa, *Proc. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, Portugal, 2007.
- [13] P. Queutey, M. Visonneau, P. Ferrant, Numerical Investigation of Wave Interaction with a Fixed Vertical Circular Cylinder, *Journal of Offshore and Polar Engineering*, 14(3), pp 202-209, 2004.
- [14] T. Barreiro; E. Didier, L. Gil, M. Alves, Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interacção entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas, *3^{as} Conferência Nacional em mecânica de fluidos, termodinâmica e energia*, Bragança, Portugal, 2009.
- [15] WAMIT User Manual. (<http://www.wamit.com>) (2008).
- [16] L. Gil, T. Barreiro, E. Didier, M. Alves, Estudo numérico não linear da interacção onda cilindro, *6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, Portugal, 2009.
- [17] United States Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual, <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>.
- [18] J. Falnes, Ocean Waves and Oscillating Systems, Cambridge University Press 2002.