

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE ONDAS SOBRE OS PILARES DE SUSTENTAÇÃO DE  
UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO POR MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Jéssica Borges Posterari

Porto Alegre  
Dezembro 2015

JÉSSICA BORGES POSTERARI

ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE ONDAS SOBRE OS PILARES DE SUSTENTAÇÃO DE  
UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO POR MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de diplomação a ser apresentado ao Departamento de  
Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Engenheira Ambiental

Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini

Coorientador: Leonardo Romero Monteiro

Porto Alegre

Dezembro 2015

JÉSSICA BORGES POSTERARI

ANÁLISE DA INCIDÊNCIA DE ONDAS SOBRE OS PILARES DE SUSTENTAÇÃO DE  
UMA PLATAFORMA DE PETRÓLEO POR MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Porto Alegre, dezembro de 2015

Orientadora

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini

Dra. Pelo Institut National  
Polytechnique de Grenoble

Coorientador

Mestre Leonardo Romero Monteiro

Mestre pela Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Edith Beatriz Camaño  
Schettini**

UFRGS

Dra. pelo Institut National  
Polytechnique de Grenoble

**Prof. Alexandre Beluco**

UFRGS

Dr. Pela UFRGS

**Profa. Daniela Guzzon Sanagiotto**

UFRGS

Dra. Pela UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Alberto de Sousa Posterari e Suzidarli Aparecida Borges Posterari, pela motivação e por não medirem esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Aos demais familiares, pelo incentivo e apoio durante as horas em que precisei.

A esta universidade, pela oportunidade de aprendizado durante meus anos de graduação que tornaram a conclusão deste trabalho possível.

À Universidade de Tecnologia Sydney (*University of Technology Sydney*), por me proporcionar um ano de experiências novas na Austrália como aluna de intercâmbio que também contribuiu para minha formação acadêmica.

À minha orientadora, pelo auxílio desde a escolha do tema até o momento final da entrega, me ajudando a alcançar meus objetivos e me aperfeiçoar cada vez mais.

Ao meu coorientador, pela paciência e presença constantes durante todo o desenvolvimento deste trabalho, além de suas correções e incentivos imprescindíveis.

Aos colegas do Núcleo de Estudos em Transição e Turbulência, por esclarecerem as minhas dúvidas sempre que foi preciso e pela companhia ao longo deste semestre.

Aos meus amigos, pelo apoio durante os meses de elaboração deste trabalho e também por compreenderem minha ausência.

## RESUMO

Plataformas semissubmersíveis são estruturas essenciais para o processo de perfuração de poços e produção de petróleo. Por ter diversos usos, o petróleo possui demanda crescente não somente no Brasil como também no mundo. Plataformas *offshore* tem sido projetadas e construídas no litoral brasileiro, sendo necessário o devido conhecimento sobre a interação onda-estrutura. Este trabalho tem o objetivo de estudar os fenômenos envolvidos nesta interação, buscando entender a influência das ondas nos pilares de sustentação de uma plataforma semissubmersível. A plataforma utilizada como referência foi a P-55, localizada na Bacia de Campos, Rio de Janeiro, pela Petrobrás. Três situações com altura e período de onda distintos foram simuladas utilizando o programa *OpenFOAM* para calcular a força aplicada sobre os pilares. Os resultados mostraram que a relação entre as propriedades da onda e a força aplicada sobre os pilares não é linear, podendo haver situações onde uma onda com menor amplitude e maior período resulta em maiores forças do que o caso contrário. Outro fator importante é a ação dos pilares a montante como regularizadores de ondas, diminuindo seus efeitos para ondas de amplitudes maiores e de maior impacto. Analisando as velocidades e os campos de vorticidade é possível de identificar campos de recirculação e o comportamento do fluido ao se interagir com a estrutura.

Palavras-chave: Dinâmica de Fluidos Computacional, Ondas Oceânicas, Interação Onda-Estrutura.

## ABSTRACT

Semisubmersible platforms are essential structures to the oil drilling and production process. For it has several uses, there is an increasing demand for oil not only in Brazil but also worldwide. Offshore platforms have been designed and constructed at Brazilian shores, which demands vast wave-structure interaction knowledge. The present work has the aim of studying the phenomenon involved on this interaction as well as the influence of waves on semisubmersible platforms pillars. The platform used as a reference is called P-55, located at Bacia de Campos, Rio de Janeiro, which belongs to Petrobras. Three situations were simulated using *OpenFOAM* for different wave periods and heights, calculating the slamming force of the water on the pillars. The results show that a relation between the wave properties and the force applied over the pillars is not linear, which makes it possible to have occasions where a wave with smaller amplitude and higher period may have more impact on a pillar considering hydrodynamic forces. Another important point is that the upstream pillars act as regulators, lessening the effects of the wave-structure interactions for waves with high amplitude. With the analysis of the velocity and vorticity fields, it is possible to identify recirculation areas in the domain and the fluid behavior when interacting with the structure.

Key words: Computational Fluid Dynamics, Ocean Waves, Wave-Structure Interaction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de extração de petróleo. ....	1
Figura 2 - Etapas da pesquisa. ....	6
Figura 3 - Gráfico dos principais países produtores entre 1960 e 2006. ....	9
Figura 4 - Consumo mundial de energia por tipo de combustível. ....	10
Figura 5 - Maiores reservas de petróleo no mundo. ....	11
Figura 6 - Maiores produtores de petróleo no mundo. ....	11
Figura 7 - Maiores consumidores de petróleo no mundo. ....	12
Figura 8 - Fortalezas Maunsell. ....	14
Figura 9 - Tipos de plataformas petrolíferas. ....	15
Figura 10 - Exemplo de plataforma fixa. ....	16
Figura 11 - Exemplo de plataforma auto-elevatória. ....	17
Figura 12 - Exemplo de naio-sonda. ....	18
Figura 13 - Plataforma semissubmersível. ....	19
Figura 14 - Semissubmersível convencional. ....	20
Figura 15 - Sistema de ancoragem <i>taut-leg</i> . ....	21
Figura 16 - MODU convencional. ....	21
Figura 17 - MODU <i>taut-leg</i> . ....	22
Figura 18 - Plataforma P-55. ....	23
Figura 19 - Distribuição esquemática da energia das ondas em função da frequência. ....	25
Figura 20 - Características das ondas. ....	26
Figura 21 - Movimento orbital em função da profundidade. ....	27
Figura 22 - Decomposição da velocidade pra um escoamento turbulento. ....	32
Figura 23 - Representação de uma malha de pontos bidimensional. ....	34
Figura 24 - Malha de diferenças finitas. ....	35
Figura 25 - Condições de contorno para um conduto com ondas. ....	36
Figura 26 - Condição de deslizamento livre em uma face. ....	37
Figura 27 - Condição de não-deslizamento em uma face. ....	37
Figura 28 - Teorias de onda. ....	38
Figura 29 - Esquema doador-receptor e superfície livre original. ....	40
Figura 30 - Estrutura do OpenFOAM. ....	41
Figura 31 - Estrutura de uma simulação utilizando OpenFOAM. ....	43
Figura 32 - Geometria utilizada na simulação. ....	44
Figura 33 - Malha utilizada na simulação. ....	45
Figura 34 - Módulo da força resultante no pilar a montante para os Casos 2 e 2A. ....	49
Figura 35 - Módulo da força resultante no pilar a jusante para os Casos 2 e 2A. ....	49
Figura 36 - Módulo da força resultante no pilar a montante para os Casos 3 e 3A. ....	50
Figura 37 - Módulo da força resultante no pilar a jusante para os Casos 3 e 3A. ....	50
Figura 38 - Força na direção x para o pilar a montante para os Casos 2 e 2A. ....	52
Figura 39 - Força na direção x para o pilar a jusante para os Casos 2 e 2A. ....	52
Figura 40 - Força na direção x para o pilar a montante para os Casos 3 e 3A. ....	53
Figura 41 - Força na direção x para o pilar a jusante para os Casos 3 e 3A. ....	53
Figura 42 - Força na direção y para o pilar a montante para os Casos 2 e 2A. ....	54
Figura 43 - Força na direção y para o pilar a jusante para os Casos 2 e 2A. ....	54

Figura 44 - Força na direção y para o pilar a montante para os Casos 3 e 3A. ....	55
Figura 45 - Força na direção y para o pilar a jusante para os Casos 3 e 3A. ....	55
Figura 46 - Módulo da força no pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	57
Figura 47 - Módulo da força no pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	57
Figura 48 - Força na direção x para o pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	58
Figura 49 - Força na direção x para o pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	58
Figura 50 - Força na direção y para o pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	59
Figura 51 - Força na direção y para o pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.....	59
Figura 52 - Módulo da força no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3. ....	60
Figura 53 - Módulo da força no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3. ....	61
Figura 54 - Força na direção x no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3. ....	61
Figura 55 - Força na direção x no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3.....	62
Figura 56 - Força na direção y no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3. ....	62
Figura 57 - Força na direção y no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3.....	63
Figura 58 - Velocidade na direção x para o caso 1. ....	65
Figura 59 - Velocidade na direção x para o caso 2. ....	66
Figura 60 - Velocidade na direção x para o caso 3. ....	67
Figura 61 - Velocidade na direção y para o caso 1. ....	68
Figura 62 - Velocidade na direção y para o caso 2. ....	69
Figura 63 - Velocidade na direção y para o caso 3. ....	70
Figura 64 - Magnitude da vorticidade para a Situação 1. ....	72
Figura 65 - Magnitude da vorticidade para a Situação 2. ....	73
Figura 66 - Magnitude da vorticidade para a Situação 3. ....	74



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes situações simuladas.....	46
Tabela 2 – Novas situações simuladas.....	49
Tabela 3 - Maiores valores de força encontrados para cada caso.....	63

## LISTA DE SIGLAS

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

EUA – Estados Unidos da América

EVTE – Estudo de Viabilidade Técnico Econômica

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

MODU - *Mobile Offshore Drilling Unit*

MVF – Método dos Volumes Finitos

FSI - *Fluid-Structure Interaction*

RANS - *Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*

VOF - *Volume of Fluid*

PIMPLE - *Pressure-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

PISO - *Pressure-Implicit Split-Operator*

SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

## LISTA DE SÍMBOLOS

A - área de secção do corpo perpendicular à direção do fluido ( $m^2$ )

D - distância característica do fluxo (m)

d - profundidade da água (m)

H - distância vertical entre o topo de uma crista e o fundo de uma cava vizinha (m)

h - distância vertical entre dois pontos (m)

p - pressão ( $N/m^2$ )

t - tempo (s)

T - tempo que um  $\lambda$  leva para passar por um ponto estacionário (s)

u - velocidade do fluido (m/s)

V - volume do corpo ( $m^3$ )

v - velocidade que uma onda passa por um ponto estacionário (m/s)

$\lambda$  - distância horizontal entre qualquer ponto de uma onda e o ponto correspondente da próxima onda (m)

$\mu$  - viscosidade dinâmica ( $N.s/m^2$ )

$\nu$  - viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ )

$\rho$  - massa específica ( $kg/m^3$ )

$\tau$  - tensão de cisalhamento ( $N/m^2$ )

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	<b>4</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	4
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	4
2.2.1 Objetivo principal.....	4
2.2.1 Objetivos secundários.....	4
2.3 PRESSUPOSTOS.....	4
2.4 PREMISSA.....	4
2.5 DELIMITAÇÕES.....	5
2.6 LIMITAÇÕES.....	5
2.7 DELINEAMENTO.....	5
<b>3 INDÚSTRIA PETROLÍFERA</b> .....	<b>7</b>
<b>4 PLATAFORMAS DE PETRÓLEO</b> .....	<b>15</b>
4.1 PLATAFORMAS SEMISSUBMERSÍVEIS.....	19
4.2 A PLATAFORMA P-55.....	22
<b>5 ONDAS OCEÂNICAS</b> .....	<b>24</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS.....	25
5.2 MOVIMENTO ORBITAL.....	26
5.3 INTERAÇÃO ONDA-ESTRUTURA.....	27
<b>6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	<b>29</b>
6.1 CONCEITOS DE MECÂNICA DE FLUÍDOS.....	29
6.1.1 Turbulência.....	31
6.1.2 Modelo RANS.....	32
6.2 CONCEITOS DE CFD.....	34
6.2.1 Discretização.....	36
6.2.2 Condição de contorno.....	36
6.2.3 Método VOF.....	40
6.3 OpenFOAM.....	41
6.4 IHFoam.....	42
<b>7 METODOLOGIA NUMÉRICA</b> .....	<b>43</b>
<b>8 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>

8.2 FORÇAS HIDRODINÂMICAS .....	48
8.3 CAMPOS DE VELOCIDADE .....	62
8.2 CAMPOS DE VORTICIDADE .....	69
<b>9 CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

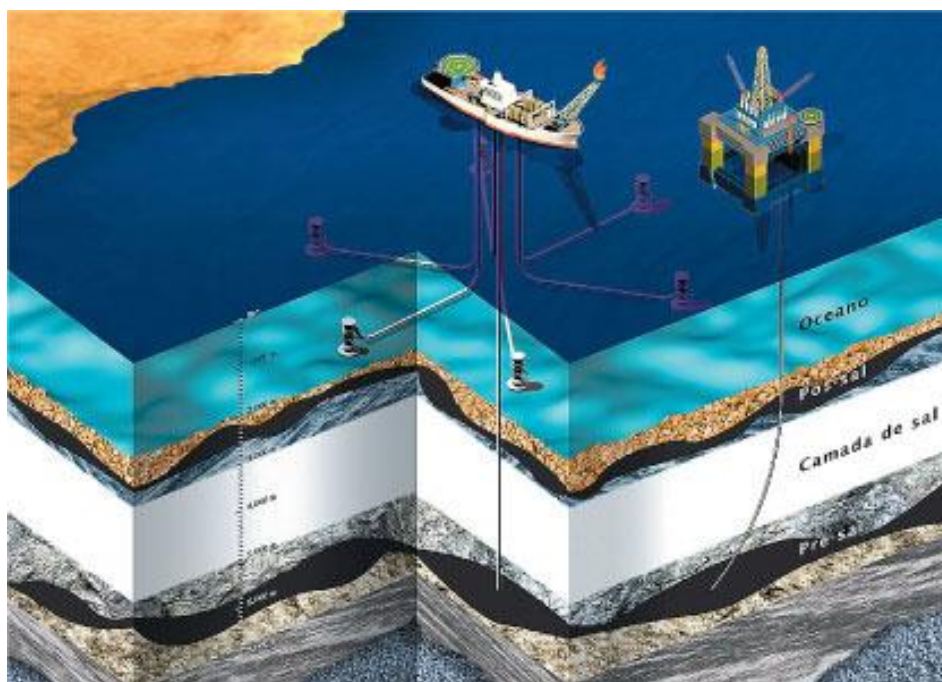
## 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais essencial a diversos setores industriais ao redor do mundo, o petróleo tem sido estudado e explorado de modo crescente. A formação deste hidrocarboneto também tem sido estudada e até o momento há um número significativo de teorias a respeito.

Além do petróleo ser amplamente utilizado na geração de gasolina, que é o combustível utilizado por milhões de automóveis em nível global, também pode ser derivado em uma enorme gama de produtos. Entre estes produtos, podem-se citar solventes, fertilizantes, pesticidas, plásticos, gás natural, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), querosene, óleo diesel e parafina.

Entretanto, para que estes usos sejam viáveis, é necessário realizar a extração do petróleo que é representada pela figura 1. Durante a extração, o petróleo é removido do subsolo e recuperado.

Figura 1 - Representação do processo de extração de petróleo.



(fonte: GOUVEIA, 2010)

Plataformas petrolíferas são utilizadas em terra firme ou no mar com o fim de perfurar poços no leito do oceano para extrair petróleo e gás natural. Os fluidos extraídos são processados e, caso a plataforma seja *offshore*, levados à costa por meio de navios.

Os tipos de plataforma variam de acordo com a finalidade que se destina, sendo as plataformas semissubmersíveis mais utilizadas para perfuração de poços exploratórios. Estas plataformas possuem como estrutura um ou mais conveses, flutuadores e um sistema de ancoragem.

Por se tratarem de estruturas *offshore*, as plataformas semissubmersíveis estão sujeitas à ação das ondas, correntes oceânicas e ventos. Há um frequente risco de danificação dos equipamentos e de movimentações indesejadas em consequência da força de impacto da água. Estes incidentes não só significam altos custos financeiros como também provocam danos à plataforma e podem levar ao seu colapso.

Ainda que as estruturas tenham sido modeladas e construídas pensando no impacto da água, o risco de acidentes ainda existe. Isso acontece, pois a altura da onda do mar pode exceder a altura máxima considerada em projeto, em consequência de tornados e tempestades. Outro motivo seria que estruturas antigas foram concebidas com base em critérios menos rigorosos e, conseqüentemente, possuem menor resistência.

Há uma necessidade de análises detalhadas acerca de eventos oceânicos extremos, visto que o risco de acidentes existe e deve ser mensurado. Experimentos físicos podem ser conduzidos com o fim de analisar o impacto das ondas nas estruturas, mas estes geralmente são caros e não fornecem resultados precisos por serem realizados em escala reduzida.

Surge então a possibilidade de utilizar a metodologia CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para obter resultados com um custo menor. Esta ferramenta é capaz de estimar o impacto das ondas para diferentes condições de contorno e diferentes geometrias, sendo limitados pelo custo computacional.

Empresas e instituições do mundo inteiro tem recorrido ao CFD para diferentes tipos de simulações, que não só envolvem interações fluido-estrutura como também análises térmicas e vibrações mecânicas. O uso de softwares de CFD também tem crescido consideravelmente no Brasil, incentivando a pesquisa na área de mecânica de fluidos computacional.

Apesar de ser comum encontrar pesquisas relacionadas ao impacto de ondas em estruturas *off-shore* em países desenvolvidos, o mesmo não acontece no Brasil. Em vista disso, torna-se necessário aprofundar conhecimentos adquiridos na literatura de uma forma prática, criando uma maior disponibilidade de informações relacionadas à área.

Este trabalho pretende avaliar a interação de uma série de ondas com os pilares de uma plataforma semissubmersível de petróleo, considerando que a mesma esteja fixada. A geometria se baseia na P-55, a maior plataforma semissubmersível já construída no Brasil. O software utilizado para as simulações será o OpenFOAM,

por se tratar de um software livre e capaz de gerar resultados adequados para esta problemática. Já a extensão do programa, o *IHFoam*, terá a finalidade de representar as ondas nas condições de contorno, adicionando-as ao domínio de simulação.

Após a finalização da etapa de adaptação ao programa, o código foi modificado e as simulações da plataforma em diferentes condições foram rodadas. Finalmente, os resultados das forças resultantes e atuantes na estrutura, assim como as velocidades e a vorticidade, são analisados, visando uma maior compreensão da ação da água sobre esta plataforma.



## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritos nos próximos itens.

### 2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: Quais são as forças resultantes de diferentes ondas nos pilares de sustentação de plataformas semissubmersíveis de petróleo?

### 2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### 2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar as forças das ondas do oceano nos pilares de sustentação de uma plataforma semissubmersível de petróleo utilizando o *software OpenFOAM* em conjunto com o *IHFoam*.

#### 2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) Criação de um modelo geométrico representativo dos pilares de sustentação de uma plataforma semissubmersível e definição das características do mesmo;
- b) Análise dos campos de vorticidade e dos campos de velocidade ao redor do objeto.

### 2.3 PRESSUPOSTOS

O trabalho tem por pressuposto que o *software OpenFOAM*, utilizando o solver *interFoam*, fornece soluções precisas para problemas de dinâmica de fluídos computacional e representa a ação da água e a força hidrodinâmica resultante sobre a plataforma simulada.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem a premissa de que o setor de estruturas *offshore* tem crescido consideravelmente, porém as simulações numéricas associadas à área ainda são escassas no Brasil. Pouco estudo é encontrado acerca de plataformas semissubmersíveis, existindo uma maior demanda de novos estudos.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho se delimita em realizar diferentes simulações de propagação de ondas em série sobre os pilares de sustentação de uma plataforma semissubmersível, utilizando diferentes características de onda.

## 2.6 LIMITAÇÕES

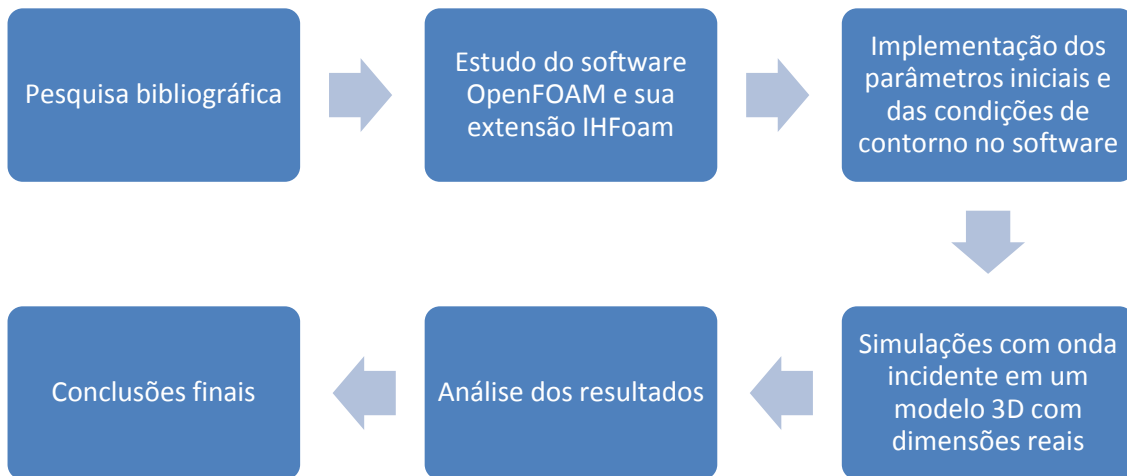
- a) Todos os pilares simulados possuem 35 m de altura e uma base quadrada de 21 m de largura e 21 m de comprimento;
- b) A distância entre os pilares é de 42 m nas direções x e y;
- c) O nível de água do domínio é de 20 m;
- d) O domínio possui 286 m de comprimento, 286 m de largura e 35 m de altura;

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado com as etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 2 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) estudo do *software OpenFOAM* e sua extensão *IHFoam*;
- c) implementação dos parâmetros e condições iniciais e das condições de contorno no software;
- d) simulações com onda incidente em um modelo 3D com dimensões reais;
- e) análise dos resultados;
- f) conclusões finais.

Figura 2 - Etapas da pesquisa.



(fonte: elaborado pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** tem como objetivo disponibilizar informações referentes a áreas de conhecimento abrangidas pelo trabalho por meio de artigos científicos, livros, teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso. Com estas informações, é possível entender como funciona a indústria petrolífera, como são as plataformas semissubmersíveis e como são realizadas as simulações numéricas.

Para iniciar as simulações, é feito um **estudo do software *OpenFOAM* e sua extensão *IHFoam*** a fim de compreender o funcionamento dos mesmos. Durante esta etapa, os códigos são analisados para que a modelagem dos pilares de sustentação da plataforma semissubmersível seja feita de forma correta e precisa.

O código só passa a ser editado durante a fase de **implementação dos parâmetros e condições iniciais e das condições de contorno no *software***. A geometria, o tamanho da malha e os parâmetros das ondas são definidos e as condições iniciais e de contorno são fornecidas ao programa. Os intervalos de tempo e o tempo total de simulação são definidos e editados para que possam ser realizadas simulações.

A partir disto, são definidos os parâmetros necessários e então são realizadas **simulações com onda incidente em um modelo 3D com dimensões reais**. Nesta etapa, as dimensões dos pilares de uma plataforma modelo, que neste trabalho é a P-55, serão utilizadas. Em consequência, o tamanho do domínio também é definido.

Na fase posterior, é realizada a **análise dos resultados** das simulações. Estes resultados incluem a força incidente nos pilares provocada pela água, a esteira de vórtices formada ao redor dos pilares e o perfil de velocidades resultante. A partir desta análise, é possível obter conclusões a cerca do impacto das ondas em uma plataforma semissubmersível para diferentes situações.

Por fim, é feito o fechamento do trabalho com as **conclusões finais**, que mostram os dados mais importantes encontrados durante as simulações e seus respectivos significados.

### 3 INDÚSTRIA PETROLÍFERA

Os primeiros poços de petróleo dos quais se tem conhecimento foram encontrados na China, no ano de 347 a. C. Sabe-se que o petróleo era queimado com o objetivo de produzir sal, enquanto o gás natural tinha como usos a iluminação e a calefação. Nas Américas, porém, o petróleo somente foi descoberto em 1595 pelo explorador Sir Walter Raleigh. A descoberta foi feita no sudoeste da ilha de Trinidad, em um lago denominado “Pitchy Lake”.

Já a primeira refinaria de petróleo foi instalada em Ukhta, Rússia, sob o governo da tsarina Isabel. O processo consistia na destilação do petróleo para a obtenção de uma substância similar ao querosene, que seria usada principalmente em lamparinas.

O querosene, também denominado de óleo de parafina, foi um marco na história moderna do petróleo durante o século 19. Sua obtenção se baseava na destilação fracionada do petróleo bruto, sendo amplamente utilizado como solvente, combustível e também na iluminação. James Young, químico escocês responsável pela descoberta da destilação de petróleo bruto, se uniu a Edward William Binney para a criação de um negócio local no ano de 1850.

Esta parceria resultou na primeira refinaria de petróleo verdadeiramente comercial do mundo, sob o nome de E.W. Binney&Co. na cidade de Bathgate. Ambos utilizavam torbanito extraído localmente, xisto e carvão betuminoso para produzir nafta e óleos lubrificantes. Parafina para combustível e parafina sólida não eram comercializadas até 1856.

Ainda não há um consenso sobre qual seria o primeiro poço comercial, porém a ideia mais aceita é de que Edwin Drake tenha perfurado o primeiro poço de petróleo moderno na Pensilvânia no ano de 1859. Os motivos para que ele tenha se destacado são que o poço foi perfurado e não escavado, sua perfuração estava associada a uma companhia e uma máquina à vapor foi utilizada.

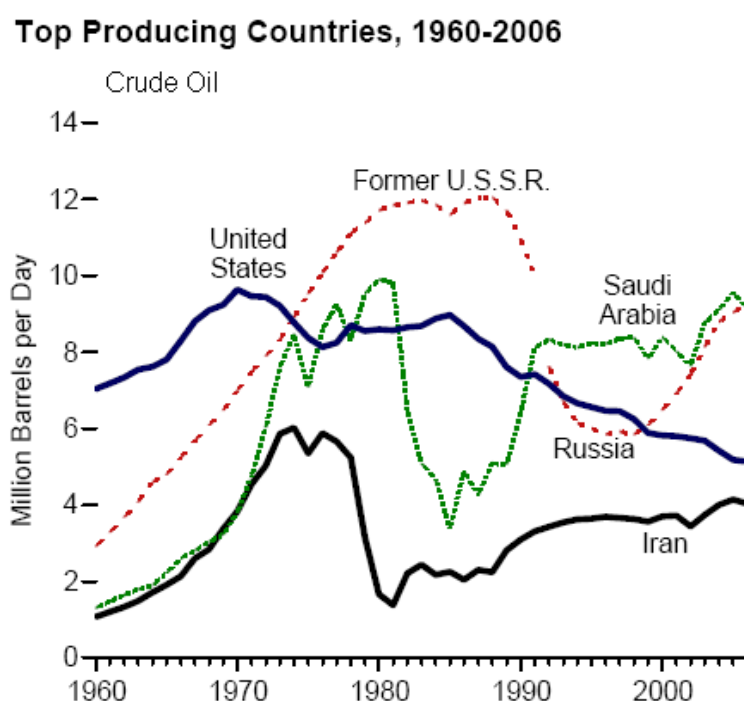
É necessário ressaltar que antes de Edwin Drake houveram avanços relacionados à área em diversas partes do mundo, não somente nos Estados Unidos. Seis anos antes, em 1853, poços comerciais de petróleo eram escavados na Polônia. Também foram criadas refinarias de petróleo na mesma região. Já em 1857, a Romênia escavava seus primeiros poços de petróleo e abria uma refinaria de petróleo que seria uma das maiores da região. No final do século XIX, o império Russo e o Azerbaijão se tornaram os maiores produtores de petróleo em escala mundial.

Em 1910, diversos países já haviam descoberto reservas significantes de petróleo ao redor do mundo. Entre estes países se encontravam Peru, Pérsia, Venezuela e México. Anos depois, com o início da Primeira Guerra Mundial, a disponibilidade de petróleo se tornava cada vez mais importante e seu uso era essencial para navios e aviões.

A situação se repetiu durante a Segunda Guerra Mundial, onde reservas de petróleo não era somente essencial, como também apresentavam um alto valor estratégico. O acesso a estas reservas foi um fator importante em diversos conflitos militares e, por conta disso, regiões com grandes reservas de petróleo foram alvos de bombardeios.

Com o final da guerra, o Oriente Médio passou a ser o principal produtor de petróleo ultrapassando os Estados Unidos, como mostra a figura 3. Também houve outras mudanças durante este período, como o surgimento da perfuração em águas profundas, a regulação dos preços e das políticas envolvidas pelas organizações multi-governamentais e a construção de navios de perfuração.

Figura 3 – Gráfico dos principais países produtores de petróleo entre 1960 e 2006.

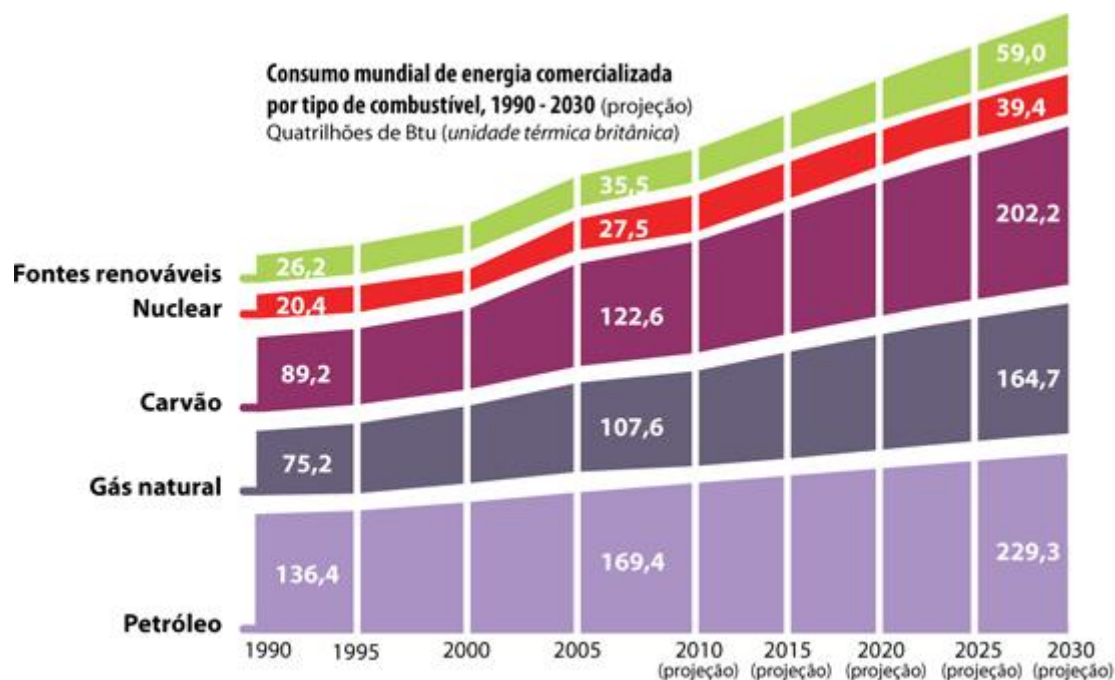


(Fonte: U.S. Energy Information Administration 2006)

Hoje em dia, há uma vasta gama de possibilidades para o uso do petróleo e seu consumo tem aumentado substancialmente como consequência do aumento da população mundial. Os produtos obtidos do petróleo incluem combustível para transporte, óleo de combustível para aquecimento e geração de eletricidade, asfalto e óleo de estrada, e as matérias-primas utilizadas para produzir produtos químicos, plásticos e materiais sintéticos encontrados em quase tudo que utilizamos (2015, U.S. Energy Information Administration).

O maior uso, porém, ainda é no setor energético. Na figura 4, é possível visualizar o consumo energético no mundo de acordo com o tipo de combustível empregado, sendo o petróleo o principal deles.

Figura 4 - Consumo mundial de energia por tipo de combustível.



(Fonte: DOSSIÊ TERRA, 2010)

O consumo, a produção e a quantidade disponível de petróleo são variáveis que apresentam comportamentos diferentes em cada país. Ainda hoje, a Venezuela e a Arábia Saudita apresentam as maiores reservas de óleo cru no mundo, como mostra a figura 5, seguidas por Canadá, Irã e Iraque. A Venezuela, país com as maiores reservas, possuía 298 bilhões de barris no ano de 2014.

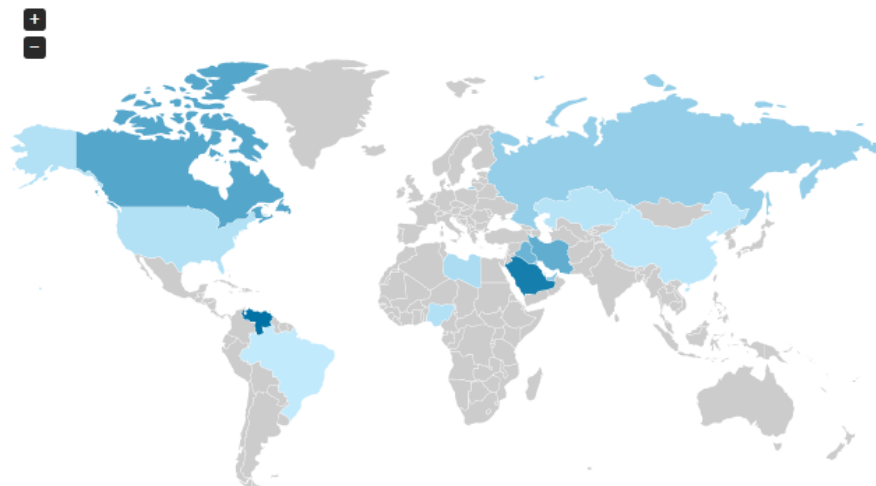
Entre os maiores produtores, porém, se encontram os Estados Unidos, a Arábia Saudita e a Rússia, que juntos produzem uma média de 36.450 barris de petróleo por dia (figura 6). Ainda assim, é visível a disparidade do consumo nos Estados Unidos e nos restantes países do mundo. Os EUA são responsáveis pelo consumo de 18.961 barris por dia, número ainda maior do que o de produção de petróleo (figura 7). Este é um exemplo da tendência crescente do consumo do petróleo e da razão pela qual há dúvidas sobre se as reservas existentes serão suficientes, o que vem incentivando a busca de fontes alternativas de energia.

Figura 5 - Maiores reservas de petróleo no mundo.

**Crude Oil Proved Reserves - 2014 >**

Billion Barrels

1. Venezuela
2. Saudi Arabia
3. Canada
4. Iran
5. Iraq
6. Kuwait
7. United Arab Emirates
8. Russia
9. Libya
10. Nigeria
11. United States
12. Kazakhstan
13. Qatar
14. China
15. Brazil



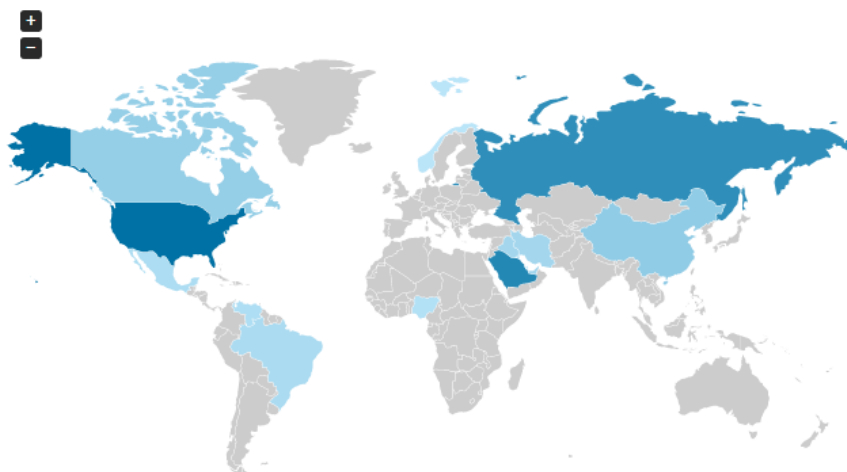
(Fonte: U.S. Energy Information Administration 2015)

Figura 6 - Maiores produtores de petróleo no mundo.

**Total Petroleum and Other Liquids Production - 2014 >**

Thousand Barrels Per Day

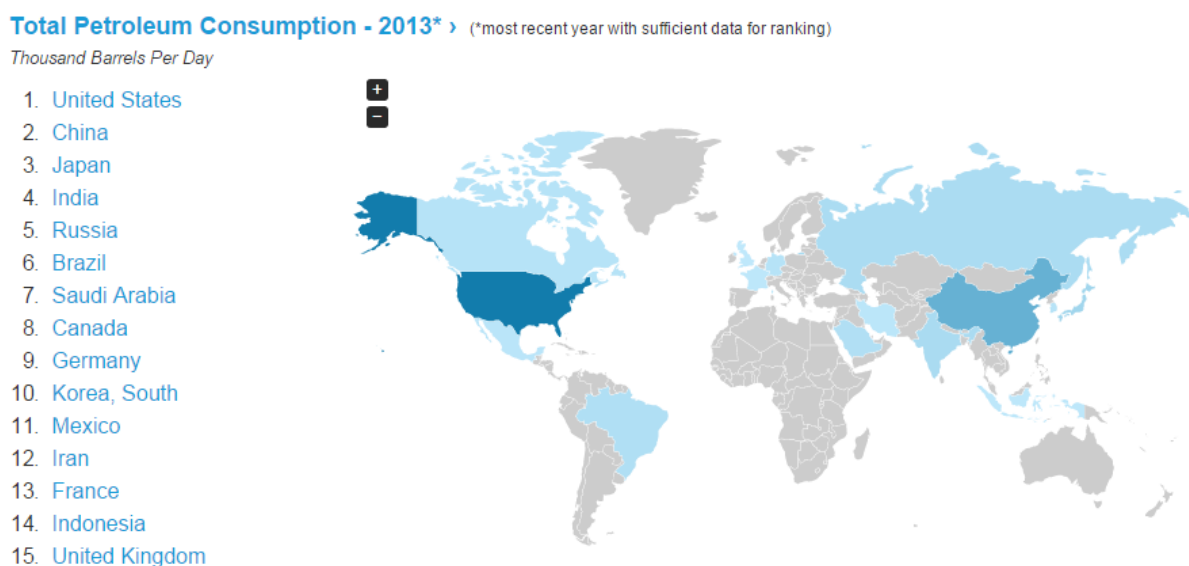
1. United States
2. Saudi Arabia
3. Russia
4. China
5. Canada
6. United Arab Emirates
7. Iran
8. Iraq
9. Brazil
10. Mexico
11. Kuwait
12. Venezuela
13. Nigeria
14. Qatar
15. Norway



(Fonte: U.S. Energy Information Administration 2015)



Figura 7 - Maiores consumidores de petróleo no mundo.



(Fonte: U.S. Energy Information Administration 2015)

## INDÚSTRIA PETROLÍFERA NO BRASIL

No Brasil, a construção de refinarias aconteceu antes do descobrimento do petróleo na região. Em 1932, petróleo era importado do Chile e refinado em Uruguaiana, na Refinaria Rio-Grandense de Petróleo. Ainda assim, desde 1892, buscas por petróleo em terras brasileiras eram feitas através de sondagens e perfurações que chegavam até 488 metros, porém na maior parte dos casos apenas água sulfurosa era encontrada, entre outras substâncias.

A primeira descoberta de petróleo aconteceu na Bahia somente no ano de 1939, na cidade de Salvador. Entretanto, o Brasil ainda não possuía recursos suficientes para a exploração e durante anos a iniciativa privada foi considerada a única solução viável. Em consequência disso, o país dependia de empresas multinacionais para a produção e distribuição do petróleo, além de possuir baixa produção.

O fim da Segunda Guerra Mundial também impactou o Brasil, que pretendia deixar de ser um grande importador de petróleo e atingir maiores níveis de produção. Campanhas começaram a surgir ao redor do país defendendo a nacionalização do petróleo, resultando na criação da Petrobrás em 1953 e da incorporação do monopólio da extração do petróleo no subsolo.

Apesar das atividades da empresa terem início em 1953, foi somente na década de 60 que a Petrobrás atingiu autossuficiência na produção de seus principais

derivados. Ainda na década de 60, no ano de 1968, foi feita a primeira descoberta de petróleo offshore. Quatro anos mais tarde foi descoberto o campo de Garoupa, onde se encontra a Bacia de Campos, a região mais importante de produção de petróleo do país.

Na década de 80, a tecnologia de produção em águas profundas começou a ser utilizada em vista das descobertas de petróleo offshore. Com isso, a produção de petróleo atingiu um nível de 500 mil barris por dia. Entre 1984 e 1987 os campos de Albacora, Marlim e Marlim Sul foram descobertos, sendo todos parte da bacia de Campos e possuindo grandes quantidades de petróleo.

Atualmente, a Petrobrás conta com unidades no exterior por meio da criação da Área Internacional da Petrobras no ano de 2000. A Área Internacional da Petrobrás implantou o conceito de Unidades de Negócios, que são as subsidiárias da empresa no exterior contando com representatividade e autonomia. Estas unidades já se encontram na Angola, Argentina, Colômbia, Estados Unidos e Nigéria.

#### 4 PLATAFORMAS DE PETRÓLEO

Plataformas petrolíferas fazem parte da principal etapa no processo de perfuração e extração de petróleo. Elas podem estar localizadas em terra firme (*on-shore*) ou no oceano (*offshore*), sendo estas últimas as responsáveis pela perfuração de poços no leito do oceano. Também podem ser subdivididas em outras categorias, relacionadas a estabilidade da plataforma ou as suas atividades que são realizadas.

É o EVTE (Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica) que dita qual a melhor plataforma para ser usada em qual tipo de exploração, pois há limitações quanto à altura da lamina d'água, ao escoamento de óleo e à viabilidade econômica do processo (AMORIM, T. O., 2010). O EVTE fornece um importante auxílio na tomada de decisões de investimentos ou melhorias de processos para empresas.

Apesar da exploração de petróleo no fundo do mar ser um processo antigo, as plataformas petrolíferas passaram a ser construídas no meio do século XX. As primeiras barcas móveis feitas de aço surgiram nos anos 30, no golfo do México. Já a primeira plataforma foi construída e utilizada na costa de Louisiana pelas companhias *PureOilCompany* e *Superior OilCompany*, em 1946.

Nos anos seguintes plataformas semelhantes foram surgindo ao redor dos Estados Unidos, principalmente em Louisiana. Porém, as plataformas modernas como conhecemos tiveram suas origens no Reino Unido durante a Segunda Guerra Mundial. As fortalezas marítimas Maunsell (figura 8) são consideradas as predecessoras das plataformas atuais, sendo construídas em um curto período de tempo e deslocadas aos Estuários Thames e Mersey.

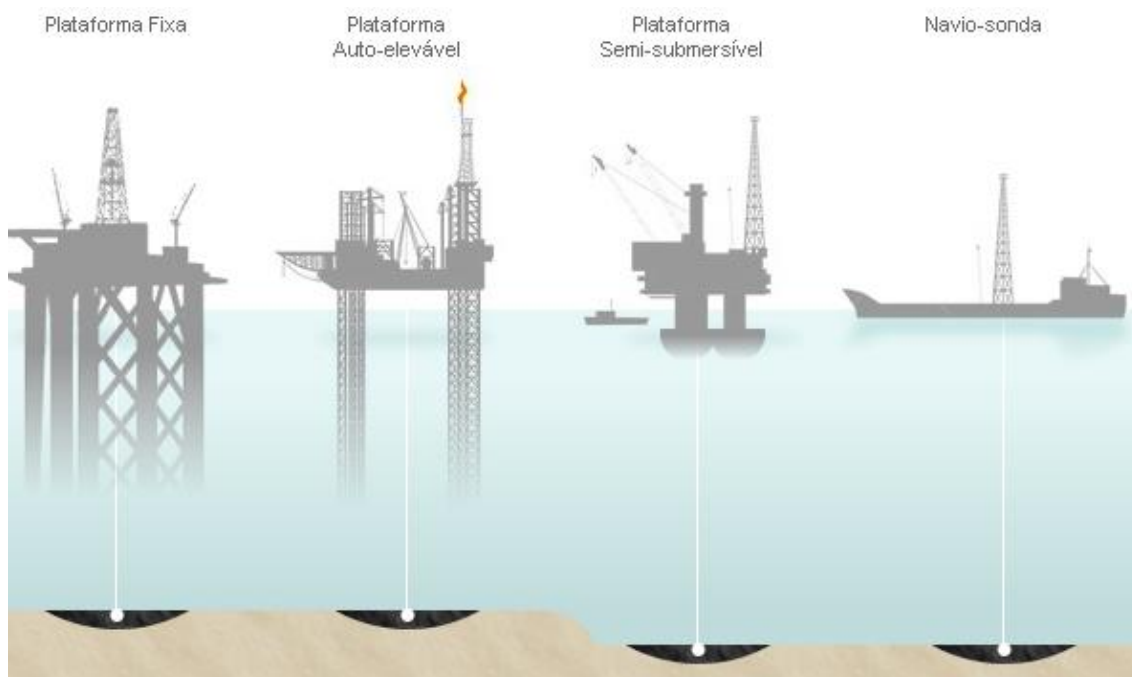
Figura 8 - Fortalezas Maunsell.



(Fonte: WILLIANS, 2006)

Dependendo das funções desejadas e da localização, os tipos de plataformas utilizadas podem variar. Previamente à instalação, um estudo é realizado levando em consideração todas as variáveis de projeto e resultados esperados, apontando qual plataforma deverá ser escolhida. Os principais tipos de plataformas estão ilustrados na figura 9 e brevemente detalhados abaixo.

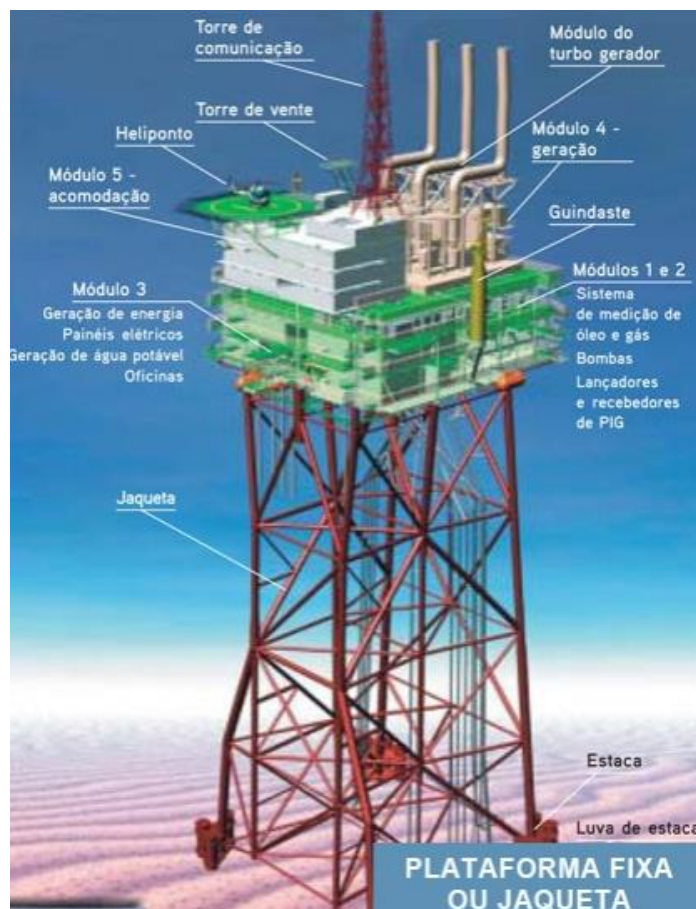
Figura 9 - Tipos de plataformas petrolíferas.



(Fonte: GALP ENERGIA, 2014)

As **plataformas fixas** são caracterizadas pela fixação ao fundo do mar através de estruturas modulares de aço (figura 10). Estas foram as primeiras plataformas *offshore* a serem desenvolvidas e as mais comumente utilizadas. Porém, a principal limitação desse tipo de unidade é a altura da lâmina d'água onde deve ser instalada, uma vez que em águas mais profundas a instabilidade aumenta, fazendo com que a base desse tipo de plataforma tenha que ser muito grande, tornando inviável a quantidade de aço empregada para construção desse tipo de projeto (AMORIM, T. O., 2010).

Figura 10 - Exemplo de plataforma fixa.



(Fonte: ISIS ENGENHARIA, 2012)

**Plataformas auto-elevatórias** (figura 11) são unidades móveis constituídas por uma balsa conectada a estruturas de apoio que podem ser rebaixadas e alcançar o fundo do mar. Estruturas com pernas de jaquetas são mais eficientes, pois possuem maior resistência à flambagem. São utilizadas para prospecção e perfuração de poços exploratórios e instalação de plataformas fixas. Desde que a primeira plataforma auto-elevatória, ou auto elevável (*jackup*) foi construída em 1954, elas se tornaram o tipo mais comum de plataforma para explorar, perfurar e desenvolver campos de petróleo. Hoje existem centenas de *jackups* operando ao redor do mundo realizando as operações de perfuração e *workover* em praticamente todos os ambientes (CITRA, R. 2014).

Figura 11 - Exemplo de plataforma auto-elevatória.



(Fonte: CITRA, 2014)

No decorrer do presente trabalho, as **plataformas semissubmersíveis** serão mais discutidas a parte por serem o foco principal, visto que a plataforma usada de referência se enquadra nesta categoria. Por último, os **navios-sonda** (figura 12) são estruturas autônomas de exploração de poços submarinos que sofrem adaptações de acordo com a profundidade a serem perfuradas. Estes navios são capazes não somente de explorar petróleo, como também podem efetuar a produção, armazenamento e escoamento do mesmo. A ideia central dos navios-sonda é garantir uma grande capacidade de armazenamento que permita a instalação dessas unidades em campos muito afastados da costa, onde a instalação de linhas de duto se torna proibitiva (GROVE, 2005). Para diminuir o efeito do vento e das ondas, é instalado um sistema de ancoragem que impeça o deslocamento do navio.

Figura 12 - Exemplo de naio-sonda.



(Fonte: GROVE, 2005)

As plataformas petrolíferas, de um modo geral, podem ser consideradas autossuficientes. O suprimento de energia se dá pelo processo de geração elétrica, que acontece na própria plataforma. Já, a água utilizada nos processos e também pelas equipes passa pelo processo de dessalinização. Todos os equipamentos necessários para o processamento de petróleo também se encontram disponíveis, sendo assim, possível transferi-lo a plataformas flutuantes ou à costa através de tubulações.

Riscos, porém, estão envolvidos ao longo de todo o processo de exploração de petróleo utilizando as plataformas. A extração de substâncias voláteis sob altas pressões pode resultar em tragédia devido à natureza desta operação. Perigos também podem estar associados à falhas de equipamentos, problemas de design da estrutura ou erros de gestão. No Brasil, por exemplo, houve o caso da P-36 que ficou conhecido no mundo inteiro. Esta era a maior plataforma semissubmersível do mundo até o ano de 2001, que foi o ano de seu naufrágio.

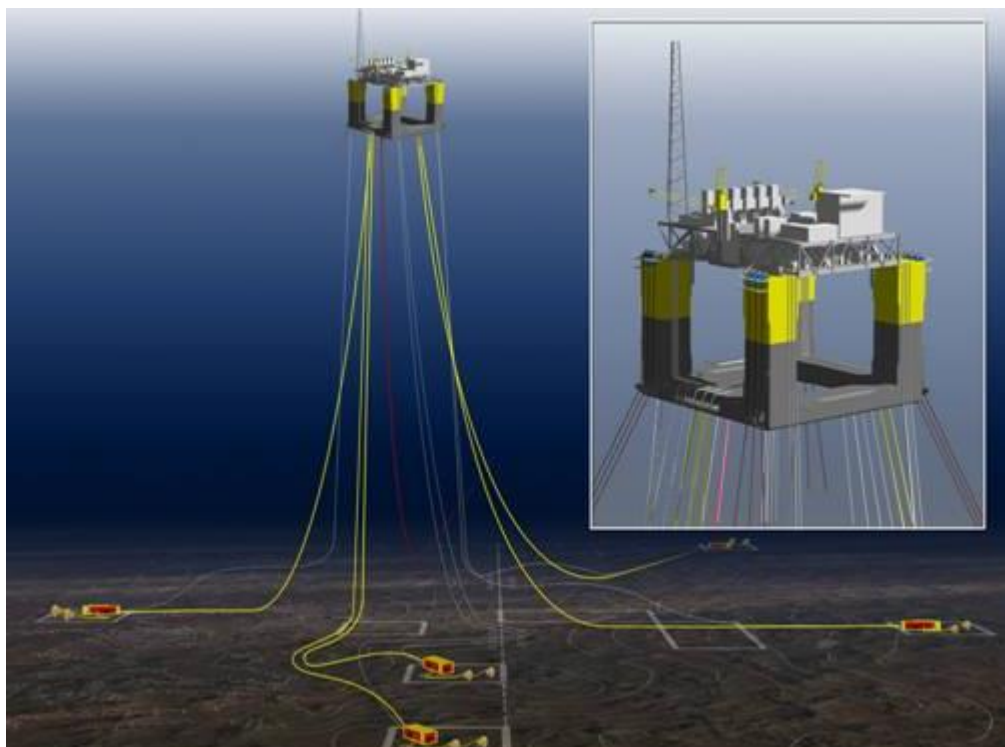
Além dos riscos já mencionados, as plataformas também estão ligadas a riscos ambientais. Na maior parte dos casos isso se dá pelo derramamento de petróleo, que promove uma série de consequências à fauna e à flora local. O petróleo bloqueia a luz solar, impedindo as algas de realizar fotossíntese e resultando na morte de peixes pela falta de oxigênio. Além de causar uma cadeia de eventos, o

derramamento de petróleo pode tomar grandes dimensões tornando-o difícil de ser controlado.

#### 4.1 PLATAFORMAS SEMISSUBMERSÍVEIS

Plataformas semissubmersíveis (figura 13) consistem em corpos submersos conectados ao convés acima do nível d'água por meio de colunas ou paredes delgadas (HOOFT, 1972). Este tipo de plataforma se apóia em flutuadores (*pontoons*), cuja profundidade pode ser alterada pelo bombeio de água para o tanque de lastro (BARROS, 2014). Elas ainda podem ser divididas em subcategorias dependendo de suas funções e sistemas de ancoragem.

Figura 13 - Plataforma semissubmersível.



(Fonte: PETROGASNEWS, 2011)

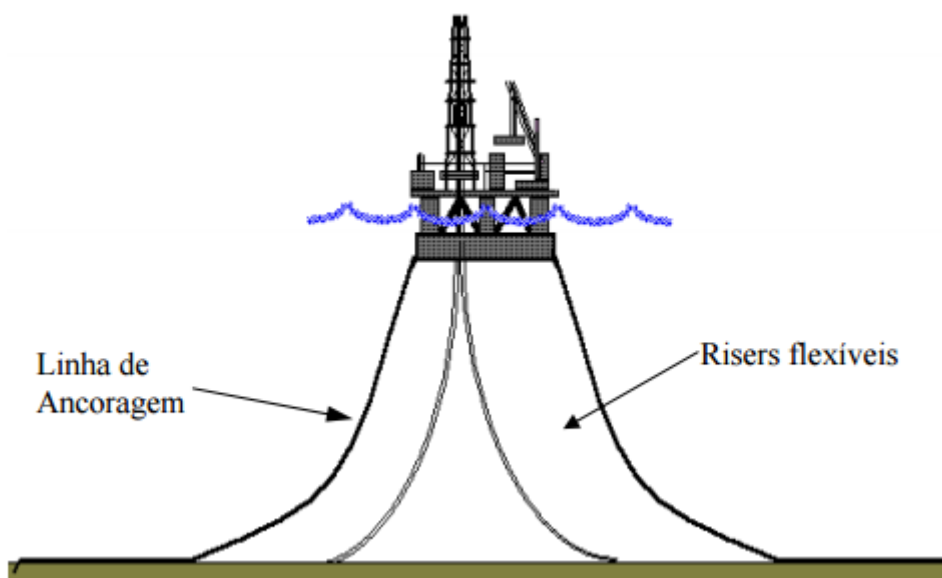
Estas plataformas possuem excelentes características hidrodinâmicas e de estabilidade, já que, os *pontoons* precisam ser volumosos para gerar empuxo e as colunas simétricas e esbeltas na região das ondas, também necessitam de grandes áreas de conveses, que são projetados e construídos para atender a um conjunto específico de condições operacionais como também suportar a carga dos equipamentos e consumíveis (SEABRA, 2009).



Existem plataformas semissubmersíveis de produção, que são fixas, e também de perfuração, denominadas MODU (*Mobile Offshore Drilling Unit*). Ainda, podem apresentar sistemas de ancoragem convencionais ou do tipo *taut-leg*. Este sistema de ancoragem, em conjunto com o sistema de posicionamento dinâmico, é responsável pelo posicionamento da plataforma.

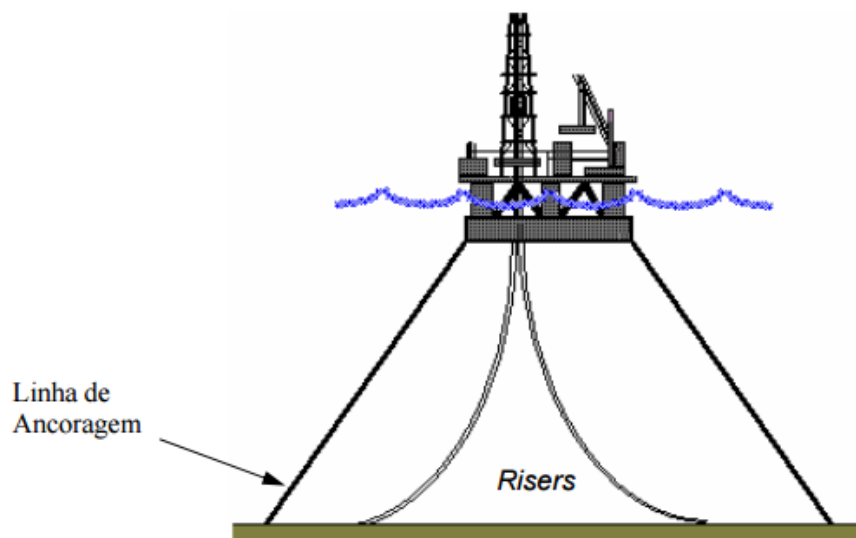
As **plataformas de produção com sistema de ancoragem convencional** (figura 14) apresentam o sistema de ancoragem em forma de catenária que é constituída por trechos em cabos de aço, amarras ou uma combinação de ambos. Este sistema é empregado na maioria das plataformas de perfuração e de produção até uma profundidade em torno de 500 metros. Seu arranjo consiste em que a linha de ancoragem é presa ao fundo do mar por âncoras de resistência horizontal (LACERDA, 2005).

Figura 14 - Semissubmersível convencional.



(Fonte: LACERDA, 2005)

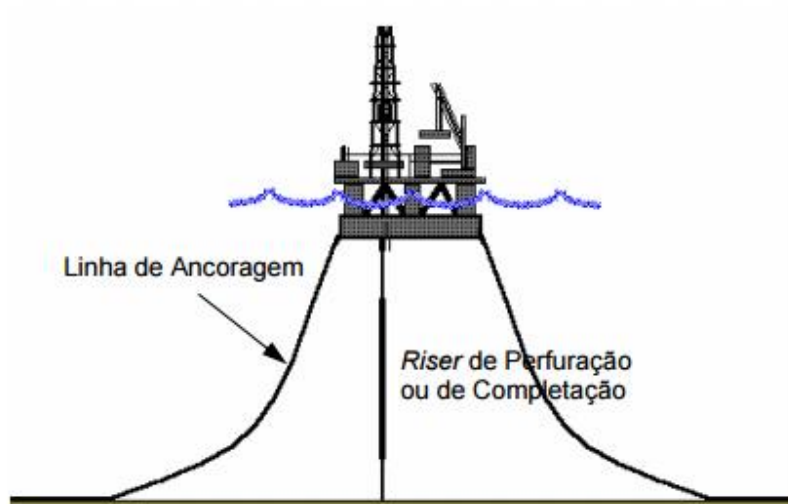
Outro tipo de ancoragem utilizada, denominada ***taut-leg***, também pode ser encontrada em plataformas semissubmersíveis. Este sistema utiliza linhas esticadas (figura 15) constituídas por aço nas extremidades e poliéster nos cabos intermediários. O poliéster é utilizado por possuir uma rigidez axial e peso submerso por unidade de comprimento menor do que o aço. Este foi um avanço significativo na área considerando que com esta configuração foi possível diminuir o raio de ancoragem significativamente em lâminas de água menores do que 700 metros.

Figura 15 - Sistema de ancoragem *taut-leg*.

(Fonte: BARROS, 2014)

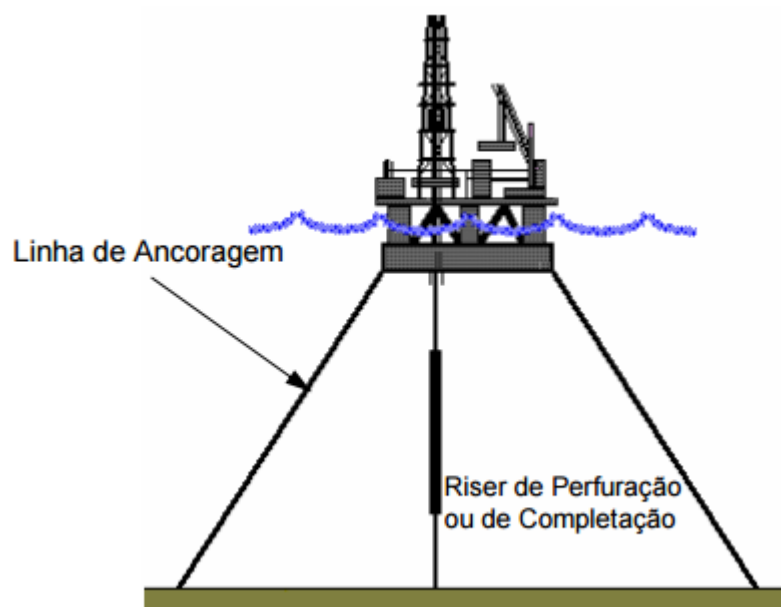
Os mesmos sistemas de ancoragem podem ser encontrados em plataformas de perfuração do tipo **MODU** (figuras 16 e 17). Esta categoria de plataformas tem sido a escolha principal de muitas empresas visto que possuem muitas vantagens. As ondas passam pela estrutura com uma energia mínima, sendo as cristas sempre localizadas abaixo do convés. Estes fatores combinados resultam em uma maior resistência a ambientes severos e a acidentes.

Figura 16 - MODU convencional.



(Fonte: LACERDA, 2005)

Figura 17 - MODU *taut-leg*.



(Fonte: LACERDA, 2005)

#### 4.2 A PLATAFORMA P-55

Como parte do Plano de Negócios e Gestão 2013-2017 da Petrobrás, foi construída a plataforma semissubmersível P-55 (figura 18) que atualmente se encontra em operação na Bacia de Campos. Esta plataforma opera desde dezembro do ano de 2013.

Figura 18 - Plataforma P-55.



(Fonte: PETROBRAS, 2014)

A plataforma P-55 ainda faz parte de um projeto interno nomeado Módulo 3, sendo interligados a ela 17 poços. Destes poços, 11 são produtores de petróleo e 6 são injetores de água. Como a plataforma manterá fixa sua localização, para exportar o petróleo extraído dutos submarinos são utilizados. Estes dutos fazem a conexão entre a plataforma e a rede de escoamento de petróleo.

A profundidade aproximada onde a P-55 está instalada, no campo de Roncador, é de 1.800 metros. Ela está projetada para processar 180 mil barris de petróleo por dia comprimir 6 milhões  $m^3$  por dia de gás natural e injetar 290 mil barris de água por dia. Com 52 mil toneladas, 10 mil  $m^2$  de área, a P-55 é a maior plataforma semissubmersível construída no Brasil e uma das maiores do gênero no mundo (PETROBRAS, 2014).

As dimensões dos pilares da plataforma são dados cruciais para este trabalho, sendo que os mesmos possuem uma altura de 35 metros e uma base quadrada de 441  $m^2$ . Todo o processo de construção e integração dos módulos ocorreu no Brasil, contribuindo assim para geração direta e indireta de empregos.

Esta unidade trabalha em conjunto com as plataformas de produção P-52 e P-54, já instaladas no campo de Roncador, e com a plataforma P-62, que deixou no dia 30/12/13 o Estaleiro Atlântico Sul, em Ipojuca (PE) (PETROBRAS, 2014).

## 5 ONDAS OCEÂNICAS

As ondas oceânicas são produtos da natureza, em que forças agem sobre a água criando estas ondulações. A causa mais óbvia da formação de ondas é por meio do vento, causa que foi descoberto pelos gregos há centenas de anos atrás, porém que foi pouco estudado em tal período.

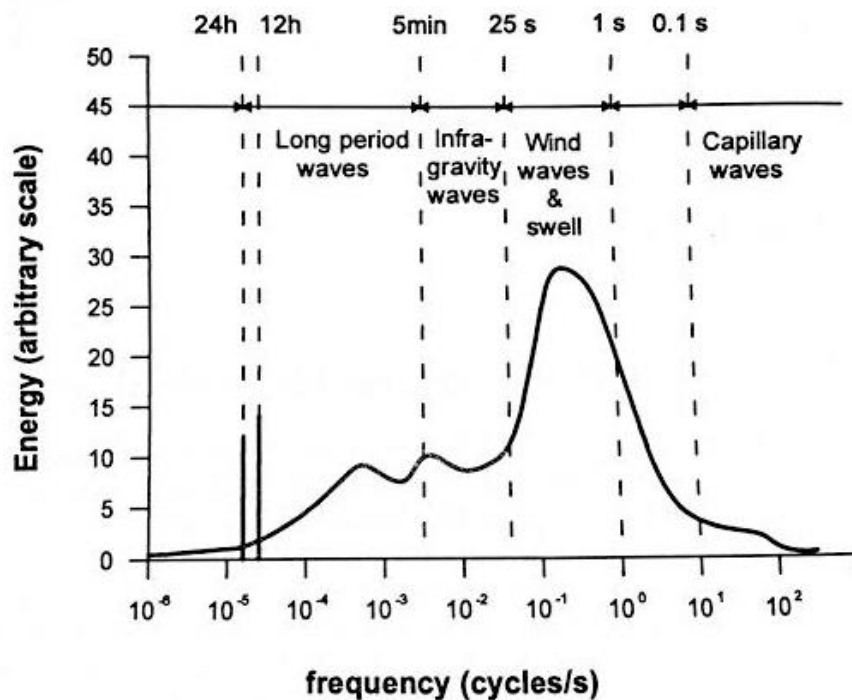
Foi somente nos séculos XIX e XX que houve um avanço significativo no conhecimento sobre o comportamento das ondas e o que as causam. De acordo com MASSEL (1996), há cinco tipos principais de ondas que se propagam na água: som, capilar, gravidade, interna e ondas planetárias. Estas não são as únicas ondas existentes, mas as principais estudadas.

As ondas planetárias são formadas por ondas lentas e de grande escala que são geradas pela variação do equilíbrio da vorticidade potencial. Ondas capilares são geralmente curtas e de alta frequência, formadas pela combinação entre tensão superficial e a turbulência do vento. A gravidade agindo sobre partículas de água e fazendo com que elas desequilibrem a superfície do oceano formam ondas de gravidade. Já ondas sonoras são produtos da baixa compressibilidade da água.

Tendo em vista que há mais de um tipo de onda possível de ser gerada, uma vasta gama de comprimentos de onda e períodos podem ser encontrada. De acordo com a figura 19, podemos encontrar ondas com período de menos de um segundo ou até mesmo com horas ou dias. Nesta figura, é possível ver como varia a energia transportada pela onda em função de seu período.

Entender as propriedades e características das ondas é fundamental para a área de engenharia oceânica e naval, visto que as estruturas *offshore* estão diretamente expostas à ação das ondas. É necessário, então, conhecer as interações entre onda e estrutura para desenvolver estruturas capazes de resistir à força proveniente da água.

Figura 19 - Distribuição esquemática da energia das ondas em função da frequência.



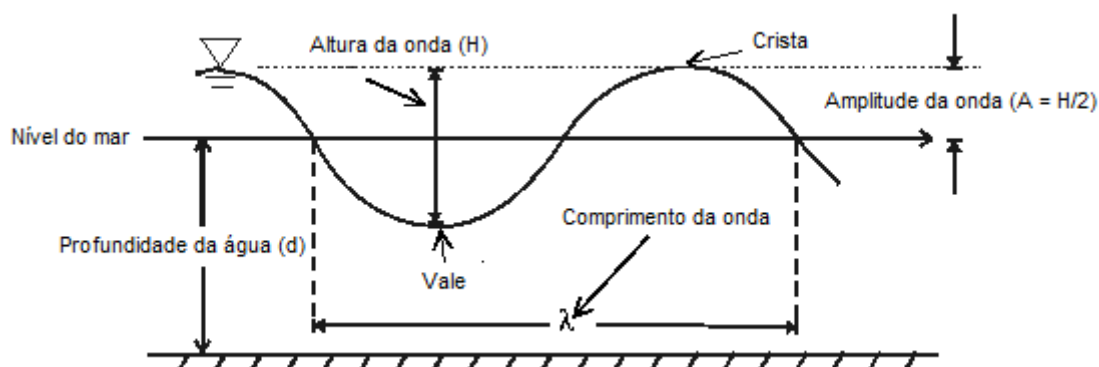
(Fonte: MASSEL, 1996)

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS OCEÂNICAS

As ondas oceânicas podem apresentar diferentes formatos, velocidades e também podem ser divididas em diferentes categorias. A profundidade da água pode influenciar a formação de ondas, podendo ser rasas, profundas ou intermediárias. Ondas em águas rasas ocorrem quando a profundidade da água é menor do que  $1/20$  do seu comprimento. Já as ondas em águas profundas ocorrem em águas cuja profundidade excede metade do seu comprimento. As ondas em águas intermediárias ocorrem entre estes dois limites, ou seja, quando a razão da profundidade pelo comprimento esta entre  $1/20$  e  $1/2$ .

A figura 20 ilustra as principais características físicas das ondas. A crista e o vale representam o ponto mais alto e mais baixo da onda, respectivamente. A distância entre estes dois pontos é denominada altura ( $H$ ). A distância entre qualquer ponto de uma onda e o ponto correspondente da próxima onda é denominado comprimento de onda ( $\lambda$ ). A distância entre o nível de água e o fundo é a profundidade da água ( $d$ ). Por fim, o período ( $T$ ) representa o tempo necessário para se percorrer um comprimento de onda.

Figura 20 - Características das ondas.



(Fonte: elaborado pela autora)

Cada onda pode possuir características e movimentos diferentes. Para ondas que não transportam massa, quando dois grupos de ondas se encontram, elas atravessam uma a outra. O que acontece após é o fenômeno de superposição, quando ondas somam ou cancelam efeitos. Se a crista de uma onda se alinha com o vale de outra onda que a atravessa, elas se subtraem, tornando esta interferência destrutiva. Porém, quando duas cristas ou dois vales se alinham esta será uma interferência construtiva. Este é o principal motivo pelo qual as ondas em uma praia se parecem diferentes, pois diferentes fenômenos de interferência ocorrem durante o deslocamento das ondas.

## 5.2 MOVIMENTO ORBITAL

A velocidade das ondas depende de duas coisas: do comprimento de onda e da profundidade da coluna d' água. Em geral, quanto maior o comprimento de onda, mais rápida é a onda e quanto mais raso o local, mais vagarosa é a onda (GOMES, 2003).

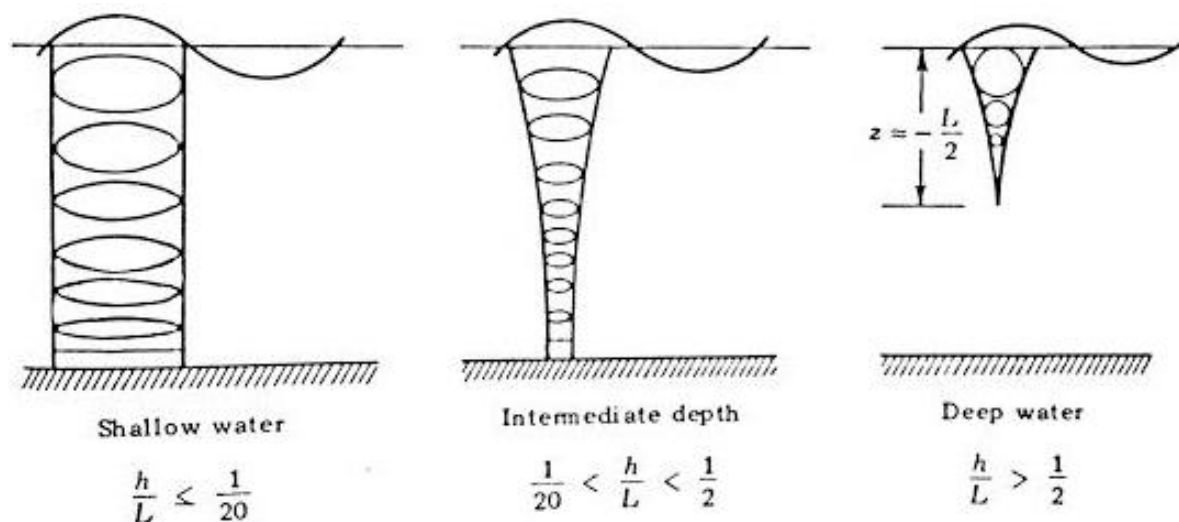
O movimento das moléculas de água se diferencia do movimento da onda, sendo influenciado pelo mesmo. Com a aproximação da crista, as partículas sobem e vão para frente, com o oposto ocorrendo após a passagem da cava. Este movimento contínuo resulta então no movimento líquido circular no oceano.

Este movimento é afetado pela profundidade da água. Em águas profundas, o movimento orbital diminui com a profundidade, tornando-se nulo ou desprezível o efeito sobre o fundo, assim como o efeito do fundo sobre as ondas. Quando a profundidade dividida pelo comprimento de onda se encontra entre 0,5 e 0,05, o

efeito sobre o fundo é menor do que na superfície, porém ainda existente, não podendo ser desprezado.

Nas águas rasas as ondas sofrem os efeitos dos sedimentos do fundo, que diminuem sua velocidade. O perfil dos movimentos orbitais em relação à profundidade também é alterado, sendo o formato da trajetória elíptico ao invés de circular. Perto do fundo as elipses se tornam mais achatadas e menores em função do atrito provado pelo mesmo. A figura 21 ilustra as três situações mencionadas.

Figura 21 - Movimento orbital em função da profundidade.



(Fonte: RAHMAN, 1988)

### 5.3 INTERAÇÃO ONDA-ESTRUTURA

Diversos fatores externos podem prejudicar uma estrutura levando ao seu colapso, como oscilações e fadiga. No caso das plataformas semissubmersíveis, a força de impacto da água pode prejudicar os pilares de sustentação e até mesmo atingir o deck de operação.

Para determinar as configurações ótimas, a interação onda-estrutura deve ser estudada para determinar a força resultante que age na estrutura pelo impacto da onda. Estes estudos preveem situações extremas e auxiliam a prever falhas no projeto ou alterações que podem ser feitas.

Pesquisadores já conseguiram encontrar fórmulas que relacionam a força da onda a estruturas específicas, sendo a mais famosa e a mais utilizada a fórmula de Morison (Equação 1). Esta é uma equação semi-empírica composta por uma força



de inércia em fase com a aceleração local do fluido,  $dU/dt$ , e uma força de arraste proporcional ao quadrado da velocidade do fluido,  $U(t)$  (GOTOH et al., 2013).

$$F = \rho C_M V \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_D A U |U|, \quad (1)$$

onde:

$V$  = volume do corpo;

$A$  = área de secção do corpo perpendicular à direção do fluido;

$C_M$  = coeficiente de inércia;

$C_D$  = coeficiente de arrasto.

Estes problemas, porém, possuem alta complexidade e não podem ser resolvidos de forma analítica, devendo então ser analisados com o auxílio de experimentos físicos ou simulações numéricas. Atualmente, já é possível encontrar um grande número de *softwares* capazes de realizar cálculos relacionados à interação fluido-estrutura e simular diferentes situações.

Há duas abordagens diferentes comumente utilizadas para resolver problemas de FSI (*Fluid-Structure Interaction*). Estas são denominadas abordagem monolítica ou abordagem particionada e podem apresentar definições diferentes de acordo com pesquisadores de diferentes áreas.

Na **abordagem monolítica**, a interação entre o fluido e a estrutura se dá no mesmo fundamento matemático, formando um sistema único de equações para todo o problema. Este sistema é resolvido utilizando um algoritmo também unificado. Esta abordagem é mais eficientemente utilizada em casos multidisciplinares, porém demandando mais recursos computacionais

Já a **abordagem particionada** se difere no sentido de que o fluido e a estrutura são vistos como duas áreas computacionais distintas que devem ser resolvidas separadamente, com diferentes malhas e algoritmos. Esta abordagem demanda menos recursos e é capaz de resolver problemas com estruturas e fluidos complexos. O desafio, porém, é coordenar os algoritmos de forma que seja possível obter uma solução confiável realizando poucas modificações do código (HOU et al., 2012).

## 6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Segundo a definição de Pegdgen et al (1991), “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com esse modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégia para a sua operação”.

É possível aplicar simulações numéricas para diferentes situações, porém na maioria dos casos recorreremos à esta ferramenta quando não é possível obter soluções analíticas para um determinado problema. Simulações também são necessárias em casos de alta complexidade ou não-linearidade.

Na indústria *offshore*, testes em modelos físicos são comuns para prever impacto das ondas na estrutura, mas também para investigar os movimentos da plataforma e as respostas relacionadas a este movimento (OLSSON et al., 2015). Porém, como testes experimentais possuem alto custo associado e geralmente os resultados obtidos não são exatos, as simulações numéricas são uma boa alternativa.

Por apresentarem confiabilidade de resultados e possibilidade de adaptabilidade dos modelos, as simulações estão ganhando um espaço cada vez maior na indústria *offshore* assim como no restante das áreas de engenharia. Este capítulo tem como objetivo revisar conceitos básicos de mecânica de fluídos utilizados como base, assim como mostrar o funcionamento das simulações e do *software* utilizado.

### 6.1 CONCEITOS DE MECÂNICA DE FLUIDOS

A mecânica dos fluidos trata do comportamento dos fluidos em repouso ou em movimento e das leis que regem este comportamento. Pode-se definir fluido como uma substância que se deforma, isto é, escoar, sob ação de uma força tangencial por menor que ela seja. (GOMES, 2012).

O estudo da mecânica dos fluídos pode ser subdividido em duas áreas principais: estática e dinâmica. Este trabalho lida apenas com dinâmica, que é a área responsável pelo movimento do ar e de outros fluídos, como a água, e com forças agindo sobre corpos em movimento relativo a estes fluídos.

São três as principais leis que descrevem os fluídos e devem ser satisfeitas para que o fluído seja descrito:

- A massa de fluido deve ser conservada;
- A taxa de variação do momento deve se igualar a soma das forças agindo sob uma partícula de fluido (Segunda Lei de Newton);
- A taxa de variação de energia deve se igualar a taxa de adição de calor e trabalho realizado sob uma partícula de fluido (Primeira Lei da Termodinâmica).

O princípio de conservação de massa estabelece que, dentro de um determinado volume de controle, a quantidade de massa de fluido que entra deve ser igual à quantidade de fluido que sai. A equação 2 mostra como é feita esta relação, sendo denominada Equação da Continuidade. Já a equação 3 é a forma simplificada da Equação da Continuidade para escoamentos incompressíveis, utilizada pelo *software* OpenFOAM.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (3)$$

onde:

$\rho$  = massa específica;

$t$  = tempo;

$u$  = velocidade do fluido.

Para obter a relação da conservação da quantidade de movimento, um conjunto de equações deve ser utilizado. Estas equações são obtidas em um referencial inercial, seguindo o mesmo procedimento adotado na obtenção das equações de conservação da massa: consideramos um volume de controle fixo no campo de velocidades de um fluido e estabelecemos uma equação integral aplicável a esse volume. A seguir obtemos a equação de conservação da quantidade de movimento na forma diferencial, utilizando o teorema de Gauss (PONTES e MANGIAVACCHI, 2013).

De acordo com a teoria, a taxa de acumulação de quantidade de movimento dentro do volume por unidade de tempo deve ser igual à soma da resultante das forças aplicadas sobre o volume de controle, sendo estas forças de superfície, de gravidade, centrífugas ou eletromagnéticas. Porém, somente as forças de gravidade serão consideradas para calcular o momento nas três direções cartesianas ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). A equação 4 mostra as relações obtidas para a Equação da Quantidade de Movimento.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho g_i - \nabla p + \nabla \cdot \tau, \quad (4)$$

onde:

$p$  = pressão;

$\tau$  = tensão de cisalhamento.

No caso de fluídos newtonianos, cuja viscosidade não varia com o tempo, substitui-se o termo  $\tau$  da Equação da Quantidade de Movimento pela sua equação constitutiva e obtém-se a Equação de Navier-Stokes (5). A equação descrita abaixo é utilizada para fluídos incompressíveis.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i + g_i, \quad (5)$$

onde:

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluído.

A Equação de Navier-Stokes, em conjunto com a Equação da Continuidade, permite calcular o campo de velocidade e pressão de um escoamento e pode ser utilizada para modular diversos fenômenos de diferentes áreas. Assim, é possível formar um conjunto de equações que pode ser resolvido com condições iniciais e de contorno apropriadas em um dado volume de controle.

### 6.1.1 Turbulência

Em mecânica dos fluídos os escoamentos podem ser divididos entre laminares e turbulentos. Esta caracterização está relacionada com o número de Reynolds, onde para altos valores encontramos escoamentos turbulentos. O número de Reynolds é um valor adimensional que representa o quociente das forças de inércia pelas forças viscosas (6). Sua principal função é definir o regime de um escoamento, sendo também utilizado como base de comportamentos reais e para modelos físicos reduzidos.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}, \quad (6)$$

onde:

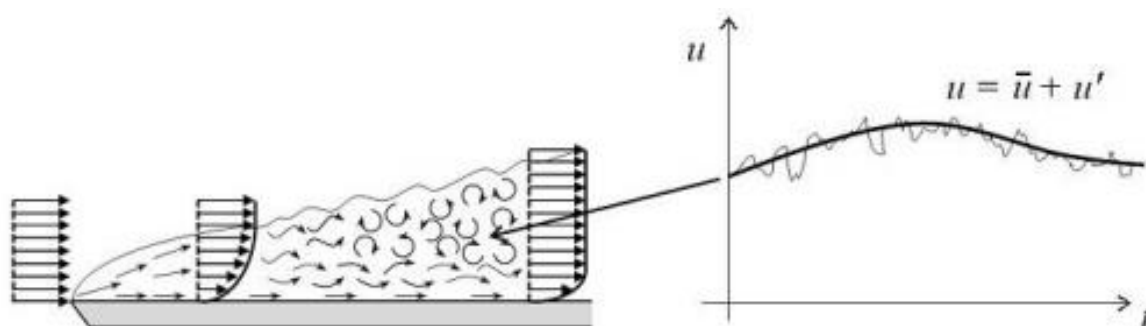
$D$  = comprimento característico do fluxo;

$\mu$  = viscosidade dinâmica.

Em casos onde há turbulência, encontramos uma variação instantânea da velocidade e da pressão, o que dificultaria a análise do fenômeno. Por esta razão é mais comum utilizar informações médias das propriedades do fluido na maioria das aplicações. Com isso, a velocidade e a pressão são decompostas em um valor médio e um valor flutuante (7). Esta relação pode ser visualizada na figura 22

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (7)$$

Figura 22 - Decomposição da velocidade pra um escoamento turbulento.



(Fonte: OLSSON, 2015)

Algumas características únicas dos escoamentos turbulentos o distinguem dos demais processos, como a intermitência. A velocidade em um determinado ponto pode parecer regular em um determinado período de tempo, porém é em seguida interrompida por períodos de brusca variação devido à turbulência. Movimento de vórtices, irregularidade, difusividade, fluxo de turbilhonamento e a dependência do tipo de escoamento também são características importantes.

### 6.1.2 Modelo RANS

O modelo RANS utiliza um conjunto de equações denominado *Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*. A velocidade do fluido é substituída pelas componentes médias e flutuantes, utilizando a equação descrita anteriormente que também pode ser utilizada para a pressão  $p$ . A relação entre os componentes  $u_i$  e  $u_j$  da velocidade, considerando a média de Reynolds, é descrita pela equação 8,

$$\overline{u_i u_j} = \overline{U_i U_j} + \overline{u'_i u'_j}. \quad (8)$$

Este conceito é então aplicado à equação da continuidade (9) e à equação de Navier-Stokes (10), tirando a média das duas equações em seguida (11) (GOTOH et al., 2013)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + F_i, \quad (10)$$

$$S_{ij} = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (11)$$

onde:

$p = P + p'$ ;

$S_{ij}$  = tensor de tensões;

$F_i$  = forças externas.

O terceiro termo à direita da equação 10 representa o momento transferido devido à turbulência. Este termo não pode ser encontrado pelo sistema de equações descrito acima, sendo necessária uma nova equação para fechar o sistema. Esta equação representa o tensor de tensões totais em um fluido e é denominado *Tensões de Reynolds* (12),

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}. \quad (12)$$

## 6.2 CONCEITOS DE CFD

A equação de Navier-Stokes é capaz de descrever diferentes fluidos, apresentando assim alta complexidade. Por este motivo soluções analíticas são extremamente difíceis de serem obtidas, justificando o uso de métodos computacionais. A dinâmica de fluidos de escoamentos complexos pode ser aproximada e calculada

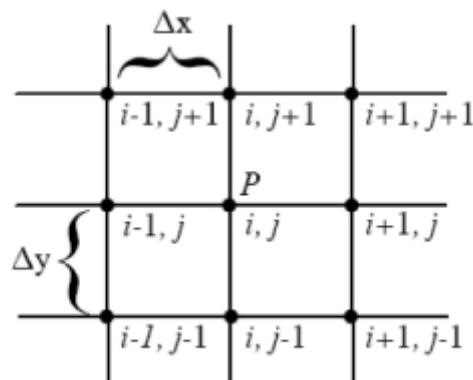
via soluções algébricas da discretização da equação de Navier-Stokes usando condições de contorno apropriadas (GOTOH et al., 2013).

Abaixo será abordada a discretização por diferenças finitas e volumes finitos, além de condições de contorno do problema e o método VOF (*Volume of Fluid*), utilizado para representar a superfície livre.

### 6.2.1 Discretização

A discretização de um domínio ocorre quando definimos pontos, ao longo de todo o domínio, onde desejamos resolver um sistema de equações (figura 23). Estes pontos conectados formam uma malha, que pode ser estruturada ou não estruturada. No presente trabalho foi utilizada uma malha estruturada, onde há uma conexão entre os pontos estabelecida por uma regra facilitando a implementação computacional.

Figura 23 - Representação de uma malha de pontos bidimensional.

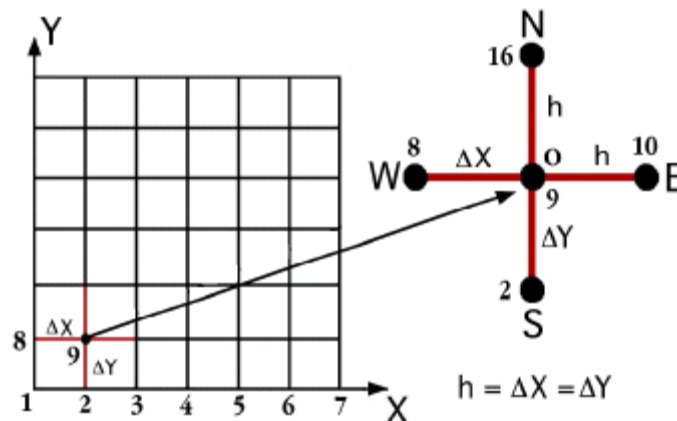


(Fonte: COSTA e RIBEIRO, 2010)

O espaçamento entre os pontos deve ser determinado de forma que seja possível captar características do escoamento que mudam rapidamente, ou seja, que possuam altos gradientes. Também é importante economizar tempo computacional em regiões que mudam lentamente e não necessitam de uma malha refinada.

O método das **diferenças finitas** substitui a equação diferencial por um conjunto de equações lineares algébricas de forma aproximada. Este é um método relativamente simples, fácil de usar e também eficaz, limitando-se a malhas estruturais somente. A figura 24 demonstra como pode ser o esquema de solução numérica. As equações são calculadas para o ponto central, depois nos pontos ao redor nas direções norte, sul, leste e oeste.

Figura 24 - Malha de diferenças finitas.



(Fonte: KRIZ, 2004)

Se  $u_{ij}$  é a componente x da velocidade no ponto  $(i,j)$ , então  $u_{i+1,j}$  pode ser expandido em série de Taylor em torno de  $(i,j)$  e os valores obtidos numericamente para toda a malha. Assim, o contínuo é tornado em discreto e a derivada de uma função qualquer,  $f(x)$ , pode ser aproximada por diferenças finitas centradas (15) (COSTA et al., 2010),

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i \cong \frac{f_{i+1} + f_{i-1}}{2\Delta x}. \quad (15)$$

Apesar do método de discretização por diferenças finitas parecer semelhante ao de **volumes finitos**, há diferenças significativas. No caso das diferenças finitas, são utilizadas as séries de Taylor para aproximar as derivadas em cada ponto da malha. Por outro lado, a aproximação discreta de uma equação de conservação pelo método dos volumes finitos tem por objetivo dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios, nos quais a lei física de conservação seja feita válida, dentro de um certo grau de aproximação (MITRE, 2008).

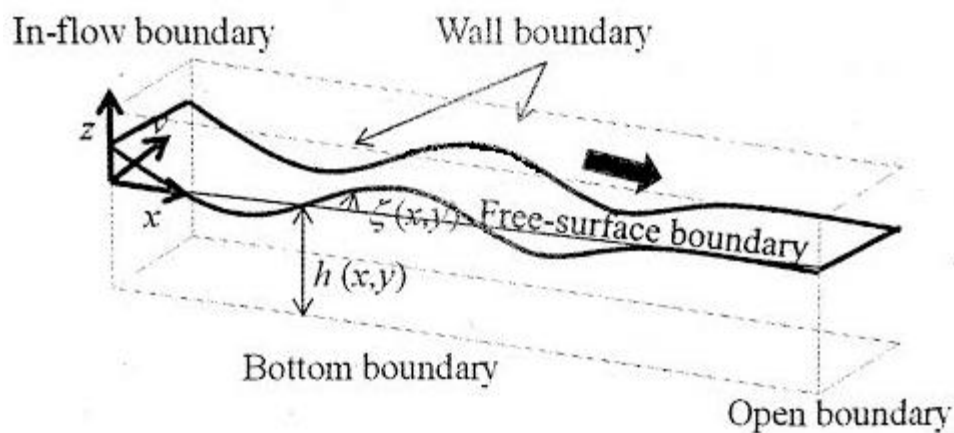
Esta abordagem possui diversas vantagens, pois assegura que a discretização é conservativa localmente e globalmente. Além disso, o MVF (método dos volumes finitos) pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso se adapta a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas (GONÇALVES, 2007).



### 6.2.2 Condições de contorno

Quando utilizamos um volume de controle, as fronteiras que delimitam o fluido tem características e propriedades específicas para o cálculo das equações governantes. As quatro principais delimitações para a maioria dos problemas são a entrada, a saída, o fundo e o topo do sistema (figura 25).

Figura 25 - Condições de contorno para um conduto com ondas.



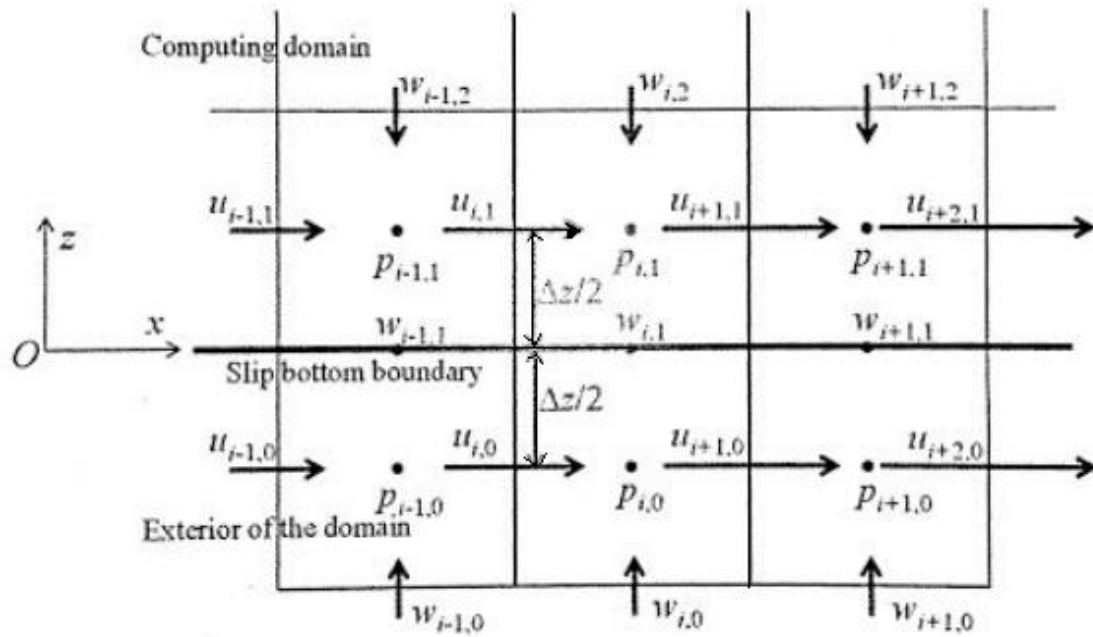
(Fonte: GOTOH, 2013)

Em casos onde existem ondas, há uma condição extra e importante de ser satisfeita, que é a condição de superfície livre. As ondas são criadas na entrada (*inflow boundary*) e atravessam a saída posicionada ao lado oposto (*open boundary/outflow boundary*). Estas zonas onde as condições de contorno são aplicadas são consideradas faces, portanto todas as células presentes nestas faces normalmente possuem as mesmas condições.

Quando a condição de parede é definida em alguma das faces, significa que esta será uma região sólida. Esta ferramenta é utilizada quando desejamos delimitar um objeto dentro do volume de controle. Também, é possível escolher entre as opções de deslizamento livre e não-deslizamento para as faces de interesse.

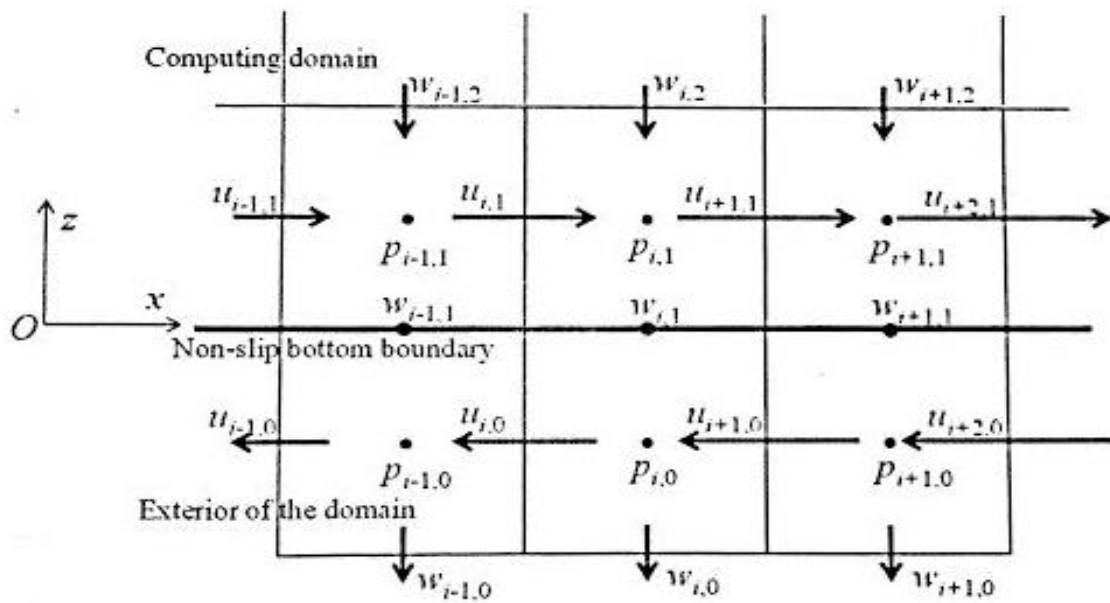
No caso de deslizamento livre, admite-se que a velocidade do fluido não se reduza nas proximidades das paredes (figura 26). Já no segundo caso, o fluido assume a mesma velocidade que a parede sólida ou o fundo e não há deslizamento (figura 27). Tanto nas paredes quanto na face de fundo a velocidade será nula ( $u = 0$ ), ou seja, estas faces são impermeáveis.

Figura 26 - Condição de deslizamento livre em uma face.



(Fonte: GOTOH, 2013)

Figura 27 - Condição de não-deslizamento em uma face

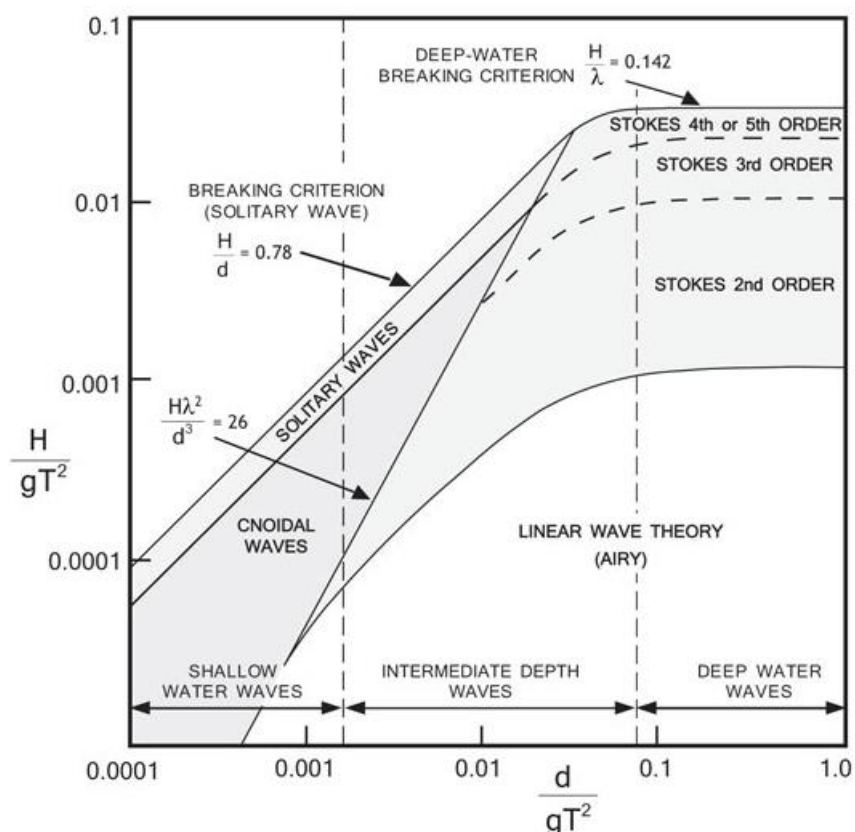


(Fonte: GOTOH, 2013)

No caso da entrada do domínio, onde são geradas as ondas, há duas opções disponíveis quanto a condições de contorno. Podem-se assumir ondas incidentes arbitrárias utilizando as teorias de ondas disponíveis, ou como alternativa, pode-se incorporar um remo oscilatório e impermeável como gerador de ondas em pontos específicos da face. O segundo método tem a desvantagem de demandar a transformação do domínio em conjunto com o remo oscilatório.

As ondas que serão formadas na entrada do domínio precisam ser definidas quanto a suas propriedades e, também, quanto à teoria de onda que será utilizada. A teoria escolhida deverá respeitar condições descritas pela figura 28. A altura da onda ( $H$ ), a profundidade da água ( $d$ ) e o período da onda ( $T$ ) são as variáveis utilizadas para definir qual a teoria que melhor descreve este fenômeno.

Figura 28 - Teorias de onda.



(Fonte: LE MÉHAUTÉ, 1976)

Para ondas pequenas em águas profundas, com uma amplitude muito menor do que o comprimento, a teoria de Airy é utilizada. Quando as ondas se aproximam da costa passam a ter amplitudes maiores, sendo necessária uma nova teoria. Nestes

casos, usa-se a teoria de Stokes. Já em águas rasas, quando as ondas adquirem formato não-linear e maiores tamanhos, a teoria Cnoidal é mais apropriada.

A condição da saída do domínio deve ser aberta, de forma que as ondas possam atravessá-la. A condição mais simples utilizada neste caso é a de gradiente de velocidade nulo (16). Esta é uma das condições mais utilizadas em simulações, ainda que não sejam obtidos resultados exatos.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (16)$$

Condições multidimensionais ou radiais surgiram para serem aplicadas à face de saída e fornecerem resultados mais exatos. Também há a possibilidade de criar uma camada esponja para atenuar a velocidade e a energia das ondas com a aproximação destas, diminuindo assim o fenômeno de reflexão. Para isso, é necessário criar um domínio adicional para impor esta camada esponja .

### 6.2.3 Método VOF

Diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos com o objetivo de definir e caracterizar a interface entre dois fluidos, como o método de segmento linear, *particle tracking method* e o método VOF. O *software OpenFOAM*, que foi utilizado neste trabalho, utiliza o método VOF para representar escoamentos multifásicos por ser mais efetivo, em relação ao segmento linear, e apresentar um custo computacional menor, em relação ao *particle tracking method*.

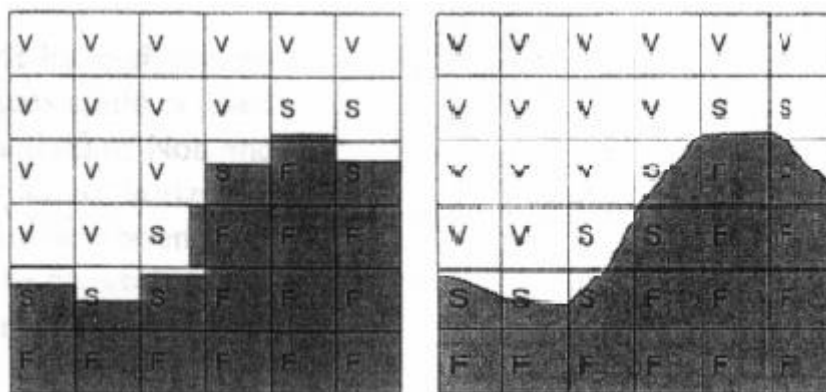
A ideia principal no método VOF é representar dois fluidos diferentes em um mesmo domínio, sendo que para este trabalho os dois fluidos são a água e o ar. Assim, uma função  $F$  é adotada, cujo valor  $F = 1$  representa uma célula ocupada por água e  $F = 0$  ocupada por ar. Um valor intermediário de  $F$  representa a fração de volume da célula ocupada por água.

Um volume de fluido pode ser descrito através da forma Lagrangiana combinada com a equação da continuidade (17). Esta equação representa o transporte de  $F$ , que distingue diferentes fluidos, pelas velocidades locais, podendo ser utilizada em todo o domínio,

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} + \frac{\partial Fw}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Para calcular os termos de advecção da equação acima, o método de doador-receptor é utilizado (figura 29). Este método assume que a quantidade máxima de advecção se encontra no volume contido nas células doadoras e utiliza a relação entre a orientação da superfície livre e a direção do fluxo da função VOF através da face da célula. Essa abordagem é necessária para evitar valores menores do que 0 ou maiores do que 1 nas células de fluido.

Figura 29 - Esquema doador-receptor e superfície livre original.



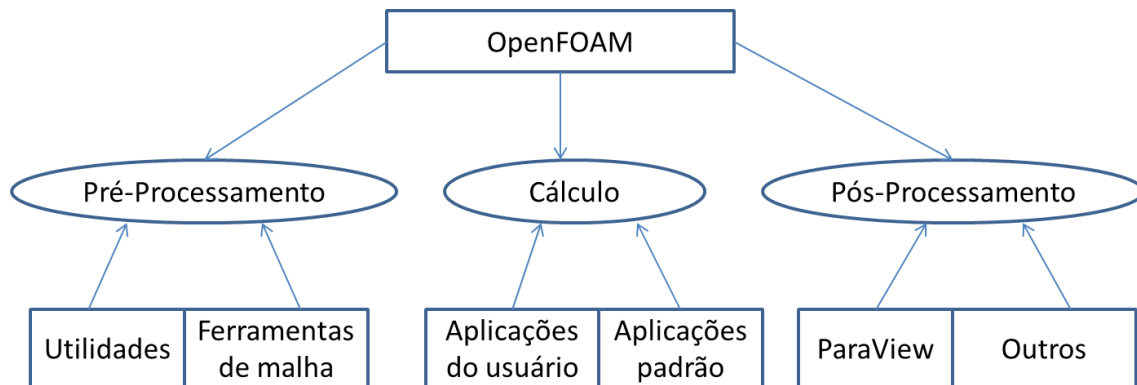
(Fonte: BAKKER, 2002)

### 6.3 OpenFOAM

O *OpenFOAM* é um *software* livre escrito na linguagem C++ que surgiu com o objetivo de criar executáveis, também conhecidos como aplicações, para resolver problemas de mecânica dos fluidos. Estas aplicações podem ser divididas em duas categorias: *solvers*, que são designados a resolver um problema específico de mecânica contínua, ou *utilities*, que realizam tarefas que envolvem a manipulação de dados (GREENSHIELDS, 2015).

Junto com o *software* são disponibilizados tutoriais contendo diferentes tipos de problemas, que podem ser alterados por usuários com conhecimentos de física e programação. Por permitir alterações e ser um *software* flexível, o OpenFOAM é uma importante ferramenta de CFD. A figura 30 ilustra a estrutura utilizada pelo programa.

Figura 30 - Estrutura do OpenFOAM.



(Fonte: Adaptado de GREENSHIELDS, 2015)

As opções de *solvers* disponibilizadas pelo programa abrangem diferentes casos, como fluidos incompressíveis, fluidos compressíveis, fluidos multifásicos, simulações numéricas diretas (DNS), transferência de calor, dinâmica molecular e eletromagnética. Todos estes *solvers* são de fácil acesso e modificação.

As utilidades (utilities) também podem ser facilmente encontradas, sendo essenciais durante as etapas de simulação. Elas estão associadas ao pré-processamento, geração de malha, conversão de malha, manipulação de malha, conversores de dados, análise de turbulência, processamento em paralelo, entre outras utilidades de pós-processamento.

Após a etapa de pré-processamento, onde o usuário define a malha e as utilidades adequadas, é necessário definir qual *solver* será utilizado e, caso o *solver* desejado não seja fornecido, criar seu próprio código. A etapa final é a de pós-processamento, onde é feita a manipulação e visualização dos resultados encontrados. O *OpenFOAM* fornece um módulo leitor denominado *paraFoam* que utiliza o *ParaView*, uma aplicação de visualização com código aberto.

Como principais vantagens, o *OpenFOAM* apresenta uma sintaxe de fácil entendimento, diversas aplicações e modelos prontos para uso, suporte e treinamentos oferecidos pelos desenvolvedores e possui licença gratuita. Como desvantagem se cita somente a falta de uma interface gráfica integrada.

#### 6.4 IHFoam

O *IHFoam* é um *solver* para escoamentos bifásicos baseado no *interFoam*, que é disponibilizado pelo *OpenFOAM*. Ele foi desenvolvido dentro do Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria, na Universidade de Cantabria. A diferença do *IHFoam* é a sua capacidade de geração e absorção de ondas, alcançada com condições de contorno apropriadas para o domínio. É possível gerar ondas 3D com esta ferramenta e simular diferentes tipos de ondas, tanto regulares como irregulares.

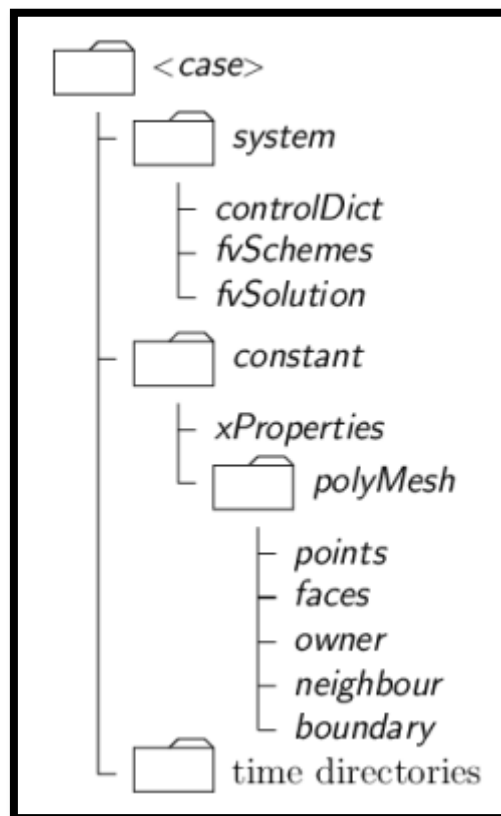
A absorção e a geração de ondas são programadas para trabalharem simultaneamente, o que não eleva o custo computacional significativamente visto que não há, necessariamente, a extensão do domínio, já que estes fenômenos ocorrem nas zonas de relaxamento. O *IHFoam* pode ser utilizado tanto para estruturas fixas quanto para estruturas dinâmicas, com domínios que alcançam escalas reais ou de laboratório.

Equações tridimensionais de RANS para dois fluidos incompressíveis são resolvidas com o método VOF. Com isso é possível representar superfícies livres complexas, sendo esta a principal vantagem. A desvantagem associada, porém, é a baixa confiabilidade de resultados onde há altas tensões superficiais. Na engenharia lidamos com ondas de altos comprimentos na maioria dos casos, fazendo com que seja possível desprezar as forças de tensão superficial.

## 7 METODOLOGIA NUMÉRICA

Todas as simulações numéricas realizadas pelo software *OpenFOAM* utilizam três pastas denominadas *time directories*, *constant* e *system* (figura 31). Cada uma destas pastas contém arquivos com diferentes informações que são necessárias durante as etapas de simulação.

Figura 31 - Estrutura de uma simulação utilizando *OpenFOAM*.



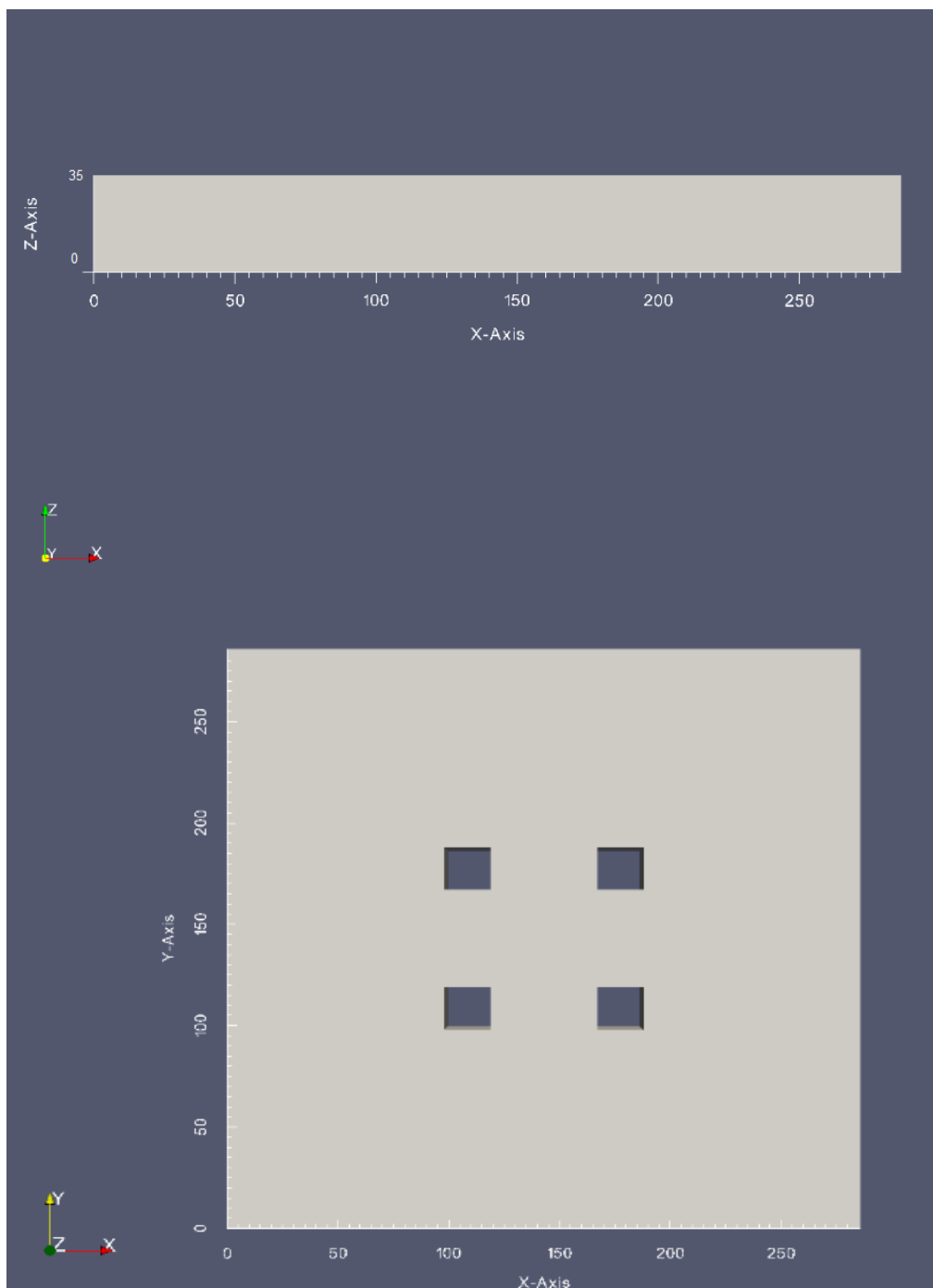
(Fonte: GREENSHIELDS, 2015)

Primeiramente, define-se a geometria e a malha que serão utilizadas com o arquivo denominado *blockMeshDict*, localizado dentro da pasta *polyMesh*. São definidos todos os pontos, faces e blocos necessários para definir o domínio e os pilares de sustentação, assim como os *patches*, que são regiões do domínio com mesmas características. Estes *patches* foram divididos em entrada, saída, fundo, atmosfera e



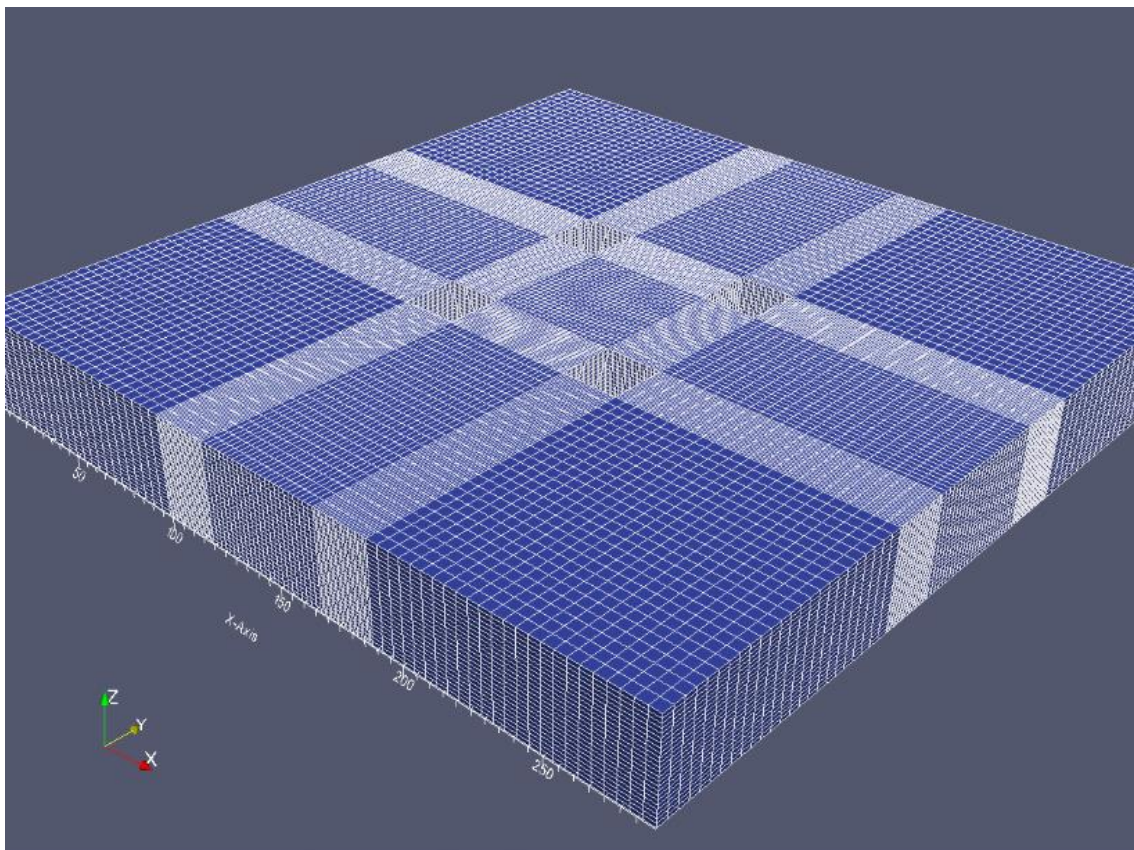
obstáculos. Já a malha foi definida de forma que a região ao entorno dos pilares fosse mais refinada, disponibilizando, assim, um maior número de pontos para representar as ondas e o impacto provocado por estas (figuras 32 e 33).

Figura 32 - Domínio utilizado na simulação.



(Fonte: elaborado pela autora)

Figura 33 - Malha utilizada na simulação.



(Fonte: elaborado pela autora)

Os pilares utilizados nas estas simulações (figura 32) são fixos e, portanto, não se movimentam com as ondas. As dimensões da base dos pilares são 21 m x 21 m, fornecendo uma área total de 441 m<sup>2</sup>. A altura é de 35 m, sendo o nível de água localizado em  $z = 20$  m. Como mostra a figura 33, a malha não é uniforme, havendo uma maior distribuição de pontos nas regiões mais fortemente influenciadas pelas ondas.

As propriedades das ondas se encontram no arquivo *IHWavesDict*, fornecido pelo *IHFoam*. Nele, é possível definir a teoria de onda utilizada, o período, a altura e a fase da onda. Neste trabalho, foram simuladas três situações que são representadas por diferentes características de onda. A tabela 1 mostra os parâmetros utilizados para cada caso.

Tabela 1 – Diferentes situações simuladas.

Caso	Teoria de onda	Amplitude (m)	Período (s)
1	StokesV	3	6
2	StokesII	1,5	8
3	StokesI	1	10

As situações foram definidas tendo como base os dados fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Considerando que as maiores ondas oceânicas do Rio de Janeiro acontecem nos meses de abril, maio e junho em decorrência dos ciclones extratropicais, foi feita uma análise dos valores de altura de ondas e dos períodos de ondas mais frequentes.

Conclui-se que em condições de calmaria, as ondas teriam uma amplitude média de 1 m e período de 10 s. Ondas um pouco maiores, com amplitude de 1,5 m e período de 8 s também se formam frequentemente. Já para uma situação extrema adotou-se uma amplitude e período ainda maiores, que formam uma série de ondas pouco encontrada no Brasil.

Ainda na pasta *constant*, é definido o modelo de turbulência que o software utiliza durante a simulação com o arquivo *RASProperties*. Para todas as situações o modelo *KOmegaSST* foi utilizado. Este modelo combina o transporte de tensão de cisalhamento (SST) com a formulação  $k-\omega$ , sendo muito utilizado por gerar bons resultados em situações de gradientes de pressão adversos e separação de escoamentos. Outra principal vantagem é sua capacidade de representar fenômenos tanto ao redor de objetos quanto em regiões afastadas do domínio.

As variáveis de tempo são definidas no arquivo *controlDict*, assim como as demais variáveis que são calculadas em cada passo de tempo da simulação. O tempo de cada simulação foi um total de 180 segundos com um intervalo de tempo de 0,001 segundos. Como a força exercida sobre os pilares é o principal foco deste trabalho, foram definidos comandos encarregados de integrar o campo de pressões ao longo de todas as superfícies de cada pilar de sustentação fornecendo, assim, a força de pressão. Esta metodologia também fornece os valores de forças viscosas e porosas, porém neste caso as forças porosas serão nulas e as forças viscosas assumem valores desprezíveis quando comparados aos de pressão.

Em *system*, cria-se o bloco de água, onde são formadas as ondas. O nível de água foi considerado como 20 metros, fornecendo um volume total de água de  $1.635.920 \text{ m}^3$ . As dimensões de comprimento e largura foram mantidas como as mesmas do domínio (286 m x 286 m). Também é possível escolher *solvers*, que são utilizados para cálculos de variáveis como pressão e velocidade, tolerâncias e algoritmos de controle no arquivo *fvSolution*.

O algoritmo PIMPLE (*pressure-implicit method for pressure-linked equations*), que é a união dos algoritmos PISO (*pressure-implicit split-operator*) e SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*), foi utilizado. Com isso, em situações de escoamento transiente o algoritmo PISO será utilizado, por fornecer resultados mais confiáveis. Este algoritmo avalia uma solução inicial e a corrige mais de uma vez, sendo o número de correções entre 1 e 4. Já em situações de escoamento estável o método é automaticamente alterado para SIMPLE, que fornece somente uma correção.

As variáveis principais são as constantes  $k$  e  $\omega$ , velocidade, pressão e *alpha.water*, que representa as regiões com água, ar e a zona de transição. Os valores iniciais são encontrados na pasta *0*, representando  $t = 0$ . Para cada *patch*, ou região do domínio, as variáveis são definidas separadamente. Após esta etapa, o arquivo *runCase* é executado com a janela de comandos e a simulação se inicia.

## 8 ANÁLISE E DISCUSSÃO

As variáveis avaliadas neste trabalho foram as forças, os campos de velocidade e, por fim, os campos de vorticidade. Tanto a força quanto os campos de velocidade foram obtidas diretamente pelo *software OpenFOAM*. Já os campos de vorticidade foram calculados pelo comando *vorticity* do *OpenFOAM*. Tanto os campos de velocidades quanto os de vorticidade podem ser visualizados utilizando o programa *ParaView*. Este capítulo aborda os resultados obtidos, assim como a interpretação dos mesmos.

### 8.1 FORÇAS

Foram gerados dados de forças para todos os pilares em conjunto, para somente um dos pilares a montante, à esquerda do domínio, e para somente um dos pilares a jusante, à direita do domínio. As posições dos pilares são importantes para analisar a diferença da influência das ondas em função da distância entre eles visto que, além de uma defasagem no tempo, a intensidade da força aplicada pode variar.

A força viscosa não foi analisada por apresentar valores extremamente baixos, na ordem de  $10^4$  vezes menor do que a força de pressão, sendo a força de pressão a única discutida durante este trabalho. Como as situações definidas com base nos dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (tabela 1) não apresentam períodos e amplitudes comuns entre nenhum dos casos, dois novos casos foram simulados, 2A e o 3A, (tabela 2) mantendo o período de onda constante. O caso 1 não sofreu alterações, pois já possuía um período igual a 6 segundos, o qual foi utilizado para os novos casos.

Tabela 2 – Quadro de situações simuladas

Caso	Teoria de onda	Amplitude (m)	Tempo (s)
1	StokesV	3	6
2	StokesII	1,5	8
3	StokesI	1	10
2A	StokesII	1,5	6
3A	StokesII	1	6

Com isso, foi possível realizar comparações de força de pressão para situações de mesma amplitude ou mesmo período. As figuras 34 e 35 mostram o módulo do vetor resultante da força de pressão nos pilares a montante e a jusante para uma

amplitude de 1,5 m e diferentes períodos. Já as figuras 36 e 37 mostram os resultados obtidos para uma amplitude de 1 m e diferentes períodos.

Figura 34 - Módulo da força resultante no pilar a montante para os Casos 2 e 2A.

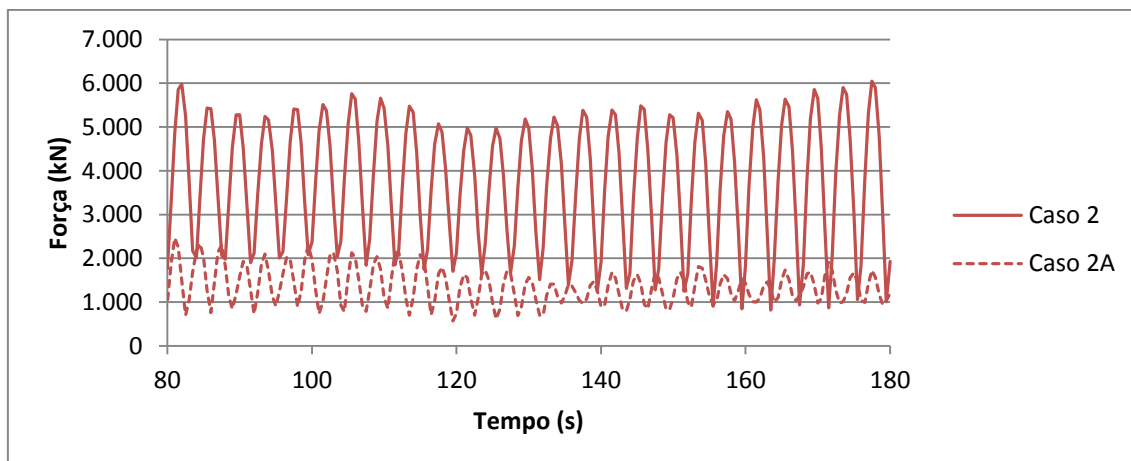


Figura 35 - Módulo da força resultante no pilar a jusante para os Casos 2 e 2A.

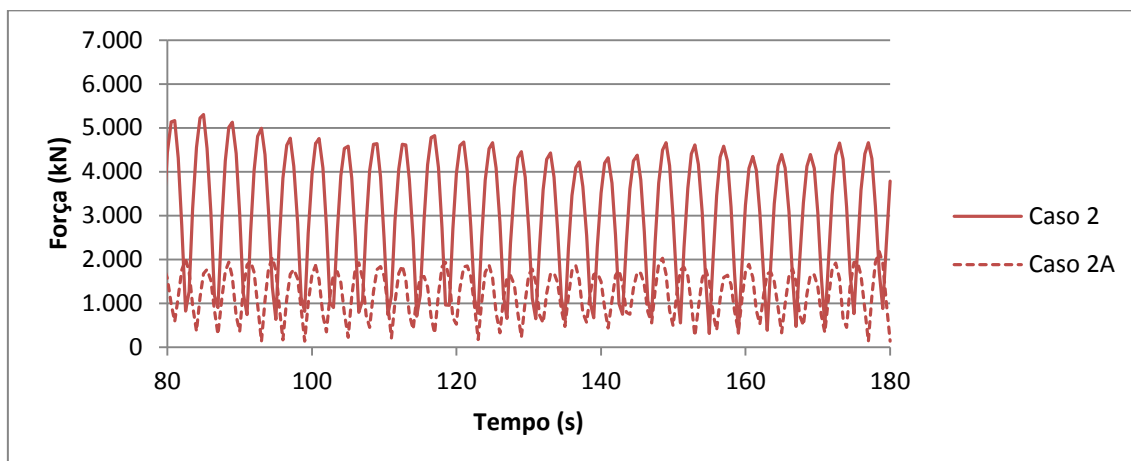


Figura 36 - Módulo da força resultante no pilara montante para os Casos 3 e 3A.

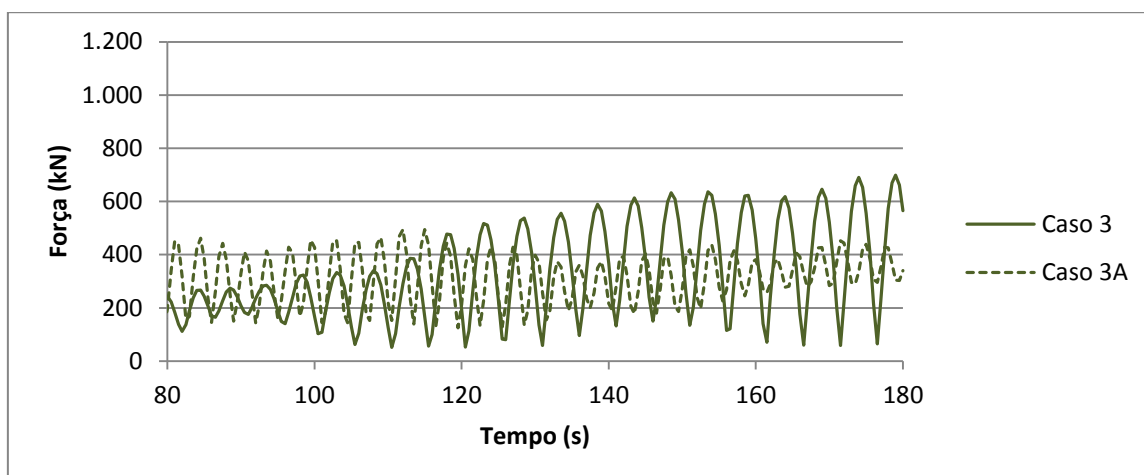
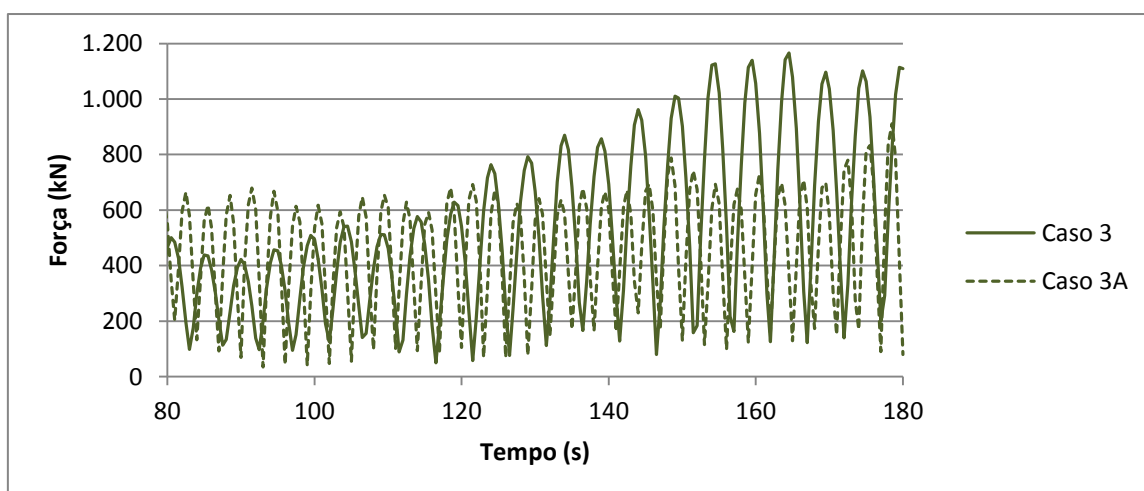


Figura 37 - Módulo da força resultante no pilar a jusante para os Casos 3 e 3A.



No caso da onda intermediária, com amplitude de 1,5 m, houve uma diminuição do módulo da força com a redução do período tanto para o pilar a montante (figura 34) quanto para o pilar a jusante (figura 35). O mesmo padrão se repete para os pilares a montante e a jusante da onda de amplitude 1 m (figuras 36 e 37). A comparação entre os resultados das forças tende a apontar que a força está diretamente relacionada com o período. Entretanto, para ambos os pilares, a força no Caso 3 ainda não se estabilizou, não podendo ser feitas análises comparativas mais apuradas entre estas forças.

Para entender melhor as componentes da força, os mesmo gráficos foram gerados, desta vez para as forças  $F_x$  e  $F_y$ . Estas são, respectivamente, as componentes horizontais transversais e horizontais longitudinais. Considerando a força na direção  $x$  ( $F_x$ ), ambos os Casos 2 e 2A mantiveram um comportamento regular, porém os valores encontrados diminuíram com a redução do período (figuras 38 e 39). Isto pode ser verificado para os dois pilares analisados, sendo que o pilar a montante continuou sendo submetido a maiores forças hidrodinâmicas horizontais. Já os casos 3 e 3A apresentaram comportamentos distintos quando comparados à situação anterior (figuras 40 e 41).

Não houve uma estabilização dos valores da força sobre o pilar a jusante do domínio nos casos 3 e 3A, ainda que as forças encontradas para o pilar a montante apresentem um comportamento semelhante ao obtido para ondas de maiores amplitudes. Pode se verificar um aumento da força com o tempo para o pilar a jusante, o que demonstra que a simulação não convergiu neste tempo para todas as componentes da força.

Considerando a força na direção  $y$  ( $F_y$ ) (figuras 42, 43, 44 e 45), os Casos 2 e 2A novamente apresentaram uma redução da força com a diminuição do período na direção  $y$  (figuras 42). Entretanto, este comportamento é verificado somente para o pilar a montante. A jusante há um aumento da força no início dos dados analisados com uma queda dos valores em seguida e um ressurgimento do aumento no final da simulação para o Caso 2 (figura 43). Nos gráficos é notável a regularização das ondas que passam pelos pilares da frente, reduzindo os seus efeitos para o pilar de trás. Nos Casos 3 e 3A, a não estabilização da simulação fica ainda mais evidente (figuras 44 e 45), o que pode ser um indício de que o tempo total simulado não foi suficiente para a simulação convergir, que a malha não está refinada o suficiente para este caso ou, ainda, que o método RANS não é eficiente para este caso.



Figura 38 - Força na direção x para o pilar a montante para os Casos 2 e 2A.

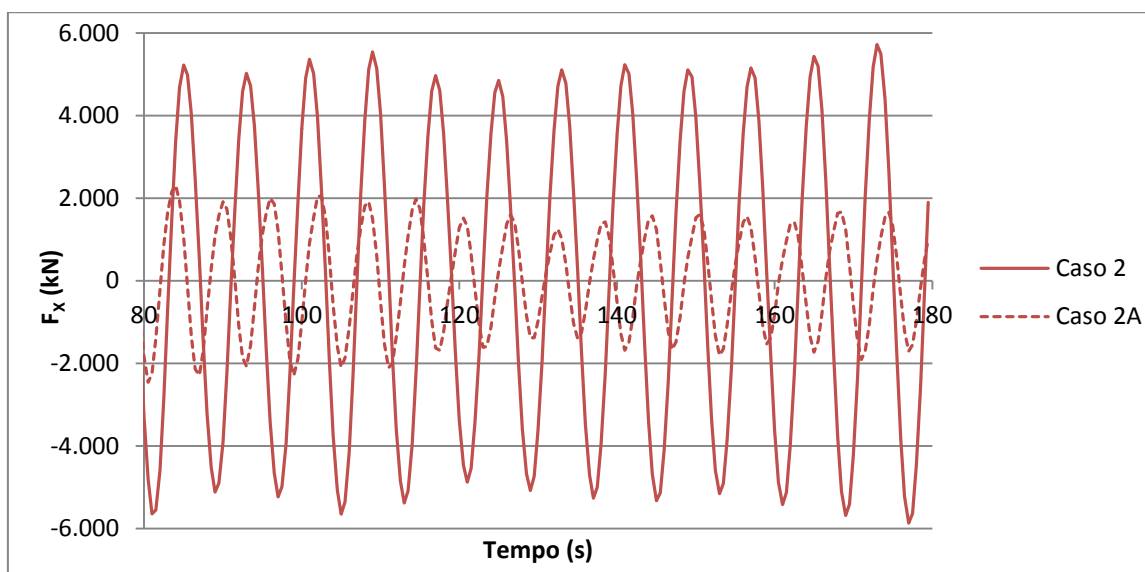


Figura 39 - Força na direção x para o pilar a jusante para os Casos 2 e 2A.

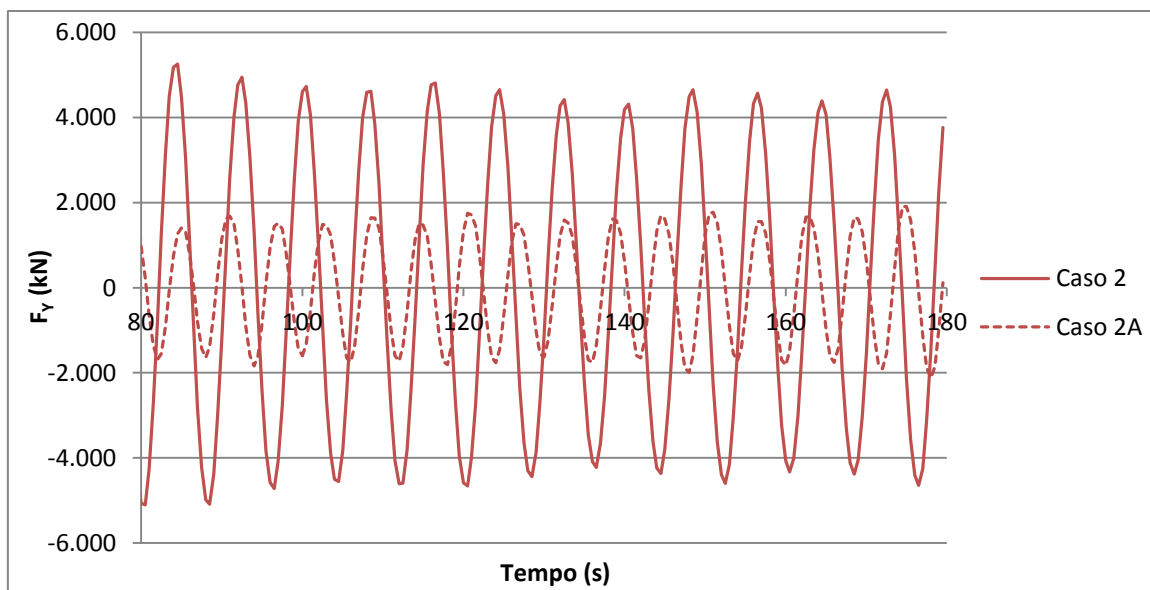


Figura 40 - Força na direção x para o pilar a montante para os Casos 3 e 3A.

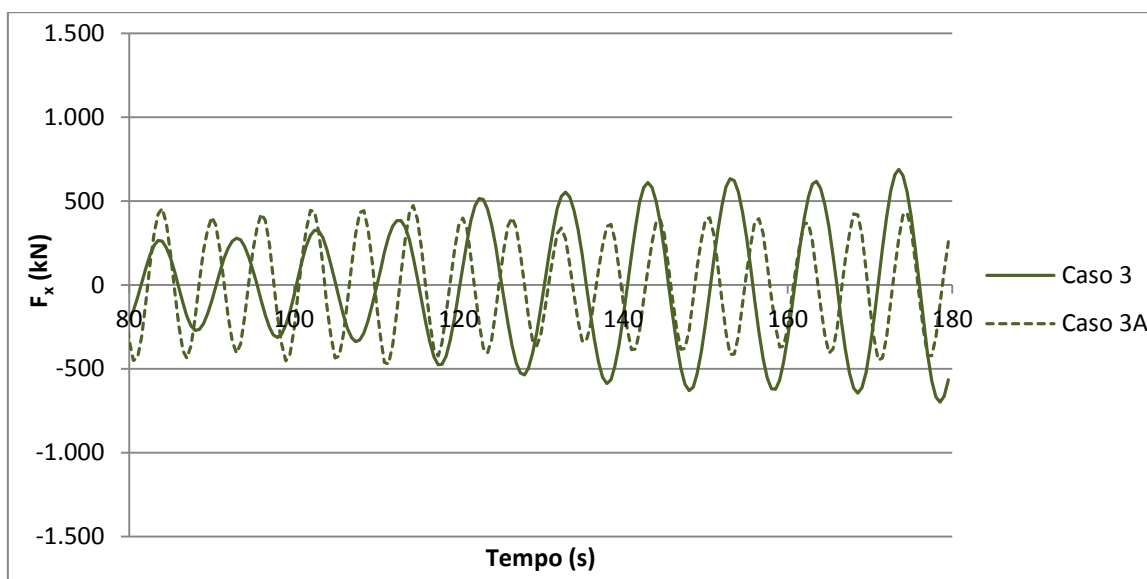


Figura 41 - Força na direção x para o pilar a jusante para os Casos 3 e 3A.

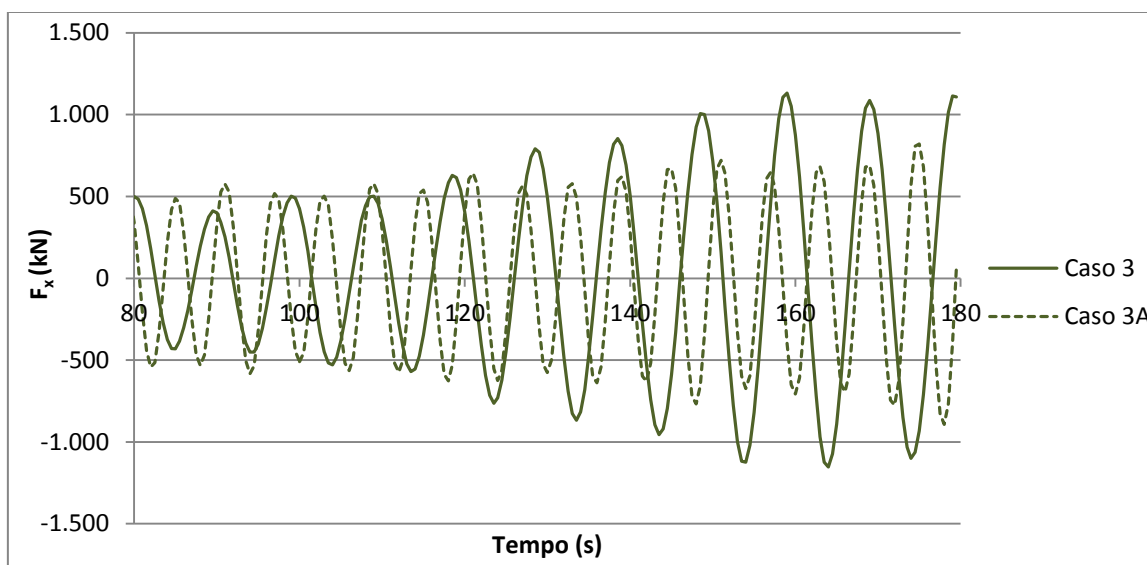


Figura 42 - Força na direção y para o pilar a montante para os Casos 2 e 2A.

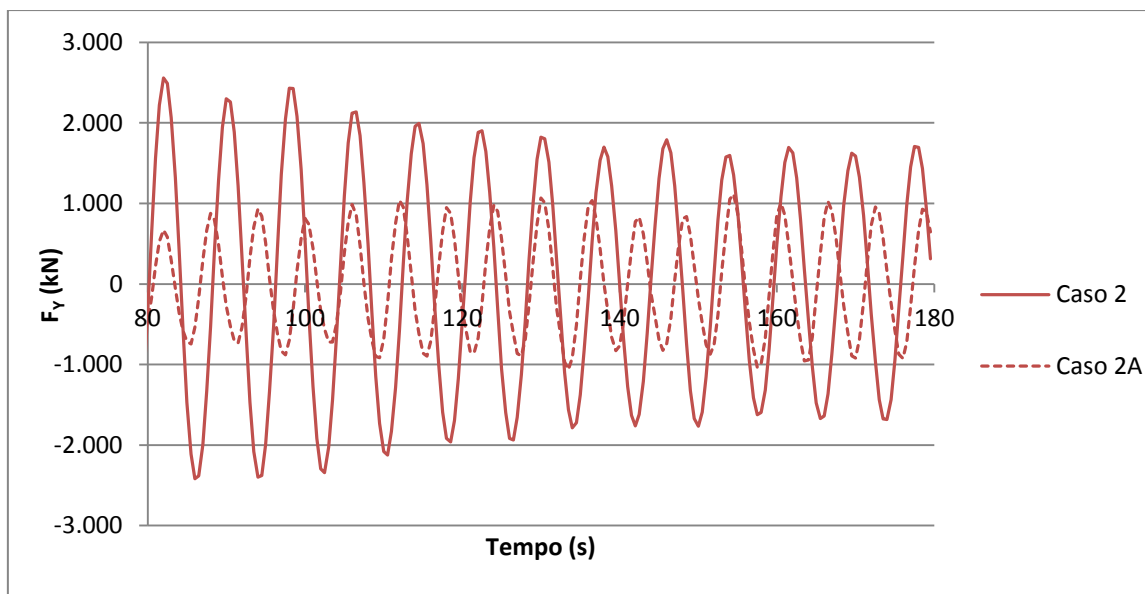


Figura 43 - Força na direção y para o pilar a jusante para os Casos 2 e 2A.

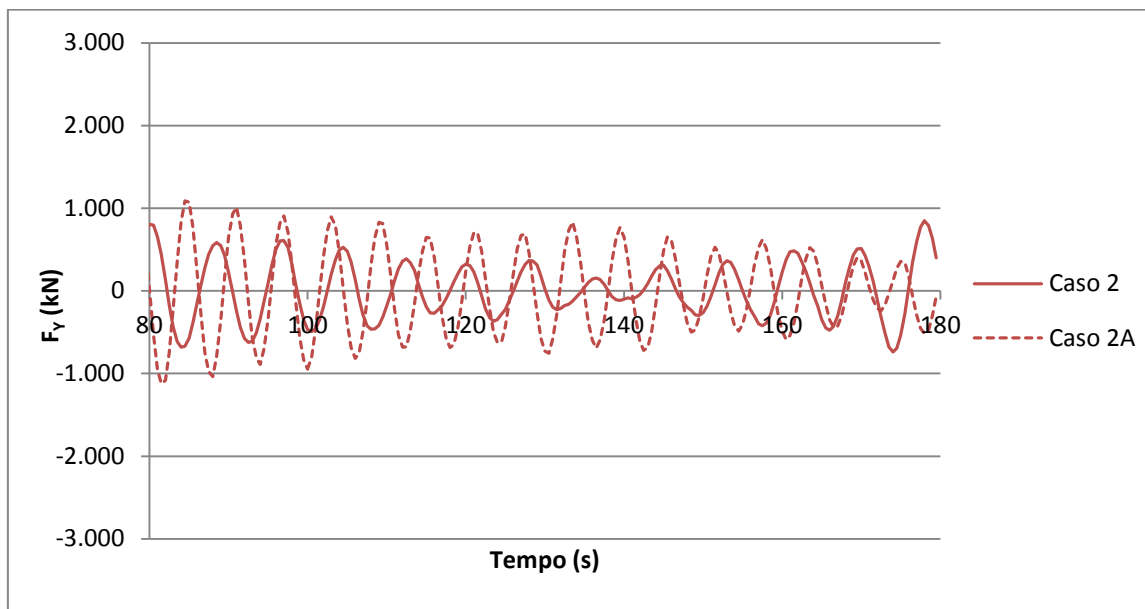


Figura 44 - Força na direção y para o pilar a montante para os Casos 3 e 3A.

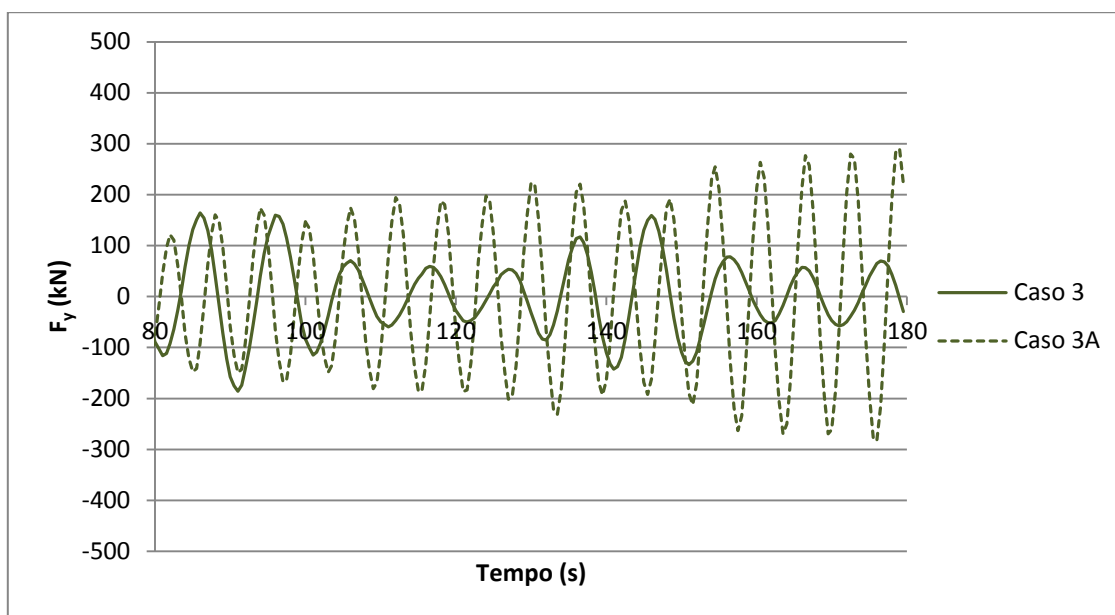
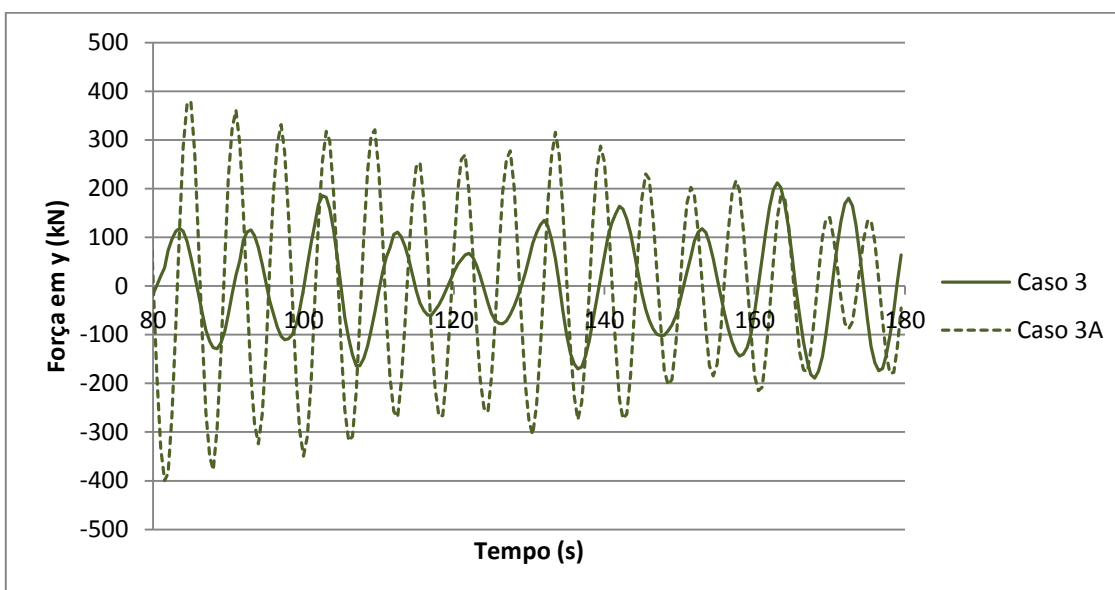


Figura 45 - Força na direção y para o pilar a jusante para os Casos 3 e 3A.



A próxima comparação envolveu ondas de mesmo período e amplitudes diferentes, que foram os casos 1, 2A e 3A. O procedimento de análise foi semelhante, sendo as variáveis  $F$ ,  $F_x$  e  $F_y$  novamente analisadas. As figuras 46 e 47 mostram o módulo da força para os pilares na Posição 1 e 2, enquanto as figuras 48, 49, 50 e 51 mostram as componentes em x e em y para ambos os pilares.

Uma característica que se torna bastante visível em todos os gráficos (figuras 46, 47, 48, 49, 50 e 51) é a frequência semelhante nos três casos, além de um comportamento padrão em que as maiores ondas apresentam maiores valores de força associados. De uma forma geral, mantendo o período constante obtemos gráficos com comportamentos regulares e um aumento da força com o aumento da amplitude.

Em relação ao módulo da força aplicada sobre o pilar a montante (figura 46), há uma diminuição da força com o tempo para os três casos, sendo mais evidente para as ondas de maior amplitude, onde há uma redução de aproximadamente 50%. Ou seja, há um pico de força seguido pela queda da mesma e depois um intervalo de tempo sem reduções efetivas dos valores extremos, evidenciando a estabilização da simulação. No pilar a jusante (figura 47) os valores variam de forma similar para os três casos, o que indica a regularização dos efeitos das ondas mais uma vez. Isto acontece em decorrência da influência do pilar a montante e da interação entre os pilares. É notável que a redução da força em relação aos pilares ocorre dependendo da altura da onda. Para a altura maior, houve uma maior redução da força, quanto que para a menor onda não ocorreu esta redução.

A força na direção  $x$  apresenta um comportamento similar ao módulo da força em ambos os pilares (figuras 48 e 49). Porém, na direção  $y$ , o pilar a montante (figura 50) mostra menos variações com o tempo, enquanto à jusante (figura 51) vemos uma queda de 50% na força para o caso 1 e menos visível para os casos 2A e 3A. Isto significa que não necessariamente a força aplicada sobre os pilares mostrará um comportamento idêntico em ambas suas componentes  $x$  e  $y$ .

Figura 46 - Módulo da força no pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.

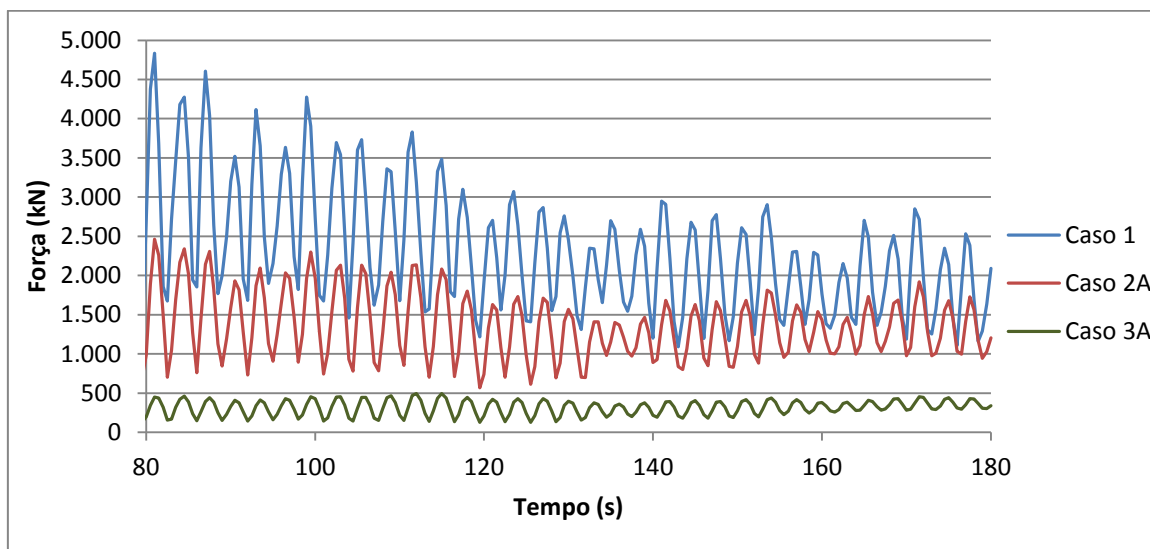


Figura 47 - Módulo da força no pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.

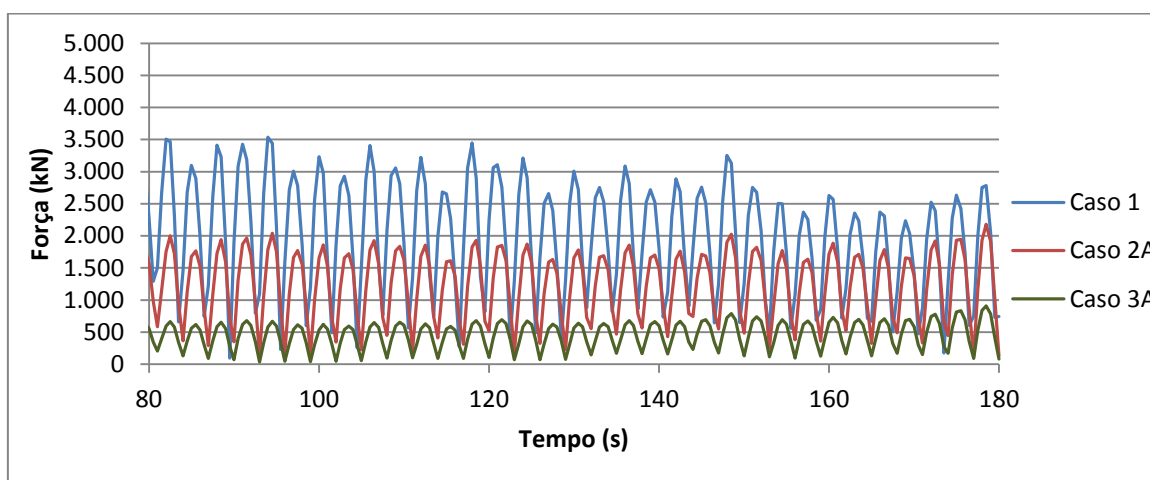


Figura 48 - Força na direção x para o pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.

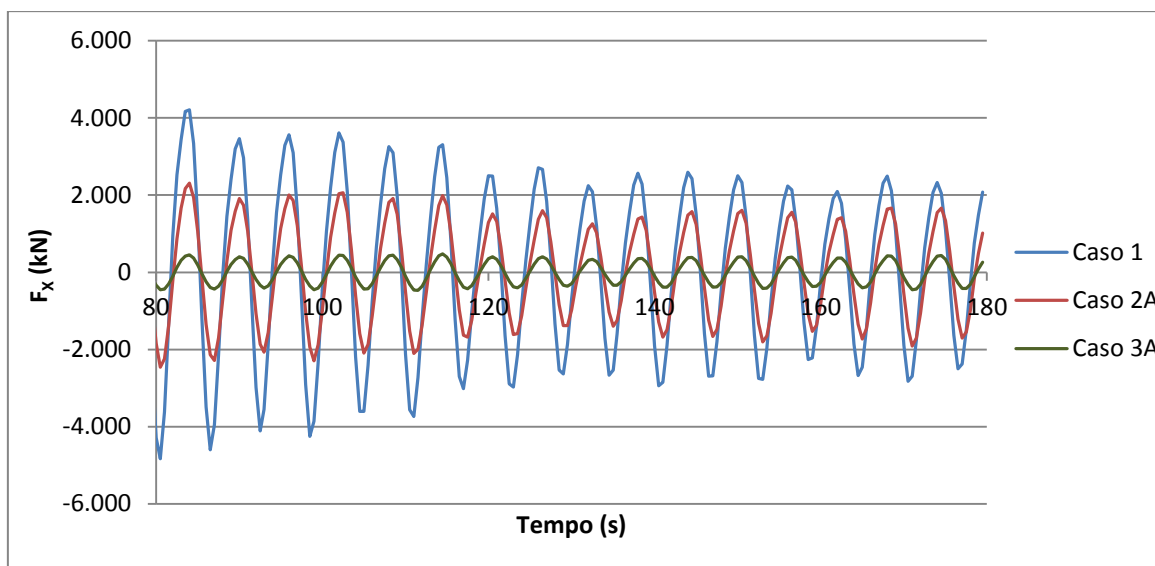


Figura 49 - Força na direção x para o pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.

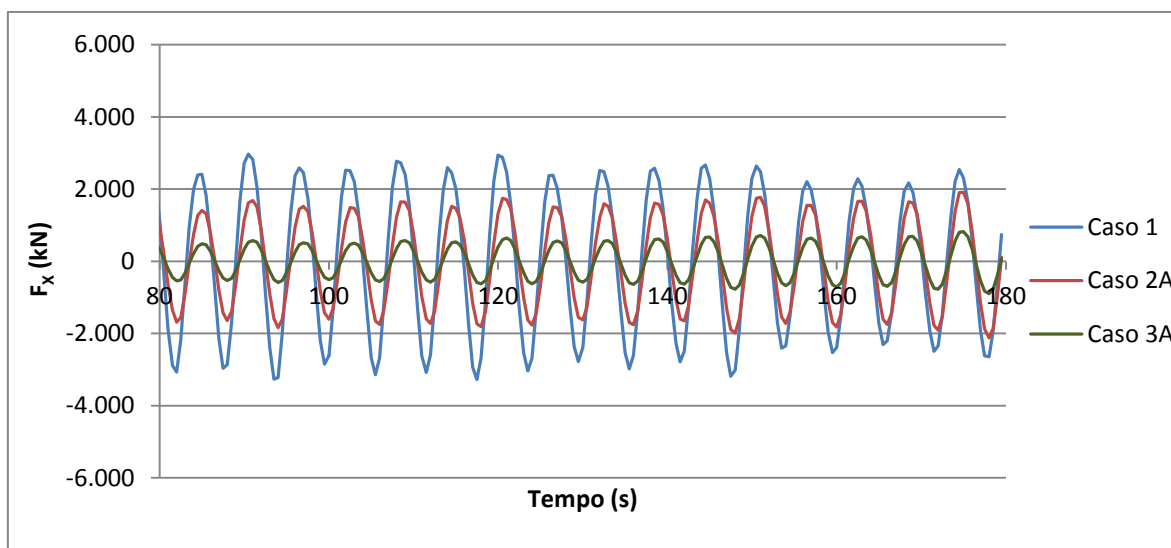


Figura 50 - Força na direção y para o pilar a montante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.

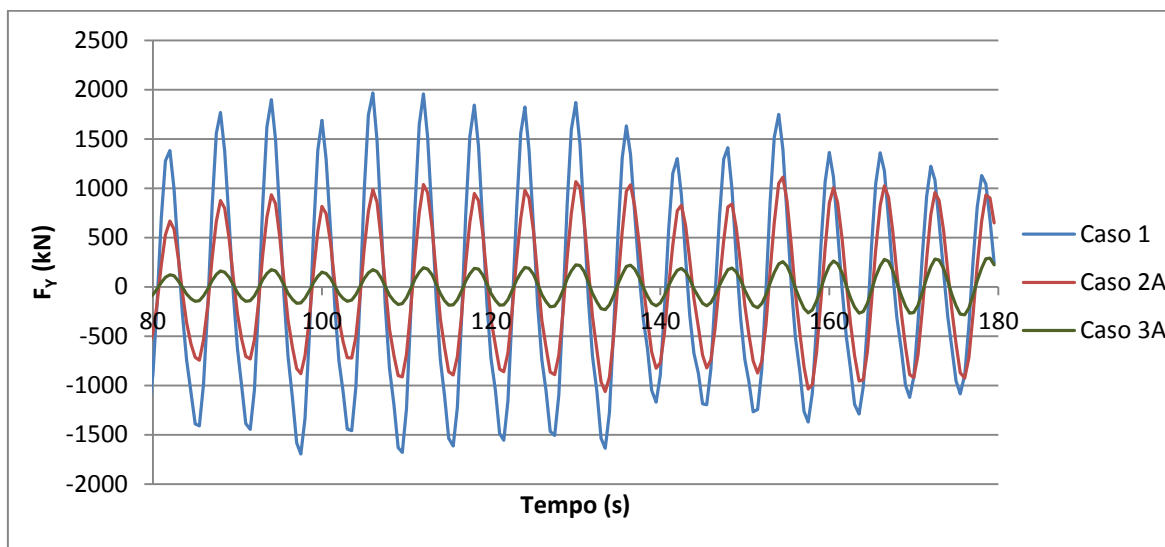
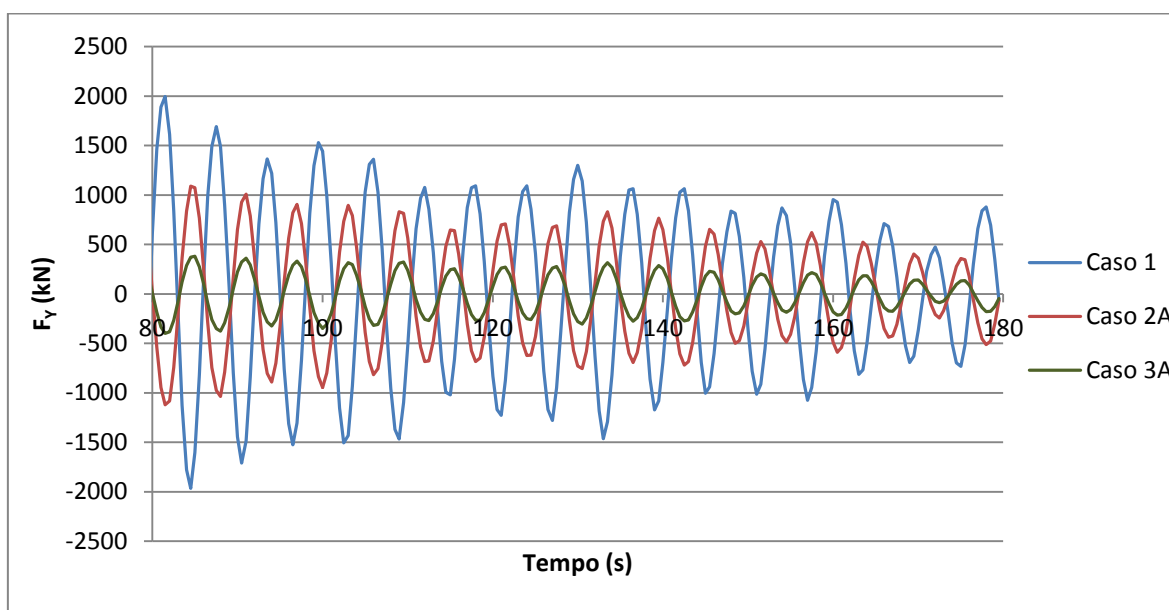


Figura 51 - Força na direção y para o pilar a jusante considerando um período de 6 segundos e diferentes amplitudes.



Por fim, foram comparadas as ondas comumente encontradas na região está a plataforma semissubmersível P-55. A etapa final da análise das forças consistiu em criar gráficos contendo as forças encontradas para os casos 1, 2 e 3, incluindo não



somente o módulo da força como também as componentes horizontais e verticais. Os gráficos obtidos se encontram nas figuras 52, 53, 54, 55 e 56.

Em decorrência das diferenças entre amplitudes e períodos, poucas semelhanças podem ser encontradas nos gráficos. Uma observação importante, porém, é de que maiores amplitudes não necessariamente acarretam em um pior cenário. Menores amplitudes com maiores períodos podem exercer maior influência sobre os pilares de uma plataforma, como mostram os gráficos do módulo de força para os pilares a montante e a jusante (figuras 52 e 53). A tabela 3 apresenta os maiores valores do módulo de força encontrados para cada caso, assim como para as componentes  $x$  e  $y$ .

Figura 52 - Módulo da força no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3.

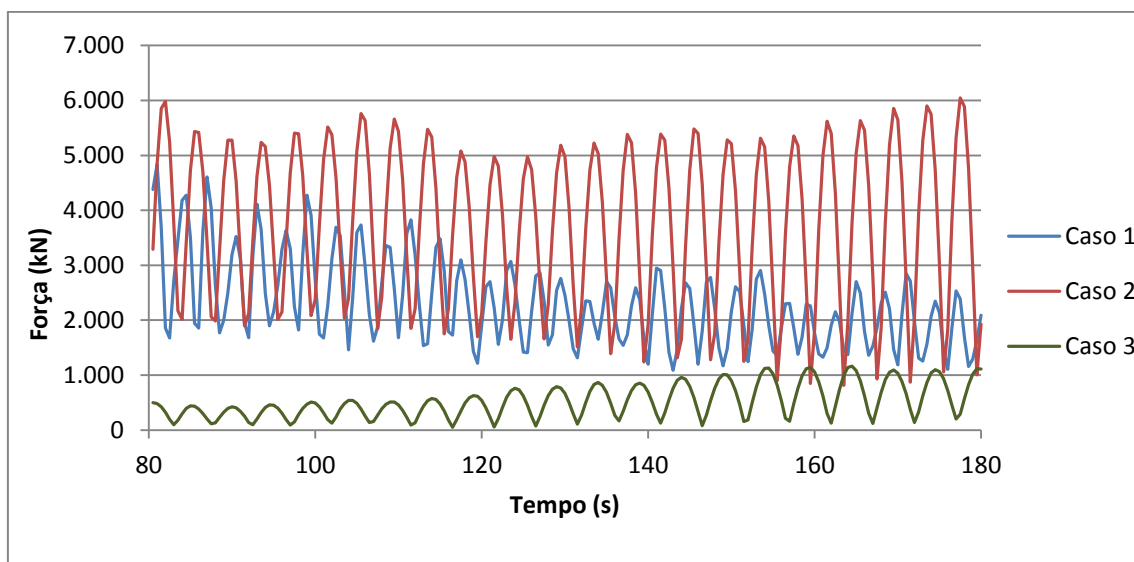


Figura 53 - Módulo da força no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3.

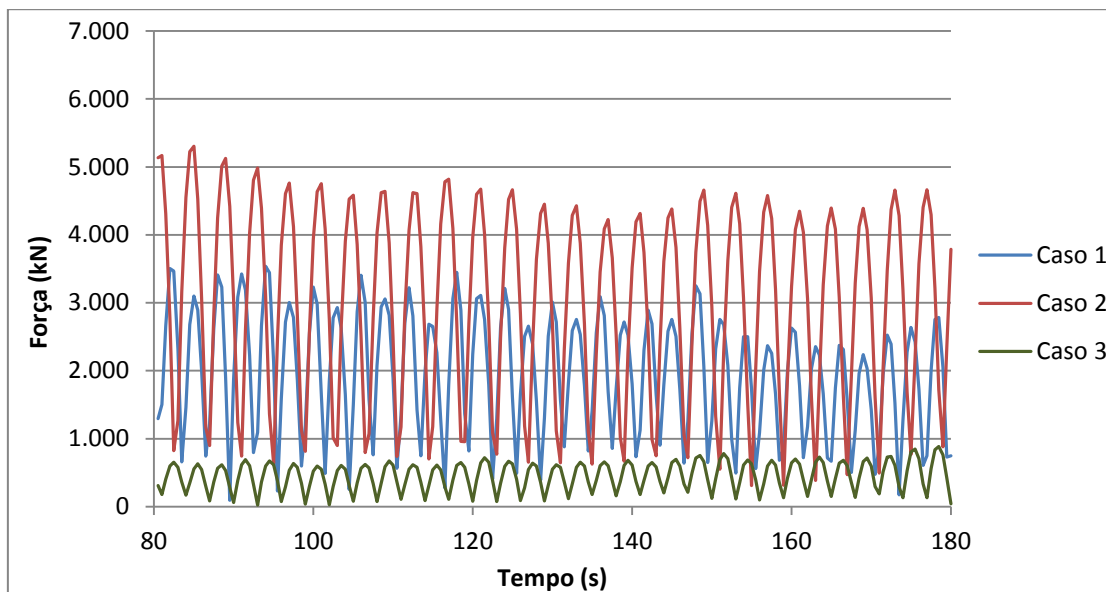


Figura 54 - Força na direção x no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3.

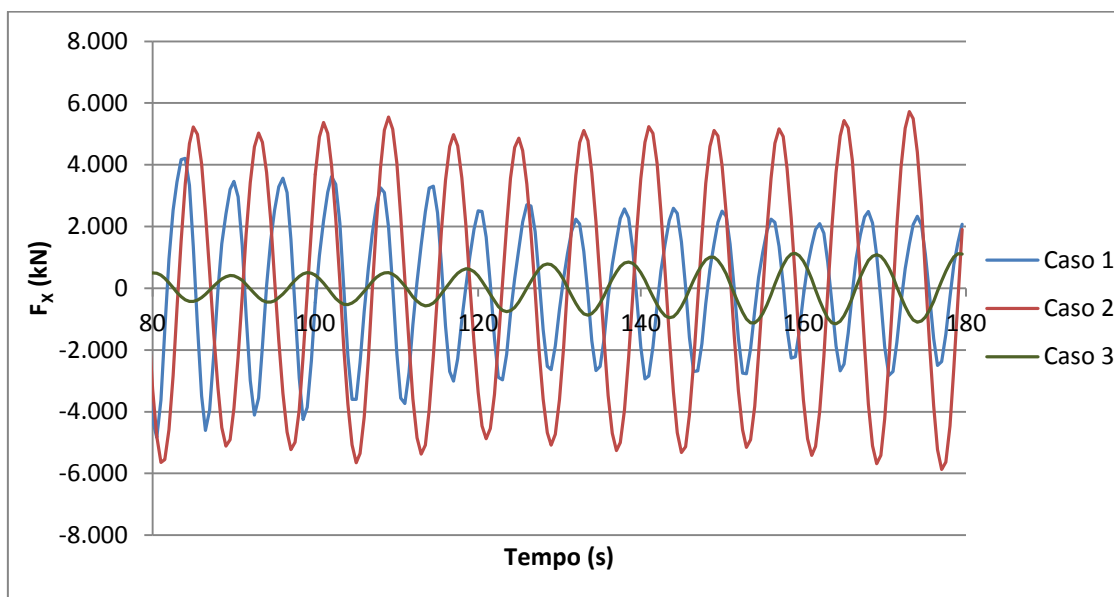


Figura 55 - Força na direção x no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3.

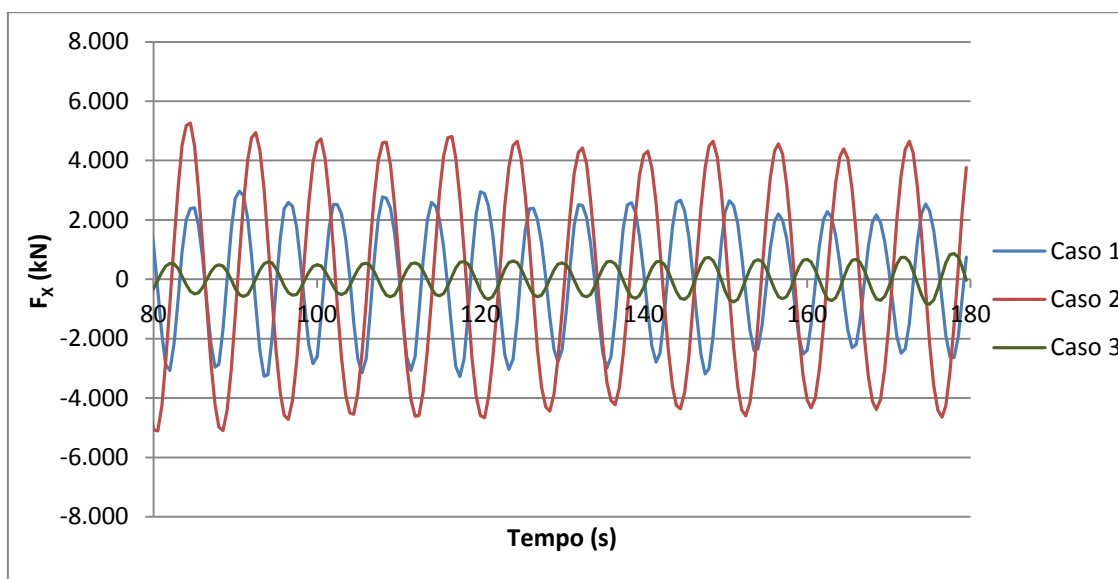


Figura 56 - Força na direção y no pilar a montante para os casos 1, 2 e 3.

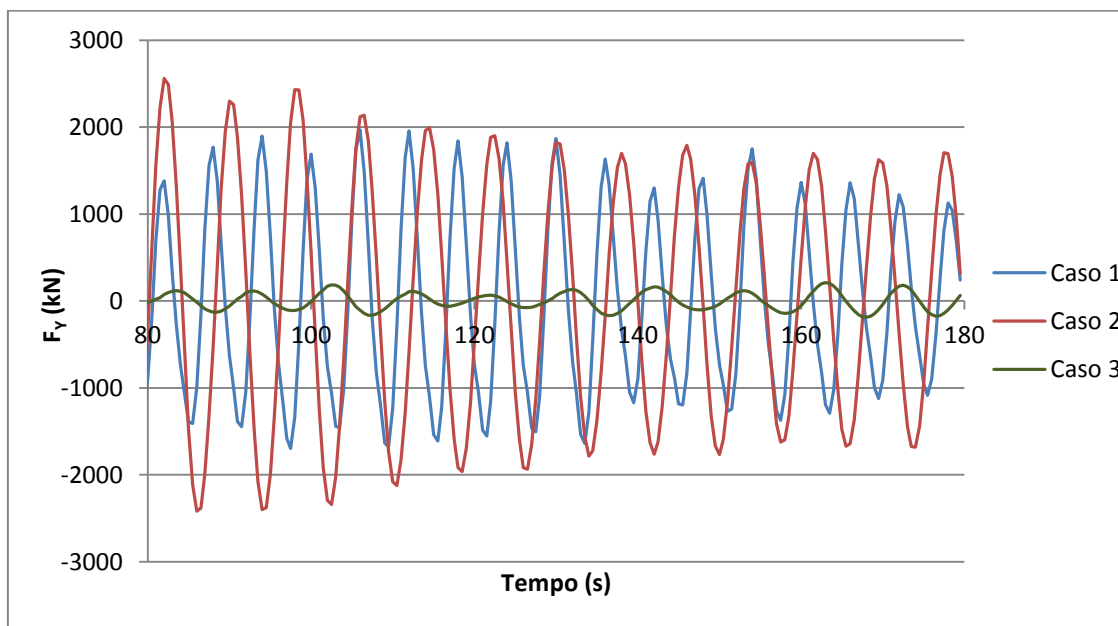


Figura 57 - Força na direção y no pilar a jusante para os casos 1, 2 e 3.

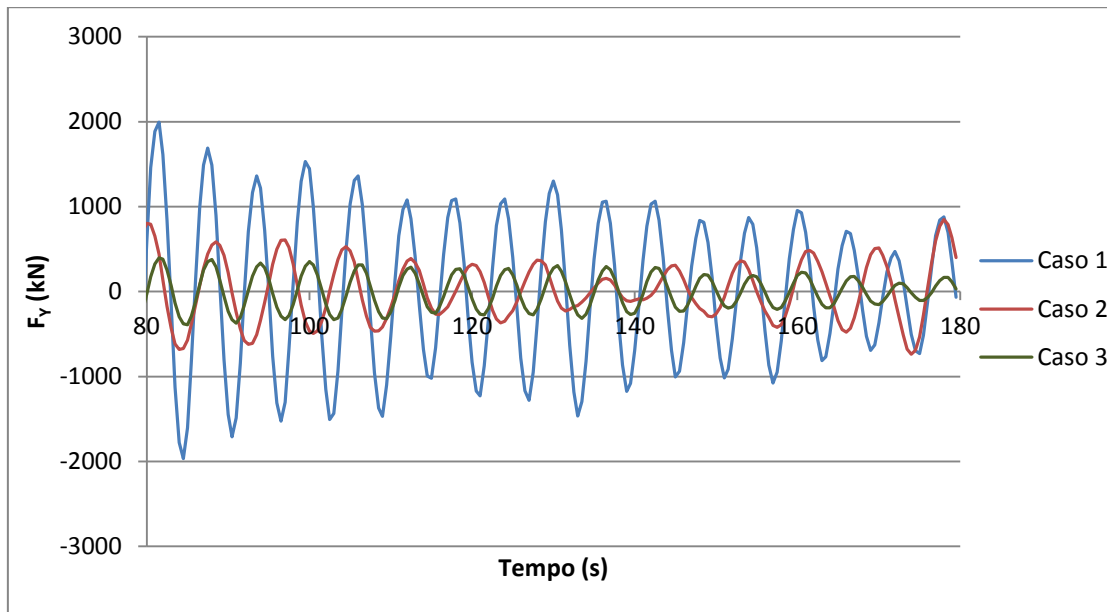


Tabela 3 – Maiores valores de força encontrados para cada caso.

Caso	Montante			Jusante		
	F máximo (kN)	F <sub>x</sub> máximo (kN)	F <sub>y</sub> máximo (kN)	F máximo (kN)	F <sub>x</sub> máximo (kN)	F <sub>y</sub> máximo (kN)
1	4881.96	4397.81	1966.00	4801.84	3933.34	2038.73
2	6223.80	5774.74	2559.22	5304.08	5261.88	898.70
2A	2655.15	2456.35	1113.35	2454.06	2186.29	1170.81
3	1528.24	1526.41	211.73	884.06	868.12	398.26
3A	542.38	520.27	290.24	911.24	821.53	395.05

## 8.2 VELOCIDADES

Os dados de velocidade fornecidos pelo *OpenFOAM* para cada passo de tempo foram utilizados nesta etapa a fim de visualizá-los no *paraView*. Para entender a variação da velocidade em todas as direções, foram gerados três tipos de imagens distintas para quatro intervalos de tempo ( $t = 105$ ,  $t = 130$ ,  $t = 155$  e  $t = 180$  s). As figuras 58, 59 e 60 mostram a velocidade na direção x para os Casos 1, 2 e 3, por representarem situações comumente encontradas na área onde se localiza a plataforma. Já as figuras 61, 62 e 63 mostram a velocidade nas direções y para os mesmo casos. As velocidades na direção z não foram apresentadas por não apresentarem características interessantes a serem analisadas, pois estas estão intimamente ligadas a variação da superfície livre.

A deformação da onda ao passar pelos pilares de sustentação é uma das principais características encontradas nos gráficos de velocidades em  $x$  e em  $y$  para o Caso 1 (figuras 58 e 61). Um motivo pode estar relacionado a alta velocidade das ondas de retorno, influenciando as ondas incidentes e modificando-as. A área de recirculação encontrada no meio do domínio, entre os pilares de sustentação, é formada ao longo do tempo pelo movimento das ondas e suas deformações. As maiores velocidades encontradas para o Caso 1 estão localizadas a montante dos pilares, que agem como reguladores dos efeitos das ondas.

Para o Caso 2, a velocidade é reduzida à metade na maior parte do domínio em relação ao Caso 1 em vista de sua menor amplitude e maior período (figuras 59 e 62). De uma forma geral, os mesmos efeitos das ondas encontrados para o Caso 1 se repetem para o Caso 2, porém em menor escala. Um fato importante que pode ser visualizado é, porém, a capacidade da onda de manter parte das suas características ao passar pelos pilares, gerando uma área de recirculação menos intensa no Caso 2.

Para situações onde a onda é relativamente pequena e possui um alto período, como ocorre no Caso 3, os obstáculos exercem baixa influência sobre as ondas. Com a figura 60 e 63, é possível notar que, ao passar pelos obstáculos, as ondas sofrem deformações muito pequenas se comparadas aos outros Casos. A influência é tão baixa que os campos de velocidade logo após os obstáculos a montante e a jusante são muito similares. Outra forma de visualizar este fenômeno é pela comparação das velocidades no início e no fim do domínio, onde há pouca variação nas áreas onde as ondas se encontram.

Figura 58 - Velocidade na direção x para o caso 1.

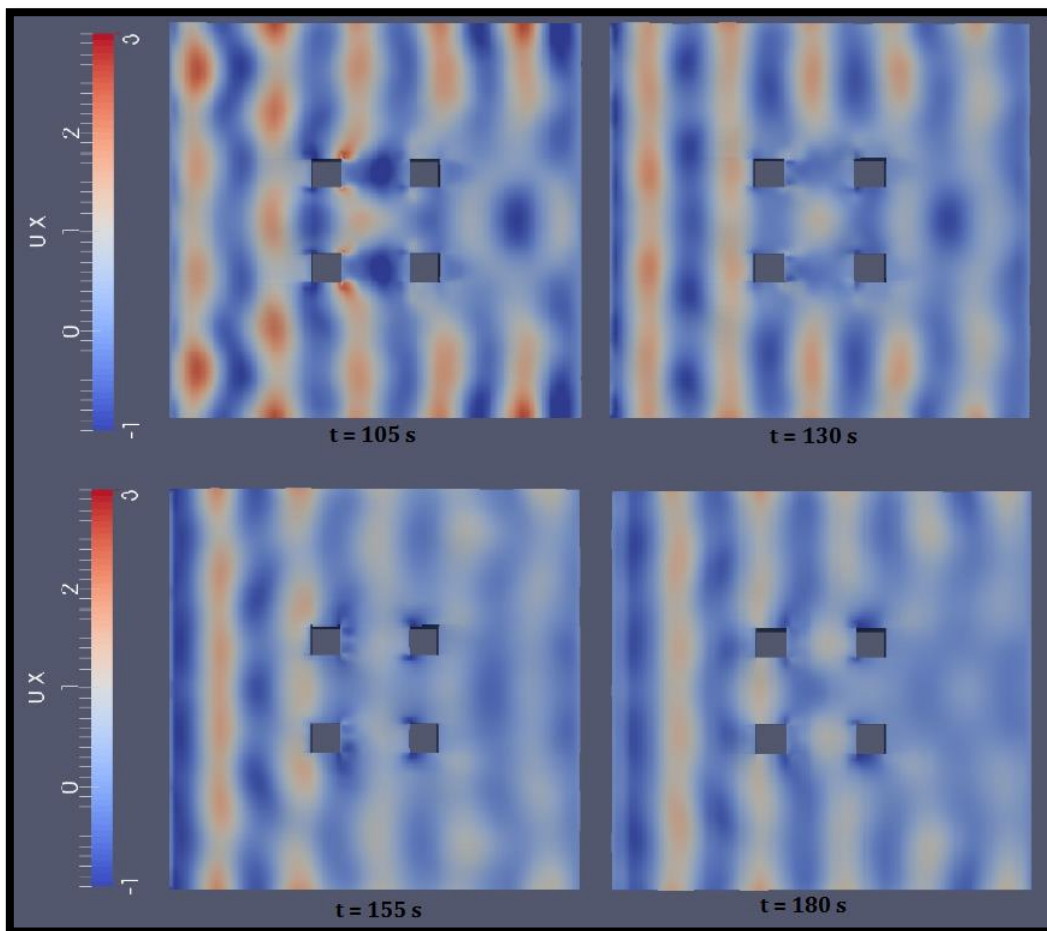


Figura 59 - Velocidade na direção x para o caso 2.

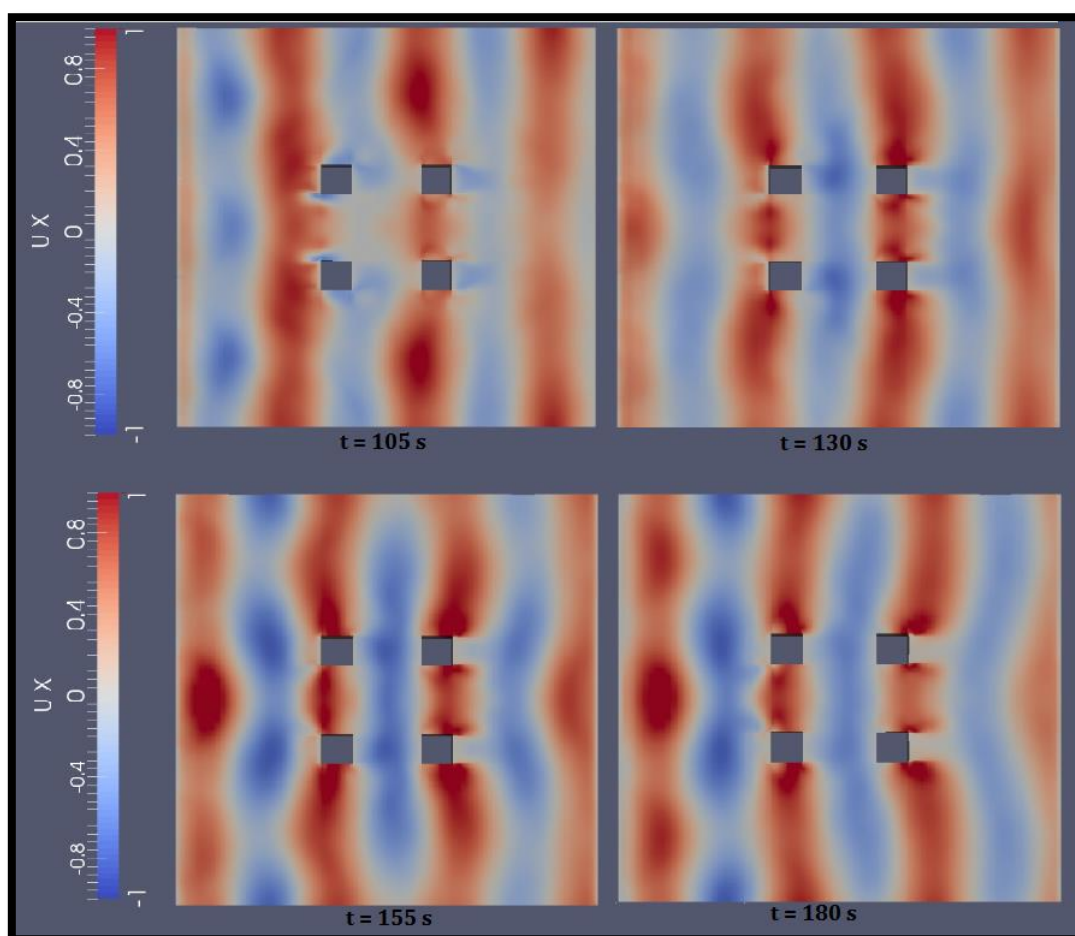
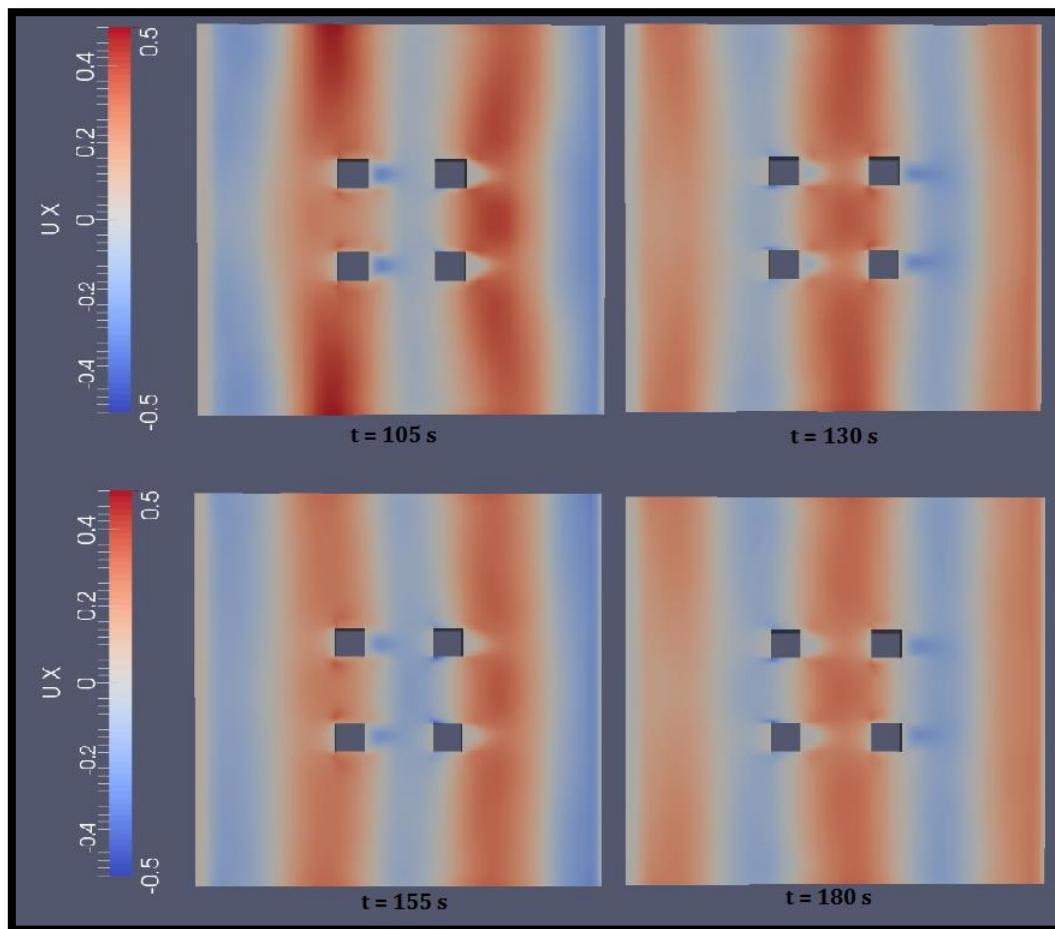


Figura 60 - Velocidade na direção x para o caso 3.



As componentes da velocidade na direção  $y$  estão diretamente ligadas às velocidades em  $x$ . Ambas caracterizam as áreas onde há interação com os obstáculos e o comportamento do fluido com estas interações. No Caso 1, fica visível o efeito dos pilares sobre as ondas, demonstrando o alcance dos efeitos que as partículas de água ao se deparar com o objeto fazem (figura 61). A área central do domínio está sob forte influência da interação entre os pilares, provocada principalmente pela forma geométrica utilizada.

Uma característica importante do Caso 1 é a segmentação das ondas na direção  $y$ , que pode ser explicada pelo comportamento da velocidade nestas seções, onde já estão sob a influência dos pilares. Esta influência diminui com o tempo, como pode ser visto nos intervalos de tempo finais.

No caso 2, o domínio está sob menor influência do campo de velocidades como consequência das características das ondas. A menor amplitude e o maior período das ondas apontam para menores velocidades e uma menor segmentação das



ondas. A área de influência dos pilares é reduzida se comparada a situação anterior (Caso 1), criando uma zona de velocidade nula entre os pilares e no centro do domínio. O comportamento da velocidade em  $y$  para o Caso 3 é semelhante, porém as velocidades são ainda menores, assim como a influência dos pilares. Neste último caso, fica visível o comportamento do fluido ao redor dos obstáculos e no restante do domínio, porém as interações onda-estruturas são baixas provocam impactos menores.

Figura 61 - Velocidade na direção  $y$  para o caso 1.

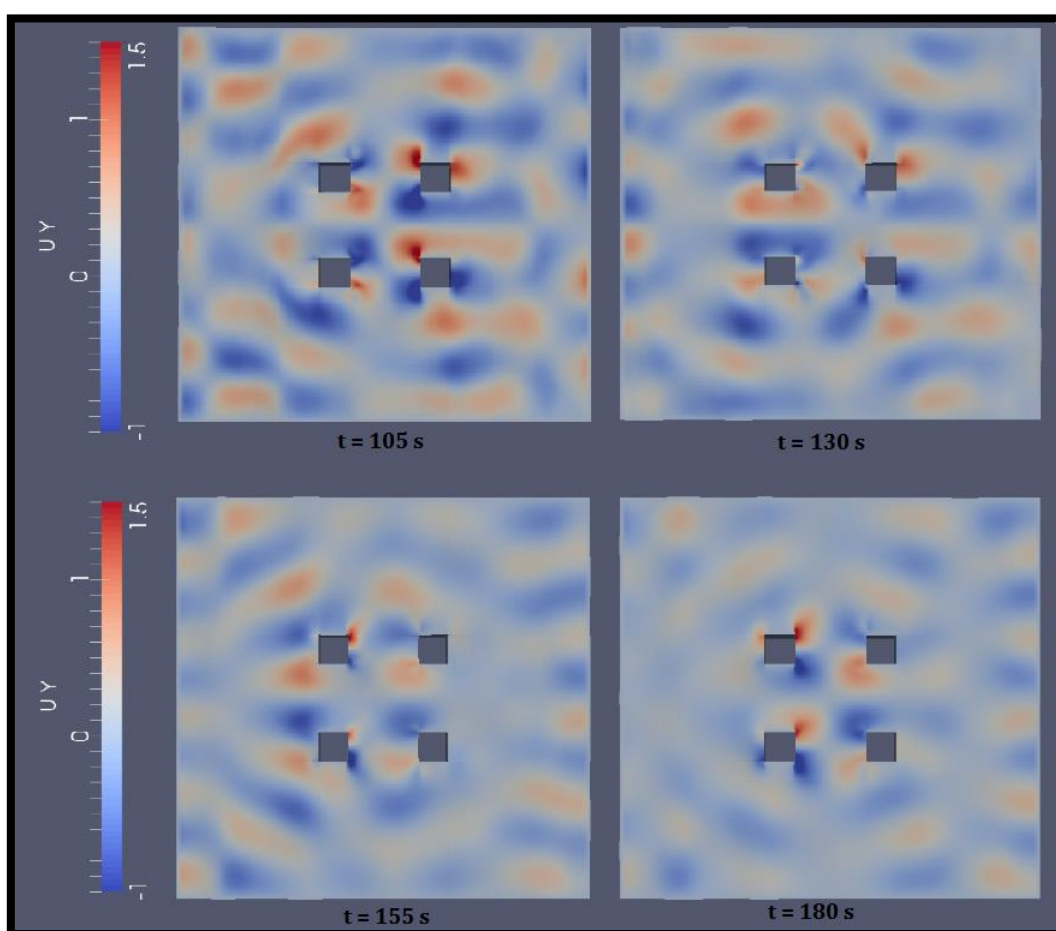


Figura 62 - Velocidade na direção y para o caso 2.

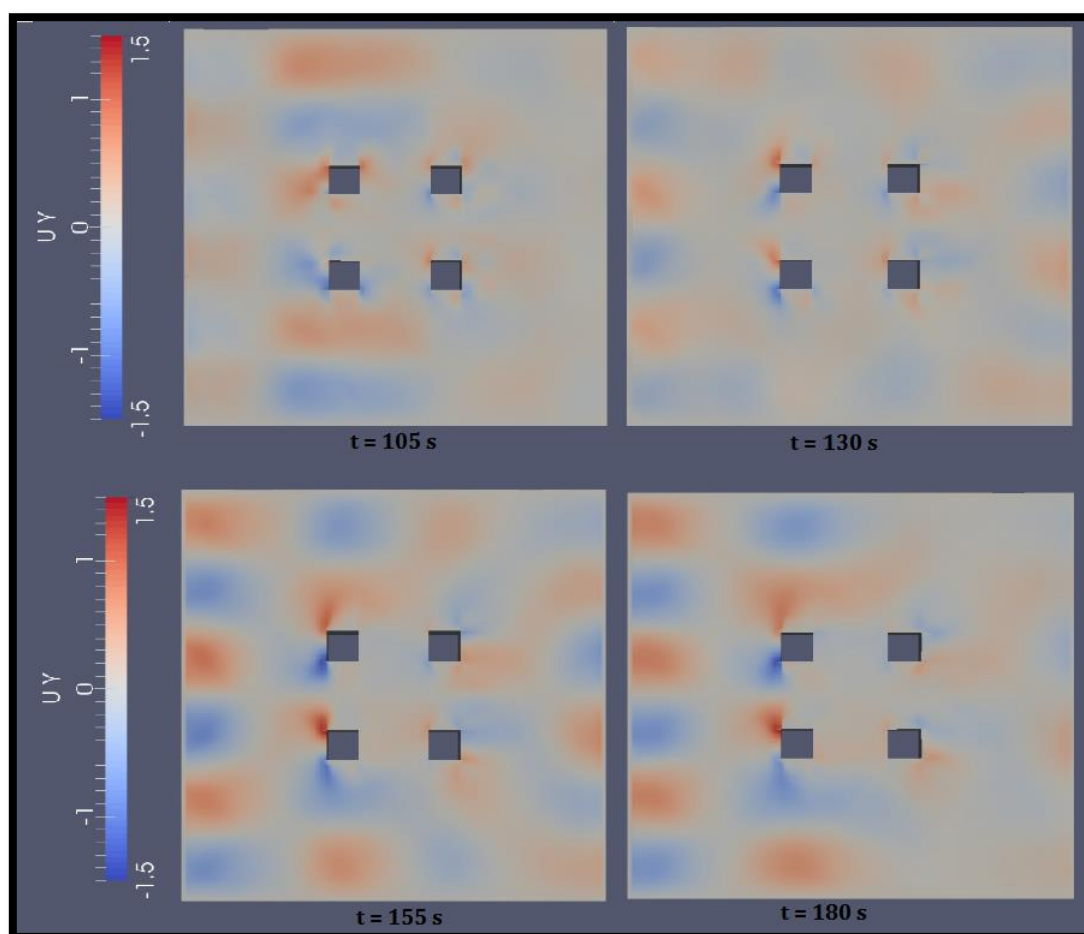
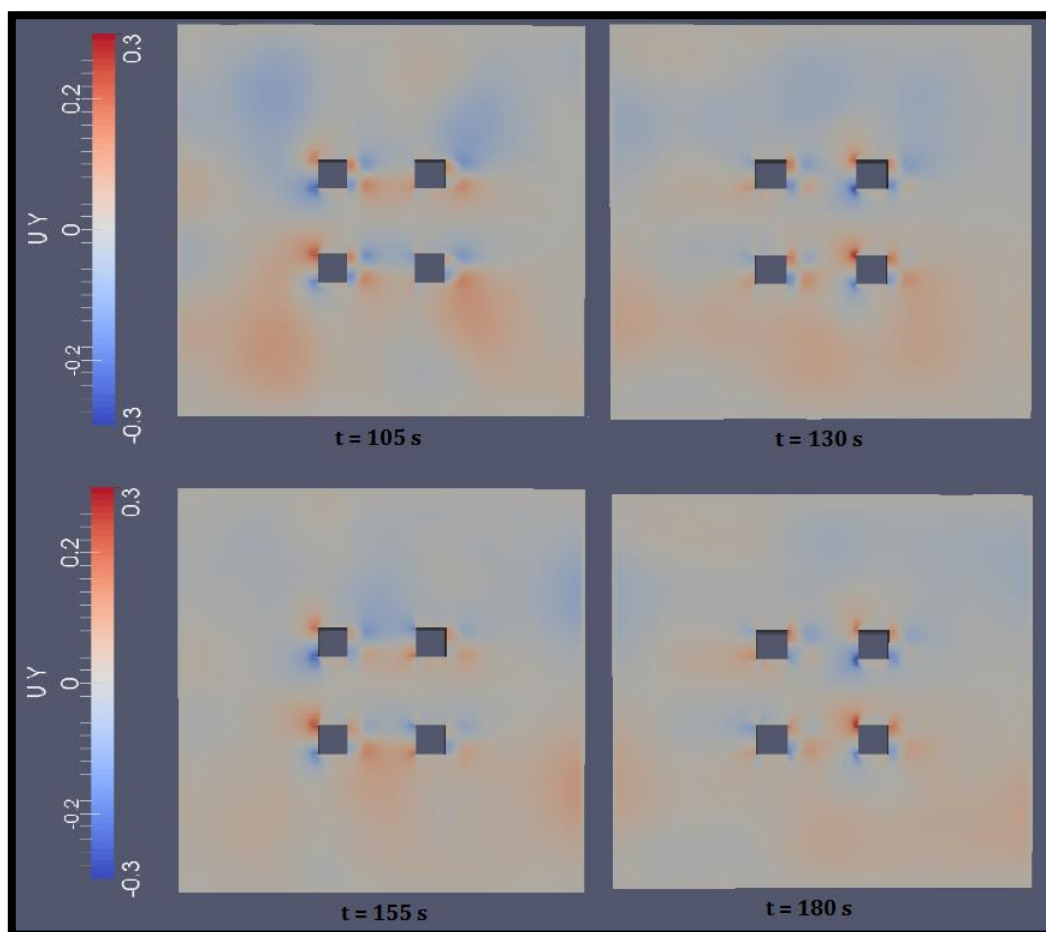


Figura 63 - Velocidade na direção y para o caso 3.



### 8.3 VORTICIDADE

O comando *vorticity* calcula a vorticidade do campo de velocidade  $U$ . Depois de calculados os valores, com o *ParaView* pode-se visualizar os campos de vorticidade ao longo do tempo para todo o domínio. É possível alterar a visualização dos resultados, escolhendo partes do domínio onde é preferível acompanhar o desenvolvimento dos vórtices.

Para fins de análise, o domínio foi modificado de forma que somente a água e os pilares de sustentação estejam visíveis. As figuras 43, 44 e 45 mostram a magnitude da vorticidade para cada situação. Todas as figuras apresentam quatro momentos distintos para  $t = 105$  s,  $t = 130$  s,  $t = 155$  s e  $t = 180$  s.

Os campos de vorticidade dos Casos 1, 2 e 3 evidenciam o processo já mencionado de descaracterização das ondas ao passar pelos obstáculos. Este fenômeno é ainda mais visível no Caso 1, onde além de uma maior amplitude também há uma maior variação da velocidade, sendo esta diretamente ligada a vorticidade (figura 64).

Ainda no caso 1, é possível notar que a vorticidade do domínio como um todo está sofrendo a influência da interação onda-estrutura. Esta influência sobre o domínio fica menos visível e menos intensa com a diminuição das amplitudes e o aumento do período.

Quando há uma maior velocidade e ondas maiores, os vórtices se encontram em sua maioria no centro do domínio, principalmente nos cantos dos pilares voltados para o meio. Também é possível de se visualizar a influência da presença dos pilares em regiões mais afastadas, consequência direta do movimento das ondas de maiores amplitudes e menores períodos. Tais ondas começam a se deformar antes mesmo do contato com os pilares, contornando-os em seguida e criando uma área de forte recirculação entre os pilares.

No Caso 2 (figura 65), as regiões onde encontramos os vórtices mais intensos são distintas quando comparadas ao Caso 3 (figura 66). Há uma grande possibilidade desta diferença ser em decorrência do fato de que quando há menores velocidades e ondas menores, a influência dos pilares ocorre em menores distâncias. Como consequência, os vórtices serão predominantemente formas nos cantos dos pilares voltados a entrada do domínio, onde é maior o impacto da onda.

O último caso (figura 66) apresenta baixa formação de vórtices, sendo as intensidades encontradas cinco vezes menores do que mostra a figura do Caso 1. Há fortes indícios de que a baixa velocidade, assim como uma amplitude três vezes menor do que o primeiro caso, influenciem estes resultados. O que é possível notar, porém, é a maior formação de vórtices nos cantos das estruturas, como consequência direta do seu formato.

Figura 64 - Magnitude da vorticidade para o Caso 1.

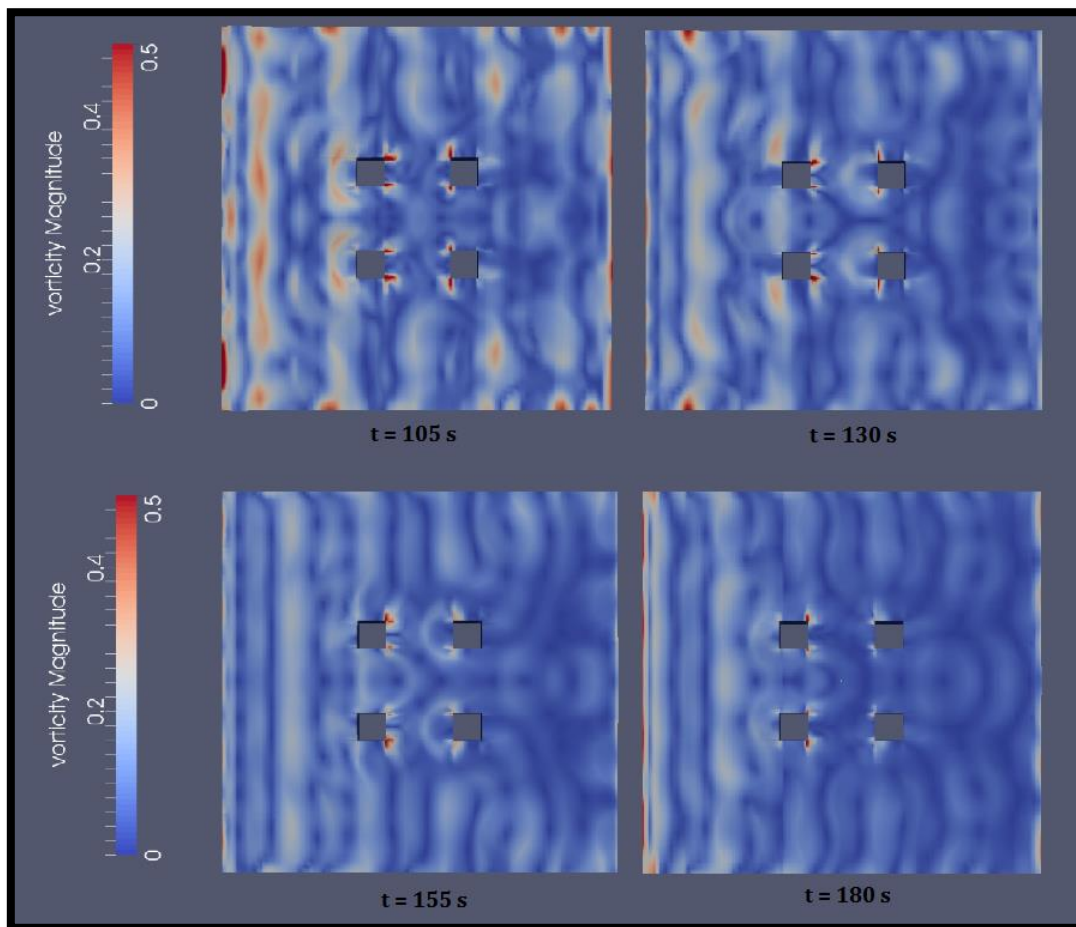


Figura 65 - Magnitude da vorticidade para o Caso 2.

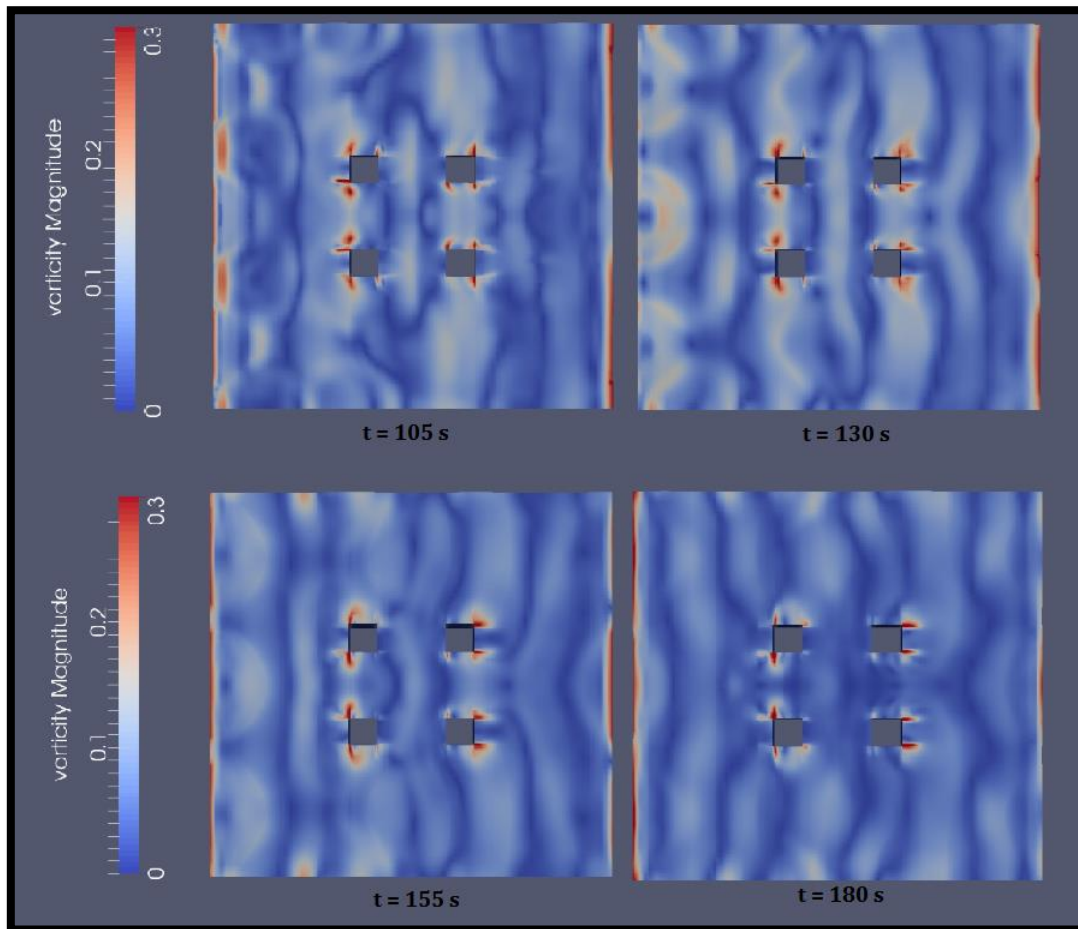
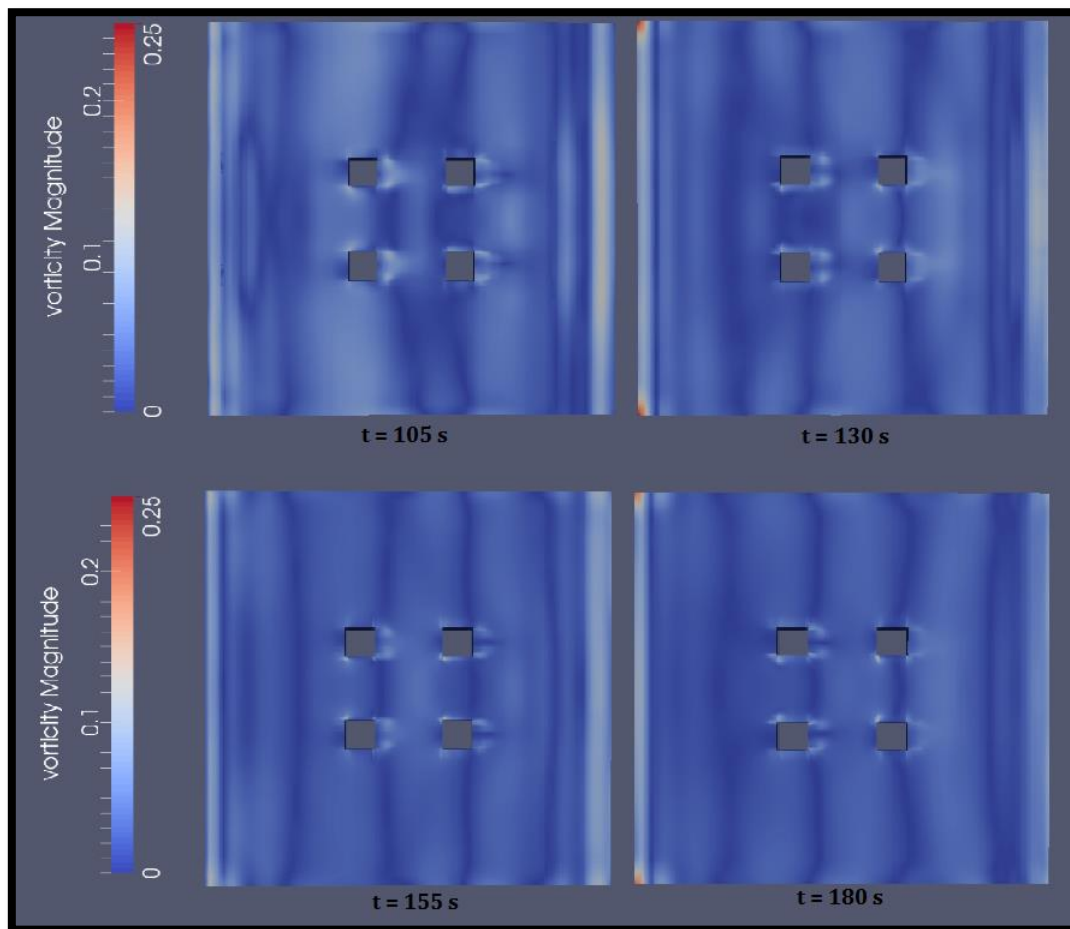


Figura 66 - Magnitude da vorticidade para o Caso 3.



## 9 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar as influências das ondas nos pilares de sustentação de uma plataforma de petróleo semissubmersível. O objetivo principal era quantificar as forças hidrodinâmicas envolvidas na interação onda-estrutura para três ondas de características distintas, representando o mar calmo, mar agitado e situação extrema. Também foram analisados os campos de velocidade e vorticidade para entender o comportamento destas variáveis na superfície livre e como os pilares os afetavam.

Os Casos apresentados como representativos de situações encontradas na Bacia de Campos não possuem características semelhantes, comprometendo a análise dos resultados de forças hidrodinâmicas. Em virtude disso, novas situações foram simuladas a fim de tornar possível a comparação de períodos e amplitudes semelhantes.

Quando comparamos situação de ondas com períodos distintos para uma mesma amplitude, fica evidente uma queda dos valores das forças hidrodinâmicas, tanto em módulo quanto para suas componentes. Os gráficos também apresentam um comportamento regular para períodos maiores, atingindo a estabilização da simulação em períodos de tempo menores.

Entretanto, para os Casos 3 e 3A, os valores de força na direção  $y$  não se estabilizam até 180 segundos, o que demonstra que valores estáveis para a direção  $x$  não necessariamente implica no mesmo comportamento para demais componentes. Diversos fatores podem influenciar a estabilização de uma simulação, como a escolha do método RANS ou das propriedades da onda. Para verificar o motivo exato uma análise mais detalhada se torna necessária.

Considerando períodos iguais, resultados adquirem um comportamento ainda mais regular. Fica evidente que há uma queda da força aplicada sobre os pilares a montante e depois um intervalo de tempo sem reduções efetivas dos valores extremos, indicando que a simulação foi estabilizada, e uma regularização dos efeitos da onda nos pilares a jusante.

De uma forma geral, os pilares localizados a montante estão sob influência de ondas mais rigorosas, o que gera forças maiores. Estes pilares são capazes de absorver parte do impacto e causar uma deformação da onda, que chegará aos pilares a jusante com velocidades mais amenas, causando menores impactos.

Ao compararmos os Casos 1, 2 e 3, notamos uma maior magnitude da força relacionada ao Caso 2, onde há ondas intermediárias de amplitude de 1,5 m e período de 8 s. Esta é uma observação importante, pois demonstra que os piores cenários não estão sempre ligados a maiores amplitudes, e sim a uma combinação de fatores. Ou seja, para analisar casos extremos a análise do período também é essencial.



As componentes da velocidade em  $x$  mostram um fenômeno de grande interesse, que seria a segmentação da onda em forma de arco. Em ondas de amplitudes maiores há uma grande influência da presença de objetos mesmo que a maiores distâncias, ocasionando altas velocidades de reflexão da onda. Esta reflexão influencia as ondas que se propagam a montante, segmentando-as e modificando suas propriedades. Para amplitudes menores e períodos menores este fenômeno se torna menos intenso.

A área entre os pilares está diretamente relacionada à recirculação das partículas de água ao passar pelos pilares de sustentação. Para ondas maiores esta área é mais intensa e implica em maiores interações onda-estrutura, influenciando os pilares a montante e a jusante de formas diferentes. Já para ondas menores, a velocidade nesta área se torna nula e os efeitos sobre as ondas em decorrência da presença dos objetos são menos intensos.

As velocidades na direção  $y$  ilustram o comportamento das partículas de água ao passarem pelos pilares, mostrando as trajetórias realizadas com o tempo, pois sem o obstáculo não existiram velocidades em  $y$ . Em todos os casos há uma formação de vórtices intensa quanto comparada ao restante do domínio para os cantos dos pilares. Esta formação de vórtices ocorre devido à geometria dos pilares, que é quadrada.

A formação de vórtices não é idêntica em todos os Casos. No Caso 1, a área central do domínio apresenta maiores intensidades em relação ao campo de vorticidade, em consequência das maiores ondas e maiores velocidades. Já no Caso 2, a formação de vórtices está concentrada na área exterior, voltada a entrada do domínio. Há fortes indícios de que esta diferença ocorre em virtude das amplitudes e velocidades distintas, que diminuem a área de influência dos pilares, assim como a descaracterização das ondas.

Por fim, seria necessário conduzir novas simulações e análises para verificar a convergência em casos de ondas menores e períodos maiores, entendendo assim os fatores envolvidos. Também seria de grande interesse simular novos períodos e amplitudes, modificando o domínio para testar a influência do tamanho do mesmo. Por ser um assunto de grande complexidade e que envolve diversos fatores, recomenda-se realizar as análises sugeridas para o desenvolvimento e entendimento dos fenômenos aqui apresentados.

## 10 REFERÊNCIAS

AMORIM, T. O. **“Plataformas offshore: Uma breve análise desde a construção ao descomissionamento”**. 2010. 57 f. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Construção Naval) – Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, D. **“Plataformas de produção”**. 2014. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABd-cAB/plataformas-producao>>. Acessos em 15 set. 2015.

BAKKER, A. **“Applied Computational Fluid Dynamics”**. 2002. Disponível em: <<http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/16-fsurf.pdf>>. Acessos em 25 out. 2015.

CITRA, R. **“Plataformas auto-eleváveis: Jack-up”**. 2014. Disponível em: <<http://portalmaritimo.com/2014/03/13/plataformas-auto-elevaveis/>>. Acessos em 12 set. 2015.

COSTA, L.; RIBEIRO, M. **“Propriedades dinâmicas de fluidos por simulação computacional: métodos híbridos atomístico-contínuo”**. 2010. Química Nova, Vol.33, n. 4, São Paulo, 2010.

DOSSIÊ TERRA. **“O Estado do Planeta”**, 2010, National Geographic, Ed. Abril.

GALP ENERGIA. **“Perfuração”**. 2014. Disponível em: <<http://www.galpennergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/Os-nossos-negocios/Exploracao-Producao/fundamentos-engenharia-petroleo/Paginas/Perfuracao.aspx>>. Acessos em 11 set. 2015.

GOMES, A. S. **“Ondas Marinhas”**. Rio de Janeiro: Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense (UFF), 2003.

GOMES, M. H. R. **“Apostila de Mecânica de Fluidos”**. 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%C3%A2nica-dos-Fluidos.pdf>>. Acessos em 18 de out. 2015.

GONÇALVES, N. D. F. **“Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas”**. 2007. 71 f. Tese de mestrado (Engenharia Matemática) - Departamento de Matemática Aplicada / Departamento de Matemática Pura, Universidade de Ciências do Porto, Porto, 2007.

GOUVEIA, F. Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal. **Conhecimento & Inovação**, Campinas, v. 6, n. 1, 2010. Disponível em <[http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-43952010000100010&lng=pt&nrm=iso](http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-43952010000100010&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 01 set. 2015.

GOTOH, H.; OKAYASU, A.; WATANABE, Y. “**Computational Wave Dynamics**”. World Scientific Publishing, Japan, Vol. 37, 2013.

GREENSHIELDS, C. J. “**OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox: User Guide**”. v. 3.0.0, Nov. de 2015.

GROVE, M. A. “**Sistema de Posicionamento Híbrido para FPSOs**”. Tese de Mestrado em Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005.

HOOFT, J. P. “**Hydrodynamic aspects of semi-submersible platforms**”. Wageningen: Veenmanen Zonen, 1972. 127 p.

HOU, G.; WANG, J.; LAYTON, A. “**Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction - A Review**”. Global-Science Press, USA, Vol. 12, No. 2, 2012.

ISIS ENGENHARIA. “**O mundo das plataformas de petróleo**”. 2011. Disponível em: <<http://www.isiengenharia.com.br/espaco-do-engenheiro/curiosidades/o-mundo-das-plataformas-de-petroleo-2>>. Acesso em 11 set. 2015.

KRIZ, R. “**Theory of Finite Difference Models with Applications in Diffusion**”. 2004. Disponível em: <[http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2034\\_NoteBook/MSE2034\\_kriz\\_NoteBook/diffusion/numeric/numeric1.html](http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2034_NoteBook/MSE2034_kriz_NoteBook/diffusion/numeric/numeric1.html)>. Acesso em 20 de out. 2015.

LACERDA, T. A. G. “**Análise de sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes**”. 2005. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

LE MÉHAUTÉ, B. “**An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**”. Springer-Verlag, 1976.

MASSEL, S. R. “**Ocean surface waves: Their physics and prediction**”. World Scientific, Australia, vol. 11, 1996.

MITRE, J. M. “Introdução ao método dos volumes finitos”. Disponível em: <<http://www.notasemcfd.com/2008/01/introduo-ao-mtodo-dos-volumes-finitos.html>>. Acesso em 25 de out. 2015.

OLSSON, A.; TUNLID, M. 2015. 92 f. “**CFD simulation of wave-in-deck loads on offshore structures**”. Tese de Mestrado em Arquitetura Naval e Engenharia Oceânica. Gothernburg: Departamento de Tecnologia Marinha e Naval, Chalmers University of Technology, 2015.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. “**Introduction to simulation using SIMAN**”. McGraw-Hill, NY. 2 ed., 1990.

PETROGRASNEWS. “**Tipos de plataformas de petróleo**”. 2011. Disponível em: <<https://petrograsnews.wordpress.com/2011/03/06/tipos-de-plataformas-de-petroleo/>>. Acessos em 17 set. 2015.

PETROBRAS. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html>>. Acessos em 19 set. 2015.

PONTES, J.; MANGIAVACCHI, N. “**Fenômenos de Transferência Com Aplicações às Ciências Físicas e à Engenharia**”. 2013. 374 f. Departamento/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

RAHMAN, M. “**The Hydrodynamics Of Waves And Tides, With Applications**”. Computational Mechanics Publications, USA, vol. 4, 1988.

SEABRA, T. J. “**Métodos de construção e edificação de plataformas semi-submersíveis**”. 2009. 54 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. “Annual Energy Review”. 2006. Disponível em: <<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/archive/038406.pdf>>. Acessos em 01 set. 2015.

U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. “International energy data and analysis”. 2015. Disponível em: <<http://www.eia.gov/beta/international/?src=home-f1>>. Acessos em 01 set. 2015.

WILLIAMS, H. 2006. Disponível em: <<http://subterrain.org.uk/maunsell/part3.html>>. Acessos em 11 set. 2015.