

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Guilherme Fuhrmeister Vargas

***WAVEROLLER*: ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS E DE ESCOAMENTO INFLUENTES NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Porto Alegre
dezembro 2015

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

**WAVEROLLER: ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS E DE ESCOAMENTO INFLUENTES NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Edith Beatriz Camaño Schettini

Porto Alegre
dezembro 2015

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

**WAVEROLLER: ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS
HIDRÁULICAS E DE ESCOAMENTO INFLUENTES NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pelo coordenador da disciplina Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de dezembro de 2015

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini
Dra. pelo Institut National
Polytechnique de Grenoble
Orientadora

Prof. Roberto Domingos Rios
Dr. pelo PPGEC/UFRGS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Profa. Edith Beatriz Camaño Schettini
(IPH/UFRGS)
Dra. pelo Institut National Polytechnique de
Grenoble

Profa. Daniela Guzzon Sanagiotto
(IPH/UFRGS)
Dra. Pela UFRGS

Prof. Alexandre Beluco (IPH/UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Leandro Conceição Pinto (UFSM)
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, Elizabeth Fuhrmeister e João Carlos Vargas, aos meus avós, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, e aos meus amigos, que fizeram de mim um guerreiro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado a saúde e a força necessárias para vencer os desafios da vida.

Agradeço aos meus pais, Elizabeth Fuhrmeister e João Carlos Vargas, por terem me ensinado a ser um homem de valores e princípios, por terem sempre me motivado a enfrentar de frente os obstáculos e por fazerem de mim quem sou hoje.

Agradeço aos meus avós, Vitor Fuhrmeister (*in memoriam*) e Vilma Schröder Fuhrmeister, por sempre terem me dado carinho e estarem presentes em minhas conquistas na vida, por terem me ensinado que a dedicação e a força de vontade fazem toda a diferença na hora de vencer.

Agradeço aos meus queridos amigos Diego Krainovic, Marjana Siqueira, Vanessa Gorniak, Fernanda Ramos, Luísa Lucchese, Rodrigo Pereira, Guilherme Cervantes, Marina Iara, Vanessa Moura, Taís Vicenzi, Caroline Kopplin, André Paschoal, Guilherme Peretti, Henrique Zanini, Brenda Brambatti, Kassio Stein e Fernando Bastiani por terem me trazido alegria ao longo dos anos de estudo e nas horas de lazer, por me darem apoio quando meu mundo parecia desabar, e por me incentivarem a ser uma pessoa boa, forte, corajosa e com caráter.

Agradeço ao meu parceiro, Eduardo Mendes, pela força, dedicação e motivação dada ao longo dos dias e por me mostrar que viver realmente vale a pena quando temos alguém com quem contar tanto nos momentos bons quanto nos ruins.

Agradeço a minha orientadora, Edith Beatriz Camaño Schettini, pela dedicação, disposição, motivação, por ser um exemplo de professora, e, principalmente, por acreditar no meu potencial.

Agradeço a todos meus colegas do NETT pela ajuda e pela motivação na hora de resolver os difíceis problemas de simulação numérica, por terem me dado força e por me ajudarem a configurar o código que possibilitou a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Rafael Manica por ter me ajudado a descobrir a minha vocação na área de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e pelo conhecimento adquirido na área.

Sonha e serás livre de espírito... luta e serás livre na vida.

Che Guevara

RESUMO

Atualmente a busca por fontes alternativas de energia está crescendo, por outro lado, os oceanos e mares abrigam um grande potencial energético que ainda é pouco explorado. As ondas são capazes de percorrer grandes distâncias sem perdas significativas de energia, portanto podem ser utilizados dispositivos que convertem a energia das ondas em energia elétrica, dentre estes está o *Waveroller*, dispositivo composto por uma placa que se movimenta e faz uma turbina gerar eletricidade. Este trabalho tem como objetivo analisar como o escoamento ocasionado pelas ondas do mar influencia no movimento das placas de um módulo composto por três *Waverollers* (projeto SURGE, Peniche, Portugal); para tal foi utilizado simulação numérica através do código computacional livre e aberto OpenFOAM v. 2.4.0, com uma malha estruturada e dividida em blocos, assumindo determinados períodos e alturas de onda (considerando esta como regular), diversas posições angulares das placas e profundidades. Constatou-se que grandes períodos de onda provocam aumento da magnitude das velocidades, vorticidade e maiores forças de arraste. Menores profundidades significam menores aproveitamentos energéticos e maiores oscilações nos valores de velocidade e forças de arraste. À medida que as placas encontram-se mais inclinadas, ficam sujeitas a maiores valores de velocidade, vorticidade e magnitudes das forças de sustentação, porém a menores valores de magnitudes das forças de arraste. Pode-se dizer que a geração de energia esteja relacionada diretamente ao período da onda incidente, onde este pode ocasionar maiores ou menores oscilações nos valores das forças de arraste e sustentação, que, por sua vez, influenciarão nas oscilações das placas e, conseqüentemente, na eletricidade gerada.

Palavras-chave: Geração de eletricidade. Hidrodinâmica de ondas.
Simulação numérica. RANS. OpenFOAM.

GUILHERME FUHRMEISTER VARGAS

**WAVEROLLER: ANALYSIS OF HYDRAULIC AND FLOW FEATURES
ACTING ON ELECTRIC PRODUCTION BY NUMERICAL
SIMULATION**

ABSTRACT

Nowadays the search for alternative energy sources is increasing, on the other hand, the oceans and seas have a great energetic potential, which is still underexplored. The waves are able to cover great distances without significant energy losses, therefore devices can be used to transform wave energy into electric power, among these, there is *Waveroller*, a device comprising a plate that moves and causes a turbine to generate electricity. This work aims to analyze the way ocean waves flow induces the plate movement of a module compound by three *Waverollers* (SURGE Project, Peniche, Portugal). Therefore was used numerical simulation through free and open source computer code called OpenFOAM v. 2.4.0, with a structured mesh divided into blocks, assuming certain periods and wave heights (considering it as regular), with several angular positions of the plates and different depths. It was found that large wave periods cause an increase of speed magnitude, vorticity and greater drag forces. Shallow depths mean lower energy uses and larger swings in values of speed and drag forces. As the plates are more leaned, they become subject to higher speed values, vorticity and lift forces magnitudes, however they become subject lesser magnitudes of drag forces. It can be said that power generation is directly related to the period of the incident wave, where this period can cause major or minor fluctuations in the values of drag and lift forces, which in turn, will influence the movements of the plates, and hence influence the electricity generated.

Key-words: Electric power. Waves hydrodynamic.
Numerical simulation. RANS. OpenFOAM

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Comprimentos de onda em função da interação rugosa do fundo e das margens | 25 |
| Figura 2 – Comportamento das ondas em função da interação rugosa do fundo e das margens | 26 |
| Figura 3 – Parque de <i>Waverollers</i> | 26 |
| Figura 4 – Diagrama de etapas do trabalho | 29 |
| Figura 5 – Produção de energia elétrica, a nível mundial, através de fontes renováveis até o ano de 2030 | 34 |
| Figura 6 – Consumo de energia, a nível mundial, por tipo de fonte energética até o ano de 2030 | 35 |
| Figura 7 – Influência da lua na variação das marés | 40 |
| Figura 8 – Regiões apropriadas para aproveitamento da energia das marés | 41 |
| Figura 9 – Funcionamento de uma barragem de maré | 41 |
| Figura 10 – Turbina de eixo horizontal | 42 |
| Figura 11 – Turbina de eixo vertical | 43 |
| Figura 12 – Hidrofólio oscilante | 44 |
| Figura 13 – Sistema que utiliza tubo venturi | 44 |
| Figura 14 – Regiões favoráveis ao aproveitamento energético do gradiente de temperatura dos oceanos | 45 |
| Figura 15 – Potencial energético anual das ondas do mar | 47 |
| Figura 16 – Classificação das regiões conforme a profundidade e proximidade com a costa | 48 |
| Figura 17 – Principais dispositivos geradores conforme o grupo de classificação | 48 |
| Figura 18 – Detalhamento do Limpet | 49 |
| Figura 19 – Funcionamento do Oyster | 50 |
| Figura 20 – Módulo composto por três <i>Waverollers</i> | 51 |
| Figura 21 – AWS | 51 |
| Figura 22 – <i>Wavebob</i> | 52 |
| Figura 23 – Detalhamento de um Pelamis | 52 |
| Figura 24 – Detalhamento do <i>Wavedragon</i> | 53 |
| Figura 25 – Comparativo entre os custos envolvidos na utilização de algumas fontes de energia..... | 55 |
| Figura 26 – Esquema de funcionamento do <i>Waveroller</i> | 56 |
| Figura 27 – Esquema da geração de energia através do <i>Waveroller</i> | 56 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 28 – Diminuição da capacidade de captação de energia com o aumento do período e da altura da onda | 58 |
| Figura 29 – Diminuição da captação de energia em função da posição angular da placa do Oyster para quatro períodos de onda distintos | 59 |
| Figura 30 – Comportamento de um <i>Waveroller</i> com a propagação de uma onda | 60 |
| Figura 31 – Variação do período de oscilação de oscilação (s) da placa em função da largura e da profundidade em que ela se localiza | 61 |
| Figura 32 – Variação da captação de energia (kW) em função da espessura da placa e da profundidade em que ela se localiza | 61 |
| Figura 33 – Parâmetros principais de uma onda | 62 |
| Figura 34 – Gráfico para se obter o parâmetro Ψ | 64 |
| Figura 35 – Classificação das águas de acordo com o comprimento de onda e profundidade..... | 65 |
| Figura 36 – Ábaco que relaciona a profundidade, altura e período de onda com a teoria de hidrodinâmica que melhor se aplica | 66 |
| Figura 37 – Grau de modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência | 76 |
| Figura 38 – Configuração dos diretórios e arquivos necessários para a realização de uma simulação através do código OpenFoam | 89 |
| Figura 39 – Esquema relacionando os casos estudados e os parâmetros a eles associados..... | 92 |
| Figura 40 – Condições iniciais e de contorno | 93 |
| Figura 41 – Domínio de cálculo | 94 |
| Figura 42 – Malha de cálculo | 94 |
| Figura 43 – Discretização da malha | 95 |
| Figura 44 – Malha para placas na posição de 90 ° com a horizontal | 95 |
| Figura 45 – Malha para placas na posição inclinada em relação à horizontal | 96 |
| Figura 46 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 30° (Caso 1a) | 97 |
| Figura 47 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 45° (Caso 1a) | 98 |
| Figura 48 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 60° (Caso 1a) | 98 |
| Figura 49 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 90° (Caso 1a) | 99 |
| Figura 50 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 120° (Caso 1a) | 99 |
| Figura 51 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 135° (Caso 1a) | 100 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 52 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 150° (Caso 1a) | 100 |
| Figura 53 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 30° (Caso 1a) | 101 |
| Figura 54 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 45° (Caso 1a) | 101 |
| Figura 55 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 60° (Caso 1a) | 102 |
| Figura 56 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 90° (Caso 1a) | 102 |
| Figura 57 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 120° (Caso 1a).... | 103 |
| Figura 58 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 135° (Caso 1a).... | 103 |
| Figura 59 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 150° (Caso 1a).... | 104 |
| Figura 60 – Campo de pressões para as posições de 60 ° e 90 ° em tempos diferentes de simulação | 104 |
| Figura 61 – Comportamento da força de arraste ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a) | 105 |
| Figura 62 – Comportamento do coeficiente de arraste ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a)..... | 106 |
| Figura 63 – Coeficientes de arraste ao longo do tempo para posições angulares opostas (Caso 1a) | 106 |
| Figura 64 – Força de arraste ao longo do tempo para posições angulares opostas (Caso 1a) | 107 |
| Figura 65 – Comportamento da força de sustentação ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a) | 107 |
| Figura 66 – Comportamento do coeficiente de sustentação ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a) | 108 |
| Figura 67 – Crescimento/decrescimento do módulo das forças de arraste e sustentação conforme posição angular assumida pelas placas (Caso 1a) | 108 |
| Figura 68 – Campo de velocidades para diversas posições angulares das placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b) | 109 |
| Figura 69 – Campo de vorticidade para diversas posições angulares das placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b) | 110 |
| Figura 70 – Coeficiente e força de arraste ao longo do tempo para placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b) | 110 |
| Figura 71 – Coeficiente e força de sustentação ao longo do tempo para placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b) | 111 |
| Figura 72 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 112 |
| Figura 73 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 113 |
| Figura 74 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 113 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 75 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 114 |
| Figura 76 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 114 |
| Figura 77 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 115 |
| Figura 78 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 115 |
| Figura 79 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 116 |
| Figura 80 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 116 |
| Figura 81 – Comparação entre o comportamento do escoamento de uma corrente de 0,8 m/s e de uma onda incidente com grande período (Caso 2) | 117 |
| Figura 82 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 118 |
| Figura 83 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 119 |
| Figura 84 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 119 |
| Figura 85 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 120 |
| Figura 86 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 120 |
| Figura 87 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 121 |
| Figura 88 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 6 s de período (Caso 2) | 121 |
| Figura 89 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 10 s de período (Caso 2) | 122 |
| Figura 90 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 15 s de período (Caso 2) | 122 |
| Figura 91 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 1 m (Caso 2) | 123 |
| Figura 92 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 3 m (Caso 2) | 124 |
| Figura 93 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 4 m (Caso 2) | 124 |
| Figura 94 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 1 m (Caso 2) | 125 |
| Figura 95 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 3 m (Caso 2) | 125 |
| Figura 96 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 4 m (Caso 2) | 126 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 97 – Módulo das forças de arraste e sustentação com a variação do período considerando alturas de onda fixas (Caso 2) | 126 |
| Figura 98 – Comparação entre o nível d'água real e teórico (Caso 2) | 127 |
| Figura 99 – Relação entre onda incidente com período de 6 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2) | 128 |
| Figura 100 – Relação entre onda incidente com período de 10 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2) | 128 |
| Figura 101 – Relação entre onda incidente com período de 15 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2) | 129 |
| Figura 102 – Campo de velocidades em função do aumento da altura da onda, para períodos de onda fixos de 6 s, 10 s e 15 s (Caso 3) | 130 |
| Figura 103 – Campo de vorticidade em função do aumento da altura da onda, para períodos de onda fixos de 6 s, 10 s e 15 s (Caso 3) | 131 |
| Figura 104 – Coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 6 s (Caso 3) | 132 |
| Figura 105 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 6 s (Caso 3) | 133 |
| Figura 106 – Coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 10 s (Caso 3) | 133 |
| Figura 107 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 10 s (Caso 3) | 134 |
| Figura 108 – Coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 15 s (Caso 3) | 134 |
| Figura 109 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 15 s (Caso 3) | 135 |
| Figura 110 – Módulo das forças de arraste e sustentação em função da altura da onda, para períodos fixos da mesma (Caso 3) | 135 |
| Figura 111 – Campo de velocidades para as profundidades de 25 m e 20 m, com altura e período de onda de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4) | 136 |
| Figura 112 – Campo de velocidades para a profundidade de 15, com altura e período de onda de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4) | 137 |
| Figura 113 – Campo de vorticidade em função da profundidade para onda com altura e período de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4) | 137 |
| Figura 114 – Força e coeficiente de arraste em função da profundidade para onda de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 4) | 138 |
| Figura 115 – Força e coeficiente de sustentação em função da profundidade para onda de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 4) | 139 |
| Figura 116 – Módulo das forças de arraste e sustentação em função da profundidade para onda de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 4) | 139 |
| Figura 117 – Comparação entre os campos de velocidade para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5) | 140 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 118 – Comparação entre a vorticidade para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5) | 141 |
| Figura 119 – Comparação entre força e coeficiente de arraste para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5) | 142 |
| Figura 120 – Comparação entre força e coeficiente de sustentação para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5) | 142 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Comparativo da potência energética mundial das fontes oriundas dos oceanos e suas respectivas densidades de energia (em metros de costa) | 38 |
| Tabela 2 – Países que possuem sistema de aproveitamento energético dos oceanos | 39 |
| Tabela 3 – Potencial energético anual das cinco fontes oriundas dos oceanos | 46 |
| Tabela 4 – Teoria de onda utilizada em função do período e altura de onda e profundidade, utilizando o ábaco da seção 6.1 | 92 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Situação das energias provenientes dos oceanos | 39 |
| Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos modelos de turbulência | 82 |

LISTA DE SIGLAS

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DNS – *Direct Numerical Simulation*

LES – *Large Eddy Simulation*

MDF – Método das Diferenças Finitas

MEF – Método dos Elementos Finitos

MVF – Método dos Volumes Finitos

RANS – Reynolds Average Navier-Stokes

SST – *Shear Stress Transport*

SURGE – *Simple Underwater Renewable Generation of Energy*

VOF – *Volume of Fluid*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\{u,v\}$ – componentes da velocidade nas direções $\{x,y\}$, respectivamente

$\{u_i,u_j\}$ – componentes da velocidade nas direções $\{i,j\}$, respectivamente

$\{x_i,x_j\}$ – componentes da posição nas direções $\{i,j\}$, respectivamente

A – amplitude da onda (m)

A_p – área de ataque (m²)

C – celeridade (m/s)

C_o – celeridade relativa às águas profundas (m/s)

C_d – coeficiente de arrasto(adimensional)

C_l – coeficiente de sustentação (adimensional)

E – potencial energético por unidade de área superficial (J/m²)

f – frequência da onda (Hz)

f^* – frequência do corpo liberar vórtices (Hz)

F_d – força de arrasto (N)

f_{dens} – função densidade

F_l – força de sustentação (N)

g – aceleração da gravidade (m/s²)

H – altura da onda (m)

h – profundidade da água (m)

H_s – média de altura de 1/3 das ondas mais altas (m)

I – momento de inércia do corpo (m⁴)

$I\alpha$ – momento de inércia adicionado (m^4)

K – número de onda (m^{-1})

k – função de resposta do impulso

K_p – coeficiente de giro do corpo (adimensional)

L – comprimento característico (m)

P – pressão (Pa)

P_o – potencial energético por unidade de comprimento (J/m)

PDI_{ap} – pressão dinâmica induzida em águas profundas (Pa)

PDI_{ar} – pressão dinâmica induzida em águas rasas (Pa)

Pk'' – parcela de pressão referente à energia cinética turbulenta (Pa)

P_m – pressão modificada (Pa)

Pot_{Cap} – potência de captação (W)

Re – número de Reynolds (adimensional)

$S(f_{dens}, \theta)$ – função espectral

S – módulo do tensor deformação do escoamento médio

St – número de Strouhal (adimensional)

T – período da onda (s)

t – tempo (s)

T_e – período da onda calculado (s)

T_w – torque proveniente da onda (N.m)

U_x – componente da velocidade da onda na direção horizontal (m/s)

U_y – componente da velocidade da onda na direção vertical (m/s)

V – velocidade de escoamento (m/s)

x – ponto no espaço na direção de propagação da onda (m)

y – distância à parede (m)

z – posição da superfície da água em relação ao fundo do oceano (m)

δ_{ij} – delta de Kronecker

η – variação de superfície da água (m)

Θ – vetor de rotação do corpo

θ – ângulo de rotação do corpo ($^\circ$)

κ – energia cinética turbulenta (J)

Λ – coeficiente de amortecimento (N.s/m)

λ – comprimento de onda (m)

λ_o – comprimento de onda relativo às águas profundas (m)

μ – viscosidade dinâmica (N.s/m²)

ρ – massa específica da água (kg/m³)

σ – frequência angular da onda (rad/s)

ν – viscosidade cinemática da água (m²/s)

ν_{ef} – viscosidade efetiva (m²/s)

ν_t – viscosidade turbulenta (m²/s)

Φ' – flutuação instantânea em torno da média

$\overline{\Phi}$ – valor médio de uma variável

ϕ – fase da onda (rad)

ϕ_{crista} – fase da onda na crista (rad)

ϕ_{vale} – fase da onda no vale (rad)

Ψ – parâmetro que varia em função da relação entre h e λ_0 (adimensional)

ω – energia cinética turbulenta (J)

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 24 |
| 2 DIRETRIZES DA PESQUISA | 27 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA | 27 |
| 2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA | 27 |
| 2.2.1 Objetivo Principal | 27 |
| 2.2.2 Objetivo Secundário | 27 |
| 2.3 HIPÓTESE | 28 |
| 2.4 PRESSUPOSTO | 28 |
| 2.5 PREMISSA | 28 |
| 2.6 DELIMITAÇÕES | 28 |
| 2.7 LIMITAÇÕES | 28 |
| 2.8 DELINEAMENTO | 29 |
| 3 ENERGIA | 32 |
| 3.1 BREVE RESUMO HISTÓRICO DA ENERGIA | 32 |
| 3.2 PRINCIPAIS FORMAS DE ENERGIA | 33 |
| 3.3 A DEMANDA ENERGÉTICA MUNDIAL NO FUTURO | 34 |
| 3.4 AS PRINCIPAIS ENERGIAS RENOVÁVEIS | 35 |
| 3.4.1 Energia biológica | 35 |
| 3.4.2 Energia do hidrogênio | 36 |
| 3.4.3 Energia solar | 36 |
| 3.4.4 Energia eólica | 36 |
| 3.4.5 Energia geotérmica | 36 |
| 3.4.6 Energia hídrica | 37 |
| 4 ENERGIA DE MARES E OCEANOS | 38 |
| 4.1 APROVEITAMENTO DA ENERGIA DOS OCEANOS AO LONGO DOS ANOS NO BRASIL E NO MUNDO | 39 |
| 4.2 ENERGIA DAS MARÉS | 40 |
| 4.3 ENERGIA DAS CORRENTES OCEÂNICAS | 42 |
| 4.3.1 Turbina de eixo horizontal | 42 |
| 4.3.2 Turbina de eixo vertical | 43 |
| 4.3.3 Hidrofólio oscilante | 43 |
| 4.3.4 Turbinas no interior de tubos Venturi | 44 |
| 4.4 ENERGIA DO GRADIENTE DE TEMPERATURA | 45 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5 ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE | 45 |
| 4.6 ENERGIA DAS ONDAS DOS MARES E OCEANOS | 46 |
| 4.6.1 Dispositivos com coluna de água oscilante | 49 |
| 4.6.2 Dispositivos de corpo oscilante | 49 |
| 4.6.2.1 Oyster | 50 |
| 4.6.2.2 <i>Waveroller</i> | 50 |
| 4.6.2.3 AWS (Archimedes <i>Wave Swing</i>) | 51 |
| 4.6.2.4 <i>Wavebob</i> | 51 |
| 4.6.2.5 Pelamis | 52 |
| 4.6.3 Dispositivos de galgamento | 53 |
| 5 O WEVEROLLER | 54 |
| 5.1 A HISTÓRIA DO WEVEROLLER | 54 |
| 5.2 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS | 55 |
| 5.3 INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO | 55 |
| 5.4 HIDRODINÂMICA DO DISPOSITIVO | 56 |
| 5.5 GERAÇÃO DE ENERGIA | 57 |
| 5.6 CONCLUSÕES DE SIMULAÇÕES E EXPERIMENTOS REALIZADOS SOBRE O WEVEROLLER E OUTROS DISPOSITIVOS SIMILARES | 59 |
| 6 DESCRIÇÃO DAS ONDAS DO MAR | 62 |
| 6.1 COMPORTAMENTO DAS ONDAS CONFORME A PROFUNDIDADE | 65 |
| 6.2 CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS | 66 |
| 6.3 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS | 67 |
| 6.4 O POTENCIAL ENERGÉTICO TRANSPORTADO PELAS ONDAS | 68 |
| 7 NOÇÕES DE ESCOAMENTOS SOBRE CORPOS IMERSOS | 70 |
| 7.1 TURBULÊNCIA | 70 |
| 7.2 FORÇA DE ARRASTE | 71 |
| 7.3 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO | 71 |
| 7.4 FORMAÇÃO DE VÓRTICES | 72 |
| 8 NOÇÕES SOBRE MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À MECÂNICA DOS FLUÍDOS | 73 |
| 8.1 TÉCNICAS PARA A SOLUÇÃO NUMÉRICA | 74 |
| 8.2 REPRESENTAÇÃO DA TURBULÊNCIA | 74 |
| 9 METODOLOGIA NUMÉRICA | 77 |
| 9.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DE UM ESCOAMENTO | 77 |
| 9.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES COM MÉDIAS DE REYNOLDS (RANS) .. | 78 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.2.1 A Hipótese de Boussinesq | 80 |
| 9.2.2 O modelo de turbulência $\kappa-\omega$ SST (<i>Shear Stress Transport</i>) | 81 |
| 9.3 TEORIAS DE ONDAS | 85 |
| 9.3.1 Teoria de Stokes de segunda ordem | 85 |
| 9.3.2 Teoria de Stokes de quinta ordem | 86 |
| 9.4 O CÓDIGO OPENFOAM | 88 |
| 9.5 A EXTENSÃO IHFOAM | 90 |
| 10 APLICAÇÕES E RESULTADOS | 91 |
| 10.1 CASOS DE ESTUDO | 91 |
| 10.2 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO | 93 |
| 10.3 DOMÍNIO DE CÁLCULO E REPRESENTAÇÃO TEMPORAL | 93 |
| 10.3.1 Malha de cálculo | 94 |
| 10.3.2 Representação temporal | 96 |
| 10.4 POSIÇÕES ANGULARES ASSUMIDAS PELAS PLACAS | 96 |
| 10.4.1 Placas distanciadas 9 m entre si | 97 |
| 10.4.1.1 Campo de velocidades | 97 |
| 10.4.1.2 Vorticidade | 101 |
| 10.4.1.3 Pressões | 104 |
| 10.4.1.4 Forças e coeficientes de arraste e sustentação | 105 |
| 10.4.2 Placas distanciadas 18 m entre si | 109 |
| 10.5 MUDANÇA NO PERÍODO DA ONDA | 111 |
| 10.5.1 Campo de velocidades | 112 |
| 10.5.2 O efeito de corrente temporária | 117 |
| 10.5.3 Vorticidade | 118 |
| 10.5.4 Forças e coeficientes de arraste e sustentação | 123 |
| 10.6 VARIAÇÃO DA ALTURA DA ONDA | 129 |
| 10.6.1 Campo de velocidades | 129 |
| 10.6.2 Vorticidade | 130 |
| 10.6.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação | 132 |
| 10.7 VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE | 136 |
| 10.7.1 Campo de velocidades | 136 |
| 10.7.2 Vorticidade | 137 |
| 10.7.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação | 138 |
| 10.8 INFLUÊNCIA DA CURVATURA NA EXTREMIDADE DA PLACA | 140 |
| 10.8.1 Campo de velocidades | 140 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.8.2 Vorticidade | 141 |
| 10.8.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação | 141 |
| 11 CONCLUSÕES | 143 |
| 12 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 145 |
| REFERÊNCIAS | 146 |

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial tem buscado fontes renováveis e limpas como alternativa aos combustíveis fósseis. Tal busca é motivada principalmente pela preservação do meio ambiente e pelo uso de fontes energéticas praticamente inesgotáveis como a energia solar, dos ventos, de biomassa (através de plantas e produtos agrícolas), geotérmica (fornecida por fontes localizadas no interior da Terra) e através da proveniente de mares e oceanos. A energia desses últimos pode ser obtida através das ondas e marés, que representa uma alternativa com grande potencial devido à proporção que os mesmos ocupam no globo terrestre e aos baixos riscos ambientais oferecidos pelos dispositivos conversores de energia marítima em eletricidade (SOUZA, 2011, p. 13).

Os mares e oceanos abrigam um grande potencial de geração de eletricidade, em torno de 32.000 TWh/ano (CAMPOS, 2013, p. 8), visto que as ondas são capazes de percorrer grandes distâncias sem perdas significativas de energia após a sua formação em função da força eólica até, finalmente, esbarrarem nas praias ou em maciços rochosos. Salienta-se que, nas regiões próximas às zonas de choque, começam a existir perdas de energia ocasionando, portanto, o emprego de diferentes tipos de dispositivos hidráulicos para a conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica baseados na sua distância com relação à costa.

As ondas do mar são formadas principalmente pela força dos ventos. Quanto maior essa força, mais energia possuem as ondas originadas que, por sua vez, se movem adquirindo determinada velocidade e, depois de certo ponto, passam a se movimentar com vida própria, não dependendo mais da força eólica e sendo capazes de percorrer grandes distâncias sem perdas significativas de energia (CRUZ; SARMENTO, 2004, p. 7). Porém, nas regiões próximas à costa, começam a existir perdas de energia devido a interação rugosa com o fundo e com as margens, sendo assim, mudanças no comportamento do escoamento também ocorrem.

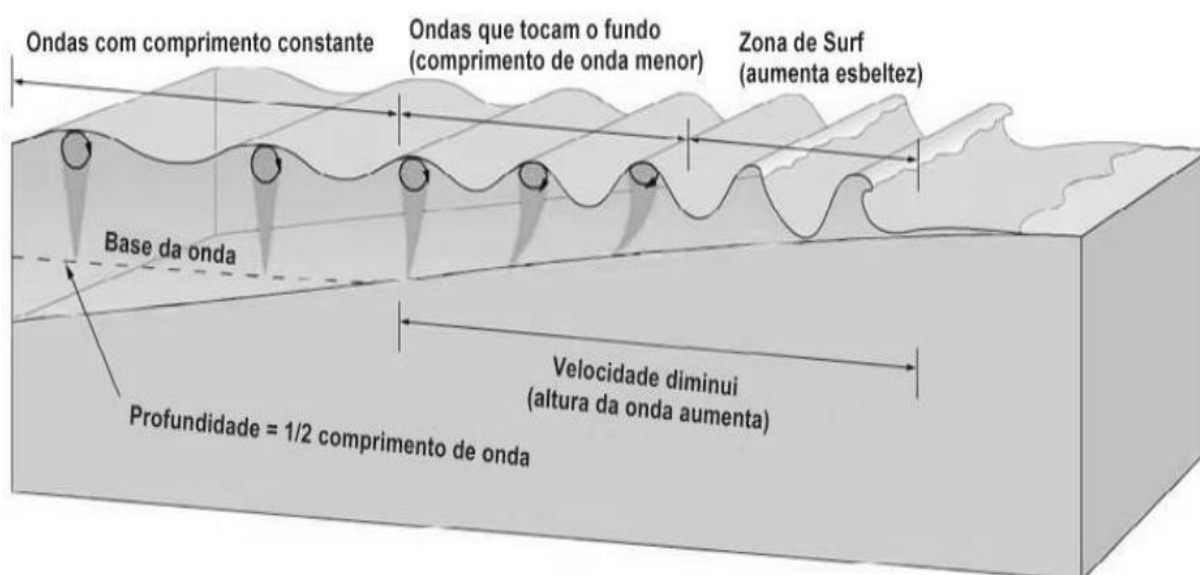
O movimento do escoamento das águas dos mares e oceanos é circular; à medida que os efeitos de rugosidade passam a ser significativos, este torna-se elíptico e, em regiões muito próximas do fundo, resume-se a um simples movimento de vai e vem horizontal (figuras 1 e 2). Isso

motivou o estudo de um tipo peculiar de dispositivo hidráulico conhecido como dispositivo de corpo oscilante.

O *Waveroller* (figura 3), um tipo de dispositivo de corpo oscilante, é formado por uma placa aproximadamente retangular articulada em sua base e conectada a pistões.

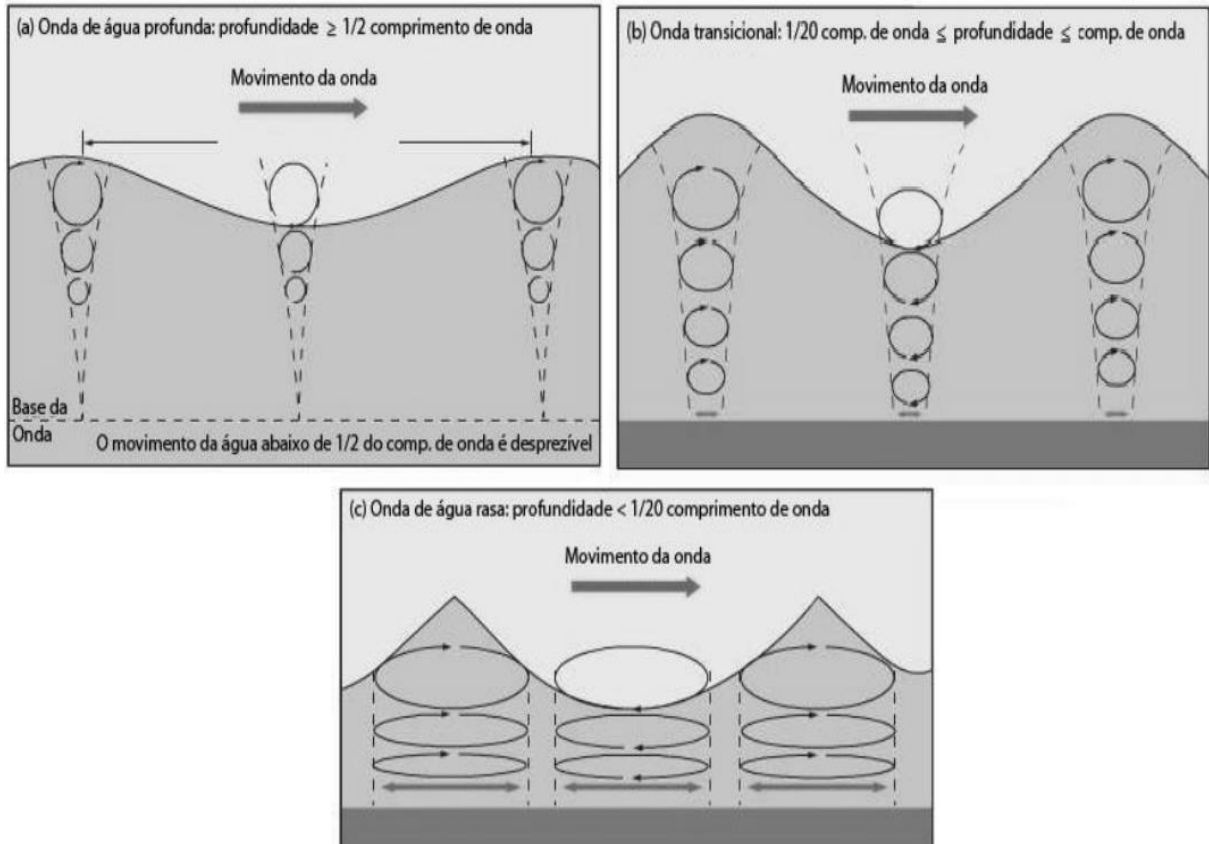
A geração de energia elétrica está associada à força que o escoamento faz contra a placa logo, é interessante avaliar como ele afeta o movimento do *Waveroller*, verificando a altura e período da onda incidente, as forças atuantes e outras propriedades de escoamento envolvidas. Estes parâmetros estão ligados às condições climáticas que, por sua vez, influenciam diretamente no estado de agitação das ondas do mar, dando ao dispositivo capacidade de gerar mais ou menos energia elétrica. O estudo do escoamento que atua sobre a placa também contribuirá para questões de projeto do aparelho, melhoria e aumento da eficiência. Para tal será utilizado simulação numérica para avaliar situações usuais e extremas de escoamento agindo sobre o *Waveroller*. Espera-se, através da simulação, compreender melhor o funcionamento do dispositivo e como ele atua, frente aos diferentes valores de velocidade e tipos de onda, na geração de eletricidade.

Figura 1 – Comprimentos de onda em função da interação rugosa do fundo e das margens



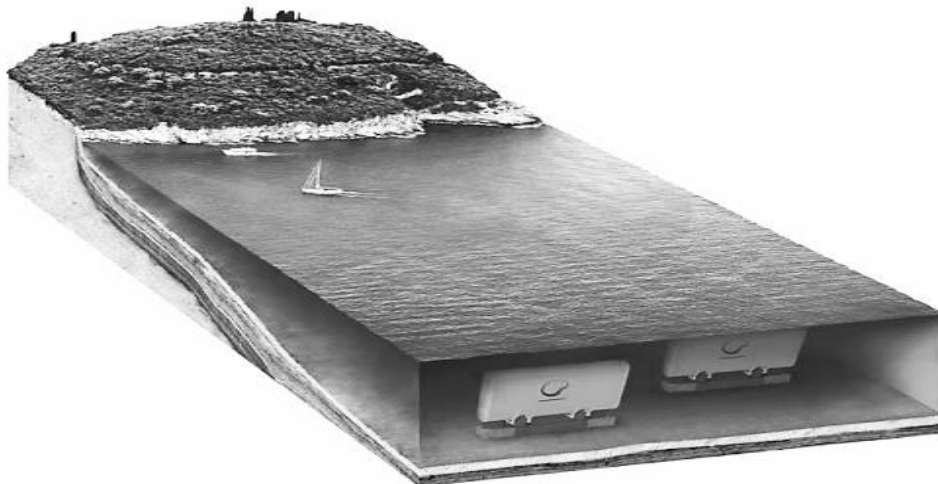
(fonte: FLEMIN, 2012)

Figura 2 – Comportamento das ondas em função da interação rugosa do fundo e das margens



(fonte: FLEMIN, 2012)

Figura 3 – Parque de *Waverollers*



(fonte: MÄKI et al., 2014)

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como a dinâmica do escoamento produzido por ondas do mar e as forças hidrodinâmicas resultantes, para diferentes posições angulares das placas dos dispositivos, profundidades, períodos e alturas de onda atuam sobre os *Waverollers*?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

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

2.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo principal a descrição da dinâmica do escoamento produzido por ondas do mar e das forças hidrodinâmicas resultantes que atuam sobre um módulo composto por três *Waverollers* para diferentes posições angulares das placas desses dispositivos, profundidades, períodos e alturas de onda.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) descrição do movimento das ondas do mar;
- b) definição das características geométricas e dos limites de movimento do dispositivo utilizados na simulação;
- c) definição dos campos de velocidade, pressão e vorticidade, altura e período de onda e profundidade da água aplicados na simulação.

2.3 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese do trabalho que as forças hidrodinâmicas resultantes do escoamento produzido por ondas do mar, que agem sobre as placas dos *Waverollers*, e efeitos turbulentos se acentuam em posições mais inclinadas dos dispositivos e em zonas menos profundas.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o código OpenFOAM representa a dinâmica do escoamento e sua ação sobre as placas dos dispositivos utilizando as equações da continuidade e de Navier-Stokes aliadas às condições iniciais e de contorno adequadas.

2.5 PREMISSA

O trabalho tem a premissa de que os experimentos e simulações já realizadas sobre o assunto não apresentam estudos detalhados sobre o comportamento do escoamento atuante sobre os dispositivos, provocando dúvidas de como o mesmo influencia no movimento dos *Waverollers*, levando a necessidade de pesquisas mais profundas acerca deste tema.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a simulações do escoamento oriundo das ondas do mar agindo sobre as placas dos *Waverollers* para diferentes condições de contorno impostas ao problema e características de onda incidente.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a placa simulada em 2D possui 9 m de altura e 1 m de espessura;
- b) a coluna de água em relação ao fundo varia dependendo da simulação;
- c) a placa permanece estática para a posição determinada;
- d) refinamento da malha definido em função da precisão de detalhes e de cálculo;

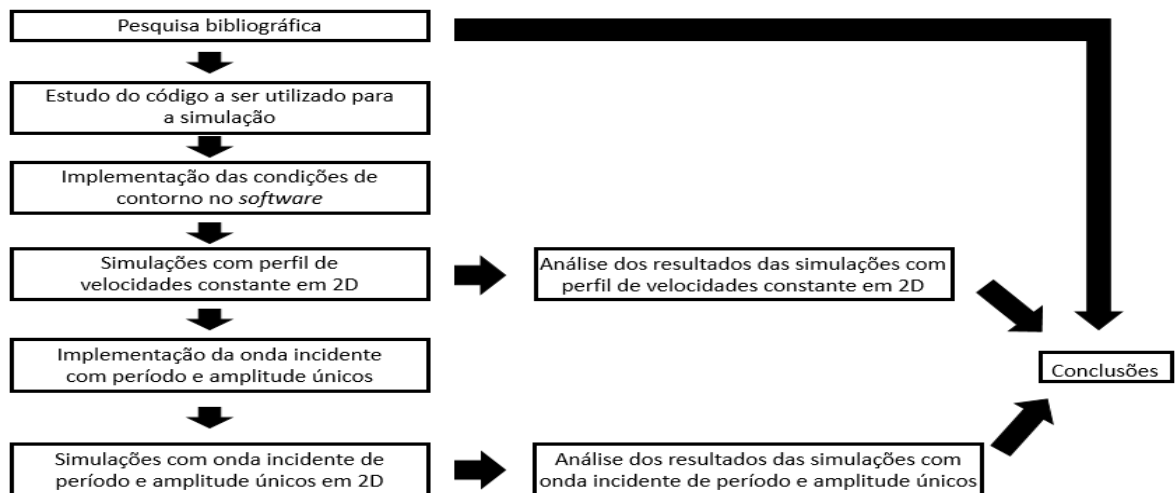
- e) condição de não deslizamento na superfície das placas e no fundo da região simulada;
- f) onda incidente com alturas e períodos que variam dependendo da simulação e 4,712 rad de fase;
- g) efeitos de correntes oceânicas não foram considerados;
- h) as posições angulares de estudo são: 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135° e 150°.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 4 e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) estudo do código a ser utilizado para as simulações;
- c) implementação das condições de contorno no *software*;
- d) simulações com perfil de velocidades de escoamento constante em 2D;
- e) análise dos resultados das simulações com perfil de velocidades de escoamento constante em 2D;
- f) implementação da onda incidente com período e amplitudes únicos;
- g) simulações com onda incidente de período e amplitude únicos em 2D;
- h) análise dos resultados das simulações com onda incidente de período e amplitude únicos em 2D;
- i) conclusões.

Figura 4 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica (capítulos 3 a 8)** teve como objetivo promover conhecimento sobre o assunto abordado por meio da leitura de livros, teses de doutorado, dissertações de mestrado e artigos. Através dela foi possível entender o funcionamento do *Waveroller*, o comportamento das ondas do mar e como o *software* utilizado pôde modelar o problema. Devido a sua importância essa etapa se desenvolveu durante todo o trabalho.

Antes de iniciar a simulação do escoamento atuando sobre o dispositivo gerador de energia foi preciso entender como o código OpenFOAM funcionava. Para tal problema foi necessário realizar um **estudo do código a ser utilizado para a simulação**, tornando possível a correta modelagem do objeto de estudo que deveria representar numericamente um fenômeno real de escoamento.

A fase de **implementação das condições de contorno no *software* (capítulo 10)** foi uma das principais etapas deste trabalho. Aqui foram definidas as dimensões do objeto de estudo, as fronteiras de entrada, saída, superfície e fundo, o tamanho da malha de cálculo, discretização da mesma e os intervalos de tempo da simulação. A definição correta das condições de contorno foi essencial para que a simulação ocorresse sem problemas de divergência.

As **simulações com perfil de velocidades constante em 2D** corresponderam a fase de teste da simulação e operação do *software*, com o objetivo de corrigir os eventuais problemas de divergência do código. Nessa etapa a velocidade de entrada foi considerada uniforme.

Após a correção dos problemas, se efetuou a **análise dos resultados das simulações com perfil de velocidades constante em 2D**, que teve por finalidade apresentar o comportamento do escoamento agindo sobre as placas dos dispositivos para condições mais amenas de funcionamento, porém não representam adequadamente a realidade.

Como as simulações iniciais obtiveram sucesso, foi colocado uma nova condição de contorno que representaria melhor a realidade, essa fase correspondeu a **implementação da onda incidente com período e amplitude únicos**, tornando possível a representação de situações mais reais de escoamento.

A fase posterior, que correspondeu às **simulações com onda incidente de período e amplitude únicos em 2D**, reuniu dados das diversas variáveis de estudo desse trabalho como força

hidrodinâmica resultante, formação de vórtices e velocidades nos entornos da placa para os diferentes tipos de ondas definidas na entrada do domínio.

Realizando a **análise dos resultados das simulações com onda incidente de período e amplitude únicos em 2D (capítulo 10)**, da formação de vórtices e do comportamento das velocidades nos entornos do dispositivo, foi possível identificar o comportamento do escoamento atuante sobre as placas dos *Waverollers*, bem como as instabilidades por ele ocasionadas. Nesta fase foram apresentados os valores das propriedades evidenciadas anteriormente para diversas posições das placas, fornecendo os resultados necessários para analisar as características hidráulicas e de escoamento influentes no movimento dos dispositivos.

O presente trabalho foi finalizado com **conclusões (capítulo 11)** acerca do funcionamento dos dispositivos hidráulicos geradores de energia elétrica e dos parâmetros de escoamento mais significativos no movimento dos mesmos.

3 ENERGIA

Neste capítulo será abordado um breve histórico da utilização e evolução da energia, definição dos seus principais tipos, estimativa da matriz energética renovável e não renovável mundial para um futuro próximo e apresentação dos principais tipos de energias renováveis utilizadas pelo mundo.

3.1 BREVE RESUMO HISTÓRICO DA ENERGIA

Desde os primórdios dos tempos, o homem utiliza a energia para atender as condições básicas de sobrevivência como caçar (energia muscular), cozinhar alimentos (energia térmica) e promover iluminação (energia eletromagnética). Um pouco depois, passou-se a utilizar a energia das águas para o movimento dos moinhos e a dos ventos para mover as embarcações nas grandes navegações. O grande impulso no uso da energia ocorreu com a Revolução Industrial no século XVIII, com a invenção da máquina a vapor. No século XIX, destacam-se os experimentos de Michael Faraday e James Clerk Maxwell que contribuíram para a utilização da energia elétrica e eletromagnética. O século seguinte (XX) é marcado por uma série de fatos que revolucionaram a matriz energética mundial, lançando o petróleo e o carvão como as principais fontes de energia não renováveis, dentre esses fatos está a produção em série proposta por Henry Ford (SILVA, 2012, p. 18-19).

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) foi um importante marco no uso da energia atômica e motivou a descoberta e consequente utilização do gás natural como alternativa energética, além disso, o petróleo, que era a base da matriz energética da época, é reconhecido como uma fonte de energia esgotável, favorecendo a busca por fontes alternativas, limpas e renováveis de energia (SILVA, 2012, p. 1).

Atualmente, o uso dos combustíveis fósseis é ainda muito utilizado, porém este é acompanhado por uma série de problemas, como a degradação do meio ambiente e por se tratar de uma fonte limitada de energia. Está em evidência a busca, o estudo e utilização de outras fontes de energia que sejam limpas e inesgotáveis, como a energia do sol, do vento e dos mares.

3.2 PRINCIPAIS FORMAS DE ENERGIA

A energia como um todo não pode ser criada nem destruída, pode somente ser transformada. Costuma-se dividi-la em dois tipos: energias primárias (obtidas diretamente da natureza) e secundárias (transformadas a partir de outras fontes de energia).

De acordo com Silva (2012, p. 21-22), podem ser definidos seis grupos principais diferentes de energia:

A energia térmica está associada ao calor de um corpo. Sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois corpos a energia transmite-se do corpo que tiver a temperatura mais alta para aquele ou aqueles que a têm mais baixa. A energia geotérmica é fruto desta forma de energia.

A energia mecânica pode ser definida como a forma de energia que pode ser convertida diretamente em trabalho mecânico. As energias cinéticas e potencial são as formas conhecidas da energia mecânica. Tanto a energia eólica como a energia hidráulica são resultantes deste tipo de manifestação de energia.

A energia radiante manifesta-se sobre a forma de radiação e transmite-se através de ondas eletromagnéticas. Esta energia, ao contrário das outras, tem a particularidade de ser a única que se propaga no vazio, i.e. não é necessário um meio para concretizar a sua transferência. Quando a radiação é visível é comum classificar-se como energia luminosa. Esta energia compreende a energia solar.

A energia química é a energia interna associada às ligações entre os átomos de uma molécula. Durante uma reação química, como no processo de combustão, algumas ligações químicas são destruídas enquanto outras são formadas. Como resultado, a energia interna é alterada. Desde a digestão dos alimentos no corpo humano, passando pela fotossíntese realizada pelas plantas, até às imensas aplicações resultantes de transformação químicas dos recursos naturais, todo o tipo de reações químicas existentes comportam a energia química.

A energia nuclear é a energia libertada durante a fusão ou fissão de um núcleo atômico. Devido ao fato das ligações no núcleo serem muito mais fortes que as ligações entre os elétrons e o núcleo, a quantidade de energia que pode ser obtida através destes processos é muito superior àquela que pode ser obtida através de processos químicos, que envolvem apenas as regiões externas dos núcleos. Na fissão, um átomo de um elemento é dividido, produzindo dois átomos de menores dimensões de elementos diferentes. Enquanto na fusão, dois átomos de pequenas dimensões combinam-se originando um átomo de maiores dimensões, constituindo um elemento diferente. A energia do sol decorre de um processo de fusão em que os átomos de hidrogénio fundem-se para formar átomos de hélio, gerando enormes quantidades de radiação solar.

A energia elétrica é consequência da energia contida numa corrente eléctrica. A matéria que constitui os corpos é constituída por partículas, denominadas de átomos. Estes, por sua vez, são compostos pelos prótons e nêutrons, que formam o núcleo, e ainda por os elétrons que o circundam e contêm carga eléctrica. Consoante a sua natureza, um átomo pode ganhar ou perder elétrons para os átomos vizinhos. O fluxo de elétrons que ocorre entre os átomos é denominado por corrente eléctrica. Quanto mais elétrons se movimentarem no mesmo espaço, maior a intensidade de corrente. Tratando-se de uma fonte de energia secundária, a energia eléctrica resulta de um ou

mais processos de transformação das fontes primárias, como o sol, os combustíveis fósseis, ou a água.

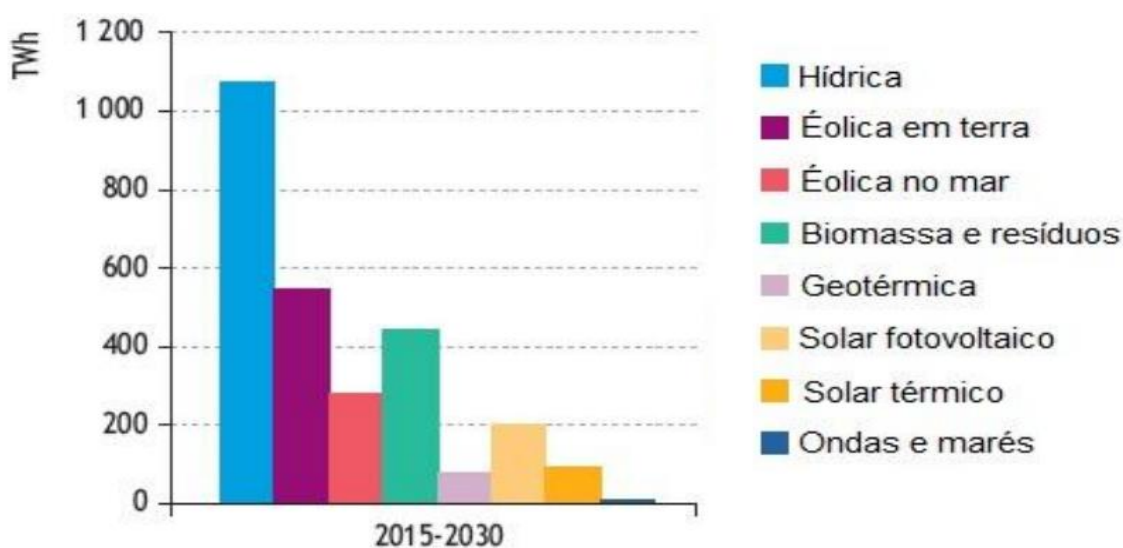
3.3 A DEMANDA ENERGÉTICA MUNDIAL NO FUTURO

Segundo a *International Energy Agency* (2014, p. 1-2), a demanda do trio de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) irá crescer até o ano de 2040. É de se esperar que o preço dessas fontes energéticas e a emissão de dióxido de carbono aumentem consideravelmente, ocasionando maiores impactos ambientais como o aumento de 3,6 °C da temperatura global, o que representa um risco muito grande para o derretimento de geleiras e alteração do bioma terrestre.

A *International Energy Agency* (2014, p. 4) também relata que a busca por fontes alternativas de energia (energias renováveis) irá crescer, motivando a economia mundial a investir em estudos e projetos dentro dessa área.

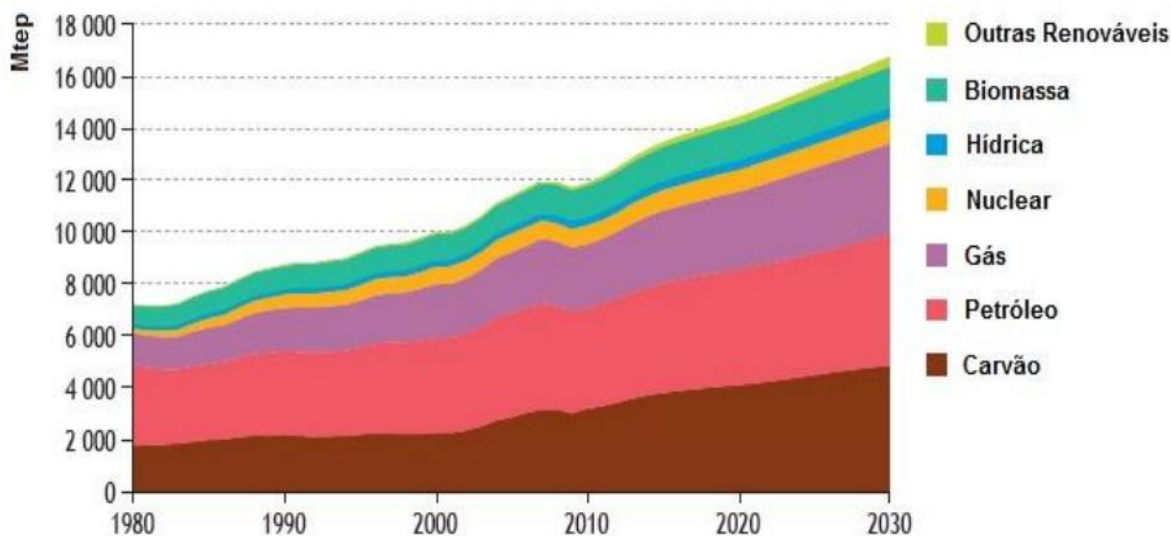
As figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a produção de energia elétrica através de fontes renováveis e o consumo, em milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), de energia a nível mundial, por tipo de fonte energética até o ano de 2030.

Figura 5 – Produção de energia elétrica, a nível mundial, através de fontes renováveis até o ano de 2030



(fonte: adaptado de SILVA, 2012)

Figura 6 – Consumo de energia, a nível mundial, por tipo de fonte energética, até o ano de 2030



(fonte: SILVA, 2012)

Ao analisar as figuras, fica evidente que a utilização da energia hídrica como fonte renovável terá um crescimento significativo. Dentre as fontes energéticas renováveis de origem hídrica destaca-se a energia proveniente de mares e oceanos, que será abordada nos próximos capítulos.

3.4 AS PRINCIPAIS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Nos próximos itens, serão apresentados os principais tipos de energias limpas e renováveis que se encontram em fase de ascensão e futuramente irão abranger grande parte da matriz energética mundial.

3.4.1 Energia biológica

São energias provenientes de microrganismos ou da biomassa. A biomassa é formada por matéria orgânica, ou seja, é um material rico em carbono. Ela é obtida, principalmente, através de plantas, ou através de nutrientes, excrementos e resíduos orgânicos domiciliares (MORAES JUNIOR, 2012, p. 21).

3.4.2 Energia do hidrogênio

Gera eletricidade e é fruto da combinação do nitrogênio com o oxigênio, pode ser obtida de diversas fontes como o petróleo e a energia do Sol. Sua queima não é poluente, não agredindo o ambiente, e pode ser considerada relativamente barata (SOUZA, 2011, p. 19).

3.4.3 Energia solar

Segundo Souza (2011, p. 19), o Sol fornece uma quantidade incrível de energia que, infelizmente, ainda não é bem aproveitada, estima-se que seu potencial energético supera os valores de energia produzidos pelas hidrelétricas e termoelétricas. Sua energia é obtida através do aquecimento (fruto da energia térmica dos raios solares) ou pela forma fotovoltaica (efeito da onda eletromagnética). Um exemplo do emprego dessa fonte de energia encontra-se no aquecimento de água nas residências através de placas (localizadas no telhado das mesmas) que captam a energia solar.

3.4.4 Energia eólica

O vento pode atingir grandes velocidades e com isso fornece uma boa quantidade de energia mecânica para transformação. Atualmente são utilizados os cata-ventos (turbinas) que convertem a energia mecânica em energia elétrica, estes são agrupados em grupos formando os parques eólicos, que normalmente são construídos em regiões suscetíveis a grandes rajadas de vento. Este tipo de energia é conhecido desde os tempos mais antigos como no período das grandes navegações e no seu uso para movimentar os moinhos (SOUZA, 2011, p. 21).

3.4.5 Energia geotérmica

A energia geotérmica nada mais é do que a energia proveniente do interior do globo terrestre, as regiões de aproveitamento da mesma compreendem as regiões vulcânicas, áreas de concentração de placas litosféricas e gêiseres. Os países que mais utilizam essa energia são os EUA, Japão e Itália (SOUZA, 2011, p. 22).

3.4.6 Energia hídrica

A energia hídrica é atualmente a energia renovável mais utilizada e promissora do futuro. O contexto hídrico abrange desde a energia proveniente de rios até a energia encontrada em mares e oceanos.

As hidrelétricas consistem basicamente na construção de um barramento que ocasiona uma grande coluna de água, seguido de tubulações que fazem a água passar por uma turbina, que converte a energia hidráulica em energia mecânica e, logo em seguida, a última é transformada em energia elétrica.

Souza (2011, p. 20) diz que os mares e oceanos podem fornecer energia através das ondas, marés, gradientes horizontais de salinidade e gradientes verticais de temperatura. A forma de obtenção de energia desse tipo mais utilizada é através do movimento diário das marés (por meio de usinas de barragem ou turbinas aquáticas). Portugal, França, Escócia e Japão são os países que mais utilizam os mares e oceanos como fontes de energia.

Um estudo sobre a energia dos mares e oceanos será feito com maiores detalhes no próximo capítulo.

4 ENERGIA DE MARES E OCEANOS

Sabe-se que a o globo terrestre possui uma quantidade imensa de água salgada que funciona como um grande reservatório da energia proveniente do Sol, que é tida como a fonte primordial de outras energias, dando origem a gradientes térmicos, correntes de marés, ventos e ondas (MORAIS, 2009, p. 23).

Este capítulo irá apresentar as fontes de energia renováveis oriundas dos mares e oceanos, começando com uma abordagem histórica e contextualização do assunto na atualidade mundial e brasileira, seguido da descrição de cada uma das principais formas de energia desse tipo e apresentação dos principais dispositivos hidráulicos geradores de energia elétrica para cada caso.

Existem basicamente cinco formas de energias marítimas e oceânicas que serão apresentadas na sequência. São elas, as energias:

- a) das marés;
- b) das correntes;
- c) do gradiente de temperatura;
- d) do gradiente de salinidade;
- e) das ondas.

A tabela 1, o quadro 1 e a tabela 2 apresentam, respectivamente, uma comparação entre as várias formas energia proveniente dos oceanos em termos de potência, a situação em que se encontram as mesmas e quais países possuem sistemas de aproveitamento energético desse tipo de fonte.

Tabela 1 – Comparativo da potência energética mundial de fontes oriundas dos oceanos e sua respectiva densidade de energia (em metros de costa)

| Recurso | Potência (TW) | Densidade de Energia (m) |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| Correntes Oceânicas | 0,05 | 0,05 |
| Ondas | 2,7 | 1,5 |
| Marés | 0,03 | 10 |
| Gradiente Térmico | 2,0 | 210 |
| Gradiente Salino | 2,6 | 240 |

(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

Quadro 1 – Situação das energias provenientes dos oceanos

| Forma de energia | Produto energético | Aplicação |
|--------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| Energia das marés | Eletricidade | Aplicado; relativamente caro |
| Energia das ondas | Eletricidade | Pesquisa, desenvolvimento e demonstração |
| Energia das correntes | Eletricidade | Pesquisa e desenvolvimento |
| Energia térmica oceânica | Calor, eletricidade | Pesquisa, desenvolvimento e demonstração |
| Energia osmótica | Eletricidade | Opção teórica |

(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

Tabela 2 – Países que possuem sistema de aproveitamento energético dos oceanos

| País | Recurso | Capacidade [kW] | |
|---------------|----------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| | | Instalada | Projetos Aprovados |
| Bélgica | Energia das Ondas | - | 20000 |
| Canadá | Correntes de Maré e Oceânicas (e correntes de rio) | 250 | 5500 |
| | Energia de Maré | 20000 | - |
| China | Energia das Ondas | 190 | 2400 |
| | Correntes de Maré e Oceânicas | 110 | 3700 |
| | Energia de Maré | 3900 | 200 |
| Dinamarca | Energia das Ondas | 250 | - |
| Nova Zelândia | Energia das Ondas | 2 x 20 (1 em Oregon) | 220 (1 projeto) |
| | Energia de Maré | - | 21000 (2 projetos) |
| Holanda | Correntes de Maré e Oceânicas | 100 | 5000 |
| | Gradiente de Salinidade | 10 | 50 |
| Noruega | Gradiente de Salinidade | 4 | - |
| Portugal | Energia das Ondas | 300 + 400 | - |
| | Energia das Ondas | - | 500 |
| Coreia do Sul | Correntes de Maré e Oceânicas | 1 | - |
| | Energia de Maré | 254 | - |
| Espanha | Energia das Ondas | 296 | 140 |
| Suécia | Energia das Ondas | 150 | 10000 |
| | Correntes de Maré e Oceânicas | - | 7.5 |
| Inglaterra | Energia das Ondas | 7340 | Vários dispositivos em teste |
| | Correntes de Maré e Oceânicas | 6700 | Vários dispositivos em teste |

(fonte: CAMPOS, 2013)

4.1 APROVEITAMENTO DA ENERGIA DOS OCEANOS AO LONGO DOS ANOS NO BRASIL E NO MUNDO

De acordo com a CEMIG (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012, p. 71-72):

A primeira patente de aproveitamento da energia dos oceanos foi registrada em 1799, mas apenas depois da Segunda Guerra Mundial ela voltou a ser pesquisada com mais afinco. Na década de 1960, foram conduzidos estudos no Japão e, após a primeira crise do petróleo, em 1973, o Reino Unido começou seu próprio programa de pesquisa. A falta de recursos nos anos 1980 retardou o desenvolvimento das tecnologias, mas elas voltaram a ter atenção nos anos 1990. Atualmente, há muitos

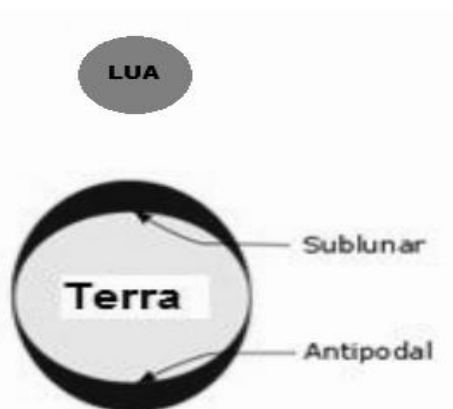
dispositivos concorrentes para o aproveitamento da energia dos oceanos, mas nenhum provou ainda ser mais viável que o outro. O Reino Unido, a Holanda e os países nórdicos são os que mais investem em energia dos oceanos, graças às condições favoráveis de suas costas. O maior empreendimento a usar a energia dos oceanos de forma viável, hoje, é a barragem de La Rance, na França. Essa barragem foi construída em 1966, gera 240 MW de eletricidade e pertence à companhia *Électricité de France* (EDF).

No Brasil, não há estratégia ou legislação em energia oceânica por parte do governo. Toda a pesquisa se concentra em universidades e em algumas empresas, como a Petrobrás. Em termos de pesquisa e desenvolvimento, o Brasil tem um dispositivo que converte energia das ondas e está em fase de testes, e a Petrobrás desenvolve um atlas de energia das ondas da costa brasileira. Em termos de demonstração, há o projeto Pecém, no Ceará, uma usina de energia das ondas que começou a ser construída em 2009. O projeto pertence à Petrobrás, ao Governo do Ceará e ao COPPE/UFRJ. A tecnologia é de bombeamento hidráulico aliado a turbinas Pelton, e a capacidade será de 100 kW. Outro projeto é o de Fernando de Noronha, do COPPE/UFRJ, do Governo de Pernambuco e da Petrobrás, com a mesma tecnologia e capacidade de 250 kW, para a dessalinização de água.

4.2 ENERGIA DAS MARÉS

Conforme a CEMIG (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012, p. 69), as marés são influenciadas diretamente pela ação gravitacional que o Sol e a Lua exercem sobre a Terra. Existem quatro variações de marés ao longo de um dia, sendo que o intervalo entre duas marés altas é de doze horas. Essas últimas ocorrem devido a posição que a Lua se encontra em relação à Terra; ou se está mais próxima da massa líquida do planeta (sublunar), ou se está mais próxima da massa rochosa do mesmo (antipodal). A figura 7 apresenta essas situações e a figura 8 indica quais as regiões mais apropriadas para se aproveitar a energia das marés.

Figura 7 – Influência da Lua na variação das marés



(fonte: adaptado de COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

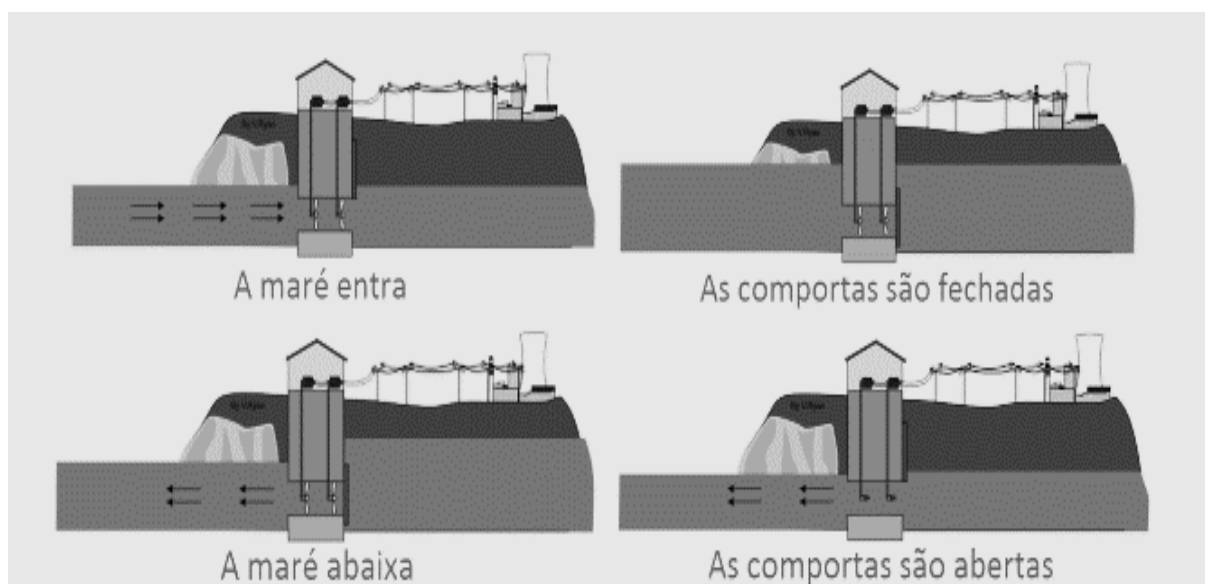
Figura 8 – Regiões apropriadas para aproveitamento da energia das marés



(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

As formas de se extrair esse tipo de energia são através da construção de barragens que utilizam a oscilação das marés para movimentar geradores e pelas correntes ocasionadas pelas mesmas, que com o uso de turbinas é capaz de transformar essa energia em energia elétrica. A figura 9 procura explicar a geração de energia elétrica através da construção destas barragens.

Figura 9 – Funcionamento de uma barragem de maré



(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

4.3 ENERGIA DAS CORRENTES OCEÂNICAS

Os ventos são consequência direta do aquecimento desigual do globo terrestre, gerando diferentes sistemas eólicos, que aliados ao aquecimento distinto das águas por parte do Sol dão origem as correntes oceânicas.

A forma de se aproveitar esse tipo de energia consiste basicamente no emprego de turbinas imersas que se movimentam com essas correntes, gerando energia elétrica.

A seguir são apresentados os principais dispositivos empregados que convertem as energias de correntes oceânicas e marítimas em energia elétrica.

4.3.1 Turbina de eixo horizontal

É uma turbina colocada de tal forma que o eixo do rotor fique paralelo ao escoamento. Podem ter duas ou três pás, e a geometria dessas pode variar para otimizar o desempenho na geração de eletricidade. Vale salientar que esses tipos de turbina são menores que as eólicas e suas lâminas são reversíveis a 180° para se adaptarem às variações de maré e de escoamento (PÁSCOA, 2014, p. 31).

A figura 10 mostra uma turbina de eixo horizontal em funcionamento.

Figura 10 – Turbina de eixo horizontal



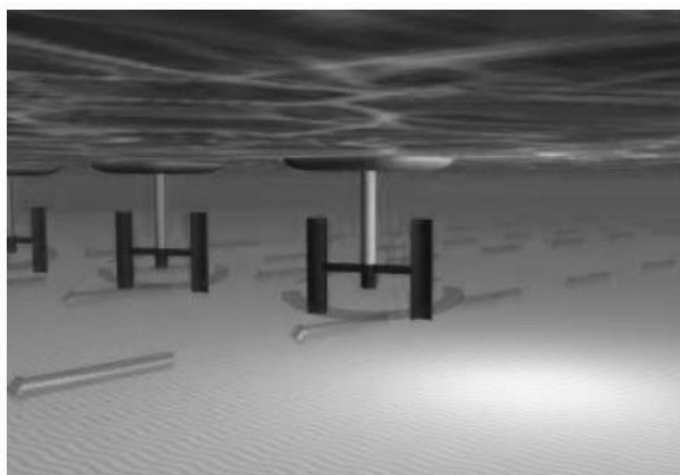
(fonte: PÁSCOA, 2014)

4.3.2 Turbina de eixo vertical

Muito semelhante a anterior em termos de funcionamento, porem o eixo do rotor encontra-se perpendicular ao fluxo. Podem ser de passo fixo ou variável, sendo que a primeira necessita de um motor de arranque automático para que comece a funcionar (PÁSCOA, 2014, p. 32).

Na figura 11 é apresentado um modelo de turbina de eixo vertical.

Figura 11 – Turbina de eixo vertical



(fonte: PÁSCOA, 2014)

4.3.3 Hidrofólio oscilante

Segundo Páscoa (2014, p. 33), este tipo de dispositivo está baseado no princípio de oscilação hidrodinâmica, associado às forças de arraste e sustentação.

A corrente marítima atua sobre as asas do dispositivo gerando movimentos ascendentes e descendentes, estes movimentos impulsionam um pistão interno que alimenta um gerador, produzindo energia elétrica.

Esse aparelho é formado por hidroavião, braço móvel, estrutura de apoio e cilindros hidráulicos como é mostrado na figura 12.

Figura 12 – Hidrofólio oscilante

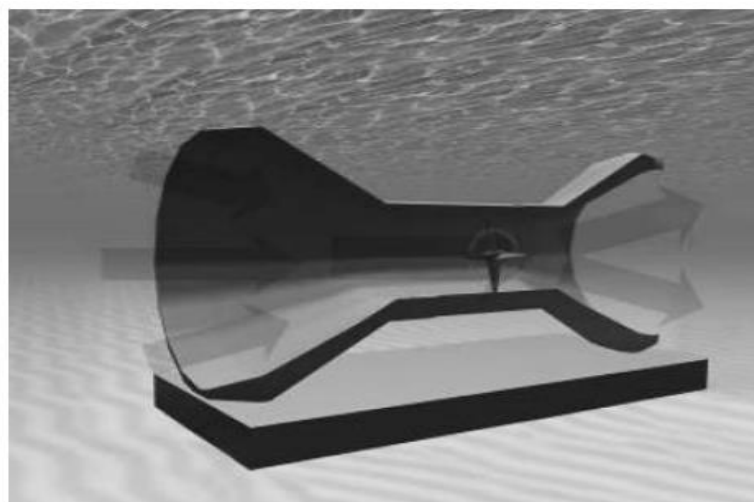


(fonte: SOARES, 2007)

4.3.4 Turbinas no interior de tubos Venturi

O tubo Venturi consiste em um duto com diminuição de sua seção transversal. Essa ocasiona uma concentração de escoamento das águas que, por sua vez, pode acionar diretamente uma turbina ou provocar uma diferença de pressão que movimentará uma turbina por correntes de ar em um sistema secundário (FISHER, 2014, p. 22). A figura 13 mostra um dispositivo desse tipo.

Figura 13 – Sistema que utiliza tubo Venturi

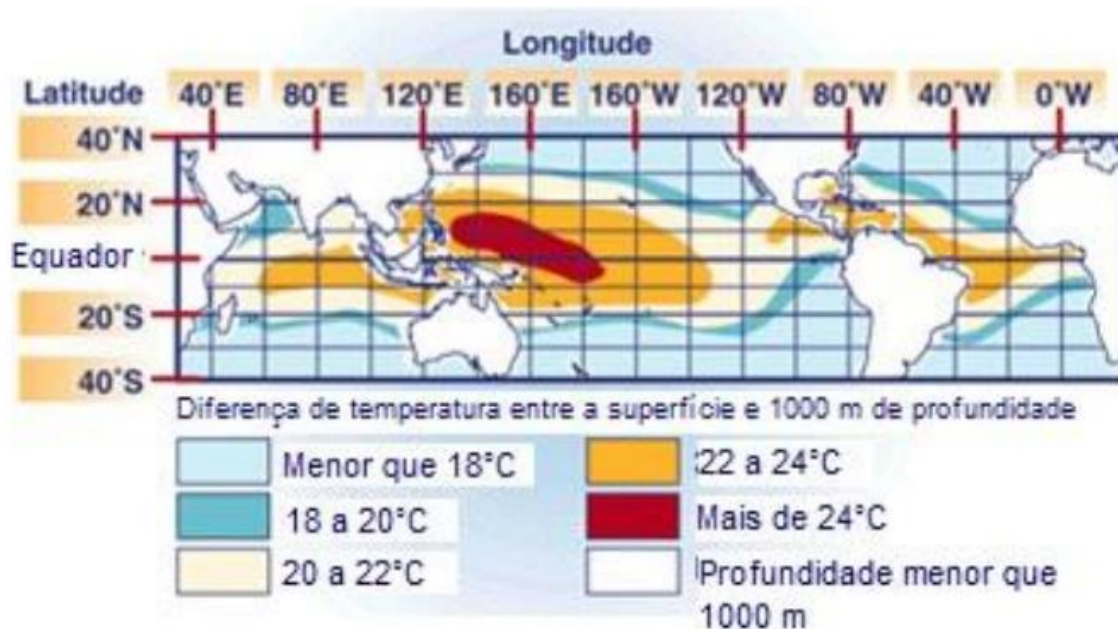


(fonte: PÁSCOA, 2014)

4.4 ENERGIA DO GRADIENTE DE TEMPERATURA

Como já foi salientado, o Sol incide de forma diferente nas diversas regiões do globo terrestre ocasionando distintas temperaturas das águas. Conforme a CEMIG (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012, p. 70), em algumas regiões para um quilômetro de profundidade há um aumento de até 20 °C em relação a superfície. Regiões favoráveis a exploração desse tipo de energia estão apresentadas na figura 14, onde se encontram os maiores gradientes.

Figura 14 – Regiões favoráveis ao aproveitamento energético do gradiente de temperatura dos oceanos



(fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012)

4.5 ENERGIA DO GRADIENTE DE SALINIDADE

Esse tipo de energia ocorre nas regiões de encontro de rios com mares, onde as águas doces, de menor concentração tendem a ir para o meio de maior concentração (mar) através do princípio da osmose. A energia é aproveitada através da construção de usinas que utilizam uma membrana sensível a variação de salinidade (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012, p. 70).

4.6 ENERGIA DAS ONDAS DOS MARES E OCEANOS

As ondas do mar são criadas a partir do derretimento das geleiras e calotas polares, dos movimentos de terra como terremotos e maremotos e das forças dos ventos, que é a forma principal de formação das ondas desse tipo.

Segundo Cruz e Sarmiento (2004, p. 7), o aquecimento não homogêneo das regiões terrestres pelo Sol ocasiona diferenças de pressões, que aliadas ao movimento da Terra dão origem aos ventos. Esses exercem tensão de cisalhamento sobre a superfície das águas transmitindo energia cinética de seu movimento e dando origem as ondas.

Em profundidades superiores a 100 m (regiões conhecidas como águas profundas) a onda é capaz de percorrer grandes distâncias sem perdas significativas de energia. As perdas passam a ocorrer à medida que a profundidade diminui, aumentando a interação rugosa com o fundo e provocando ondas mais esbeltas e com menores comprimentos de onda (FRAGA, 2011, p. 11).

A coluna de água fornece energia potencial que, somada a energia cinética de origem eólica transferida, faz do oceano um grande reservatório energético e das ondas a fonte mais promissora no âmbito de energia proveniente dos oceanos como é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Potencial energético anual das cinco fontes oriundas dos oceanos

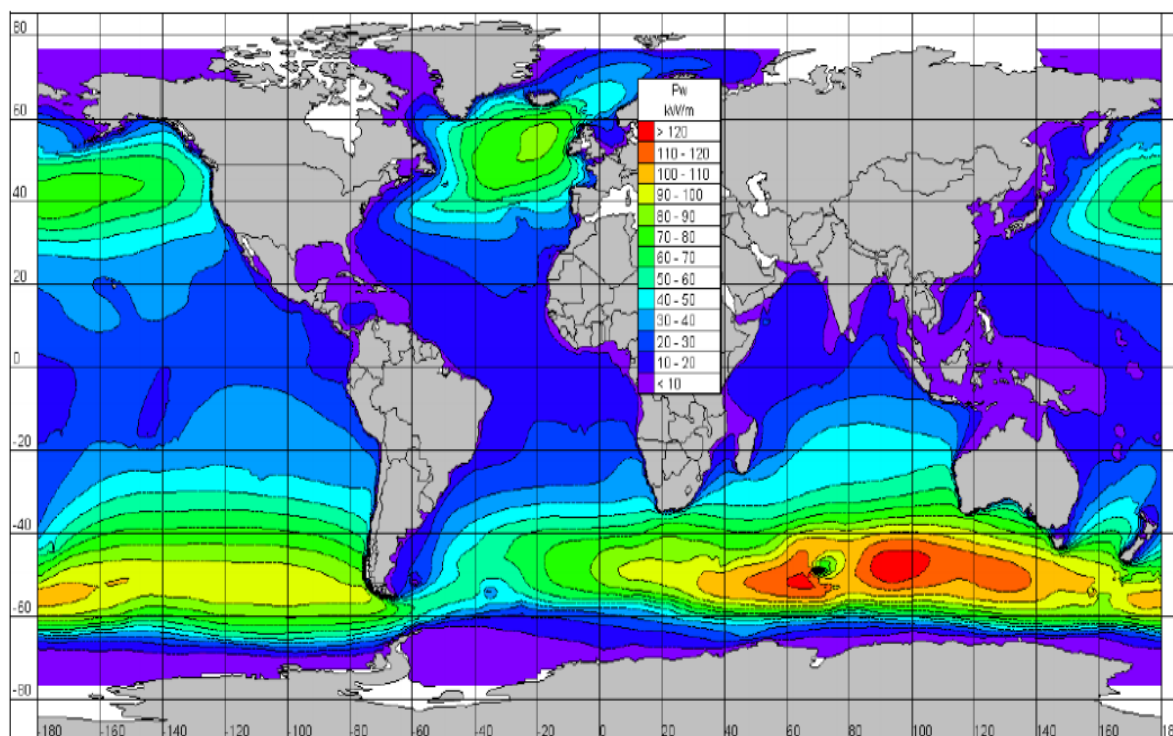
| Tipo de Energia | Energia teórica anual |
|---------------------------------|------------------------------|
| Gradiente de Temperatura | 10000 TWh/ano |
| Gradiente de Salinidade | 2000 TWh/ano |
| Correntes marítimas | +800 TWh/ano |
| Marés | +300 TWh/ano |
| Ondas | 8000 a 80000 TWh/ano |

(fonte: MORAIS, 2009)

Morais (2009, p. 26) lança o Oeste da Europa, América do Norte, América do Sul, Sul da África, Austrália e Nova Zelândia como as regiões mais propícias a utilizar meios de aproveitamento energético das ondas do mar.

Um mapa com as distribuições anuais em KW/m de potência energética das ondas do mar é mostrado na figura 15.

Figura 15 – Potencial energético anual das ondas do mar



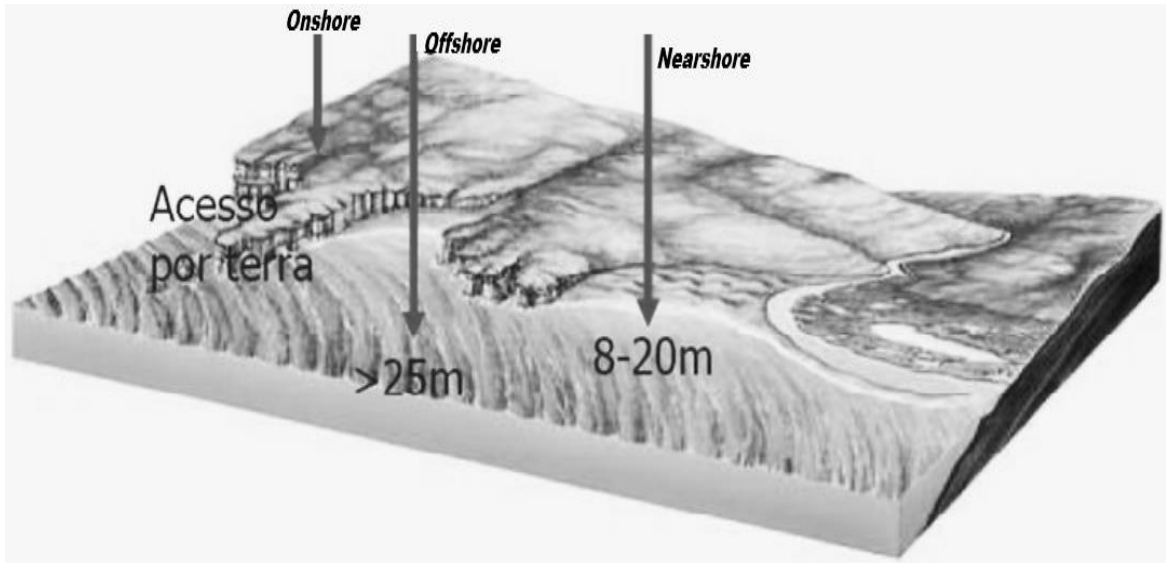
(fonte: MORAIS, 2009)

Portugal é tido como o principal país a desenvolver dispositivos que transformam a energia das ondas em energia elétrica (CRUZ; SARMENTO, 2004, p. 8).

De acordo com Fraga (2011, p. 12-14), os dispositivos hidráulicos que convertem a energia das ondas do mar em eletricidade são classificados, primeiramente, em função da sua profundidade e distância em relação a costa (figura 16):

- a) **onshore (shoreline ou costeiros)** – dispositivos localizados sobre a costa ou muito próximas dela, apresentam de 25% a 50% de aproveitamento energético;
- b) **nearshore (próximos da costa)** – dispositivos que se encontram em profundidades entre 15 m e 25 m, apresentam médio aproveitamento energético;
- c) **offshore (afastados da costa)** – dispositivos que estão em alto mar em profundidades superiores a 25 m, são flutuantes em sua grande maioria e possuem o maior potencial de geração de energia elétrica, pois as interações rugosas com o fundo e com as margens são pouco significativas nesta região.

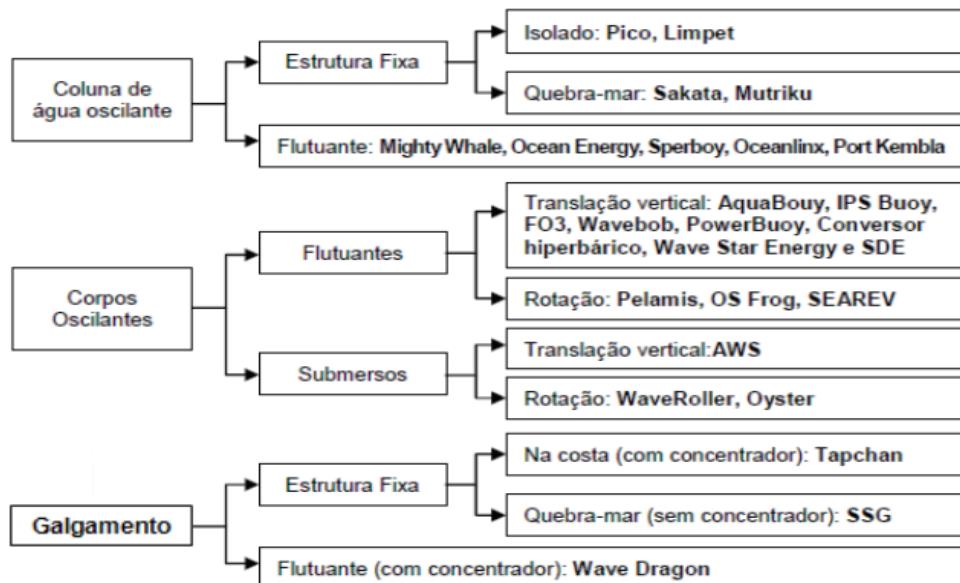
Figura 16 – Classificação das regiões energéticas conforme a profundidade e proximidade com a costa



(fonte: adaptado de SOUZA, 2011)

Cruz e Sarmiento (2004, p. 15) divide os dispositivos em três grupos básicos: dispositivos com coluna de água oscilante, de corpo oscilante e de galgamento. A figura 17 apresenta os três grupos principais, bem como algum dos dispositivos pertencentes aos mesmos.

Figura 17 – Principais dispositivos geradores conforme o grupo de classificação



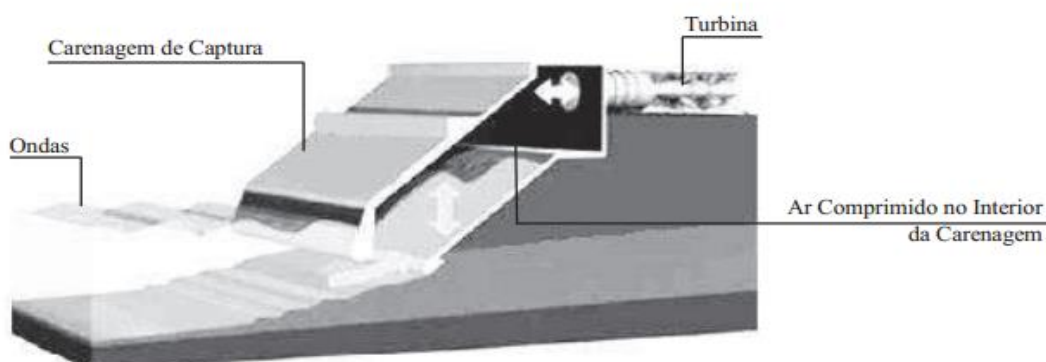
(fonte: CAMPOS, 2013)

4.6.1 Dispositivos com coluna de água oscilante

Estes dispositivos são formados por estruturas ocas que possuem uma abertura inferior por onde a água do mar ingressa. Ao entrar na câmara interna, a água tende a comprimir o ar existente na mesma e, ao sair, tende a expandí-lo. Em ambas situações o movimento do ar impulsiona uma turbina bidirecional (possui o mesmo sentido de rotação, não dependendo do sentido do escoamento) que gera energia elétrica (ANDRÉ, 2010, p. 11).

O Limpet, que utiliza esse princípio, é um dispositivo *onshore* constituído de um coletor que capta as ondas do mar, uma turbina e um gerador. Seu funcionamento depende exclusivamente da entrada de água oriunda das ondas em seu interior (CAMPOS, 2013, p.14). A figura 18 ilustra o Limpet.

Figura 18 – Detalhamento do Limpet



(fonte: CAMPOS, 2013)

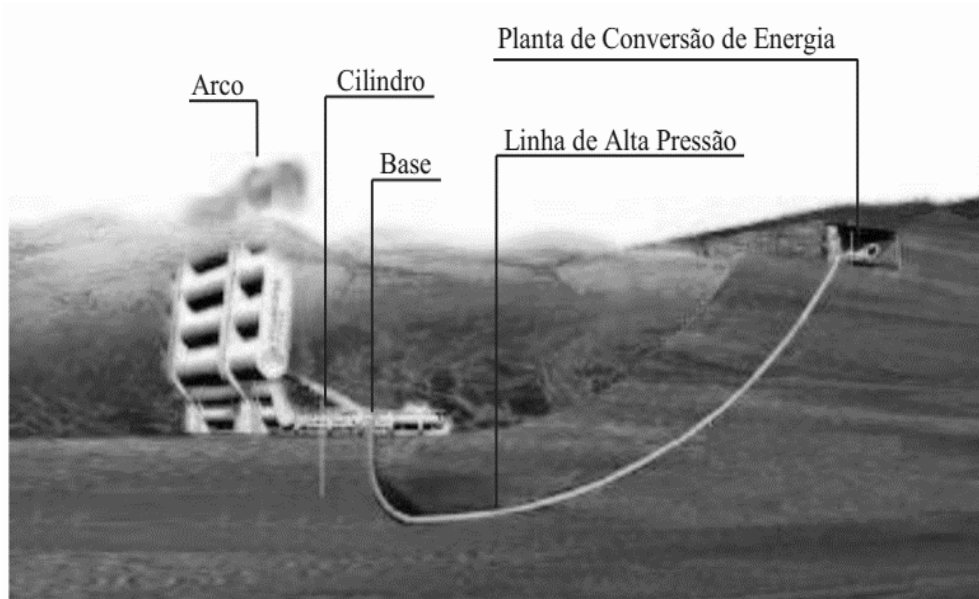
4.6.2 Dispositivos de corpo oscilante

Este tipo de dispositivo pode ser do tipo flutuante ou totalmente submerso. Tem como objetivo entrar em ressonância com as ondas do mar, podendo aproveitar a energia fornecida pela componente vertical e/ou horizontal das mesmas. A maioria dos dispositivos *nearshore* e *offshore* fazem parte deste grupo.

4.6.2.1 Oyster

Conforme Campos (2013, p. 16), é um dispositivo *nearshore*, instalado em profundidades em torno de 15 m e totalmente submerso que se movimenta com a passagem das ondas. Seu movimento desloca um pistão que funciona como uma bomba alternativa e o fluido interno a ele gira uma turbina, gerando energia elétrica. Este dispositivo foi desenvolvido pela Aquamarine Power, uma empresa do Reino Unido. A figura 19 apresenta o funcionamento do Oyster.

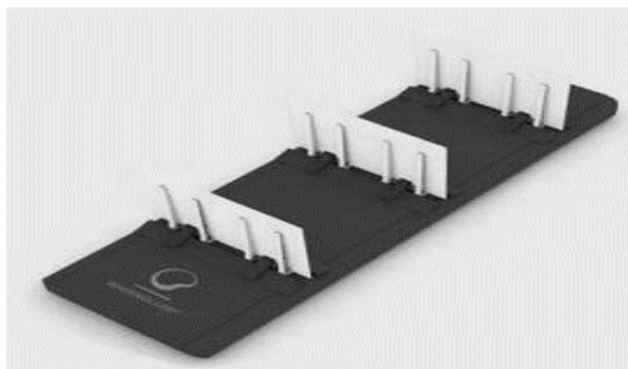
Figura 19 – Funcionamento do Oyster



(fonte: CAMPOS, 2013)

4.6.2.2 Waveroller

Este dispositivo é constituído por uma placa articulada em sua base e por pistões que, assim como o Oyster, são acionados com o movimento da placa. Sua largura não pode ser muito grande, caso contrário, sua performance pode diminuir. São instalados em profundidades em torno de 20 m e aproveitam a energia fornecida pela componente horizontal das ondas. Este dispositivo, que é o objeto de estudo desse trabalho, será detalhado no próximo capítulo. Na figura 20 é mostrado um módulo composto por três *Waverollers* em sequência.

Figura 20 – Módulo composto por três *Waverollers*

(fonte: ANDRÉ, 2010)

4.6.2.3 AWS (Archimedes Wave Swing)

Dispositivo *offshore*, submerso e de translação vertical. Possui uma câmara de ar pressurizado que suporta o cilindro superior. O movimento das ondas induz uma variação de pressão que faz oscilar verticalmente o flutuador e acionar um cilindro hidráulico, gerando energia elétrica (FRAGA, 2011, p. 14). O AWS é mostrado na figura 21.

Figura 21 – AWS

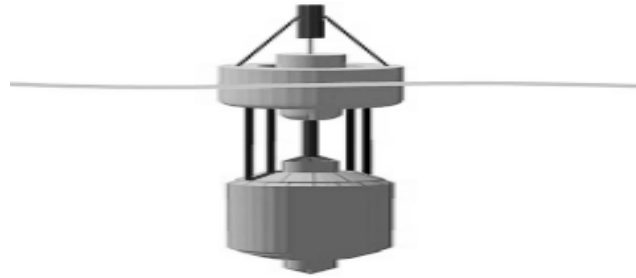


(fonte: FRAGA, 2011)

4.6.2.4 Wavebob

Consiste basicamente no aproveitamento do movimento vertical das ondas, que movimentam pistões que bombeiam um líquido pressurizado, fazendo-o percorrer uma turbina geradora de eletricidade. É um dispositivo *offshore* e possui sistema de amortecimento para casos mais críticos de movimento das ondas (FRAGA, 2011, p. 15). A figura 22 mostra o Wavebob.

Figura 22 – Wavebob

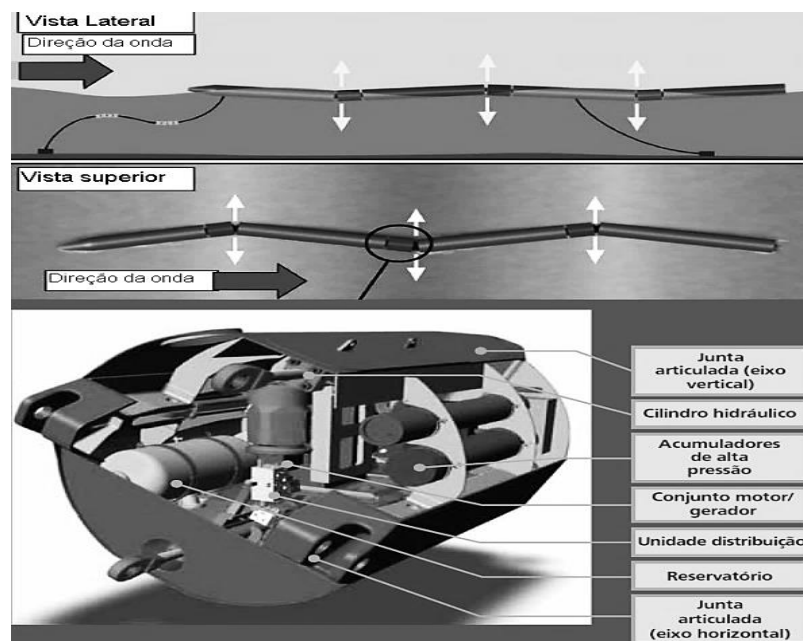


(fonte: FRAGA, 2011)

4.6.2.5 Pelamis

Segundo Souza (2011, p. 39-40), este dispositivo é do tipo *offshore* e sua instalação deve ser feita em profundidades em torno de 60 m a fim de garantir uma boa performance. Sua estrutura é dividida em quatro partes articuladas entre si, regiões nas quais existem pistões que bombeiam óleo pressurizado, fazendo-o percorrer pequenos geradores e gerar energia elétrica. O Pelamis possui a capacidade de aproveitar tanto a componente vertical quanto a horizontal das ondas na produção de energia, são amarrados por cabos ao fundo do oceano e são colocados para funcionar no sentido de propagação da onda. Na figura 23 é apresentado um detalhamento deste dispositivo.

Figura 23 – Detalhamento de um Pelamis



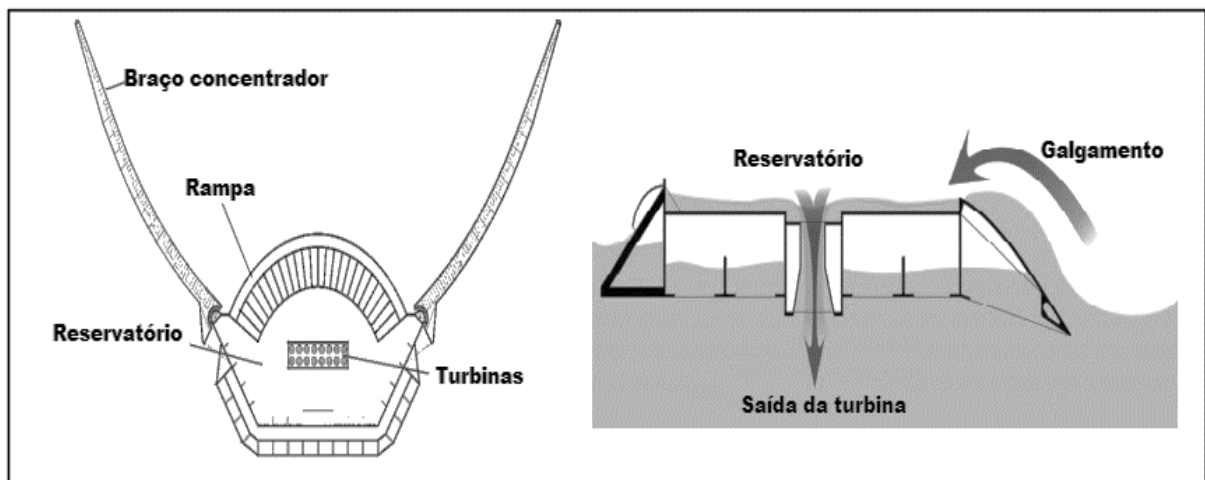
(fonte: SOUZA, 2011)

4.6.3 Dispositivos de galgamento

O funcionamento desse sistema consiste basicamente em um concentrador de ondas (estrutura de galgamento) que é responsável por alimentar um reservatório interno, proporcionando uma considerável camada de água interna que é forçada a passar por turbinas de baixa queda instaladas no fundo do reservatório convertendo a energia hidráulica em energia elétrica. Geralmente são dispositivos *offshore*, mas podem ser *onshore* o que diminui o aproveitamento energético (FLEMIN, 2012, p. 18).

O principal exemplo desse tipo de dispositivo é o *Wavedragon* que é formado por uma estrutura flutuante *offshore* composta por dois braços concentradores de ondas e por uma rampa que lança água para o interior de um reservatório onde estão instaladas as turbinas do tipo Kaplan. Este dispositivo foi construído primeiramente na Dinamarca (CAMPOS, 2013, p. 20). A figura 24 apresenta esse dispositivo.

Figura 24 – Detalhamento do *Wavedragon*



(fonte: adaptado de SOUZA, 2011)

5 O *WAVEROLLER*

Esse capítulo tem como objetivo apresentar esse dispositivo hidráulico conversor de energia das ondas em energia elétrica, começando com uma abordagem histórica, descrição do funcionamento, instalação, manutenção e performance do mesmo.

5.1 A HISTÓRIA DO *WAVEROLLER*

Segundo a AW- Energy ([2009?]), em 1993, Rauno Kaivusaari, em um de seus mergulhos, percebe que uma pesada escotilha de um antigo navio naufragado se movimentava para frente e para trás por consequência do movimento das ondas. No ano de 1999 são criados pequenos modelos provando que a ideia de utilizar esse tipo de movimento para gerar energia elétrica era possível. Em 2000 são realizados experimentos em laboratório e no ano de 2002 é fundada a empresa AW-Energy, que é financiada para executar testes no golfo da Finlândia.

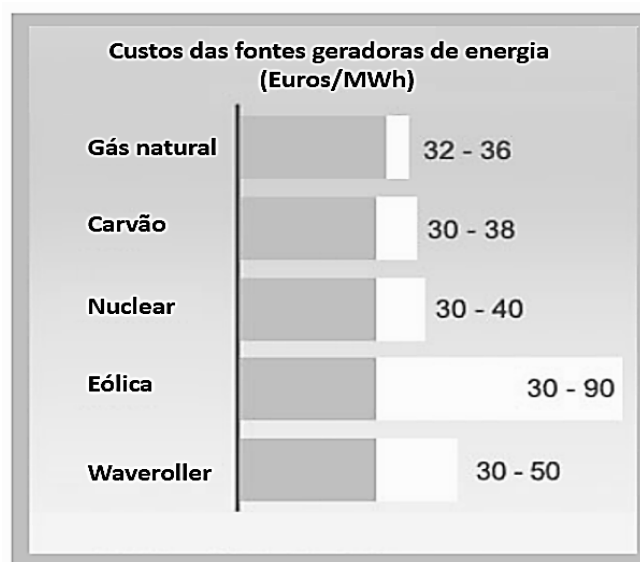
O ano de 2005 é marcado pela descoberta das limitações do dispositivo em regiões rochosas e em situações extremas e pelo investimento da empresa Aura Capital, o que motiva a ideia de criar o primeiro protótipo de *Waveroller*. No ano seguinte são realizadas as primeiras simulações numéricas e início da construção do primeiro protótipo. Em 2007 o protótipo é instalado em Peniche (Portugal) e é estudada a capacidade de fornecimento de energia deste aparelho e proposta melhoria do dispositivo. Em 2008 é instalado um *Waveroller* com cilindros mais potentes e busca-se trabalhar em um projeto de um parque destes dispositivos, através de módulos compostos por três unidades independentes, visando atingir a uma taxa de geração de energia em torno de 300 KW. No ano seguinte (2009) é proposta a instalação do módulo de três *Waverollers* em Peniche, tal projeto é denominado como *Simple Underwater Renewable Generation of Energy* (SURGE). Em 2012 é instalado este módulo proposto pelo projeto SURGE, tal sistema é composto por três placas e estas estão agrupadas em uma plataforma que pode subir à superfície para facilitar a manutenção. Tal projeto contribuiu para a análise dos impactos ambientais deste dispositivo e o lançou como um dispositivo promissor no âmbito de geradores de energia a partir de fontes renováveis.

5.2 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS

Estima-se que o custo para a comercialização do dispositivo esteja entre 800 e 1300 euros por kW e o custo da energia produzida entre 30 e 50 euros por MWh. (MUNICÍPIO DE PENICHE, 2007, p. 4, tradução nossa).

A figura 25 mostra um comparativo dos custos envolvidos na utilização de algumas fontes de energia com os do *Waveroller*.

Figura 25 – Comparativo entre os custos envolvidos na utilização de algumas fontes de energia



(fonte: adaptado de MUNICÍPIO DE PENICHE, 2007)

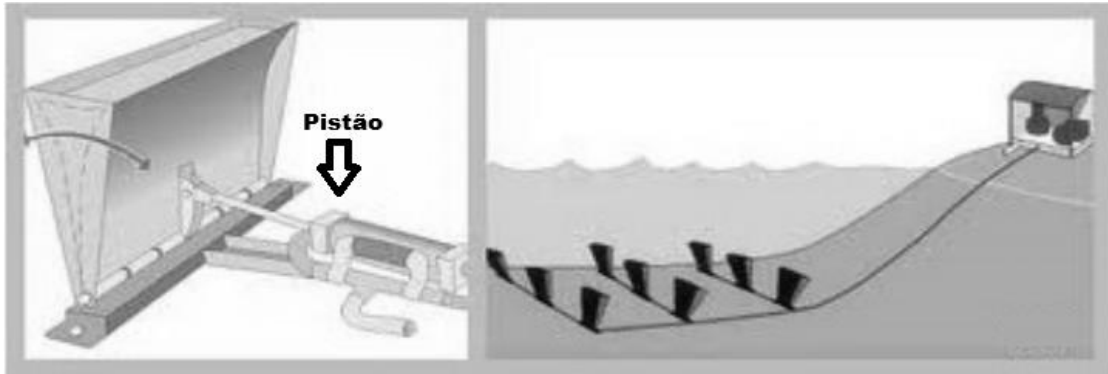
5.3 INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO

Mäki et. al (2014, tradução nossa) diz que o *Waveroller* deve ser instalado em profundidades entre 15 m e 25 m, a fim de aproveitar melhor a energia oriunda das ondas e deve ficar totalmente imerso no mar.

O dispositivo é composto por uma placa articulada que se movimenta para frente e para trás com o escoamento ocasionado pelo comportamento elíptico das ondas do mar. Tal movimento aciona pistões em sua base que fazem um fluido secundário percorrer um pequeno sistema e passar por um gerador de energia elétrica. O sistema é hermeticamente fechado evitando ruídos e qualquer tipo de risco ao ambiente aquático, e possui comunicação com centrais de controle

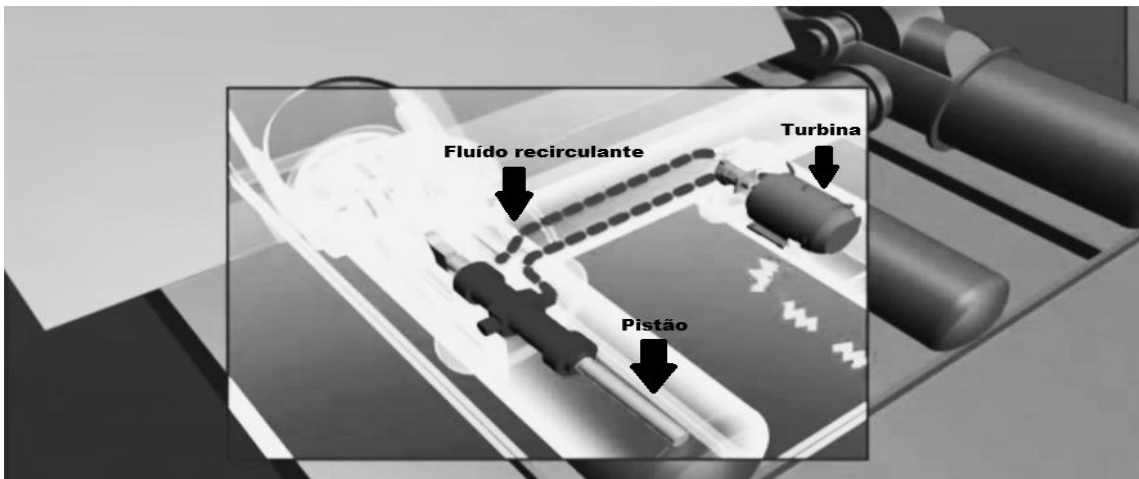
que detectam quando existe algum problema. O esquema de funcionamento do dispositivo está representado nas figuras 26 e 27.

Figura 26 – Esquema de funcionamento do *Waveroller*



(fonte: adaptado de FRAGA, 2011)

Figura 27 – Esquema da geração de energia através do *Waveroller*



(fonte: adaptado de MORAIS, 2009)

5.4 HIDRODINÂMICA DO DISPOSITIVO

Conforme Folley et al. (2007, p. [3], tradução nossa), os dispositivos submersos de corpo oscilante por rotação possuem um braço giratório que é posicionado perpendicularmente à linha do oceano. O escoamento do mar faz o braço movimentar-se e este, por sua vez, permite que um eixo secundário (pistão) transforme a energia das ondas em energia elétrica. O funcionamento desse sistema pode ser explicado pelo torque (considerando apenas um grau de

liberdade do corpo) ocasionado pelas ondas em função do tempo (Equação 1) e pela potência de captação energética (Equação 2).

$$T_w(t) = (I + I\alpha) \ddot{\theta} + \int_0^t \dot{\theta}(\tau) \cdot k(t - \tau) d\tau + K_p \theta + \Lambda \dot{\theta} \quad (1)$$

$$P_{otCap} = \frac{1}{2} \Lambda f^2 [\Theta]^2 \quad (2)$$

Sendo:

I = momento de inércia do corpo;

I α = momento de inércia adicionado;

θ = ângulo de rotação do corpo;

K_p = coeficiente de giro do corpo;

Λ = coeficiente de amortecimento;

k = função de resposta do impulso;

t = tempo;

f = frequência da onda;

PotCap = potência de captação;

Θ = vetor de rotação do corpo;

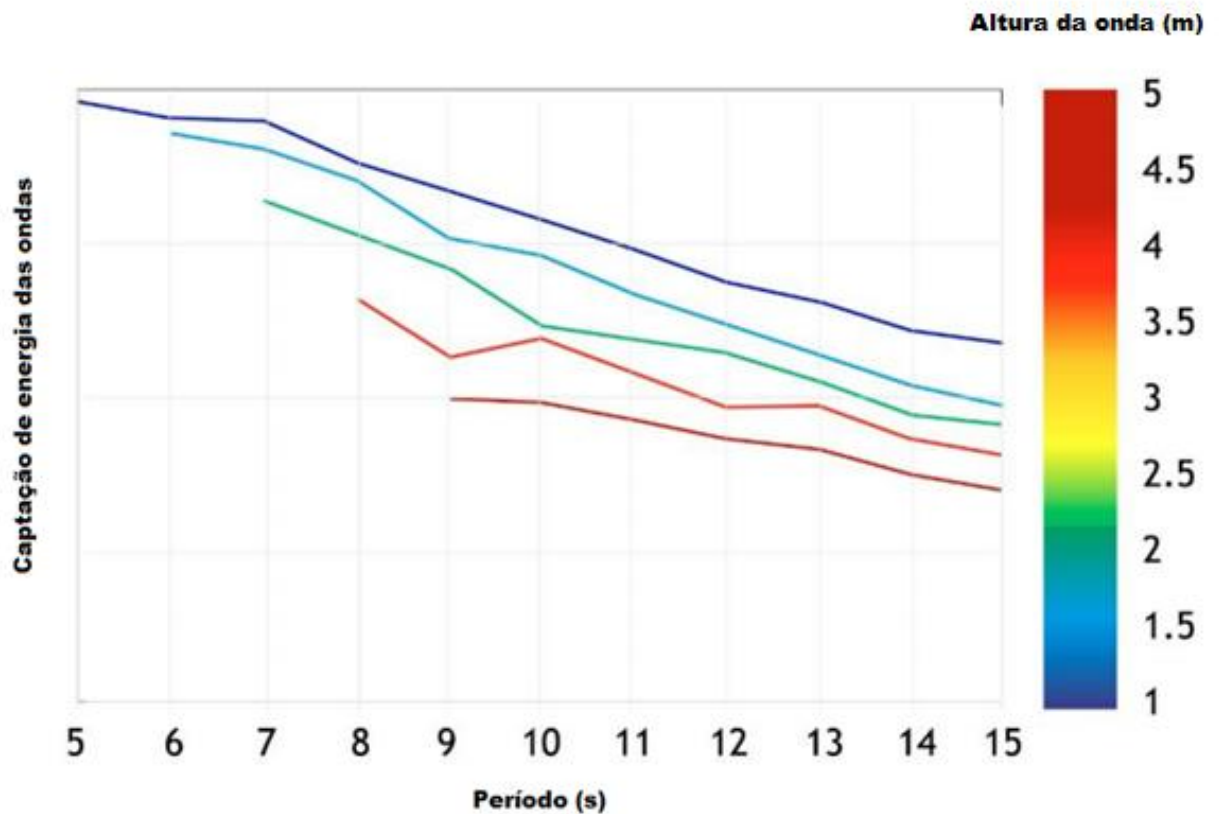
T_w = torque proveniente da onda.

5.5 GERAÇÃO DE ENERGIA

De acordo com testes descritos por Mäki et al. (2014, p. [2-3], tradução nossa), a captação de energia pelo *Waveroller* diminui com o aumento da altura e com o aumento do período de uma onda, o que pode ser explicado pelo fato da placa permanecer com uma grande inclinação durante um mesmo ciclo, estando sujeita a baixas oscilações nas velocidades. Grandes alturas de onda também resultam em maiores inclinações, tal comportamento é apresentado na figura 28, que é resultado de uma série de experimentos numéricos e de campo. Através desses

resultados pode-se esperar que, maiores inclinações estão associadas a menores taxas de geração de energia elétrica.

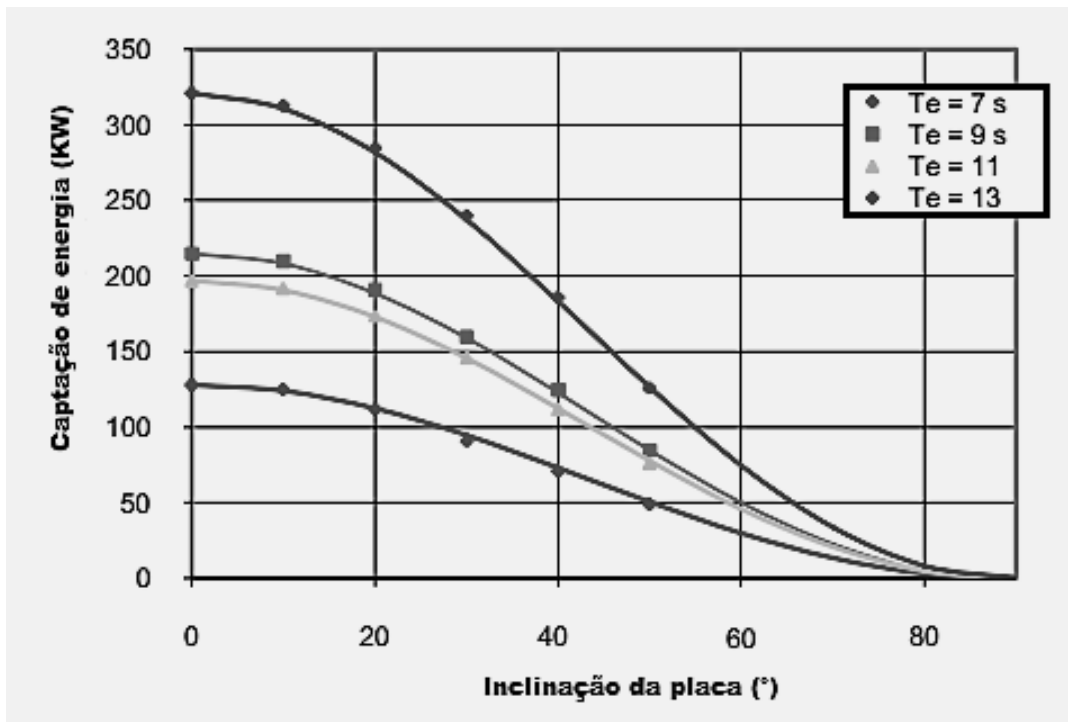
Figura 28 – Diminuição da capacidade de captação de energia com o aumento do período e da altura de onda



(fonte: adaptado de MÄKI et al., 2014)

A geração de energia elétrica conforme a posição angular da placa do *Waveroller* não foi apresentada, mas é de se esperar pelos estudos abordados por Whittaker et al. (2007, p. [4]) sobre o Oyster, cujo funcionamento é muito parecido com o dispositivo em questão, que quanto mais inclinada estiver a placa menor é a captação de energia das ondas, estando de acordo com a conclusão explicitada anteriormente. A figura 29 apresenta os resultados obtidos em experimentos realizados com o dispositivo Oyster, relacionando sua inclinação com a captação de energia.

Figura 29 – Diminuição da captação de energia em função da posição angular da placa do Oyster para quatro períodos de onda distintos

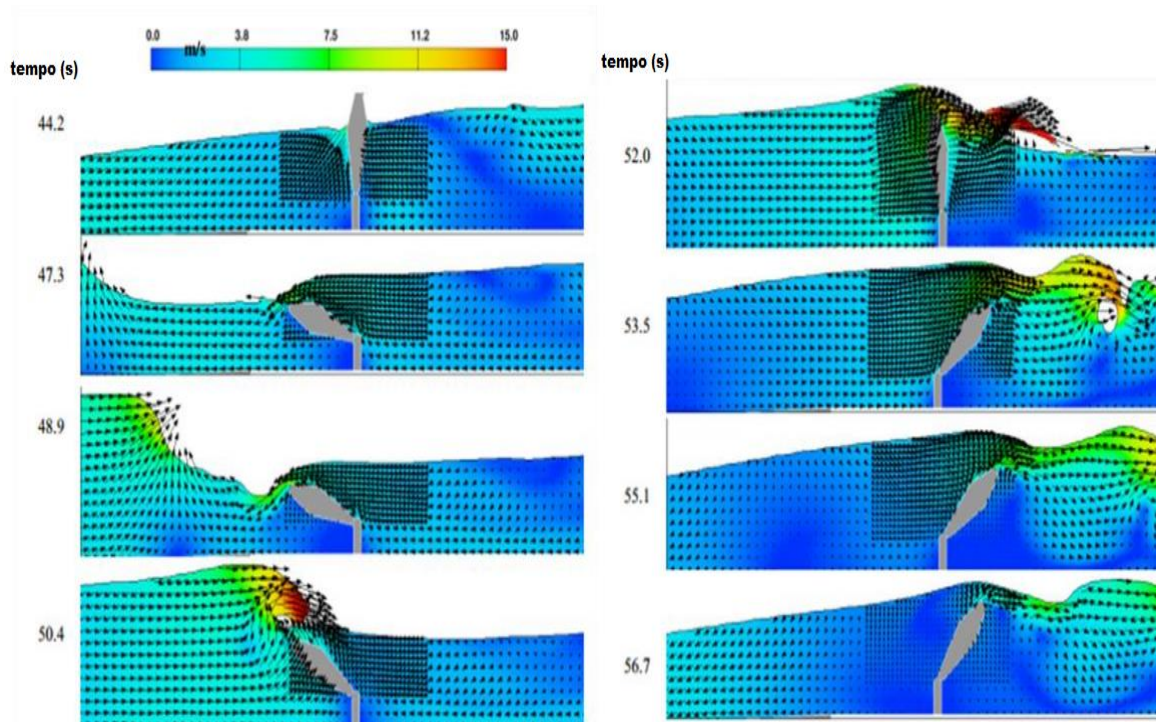


(fonte: adaptado de Whittaker et al., 2007)

5.6 CONCLUSÕES DE SIMULAÇÕES E EXPERIMENTOS REALIZADOS SOBRE O *WAVEROLLER* E OUTROS DISPOSITIVOS SIMILARES

Mäki et al. (2014, tradução nossa) relata que as ondas simuladas numericamente para uma altura de 5 m, períodos de 10, 14 e 18 s apresentaram a menor posição angular no momento de repuxo da formação das ondas (instante em que a força puxa o *Waveroller* para trás e que a onda começa a se erguer). Tal fato é apresentado na figura 30, que mostra o comportamento do dispositivo e vetores de velocidade de escoamento em momentos sucessivos da propagação de uma onda.

Figura 30 – Comportamento de um *Waveroller* com a propagação de uma onda



(fonte: MÄKI et al., 2014)

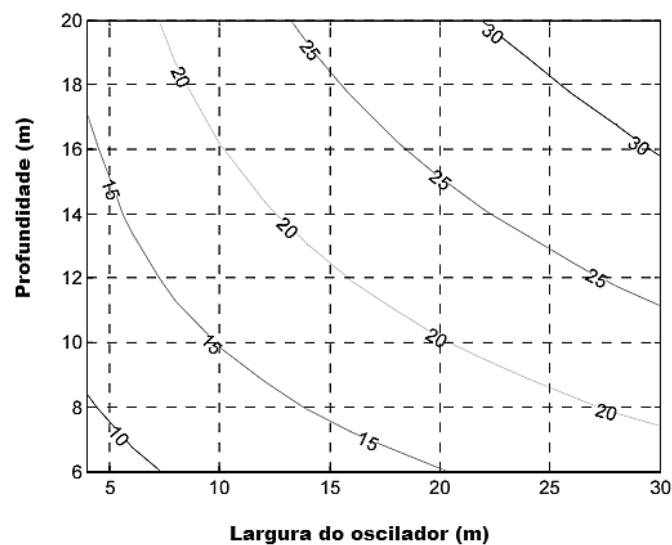
A parte experimental do mesmo trabalho realizado foi feita considerando-se ondas regulares de até 5 m de altura e períodos entre 5 s e 13 s, ondas irregulares de até 7 m de altura com períodos de 6 s a 19 s, direção de onda de até 20 °, e marés menores que 16,5 m.

Tal experimento levou a conclusão que efeitos de turbulência são significativos e devem ser levados em conta no dimensionamento e no formato da placa do dispositivo, esse efeito e o carregamento a ele associado são mais significativos em regiões mais próximas da costa do que em regiões mais afastadas. Outra conclusão é que as ondas não direcionais (cuja direção de propagação não possui inclinação com a horizontal) causam maiores carregamentos no dispositivo do que ondas direcionais.

Segundo os resultados de experimentos e simulações encontrados no trabalho de Folley et al. (2005, p. [3-4], tradução nossa), a profundidade influencia no desempenho dos dispositivos que oscilam com a translação das ondas. Foi demonstrado que a média anual da potência de onda incidente é reduzida com a diminuição da profundidade, e parte dessa diminuição se deve, principalmente, à fricção do escoamento com o fundo do oceano e à quebra das ondas na costa. Outra conclusão importante é de que a energia está mais relacionada com a força da onda

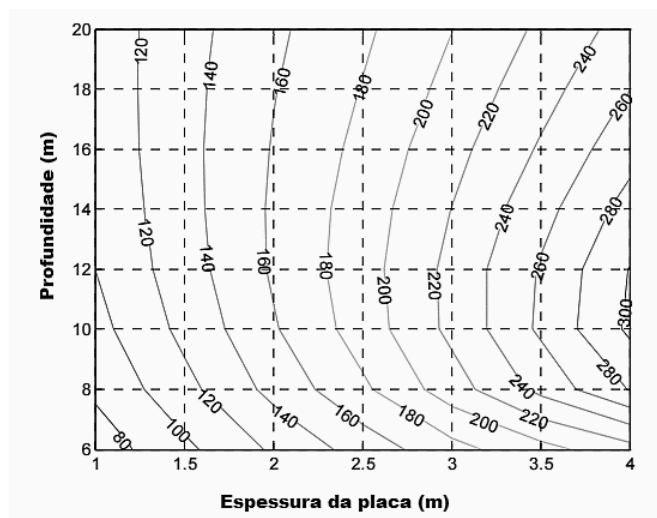
incidente do que com a potência da onda incidente, os resultados apontam que as magnitudes da força de translação das ondas e da potência absorvida pela placa articulada aumentam em águas pouco profundas. A figura 31 mostra a variação do período de oscilação de uma placa com a largura dela e com a profundidade que o dispositivo se encontra. A variação da captação de energia em função da espessura da placa e da profundidade que a mesma se localiza é apresentada na figura 32.

Figura 31 – Variação do período de oscilação (s) da placa em função da largura e da profundidade em que ela se localiza



(fonte: FOLLEY et al., 2007)

Figura 32 – Variação da captação de energia (kW) em função da espessura da placa e da profundidade em que ela se localiza



(fonte: FOLLEY et al., 2007)

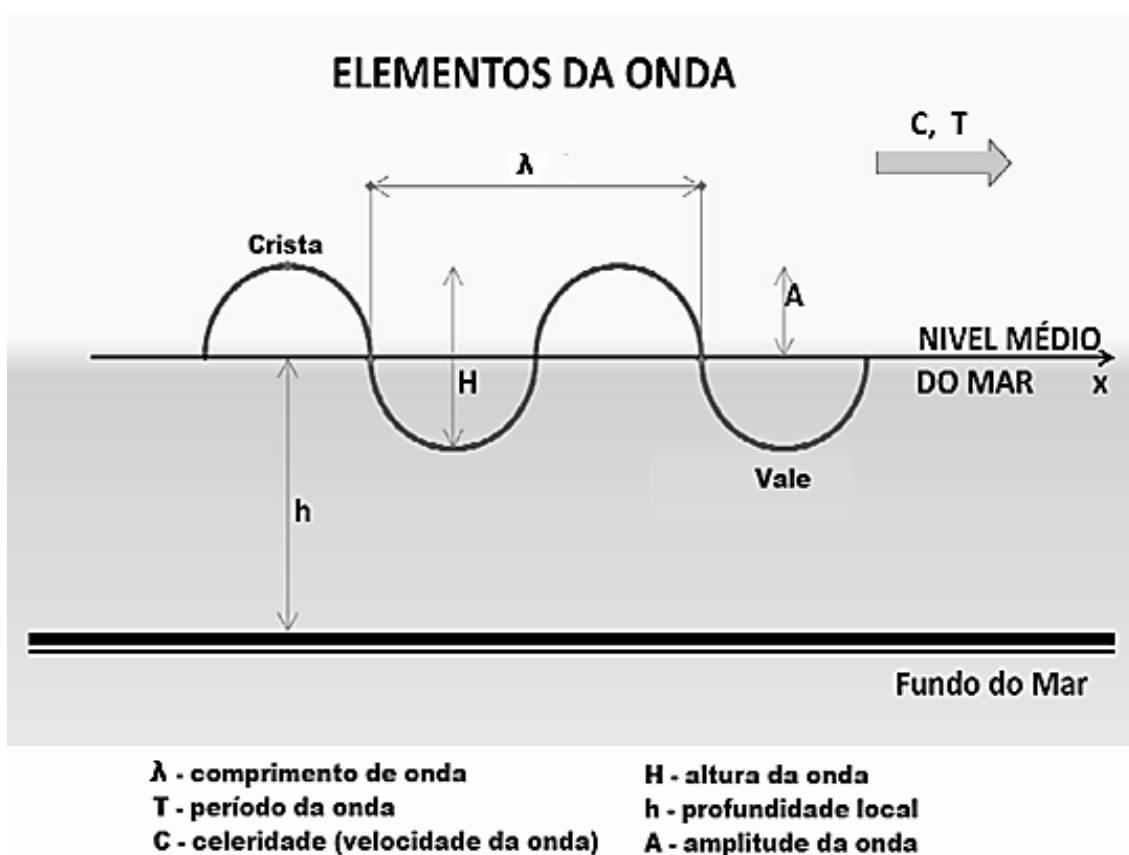
6 DESCRIÇÃO DAS ONDAS DO MAR

De acordo com o que foi discutido nos capítulos anteriores, à medida que as ondas se aproximam de regiões mais rasas e próximas da costa, interações rugosas tornam-se significativas, ocasionando perdas de energia.

Esse capítulo tem o objetivo de descrever o comportamento das ondas do mar, sua dinâmica e transporte de energia.

Na figura 33 são definidos os principais parâmetros de uma onda.

Figura 33 – Parâmetros principais de uma onda



(fonte: adaptado de SOUZA., 2011)

Segundo Dean e Dalrymple (1991, p. 52-66) podem ser calculados alguns parâmetros básicos das ondas pelas equações a seguir e através do gráfico da figura 34:

$$\lambda_o = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3)$$

$$C_o = \frac{gT}{2\pi} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

$$\lambda = \psi \lambda_o \quad (6)$$

$$C = \psi C_o \quad (7)$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8)$$

$$\eta = A \cos(Kx - \sigma t) \quad (9)$$

Sendo:

H = altura da onda;

A = amplitude da onda ($H/2$);

λ_0 = comprimento de onda relativo às águas profundas;

λ = comprimento de onda;

C = celeridade (velocidade de propagação da onda);

C_0 = celeridade relativa às águas profundas;

x = ponto no espaço na direção de propagação da onda;

η = variação de superfície da água;

g = aceleração da gravidade;

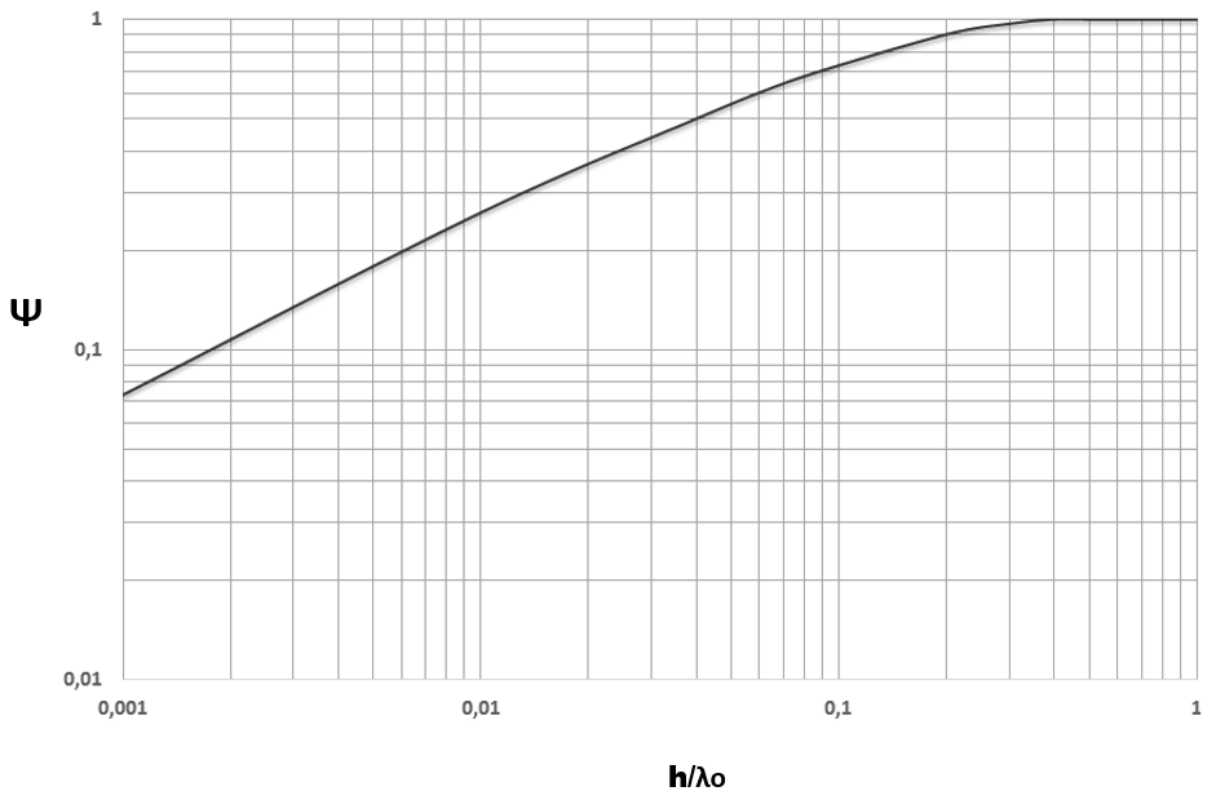
T = período da onda;

ψ = parâmetro que varia em função da relação entre h e λ_0 (deve ser obtido pelo gráfico da figura 34);

K = número de onda;

σ = frequência angular da onda.

Figura 34 – Gráfico para se obter o parâmetro ψ



(fonte: adaptado de DEAN e DALRYMPLE., 1991)

6.1 COMPORTAMENTO DAS ONDAS CONFORME A PROFUNDIDADE

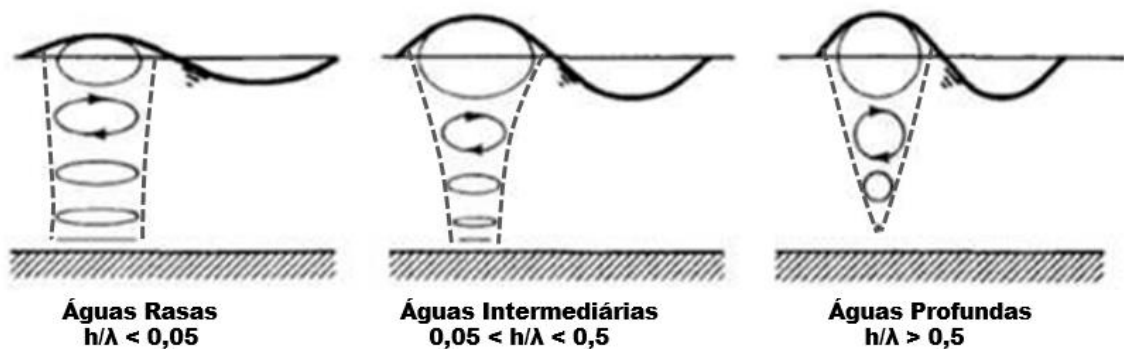
As ondas apresentam comportamento circular em seu escoamento e, à medida que se aproximam de regiões mais rasas, o mesmo torna-se elíptico. O conjunto de elipses, que diminuem de tamanho com o aumento da profundidade, em formato de cone é chamado de família de hodógrafas.

Existem basicamente três regiões que apresentam comportamentos distintos em função da interação rugosa com o fundo (ANDRÉ, 2010, p. 32) são elas as águas:

- a) **profundas** – apresentam comportamento circular e hidrostático a partir de uma determinada profundidade;
- b) **intermediárias** – mostram comportamento circular e elíptico nas regiões próximas do fundo;
- c) **rasas** – devido a sua baixa profundidade, apresentam somente comportamento elíptico.

A figura 35 classifica as águas em função da profundidade e do comprimento das ondas atuantes na região de interesse:

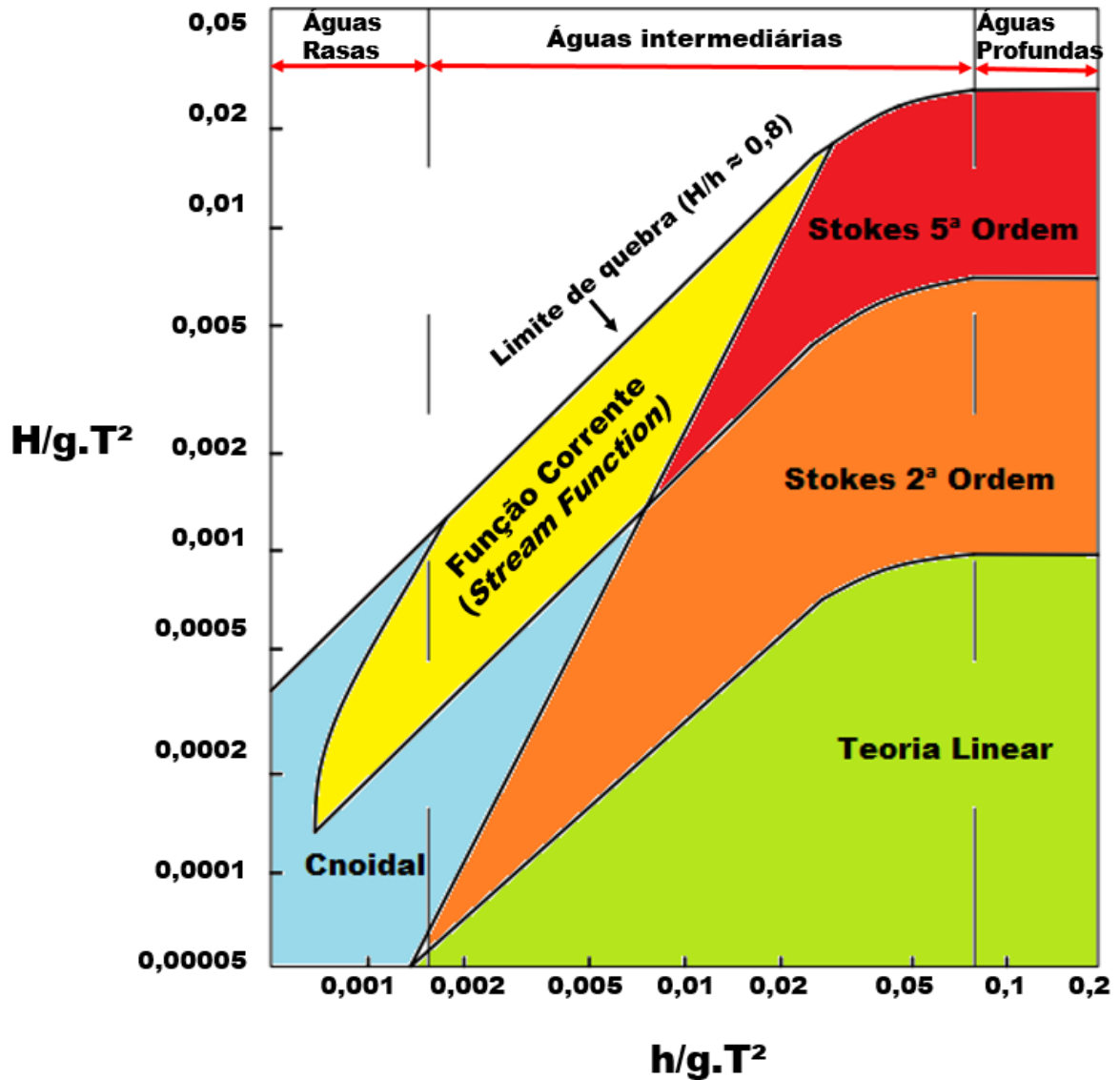
Figura 35 – Classificação das águas de acordo com o comprimento de onda e profundidade



(fonte: adaptado de ANDRÉ., 2010)

Tal classificação é importante, pois para cada zona existe uma teoria da hidrodinâmica de ondas diferente que deve ser aplicada em função da profundidade, altura e período da onda. Segundo o Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantabria (2014, p. 10-11) um ábaco (figura 36) pode ser utilizado para relacionar estes parâmetros com a teoria de ondas mais aplicável ao caso.

Figura 36 – Ábaco que relaciona a profundidade, altura e período de onda com a teoria de hidrodinâmica que melhor se aplica



(fonte: adaptado de INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE CANTABRIA., 2014)

6.2 CARACTERÍSTICAS CINEMÁTICAS

De acordo com Holthuijsen (2007, p. 120) as velocidades, nas componentes horizontal e vertical, das ondas podem ser calculadas pelas equações apresentadas a seguir:

$$\varphi_{crista} = K\pi \quad (10)$$

$$\varphi_{vale} = K.\pi / 2 \quad (11)$$

$$U_x = \frac{H g T}{2 \lambda} \frac{\cosh(2 \pi (\eta + h) / \lambda)}{\cosh(2 \pi h / \lambda)} \cos \varphi \quad (12)$$

$$U_y = \frac{H g T}{2 \lambda} \frac{\sinh(2 \pi (\eta + h) / \lambda)}{\cosh(2 \pi h / \lambda)} \sin \varphi \quad (13)$$

Sendo:

U_x = componente da velocidade da onda na direção horizontal;

U_y = componente da velocidade da onda na direção vertical;

φ = fase da onda;

φ_{crista} = fase da onda na crista;

φ_{vale} = fase da onda no vale;

h = profundidade da água;

6.3 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

Segundo Holthuijsen (2007, p. 129) as pressões dinâmicas induzidas pelo movimento das ondas podem ser aproximadas pelas equações apresentadas na sequência:

$$P_{Diar} = \rho g \frac{H}{2} e^{K\eta} \quad (14)$$

$$P_{Dlap} = \rho g \frac{H}{2} \quad (15)$$

Onde:

P_{Diar} = pressão dinâmica induzida em águas rasas;

P_{Dlap} = pressão dinâmica induzida em águas profundas;

ρ = massa específica da água.

6.4 O POTENCIAL ENERGÉTICO TRANSPORTADO PELAS ONDAS

Conforme Dean e Dalrymple (1991, p. 97) o potencial energético total por unidade de área superficial, que corresponde a soma da energia cinética e potencial, pode ser calculado pela equação abaixo:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (16)$$

Onde:

E = potencial energético por unidade de área superficial.

Cornett (2008, p. 2) diz que é possível aproximar o potencial energético por unidade de comprimento, para águas profundas, através das equações apresentadas a seguir:

$$P_o = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e}{64 \pi} \quad (17)$$

$$T_e = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f_{dens}^{-1} S(f_{dens}, \theta) df_{dens} d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f_{dens}, \theta) df_{dens} d\theta} \quad (18)$$

Onde:

P_o = potencial energético por unidade de comprimento;

H_s = média de altura de 1/3 das ondas mais altas;

T_e = período da onda calculado;

f_{dens} = função densidade;

$S(f_{dens}, \theta)$ = função espectral.

7 NOÇÕES DE ESCOAMENTOS SOBRE CORPOS IMERSOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais fenômenos que podem ocorrer na presença de corpos imersos em um escoamento e levar a conclusão que a geometria e material constituintes de um dispositivo gerador de energia influenciam no seu desempenho.

7.1 TURBULÊNCIA

Esse é um fenômeno que acontece na grande maioria dos escoamentos, tanto externos (à superfície livre), quanto internos (dentro de condutos).

É caracterizada por um movimento mais agitado das partículas líquidas, onde essas se movimentam de forma desordenada.

O parâmetro adimensional utilizado para diferenciar um regime turbulento de um regime laminar de escoamento é o número de Reynolds, que é definido a seguir:

$$R_e = \frac{V L}{\nu} \quad (19)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

L = comprimento característico;

ν = viscosidade cinemática da água;

V = velocidade de escoamento.

7.2 FORÇA DE ARRASTE

Segundo Campos (2013, p. 41), a força de arraste atua paralelamente a direção de escoamento, é formada por uma parcela ocasionada pelo atrito com a superfície do corpo e por outra devido ao arraste de pressão.

Muitas vezes pode sofrer influência do número de Mach (caso esse seja maior do que 0,5), que acrescenta ao arrasto uma influência da compressibilidade.

O coeficiente de arrasto pode ser calculado pela seguinte equação:

$$C_d = \frac{F_d}{\rho V^2 A_p / 2} \quad (20)$$

Onde:

F_d = força de arrasto;

C_d = coeficiente de arrasto;

A_p = área de ataque, normalmente a considerada é a frontal ao escoamento, porém em aerofólios deve-se considerar a planiforme.

7.3 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

Fox et al. (2006, p. 456) diz que a força de sustentação depende do aumento da velocidade (causa decréscimo na pressão) sobre a superfície superior de um aerofólio e da diminuição dela (a pressão aumenta) sobre a superfície inferior do mesmo.

Essa força é o motivo dos aviões se manterem no ar e é a responsável por possibilitar às turbinas a capacidade de gerar energia elétrica.

A sustentação depende do número de Reynolds, do ângulo que o perfil faz com o escoamento, e do formato do objeto considerado. Ela pode ser expressa pela equação a seguir:

$$C_l = \frac{F_l}{\rho V^2 A_p / 2} \quad (21)$$

Sendo:

F_l = força de sustentação;

C_l = coeficiente de sustentação;

7.4 FORMAÇÃO DE VÓRTICES

Conforme Potter et al. (2015, p. 321-323), vórtices são escoamentos com rotação, apresentando um comportamento circular ou em espiral.

Existem três tipos básicos de vórtices:

- a) **forçados** – a rotação é constante e aumenta com a distância em relação a origem;
- b) **livres** – são irrotacionais e a circulação é constante independentemente da distância em relação a origem;
- c) **de fuga** – ocorre em torno de aerofólios, onde as pressões altas (na parte de baixo do corpo) escapam para a região de pressões baixas (parte superior do corpo).

Os cilindros normalmente são os corpos que permitem maior formação de vórtices. O número de Strouhal é associado a probabilidade de um determinado corpo liberar vórtices e pode ser calculado pela equação abaixo:

$$S_t = \frac{f^* L}{V} \quad (22)$$

Onde:

S_t = número de Strouhal;

f^* = frequência de desprendimento de vórtices.

8 NOÇÕES SOBRE MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À MECÂNICA DOS FLUIDOS

A modelagem numérica (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) tem como objetivo resolver as principais equações governantes do escoamento dos fluidos, como as conhecidas equações de Navier-Stokes e equação da continuidade, através do auxílio de computadores.

Segundo André (2010, p. 58) as modelagens numéricas reduzem consideravelmente o tempo e custos na obtenção dos resultados, são precisas e, se corretamente discretizadas, se aproximam de fenômenos reais.

Toda simulação numérica pode ser dividida em três etapas principais:

- a) **pré-processamento** – etapa na qual é definido o modelo matemático a ser utilizado e as condições de contorno aplicáveis ao problema. É definida também a malha de simulação, que, quanto maior for o seu refinamento, melhor será a precisão dos resultados.
- b) **utilização do *solver*** – modela as variáveis num sistema mais simples, discretiza e soluciona as equações.
- c) **pós-processamento** – etapa na qual os resultados são interpretados por programas.

Segundo Potter et al. (2015, p. 649-651) toda modelagem numérica deve ser consistente (deve convergir para o valor exato a medida que o espaço na malha tenda a zero), estável (não aumentar os erros progressivamente), e precisa respeitar as configurações impostas nas condições de contorno.

Para Simões (2009, p. 53-54):

O CFD procura simular um componente ou um sistema em sua fase de projeto inicial ou mesmo um sistema real existente para analisar seu comportamento. O objetivo é avaliar o desempenho deste componente e sempre que possível avaliar o comportamento da implementação de modificações no projeto original ou nas condições de contorno do sistema.

Para modelar um componente ou um sistema é necessário criar a geometria que será avaliada em um software de desenho computacional, também conhecido como CAD. O desenho criado deve ser um sólido inteiro sem falhas ou descontinuidades em sua geometria. A partir do desenho sólido é possível definir o volume de controle por onde o escoamento será considerado, que pode ser externo ou interno ao sólido. Em seguida é possível definir as superfícies que limitarão a região de interesse, com paredes, regiões de entrada ou saída do fluido e superfícies de repetição quando o domínio é

periódico. As superfícies são cobertas por uma malha onde são definidas as condições de contorno do problema.

A solução do problema de escoamento (com velocidade, pressão, temperatura, etc) é calculada nos nós de cada elemento. A acurácia da solução do problema é governada pelo número de elementos na malha gerada. Geralmente, quanto maior o número de elementos, maior será a acurácia, porém maior será também o custo computacional em tempo de processamento. As malhas podem ser otimizadas normalmente através do refinamento de seus elementos em regiões onde grandes variações das propriedades do escoamento são esperadas. Os pré-processadores mais modernos permitem ao usuário acessar as propriedades físicas e químicas de diversos materiais, além de permitir selecionar o modelo de processo físico ou químico mais adequado ao problema (como por exemplo, os modelos de turbulência, transferência de calor, modelos de combustão) ao lado das principais equações para o escoamento fluido.

8.1 TÉCNICAS PARA A SOLUÇÃO NUMÉRICA

Versteeg e Malalasekera (1995, p. 3-5, tradução nossa) destacam que existem três técnicas distintas para a resolução dos problemas numéricos em CFD, são elas:

- a) **método das diferenças finitas (MDF)** – consiste na resolução de equações diferenciais através da aproximação das derivadas por diferenças finitas, estas são feitas através de expansões em série de Taylor, que geram fórmulas de aproximações. As derivadas que se encontram na equação governante são substituídas por diferenças finitas, resultando em equações mais simples que são aplicadas para valores específicos da função em cada ponto da malha.
- b) **método dos elementos finitos (MEF)** – utiliza funções mais simples para descrever as variações das variáveis a serem calculadas dentro de cada elemento. Somadas todas as aproximações para todos os elementos considerados se obtém uma função de aproximação para a variável em questão em todo o domínio de cálculo. Essas equações entram na equação governante, gerando soluções não exatas e que possuem resíduos devido a erros de aproximação, estes são minimizados através de funções-peso e integrações. O resultado final fornece o valor aproximado de uma determinada variável para cada ponto do domínio.
- c) **método dos volumes finitos (MVF)** – a região de cálculo é dividida em sub-regiões (volumes de controle). As equações são aplicadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle e, ao final, obtém-se um valor aproximado de cada variável para cada ponto específico no domínio em questão.

8.2 REPRESENTAÇÃO DA TURBULÊNCIA

A grande maioria dos escoamentos reais são turbulentos e possuem um elevado número de Reynolds. Algumas características peculiares estão presentes em escoamentos turbulentos segundo Kundu et al. (2012, p. 542-543, tradução nossa):

- 1) **não-linearidade** – nenhum escoamento turbulento é linear.
- 2) **aleatoriedade** – esse tipo de escoamento é totalmente imprevisível, caótico e irregular.
- 3) **grande vorticidade** – os escoamentos turbulentos são caracterizados pelo elevado nível de vorticidade, sua visualização apresenta características coalescentes, divididas, alongadas e rotatórias.
- 4) **alta dissipação** – o alongamento dos vórtices transfere energia e vorticidade para o aumento das menores escalas, até que o gradiente aumente, se espalhando ou sendo dissipado pela viscosidade, o que torna o esse tipo de escoamento carente do suprimento de energia para compensação das perdas viscosas.
- 5) **difusão** – escoamentos turbulentos possuem uma alta taxa de difusão de momento e calor.

A representação da turbulência é um tanto quanto complexa, não existindo um único modelo que possa ser aplicado adequadamente a todos os tipos de escoamento. Rezende (2009, p. 51) relata as três formas principais utilizadas para modelar a turbulência conforme a exigência computacional. São elas as simulações numéricas:

- a) **via equações de médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes*)** – esta técnica consiste na utilização de um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. Neste modelo surgem as tensões turbulentas (tensões de Reynolds) que descrevem os efeitos das variações turbulentas da velocidade e da pressão.
- b) **de grandes escalas (LES – *Large Eddy Simulation*)** – aqui as grandes escalas (turbilhões que contém energia) são calculadas diretamente e para as pequenas escalas são utilizados modelos de escala sub-malha. Sua formulação é transiente e tridimensional.
- c) **diretas (DNS – *Direct Numerical Simulation*)** – nesse método as equações de Navier-Stokes são resolvidas diretamente sem modelagem, por isso necessitam de malhas bastante refinadas e exigem grande processamento do computador para que seja possível capturar toda gama de escalas turbulentas.

Conforme Rezende (2009, p. 52):

Uma vez que a turbulência é qualificada por um grande número de escalas temporais e espaciais, as quais aumentam rapidamente com o número de Reynolds, a simulação direta DNS torna-se inviável do ponto de vista prático e as simulações RANS e LES tornam-se as melhores alternativas de predição numérica. Estas técnicas fazem à decomposição das equações governantes em um campo médio ou filtrado e um campo de flutuações.

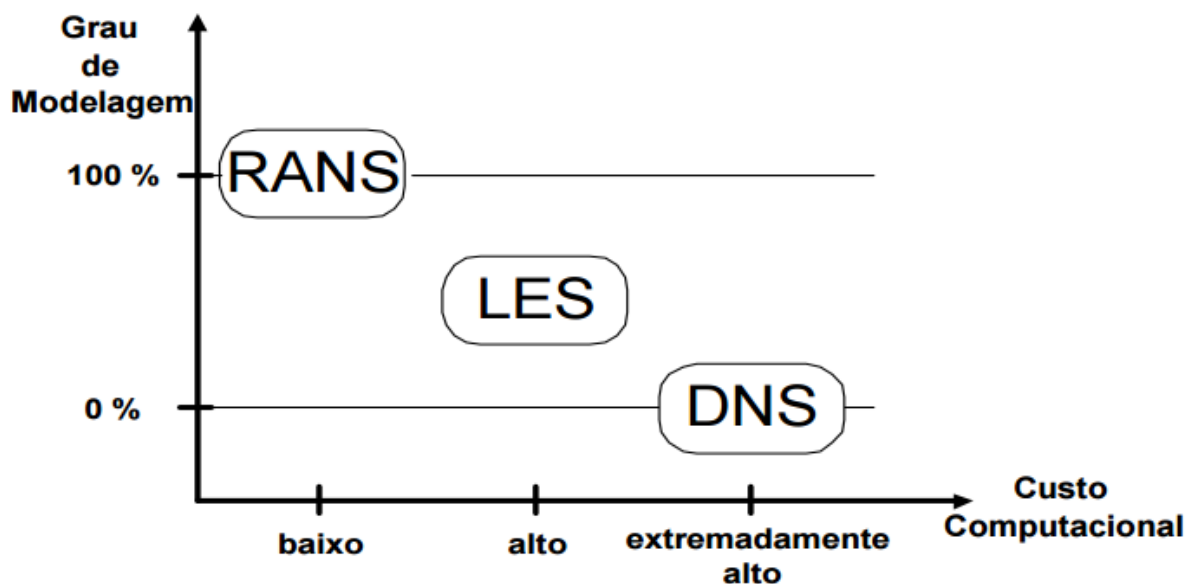
Esta decomposição das equações de Navier-Stokes provoca o aparecimento de momentos de segunda ordem ou mais, os quais envolvem flutuações, obtendo-se mais incógnitas que equações. Este é o conhecido problema de fechamento da turbulência.

É exatamente sobre este problema que a maior parte das pesquisas reside, ou seja, na investigação por melhores modelos de turbulência que solucionem o problema de fechamento. Métodos experimentais e a simulação direta são instrumentos utilizados neste esforço, para validar as modelagens propostas.

Assim, o RANS e o LES são as duas abordagens para predição de escoamentos turbulentos que possuem o problema de fechamento da turbulência. Na modelagem RANS todas as informações espectrais são perdidas. As quantidades estatísticas são médias sobre todas as escalas de turbulência. Já a metodologia LES é intermediária tanto em custo como em esforço computacional entre o DNS e a modelagem RANS, uma vez que prediz a dinâmica das grandes escalas

A figura 37 mostra o grau de modelagem e custo computacional para as três formas de representar a turbulência.

Figura 37 – Grau de modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência



(fonte: REZENDE., 2009)

9 METODOLOGIA NUMÉRICA

O presente capítulo busca descrever os princípios, equações, modelos e métodos numéricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Aqui será abordado também, o código utilizado para simular o problema (OpenFOAM) e sua extensão (IHFOAM), que acrescenta ao primeiro as teorias da hidrodinâmica e geração de ondas.

9.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES DE UM ESCOAMENTO

As duas equações básicas que descrevem o fluxo de um fluido incompressível, são as equações de Navier-Stokes (equações 23 e 24) e equação da continuidade, também conhecida como equação da conservação de massa (equação 25). Essas, para o caso bidimensional do escoamento de um fluido incompressível, são apresentadas abaixo:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (23)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (25)$$

Onde:

P – pressão;

μ – viscosidade dinâmica;

$g_{\{x,y\}}$ – componentes da aceleração da gravidade nas direções $\{x,y\}$, respectivamente.

$\{u,v\}$ – componentes da velocidade nas direções $\{x,y\}$, respectivamente

9.2 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES COM MÉDIAS DE REYNOLDS (RANS)

Conforme Rezende (2009, p. 54), pode-se, através de manipulações e combinações entre as equações da conservação de massa e quantidade de movimento linear, escrever a seguinte forma da equação de Navier-Stokes:

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (26)$$

Sendo:

$g_{\{i,j\}}$ – componentes da aceleração da gravidade nas direções $\{i,j\}$, respectivamente;

$\{u_i, u_j\}$ – componentes da velocidade nas direções $\{i,j\}$, respectivamente;

$\{x_i, x_j\}$ – componentes da posição nas direções $\{i,j\}$, respectivamente.

São obtidas equações para valores médios do escoamento através da decomposição de Reynolds aplicadas às equações de Navier-Stokes. Esta decomposição descreve os valores instantâneos das variáveis do movimento turbulento como uma variação aleatória em torno dos valores médios:

$$\Phi = \bar{\Phi} + \Phi' \quad (27)$$

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \Phi dt \quad (28)$$

$$\overline{\Phi'} = 0 \quad (29)$$

Onde:

$\overline{\Phi}$ – valor médio de uma variável;

Φ' – flutuação instantânea em torno da média.

Aplicando o princípio das médias de Reynolds às equações 23,24 e 25 obtém-se as seguintes formas das equações da continuidade e de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) + g_i \quad (31)$$

A equação 31 é bem semelhante à equação 26, diferenciando-se desta pelas variáveis dependentes, que agora são as velocidades médias e a pressão média. O termo $-\overline{u_i' u_j'}$ é conhecido como tensor de Reynolds e representa a influência das flutuações turbulentas no fluxo médio. O surgimento desse termo causa um problema de fechamento matemático da turbulência, pelo aparecimento de mais variáveis que equações, sendo necessário adotar um modelo adicional de cálculo para a resolução das equações.

9.2.1 A hipótese de Boussinesq

De acordo com Launder e Sandham¹ (2001, apud REZENDE, 2009, p. 56-59), a modelagem mais comum para a tensão de Reynolds é através da hipótese de Boussinesq, que é fundamentada numa analogia entre as tensões turbulentas e as tensões viscosas do escoamento laminar, onde as primeiras são proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento, surgindo um coeficiente de proporcionalidade chamado de viscosidade turbulenta. A seguir são apresentadas as equações resultantes da hipótese de Boussinesq:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (32)$$

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (33)$$

$$P_m = \frac{1}{\rho} \overline{P} + \frac{2}{3} \kappa \quad (34)$$

$$\nu_{ef} = \nu + \nu_t \quad (35)$$

Onde:

$\overline{u_i u_j}$ – tensão turbulenta (tensor de Reynolds);

κ – energia cinética turbulenta;

¹ LAUNDER, B. E.; SANDHAM, N. D. **Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows**. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

P_m – pressão modificada;
 ν_{ef} – viscosidade efetiva;
 ν_t – viscosidade turbulenta;
 δ_{ij} – delta de Kronecker.

Essa hipótese simplifica significativamente o problema do fechamento matemático na equação 31, sendo necessário a utilização de uma outra equação para a viscosidade turbulenta. Reescrevendo a equação 31 com o auxílio das equações propostas por Boussinesq, chega-se à seguinte forma da equação de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial P_m}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_{ef} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \right) + g_i \quad (36)$$

As diversas equações adicionais que representam a viscosidade turbulenta são conhecidas como modelos de turbulência.

9.2.2 O modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*)

Para a representar a viscosidade turbulenta existem dois modelos principais: $\kappa - \omega$ e $\kappa - \epsilon$. Cada um deles possui vantagens e desvantagens, porém a combinação de ambos, que dá origem ao modelo $\kappa - \omega$ SST, permite uma representação mais precisa do escoamento em regiões próximas às paredes sem o refinamento das malhas nessas regiões (MARTINS et al., 2007, p. 1).

Rezende (2009, p. 63) diz que “o modelo SST mistura a formulação robusta e precisa do modelo $\kappa - \omega$ próximo à parede com a independência do modelo $\kappa - \epsilon$ na corrente livre.”.

O quadro a seguir mostra uma comparação entre esses três modelos, com suas vantagens e desvantagens.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens dos modelos de turbulência

| | Vantagem | Desvantagem |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| κ-ϵ | <p>Normalmente fornece bons resultados para maioria dos escoamentos na área industrial</p> <p>Relativamente simples e de fácil implementação</p> <p>Permite inclusão de efeitos adicionais (rugosidade da parede, etc.)</p> | <p>Difícil formulação para tratamento próximo a parede</p> <ul style="list-style-type: none"> - Requer funções de amortecimento complexas e apresenta baixa acurácia - Não é robusto nem preciso <p>Não captura escoamentos secundários;</p> <p>Resultados pobres para escoamentos com grandes curvaturas (geometria) e com fortes curvaturas das linhas de corrente (no escoamento)</p> |
| κ-ω | <p>Simple formulação para tratamento próximo a parede</p> <ul style="list-style-type: none"> - Robusto e preciso - Resultados mais precisos para transferência de calor com uma parede sólida; <p>Relativamente simples e de fácil implementação</p> <p>Permite inclusão de efeitos adicionais (rugosidade da parede, etc.)</p> | <p>Forte sensibilidade aos valores de ω na corrente livre;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Valores diferentes levam a soluções diferentes na camada limite; - Este efeito não está presente no modelo κ-ϵ <p>Não captura escoamentos secundários;</p> <p>Resultados pobres para escoamentos com grandes curvaturas (geometria) e com fortes curvaturas das linhas de corrente (no escoamento)</p> |
| SST | <p>Combina as vantagens dos modelos κ-ϵ e κ-ω:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transição suave através de função de combinação F1 - Robusto e preciso tratamento próximo a parede do modelo κ-ω; - Resultados mais precisos para transferência de calor com uma parede sólida; - Insensível aos valores da corrente livre de ω e ϵ; <p>Acrescenta melhor tratamento ao transporte de tensão cisalhante na camada limite, devido a aos resultados precisos da função de combinação F2;</p> <p>Numericamente tão barato quanto os modelos acima.</p> | <p>Implementação um pouco mais complexa:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Requer cálculos das funções de combinação e da distância da parede. <p>Não captura escoamentos secundários;</p> <p>Resultados pobres para escoamentos com grandes curvaturas (geometria) e com fortes curvaturas das linhas de corrente (no escoamento)</p> |

(fonte: SIMÕES, 2009)

Conforme Menter et al. (2003, p. [1-2]), as equações que fundamentam o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST são:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial u_i \kappa}{\partial x_i} = \frac{P_k}{\rho} - \beta^* \omega \kappa + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\nu + \sigma \kappa \nu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] \quad (37)$$

$$P_k = \min(P_k; 10 \varepsilon) \quad (38)$$

$$\varepsilon = \beta^* \kappa \omega \quad (39)$$

$$P_k = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (40)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_i \omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\nu + \sigma \omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (41)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right) \right\}^4 \right\} \quad (42)$$

$$CD_{\kappa\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial\kappa}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i}; 10^{-10}\right) \quad (43)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (44)$$

$$\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F) \quad (45)$$

$$\nu_t = \rho \frac{\alpha_1 \kappa}{\max(\alpha_1 \omega; S F_2)} \quad (46)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \cdot \omega y}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (47)$$

Onde:

$$\beta^* = 0,09;$$

$$\alpha_1 = 0,56;$$

$$\beta_1 = 0,075;$$

$$\sigma_{\kappa 1} = 0,85;$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0,5;$$

$$\alpha_2 = 0,44;$$

$$\beta_2 = 0,0828;$$

$\sigma_k = 1;$

$\sigma_\omega = 0,856;$

S – módulo do tensor de deformação do escoamento médio S_{ij} ;

ω – energia cinética turbulenta;

P_k'' – parcela de pressão referente à energia cinética turbulenta limitada para prevenir acúmulo de turbulência em regiões de estagnação;

y – distância à parede.

9.3 TEORIAS DE ONDAS

De acordo com o Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantabria (2014, p.15-19), as teorias mais utilizadas e que descrevem com uma boa aproximação o movimento das ondas do mar são as teorias de Stokes: de primeira (teoria linear), de segunda ou de quinta ordem.

Na região *nearshore*, em função do período e profundidade, as teorias que abrangem a grande maioria das ondas atuantes são as de Stokes de segunda e quinta ordem. Um ábaco relacionando a profundidade, período e altura de onda deve ser consultado para saber qual a teoria mais adequada a ser utilizada para os cálculos (ver seção 6.1).

9.3.1 Teoria de Stokes de segunda ordem

Esta teoria é fácil de implementar, visto que ela acrescenta somente um termo de segunda ordem a teoria de Stokes de primeira ordem. Ela está fundamentada nas seguintes equações:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(\varphi) + \frac{K H^2 (3 - \delta^2)}{16 \delta^3} \cos(2\varphi) \quad (48)$$

$$\delta = \tanh(K h) \quad (49)$$

$$U_x = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh(K.z)}{\sinh(K.h)} \cos(\varphi) + \frac{3H^2 \sigma K \cosh(2K.z)}{16(\sinh(K.h))^4} \cos(2\varphi) \quad (50)$$

$$U_y = \frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh(K.z)}{\sinh(K.h)} \sin(\varphi) + \frac{3H^2 \sigma K \sinh(2K.z)}{16(\sinh(K.h))^4} \sin(2\varphi) \quad (51)$$

Em que:

z – posição da superfície da água em relação ao fundo do oceano.

9.3.2 Teoria de Stokes de quinta ordem

As teorias anteriores representam bem as ondas de pequenas alturas, porém, a medida que essa última aumenta, é necessária a introdução de uma outra formulação que acrescenta termos de ordem superior para representar adequadamente o movimento das ondas. A seguir são apresentadas as equações que compõem essa teoria:

$$\frac{\pi.H}{h} = \frac{\lambda}{h} \left[\zeta + \zeta^3 B_{33} + \zeta^5 (B_{35} + B_{55}) \right] \quad (52)$$

$$\lambda = \lambda_o \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \left(1 + \zeta^2 C_1 + \zeta^4 C_2\right) \quad (53)$$

$$\eta = \frac{\zeta \cos(\varphi)}{K} + (\zeta^2 B_{22} + \zeta^4 B_{24}) \frac{\cos(2\varphi)}{K} + (\zeta^3 B_{33} + \zeta^5 B_{35}) \frac{\cos(3\varphi)}{K} + \frac{\zeta^4 B_{44} \cos(4\varphi)}{K} + \frac{\zeta^5 B_{55} \cos(5\varphi)}{K} \quad (54)$$

$$U_x = avel_1 \cosh(K.z) \cos(\varphi) + avel_2 \cosh(2K.z) \cos(2\varphi) + avel_3 \cosh(3K.z) \cos(3\varphi) \\ + avel_4 \cosh(4K.z) \cos(4\varphi) + avel_5 \cosh(5K.z) \cos(5\varphi) \quad (55)$$

$$U_y = avel_1 \sinh(K.z) \sin(\varphi) + avel_2 \sinh(2K.z) \sin(2\varphi) + avel_3 \sinh(3K.z) \sin(3\varphi) \\ + avel_4 \sinh(4K.z) \sin(4\varphi) + avel_5 \sinh(5K.z) \sin(5\varphi) \quad (56)$$

$$avel_1 = \frac{2\pi}{TK} (\zeta A_{11} + \zeta^3 A_{13} + \zeta^5 A_{15}) \quad (57)$$

$$avel_2 = \frac{4\pi}{TK} (\zeta^2 A_{22} + \zeta^4 A_{24}) \quad (58)$$

$$avel_3 = \frac{6\pi}{TK} (\zeta^3 A_{33} + \zeta^5 A_{35}) \quad (59)$$

$$avel_4 = \frac{8\pi}{TK} (\zeta^4 A_{44}) \quad (60)$$

$$avel_5 = \frac{10\pi}{TK} (\zeta^5 A_{55}) \quad (61)$$

Em que:

A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} – constantes polinomiais;

$avel_{(1,2,3,4,5)}$ – amplitude dos termos.

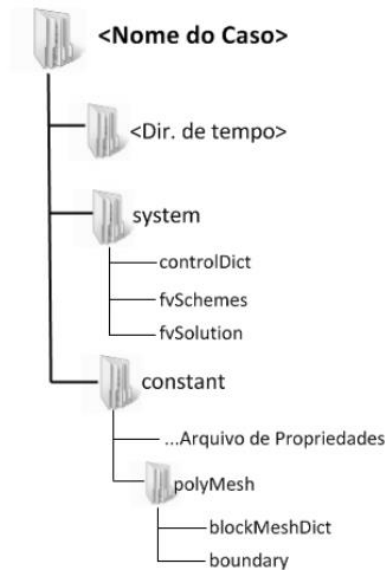
9.4 O CÓDIGO OPENFOAM

O OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) é um código computacional livre e aberto destinado a modelagem numérica computacional de fluídos que foi lançado no ano de 2004. Sua linguagem de programação é essencialmente em C++, esta é utilizada para criar dois tipos de arquivos executáveis (*applications*): *solvers* e *utilities*. O primeiro é utilizado para resolver cada tipo de problema especificado e o segundo possibilita a manipulação de dados. Por ser um código livre, permite que os usuários modifiquem os arquivos executáveis para melhor adaptá-los a um determinado problema. O OpenFOAM vem sendo utilizado por inúmeras empresas comerciais e em meio acadêmico para resolver problemas como os de fluxos de fluídos compressíveis, incompressíveis, multifásicos, combustão e transferência de calor (LAMBERT, p. 11, 2012, tradução nossa).

Segundo Favero (p. 49-70, 2009) os *solvers* deste código utilizam um conjunto de arquivos que unem as informações necessárias para se resolver um determinado caso. Estes arquivos guardam informações como descrição da geometria, discretização da malha de cálculo, condições de contorno, parâmetros para os métodos numéricos e outras propriedades relevantes do problema em questão.

A figura 38 mostra a configuração de diretórios e arquivos necessários para se realizar uma simulação através do código OpenFOAM; estes são descritos na sequência.

Figura 38 – Configuração dos diretórios e arquivos necessários para a realização de uma simulação através do código OpenFOAM



(fonte: FAVERO, 2009)

A pasta **<Nome do caso>** representa a raiz de cada caso e é dentro dela que são colocados os diretórios e arquivos necessários para rodar as simulações. Nos itens a seguir são abordadas breves descrições sobre o conteúdo destes diretórios:

- a) **<Dir. de tempo>** – contém os dados individuais de variáveis como pressão, velocidade, vorticidade, etc. À medida que uma simulação está rodando, surgem novos diretórios, cada um referente a um determinado instante de tempo, conforme intervalo de tempo e tempo total de simulação previamente determinados;
- b) **<system>** – esse diretório está associado a forma como o caso em questão será solucionado. Existem pelo menos três arquivos fundamentais que devem estar sempre contidos nesse diretório são eles: *controlDict*, *fvSchemes* e *fvSolution*. O primeiro possibilita controlar o tempo de simulação, passo de tempo e intervalo de escrita dos dados, o segundo especifica os métodos necessários para a discretização. Já o último dos arquivos mencionados, representa os métodos de soluções adotados e suas tolerâncias; aqui também é informado o modo de representação da turbulência (RANS, LES ou DNS).
- c) **<constant>** - deve conter arquivos relacionados às propriedades físicas como o *transportProperties*. Existe um outro diretório dentro deste chamado de *polyMesh*, que é onde o usuário define a geometria do problema, nome dos contornos para que possam ser atribuídas condições a eles, tipo de malha utilizada e o refinamento da mesma; os arquivos relacionados a essas funções são o *blockMeshDict* e *boundary*.

9.5 A EXTENSÃO IHFOAM

O IHFOAM é um dos *solvers* do código OpenFOAM, extensão que foi desenvolvida pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantabria. Ela resolve as equações em três dimensões para o modelo numérico do tipo RANS de um escoamento bifásico de fluidos incompressíveis utilizando a metodologia VOF (*Volume of Fluid*), na qual cada fase é descrita em função da fração de volume que um determinado material ocupa numa célula, método que possui a vantagem de representar facilmente configurações complexas de superfície livre sem que seja necessário a utilização de malha dinâmica.

Esta extensão é capaz de fornecer ao código OpenFOAM a possibilidade de gerar ondas e aplicar as diversas teorias da dinâmica das mesmas, bem como definir suas alturas, períodos, fases e direção de propagação. Sendo assim, é uma ferramenta apropriada para aplicações em engenharia costeira. (INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE CANTABRIA, p. 1-2, 2014, tradução nossa).

10 APLICAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os casos estudados em função das variáveis do problema tais como profundidade, altura e período da onda incidente, afastamento entre placas, posição angular das placas e a influência da curvatura nas extremidades das mesmas. Primeiramente, apresentam-se os casos estudados, as condições de contorno utilizadas, a malha de cálculo escolhida e, por fim, será mostrado como as variáveis escolhidas modificam as características do escoamento em termos de velocidade, vorticidade, pressão, forças e coeficientes de arraste e sustentação.

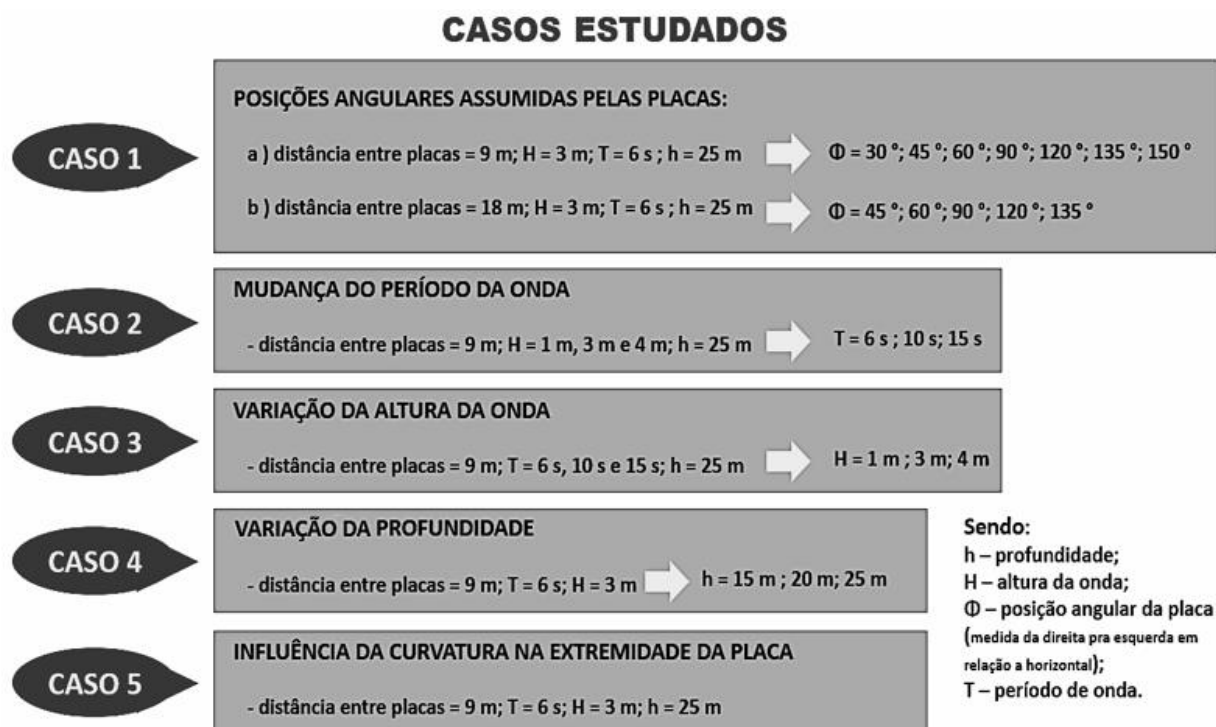
10.1 CASOS DE ESTUDO

O presente trabalho foi dividido em cinco cenários, sendo que todos esses estão focados no comportamento do escoamento agindo sobre as placas dos *Waverollers*. São eles:

- a) **posições angulares assumidas pelas placas** – consiste na análise do escoamento para as diversas posições angulares que a placa assume durante seu movimento ocasionado pelas ondas;
- b) **mudança do período da onda** – compreende o estudo de como o aumento ou diminuição do período da onda, associado às alturas de onda consideradas, modifica as características principais do escoamento;
- c) **variação da altura da onda** – estuda como a altura da onda, em conjunto com os períodos de onda considerados, influencia no escoamento em torno das placas;
- d) **variação da profundidade** – analisa como o escoamento agiria sobre a placa de um *Waveroller* quando este for instalado em uma determinada profundidade, que pode ser mais próxima ou afastada da costa;
- e) **influência da curvatura na extremidade da placa** – abrange a análise de como a mudança na geometria na extremidade da placa difere, em termos de escoamento, de uma placa com as extremidades retas;

A figura 39 e a tabela 4, mostram, respectivamente, um esquema dos casos estudados e dos parâmetros a eles associados e as teorias de onda utilizadas no trabalho em função da profundidade, período e altura de onda.

Figura 39 – Esquema relacionando os casos estudados e os parâmetros a eles associados



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Teoria de onda utilizada em função do período e altura de onda e profundidade, utilizando o ábaco da seção 6.1

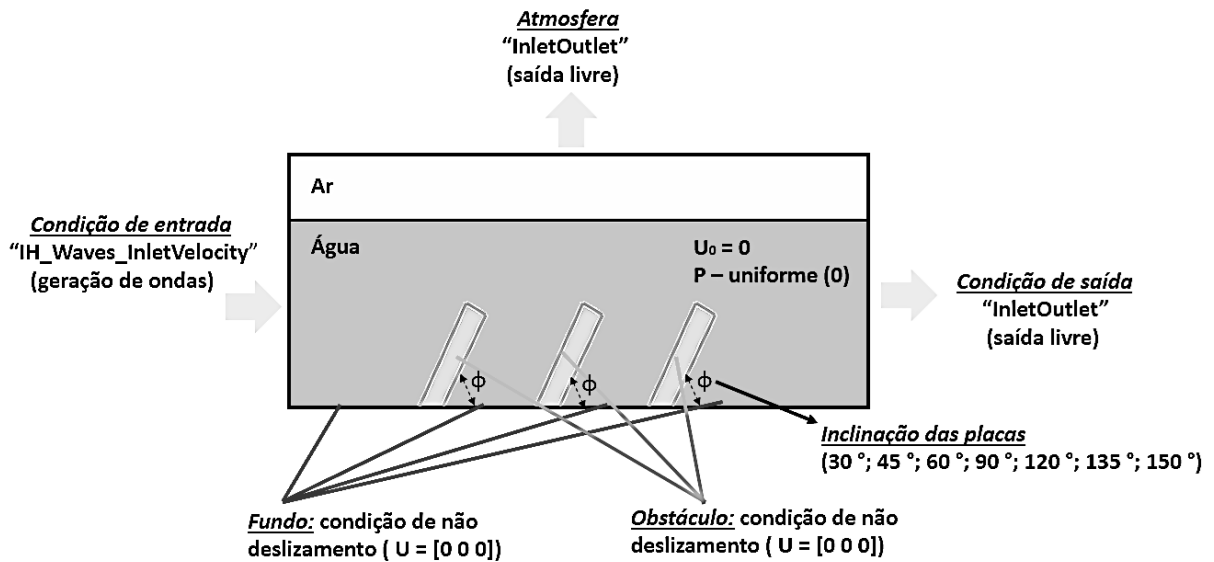
| H (m) | T (s) | h (m) | λ_0 (m) | C_0 (m/s) | λ (m) | C (m/s) | Teoria Utilizada |
|-------|-------|-------|-----------------|-------------|---------------|---------|------------------|
| 3 | 6 | 25 | 56,15 | 9,36 | 54,96 | 9,16 | Stokes 5ª ordem |
| 3 | 10 | 25 | 155,97 | 15,60 | 129,91 | 12,99 | Stokes 5ª ordem |
| 3 | 15 | 25 | 350,94 | 23,40 | 232,10 | 15,47 | Stokes 2ª ordem |
| 1 | 6 | 25 | 56,15 | 9,36 | 54,96 | 9,16 | Stokes 2ª ordem |
| 1 | 10 | 25 | 155,97 | 15,60 | 129,91 | 12,99 | Stokes 5ª ordem |
| 1 | 15 | 25 | 350,94 | 23,40 | 232,10 | 15,47 | Stokes 2ª ordem |
| 4 | 6 | 25 | 56,15 | 9,36 | 54,96 | 9,16 | Stokes 5ª ordem |
| 4 | 10 | 25 | 155,97 | 15,60 | 129,91 | 12,99 | Stokes 5ª ordem |
| 4 | 15 | 25 | 350,94 | 23,40 | 232,10 | 15,47 | Stokes 2ª ordem |
| 3 | 6 | 20 | 56,15 | 9,36 | 56,08 | 9,35 | Stokes 5ª ordem |
| 3 | 6 | 15 | 56,15 | 9,36 | 53,86 | 8,98 | Stokes 5ª ordem |

(fonte: elaborado pelo autor)

10.2 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Foram definidas condições iniciais e de contorno como: campo de velocidades inicial interno nulo, pressão uniforme, condição de entrada com geração de ondas, onda regular, região do fundo e da superfície das placas com condição de não deslizamento, condição de saída e atmosfera livres (figura 40). Parâmetros como período e altura de onda, posição angular das placas e profundidade da água foram agrupados conforme o caso estudado, como foi mostrado na figura 39.

Figura 40 – Condições iniciais e de contorno

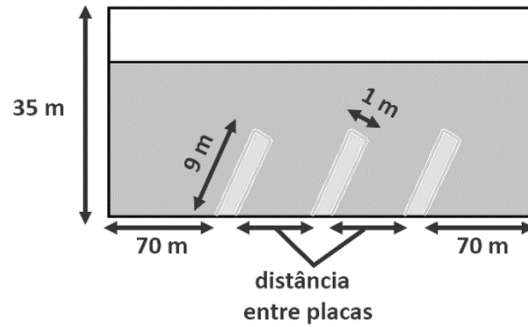


(fonte: elaborado pelo autor)

10.3 DOMÍNIO DE CÁLCULO E REPRESENTAÇÃO TEMPORAL

O domínio de cálculo foi elaborado considerando-se um afastamento entre placas igual a 9 m ou 18 m (dependendo do caso analisado), 9 m de altura de placas, distância das placas à entrada do domínio igual à da saída do mesmo, ambas adotadas como 70 m, espessura de placa de 1 m e altura do domínio igual a 35 m. Na figura 41 é apresentada essa configuração.

Figura 41 – Domínio de cálculo



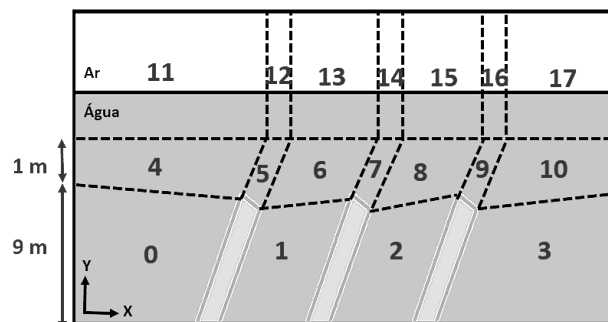
(fonte: elaborado pelo autor)

10.3.1 Malha de cálculo

O tipo de malha utilizada no domínio de cálculo foi a estruturada separada em blocos hexaédricos e dividida em elementos também hexaédricos. Para a criação da mesma foi utilizado o comando *'blockMesh'* no código OpenFOAM, gerando um total de 18 blocos. Tomou-se o cuidado para que a superfície da água estivesse sempre em um bloco retangular e não em um inclinado, visto que, caso isso não ocorresse, valores irreais de velocidade apareceriam na interface ar-água em função da mesma estar inicialmente inclinada. Para evitar tal situação foram consideradas as condições apresentadas na figura 42, a seguir.

É importante ressaltar que, ao se gerar a malha por meio da utilização dos multiblocos, surgem pequenas instabilidades numéricas nas regiões de transição entre blocos adjacentes, estas são maiores conforme aumentam as inclinações dos blocos, pois suas células ficam distorcidas ocasionando uma descontinuidade entre o formato das células de blocos vizinhos, tal problema é uma limitação encontrada ao se utilizar essa metodologia para a geração da malha.

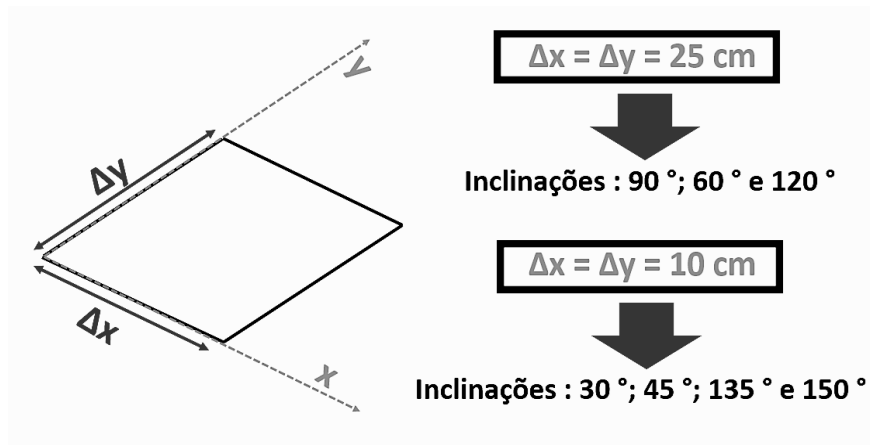
Figura 42 – Malha de cálculo



(fonte: elaborado pelo autor)

A discretização da malha foi feita considerando-se o mesmo valor para Δx e Δy , sendo que esses deveriam ser menores quanto mais inclinadas estivessem as placas, resultando em uma malha mais refinada, em razão de evitar descontinuidade no valor das velocidades na região de encontro entre dois blocos consecutivos (figura 43).

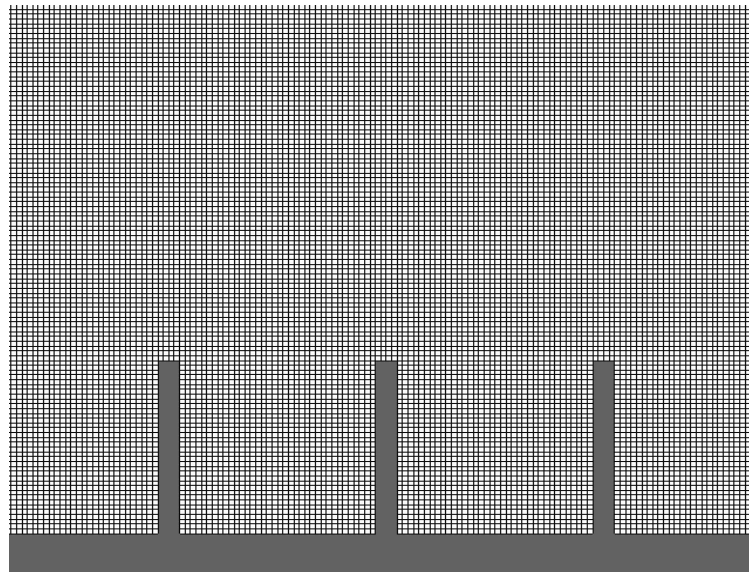
Figura 43 – Discretização da malha



(fonte: elaborado pelo autor)

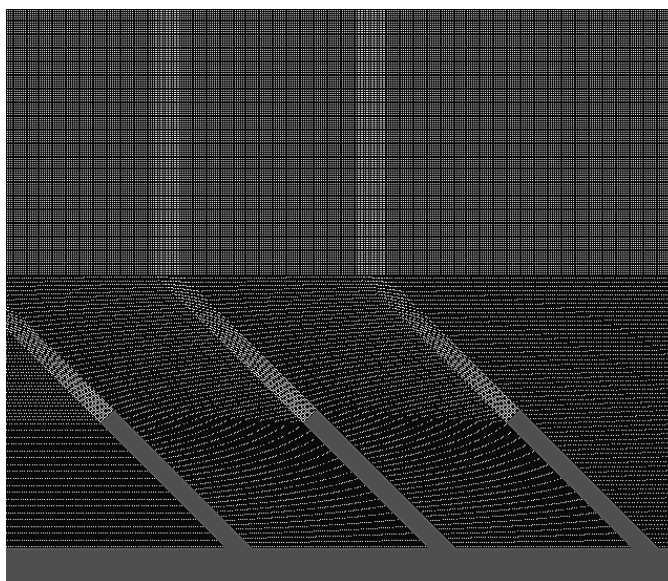
Nas figuras 44 e 45 são mostradas, respectivamente, uma malha para o caso das placas ortogonais e das placas inclinadas em relação à horizontal.

Figura 44 – Malha para placas na posição 90° com a horizontal



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 – Malha para placas na posição inclinada em relação à horizontal



(fonte: elaborado pelo autor)

10.3.2 Representação temporal

O tempo total de simulação foi de 100 s e o intervalo de tempo (Δt) adotado foi de 0,01 s, este é recalculado a cada passo para garantir a estabilidade do cálculo. Constatou-se que o intervalo de tempo entre 0 s e 40 s bem como o intervalo de 80 s a 100 s correspondem a efeitos secundários, respectivamente, de transição e de reflexão das ondas (consequência da condição de contorno de saída do domínio). Sendo assim o intervalo adotado para análise das forças de arraste e sustentação, bem como seus coeficientes, foi entre 40 s e 80 s.

10.4 POSIÇÕES ANGULARES ASSUMIDAS PELAS PLACAS

Para este cenário, foi considerado uma onda regular incidente de altura igual a 3 m, período de 6 s, fase de 4,712 rad (*default* do código), profundidade de 25 m e distância entre placas iguais a 9 m e 18 m. As posições angulares admitidas para as placas foram: 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135° e 150°.

Neste caso e em todos os próximos do presente trabalho, foi considerado, para fins de cálculo, a celeridade da onda como a velocidade de referência e a área de projeção com valor igual à altura de 9 m das placas (resultando em forças por unidade de largura de placa) nas equações 20 e 21 para o cálculo dos valores dos coeficientes de arraste e sustentação.

10.4.1 Placas distanciadas 9 m entre si

Esta corresponde a situação usual de funcionamento do dispositivo, visto que as ondas da região onde está instalado o dispositivo do projeto SURGE, no qual este trabalho está focado, possuem em média 3 m de altura. Posições extremas como 30° e 150° correspondem aos estados mais turbulentos e agitados do mar, situação que não é usual.

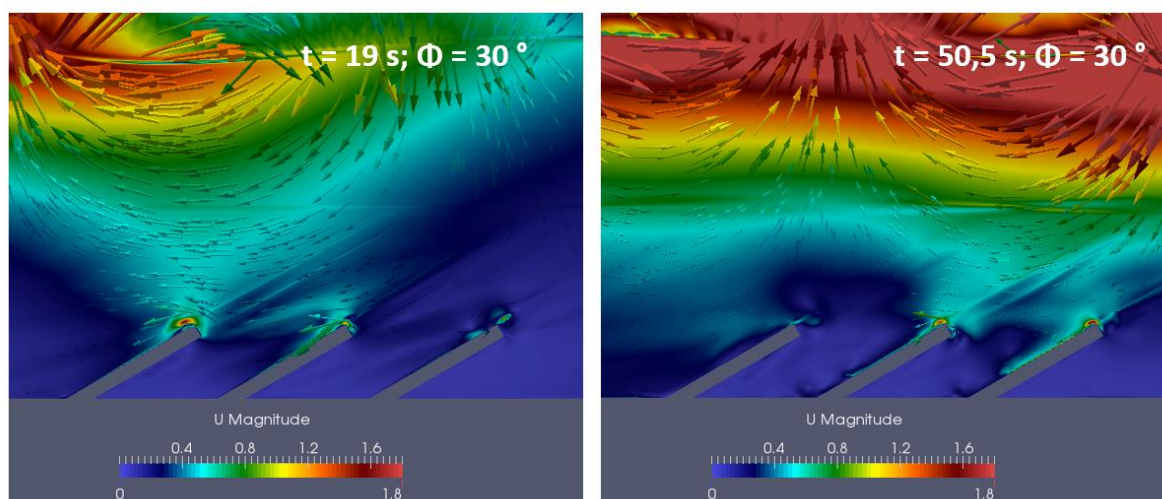
10.4.1.1 Campo de velocidades

É observado para todos os casos que, independentemente da posição angular assumida pelas placas e do instante de tempo considerado, há um aumento da velocidade nas regiões de extremidade das placas. A tendência é que, quanto mais inclinada estiver a placa, maior serão os valores assumidos pela velocidade de escoamento com o passar do tempo.

Para essa configuração de período e altura de onda, fica evidente no escoamento uma região onde existem sentidos opostos de movimento das hodógrafas.

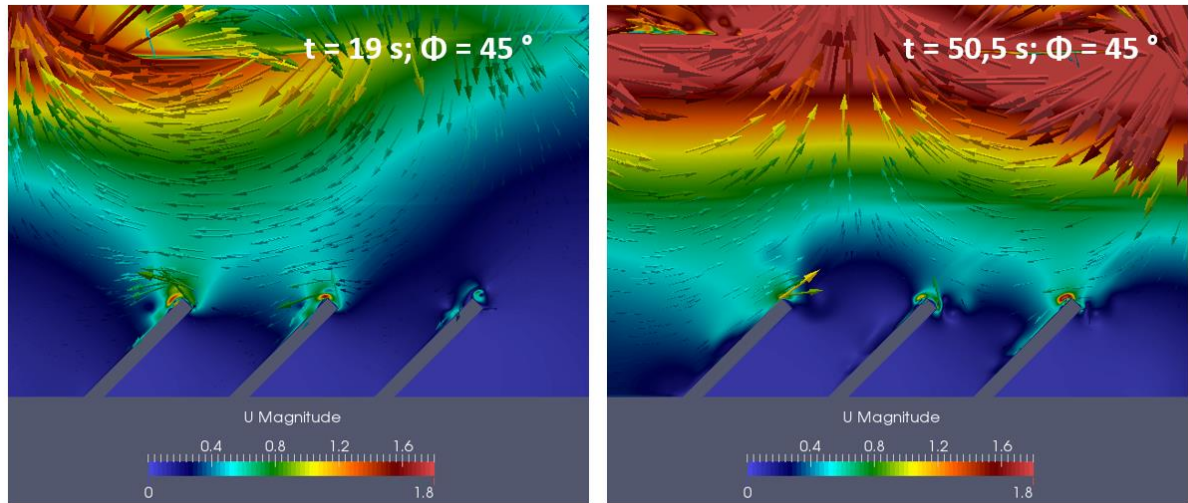
As figuras 46 a 52 mostram campos de velocidades instantâneos no entorno das placas em dois instantes de tempo (19 s e 50,5 s), para diversas posições angulares destas.

Figura 46 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 30° (Caso 1a)



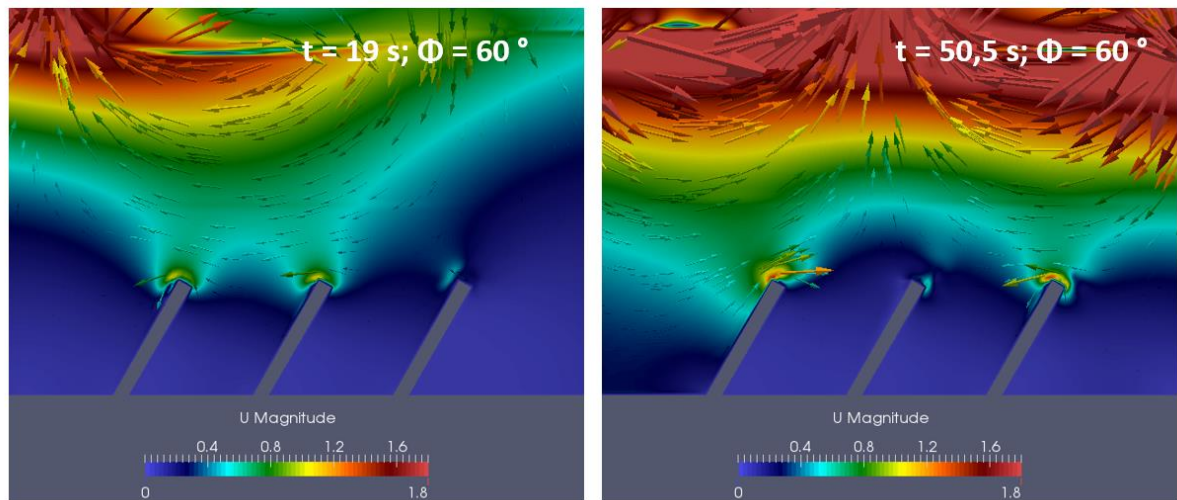
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 47 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 45° (Caso 1a)



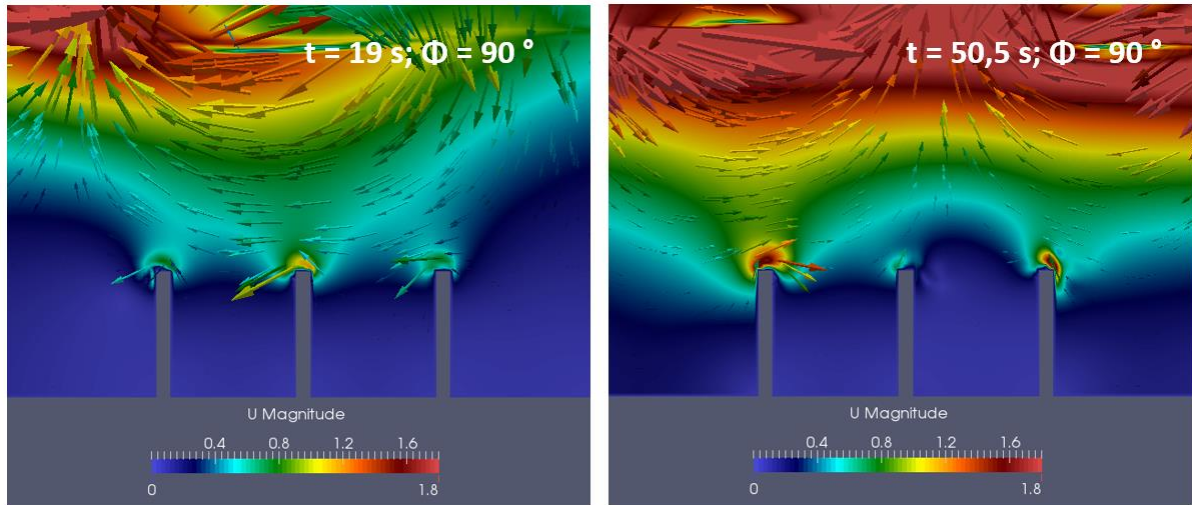
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 60° (Caso 1a)



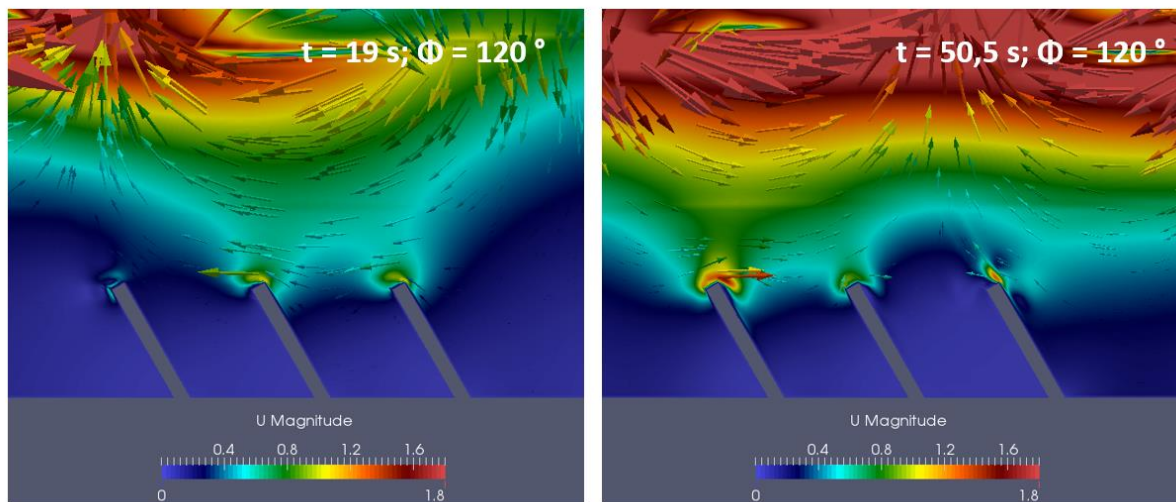
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 49 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 90° (Caso 1a)



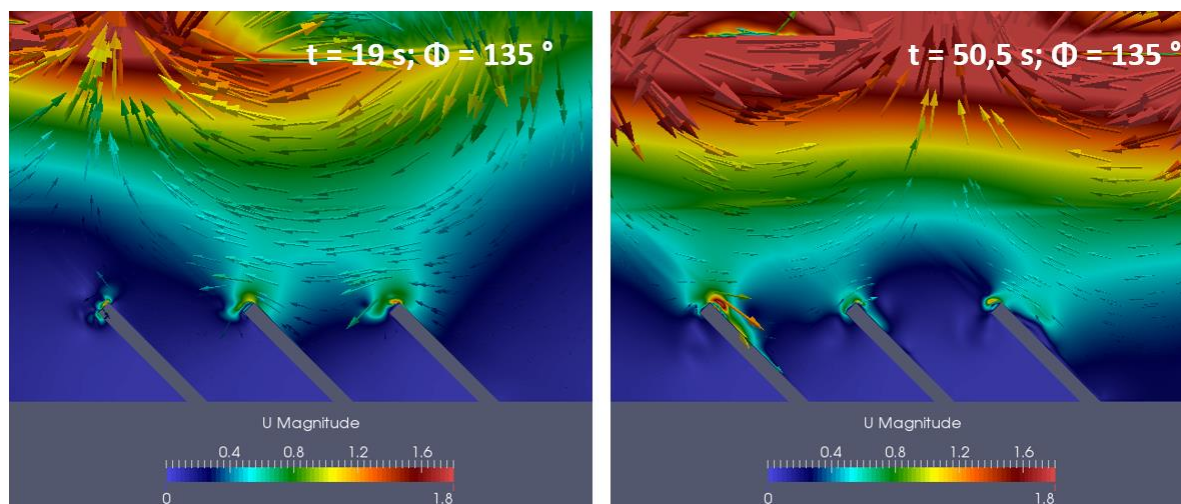
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 50 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 120° (Caso 1a)



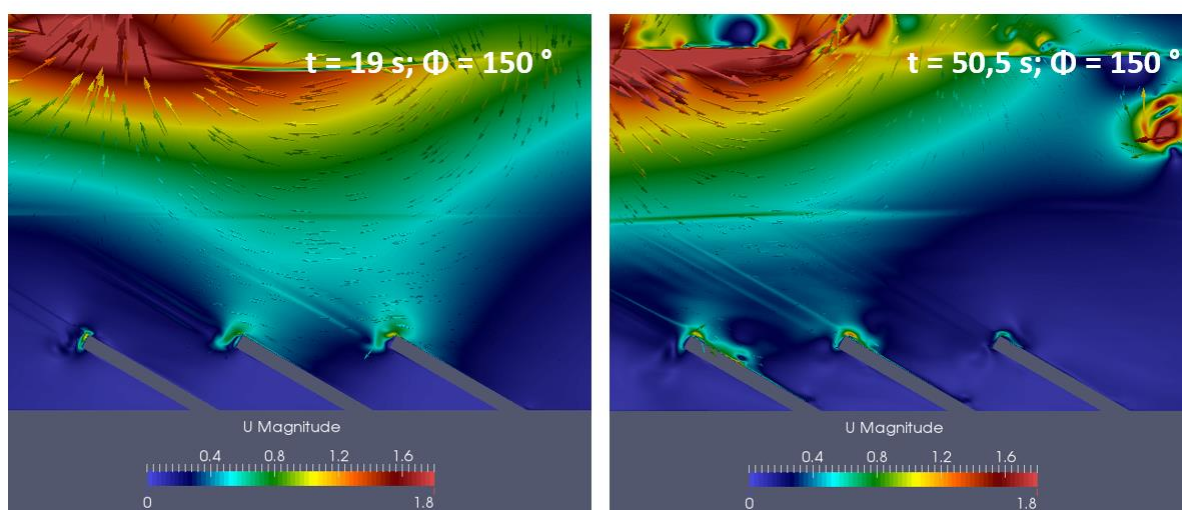
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 51 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 135° (Caso 1a)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 52 – Campo de velocidades ao longo do tempo para posição angular das placas de 150° (Caso 1a)



(fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que à medida que as placas estão mais inclinadas, a velocidade induzida pela onda não afeta diretamente todas as placas como acontece na posição angular de 90° , na qual todas as placas sofrem aumento de velocidade em suas extremidades devido a influência da onda.

É possível perceber pequenas instabilidades numéricas que surgem com o aumento da inclinação das placas em função da limitação ao se utilizar a metodologia de blocos para

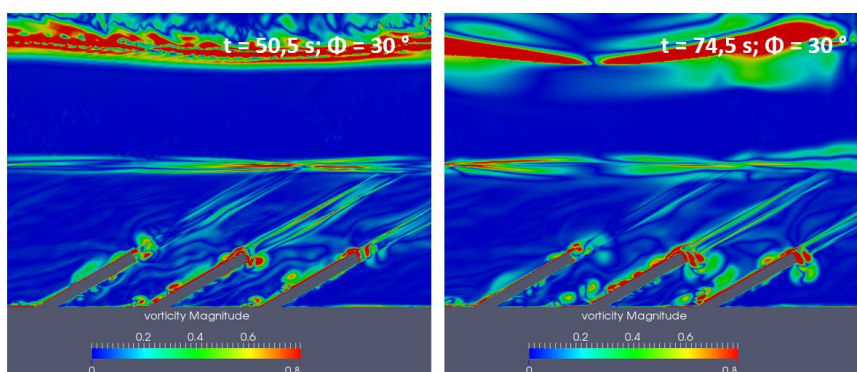
elaboração da malha. Recomenda-se utilizar outra metodologia de geração de malhas para análises mais profundas, onde tais instabilidades são mínimas ou inexistentes.

10.4.1.2 Vorticidade

Assim como a velocidade, a vorticidade tende a aumentar à medida que as placas se encontram mais inclinadas e possui maior magnitude nas extremidades das mesmas, sendo que as placas mais externas tendem a gerar mais vorticidade. Percebe-se também, que, para posições mais inclinadas, a vorticidade começa a se manifestar mais intensamente na região entre as placas e na placa central.

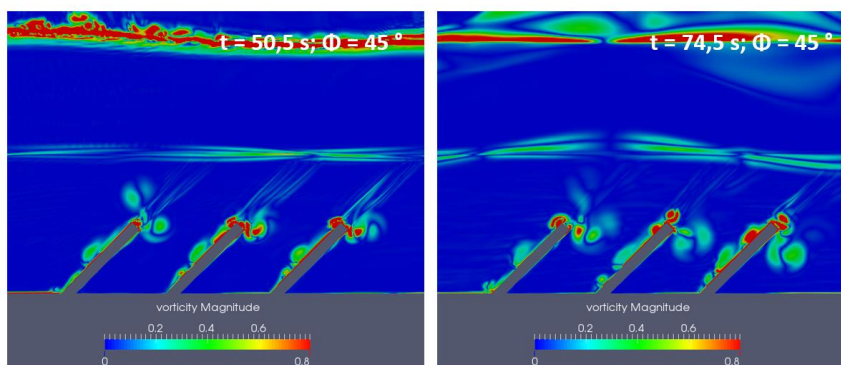
O comportamento da vorticidade para diversas posições assumidas pelas placas pode ser visto nas figuras 53 a 59, apresentadas a seguir.

Figura 53 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 30° (Caso 1a)

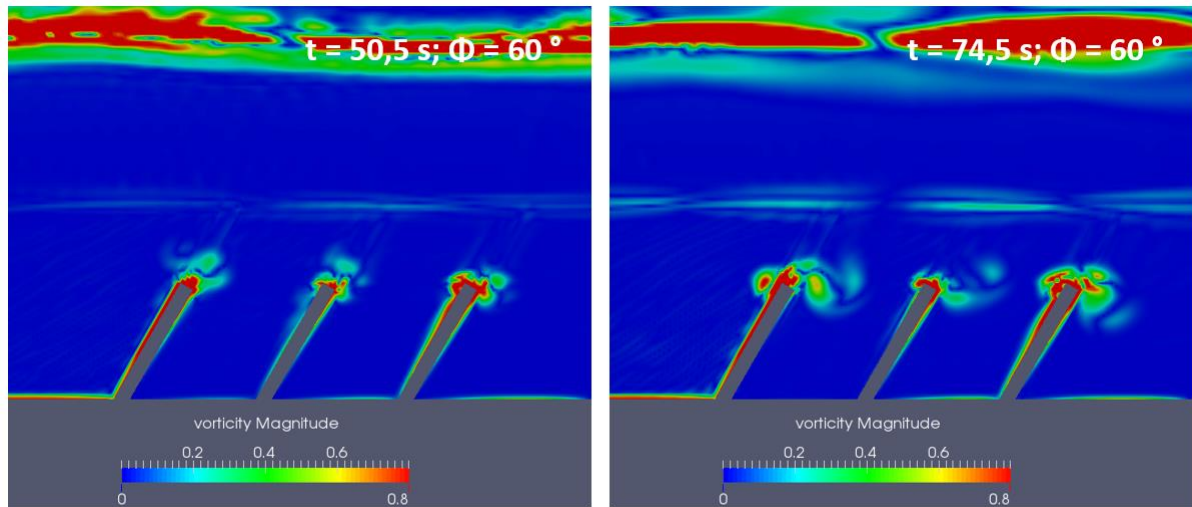


(fonte: elaborado pelo autor)

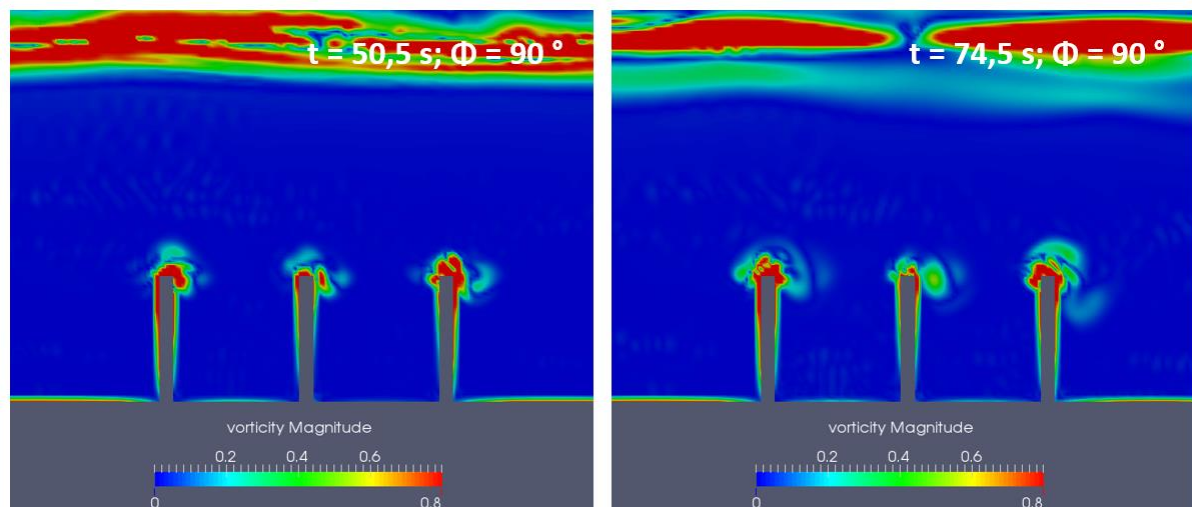
Figura 54 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 45° (Caso 1a)



(fonte: elaborado pelo autor)

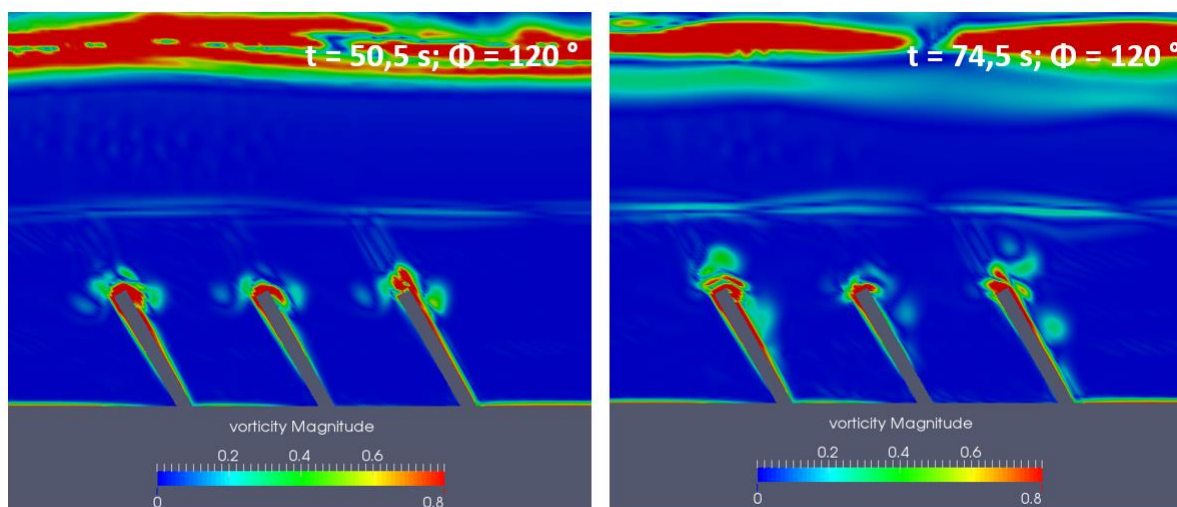
Figura 55 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 60° (Caso 1a)

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 56 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 90° (Caso 1a)

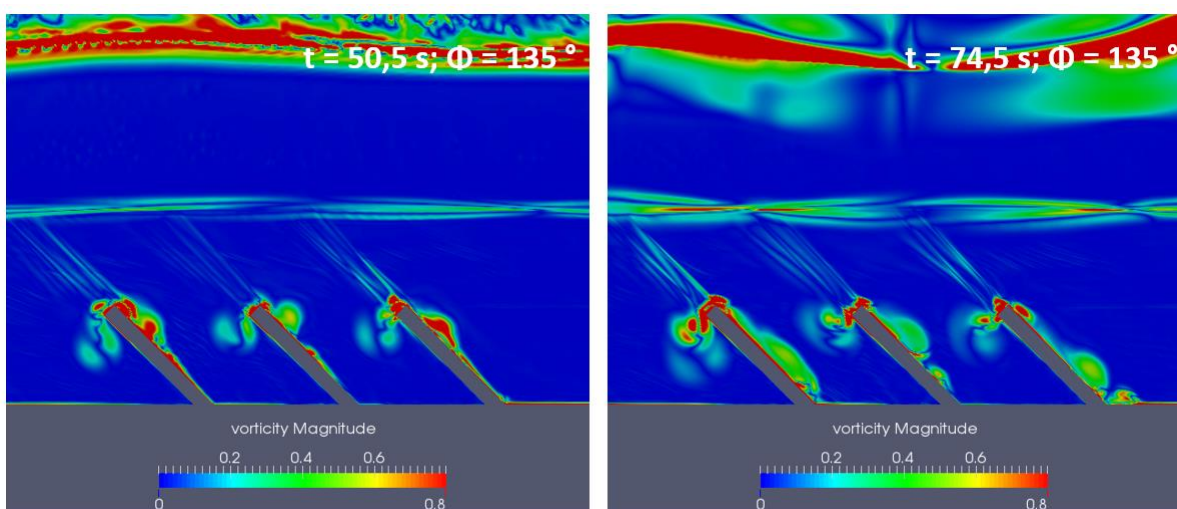
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 57 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 120° (Caso 1a)



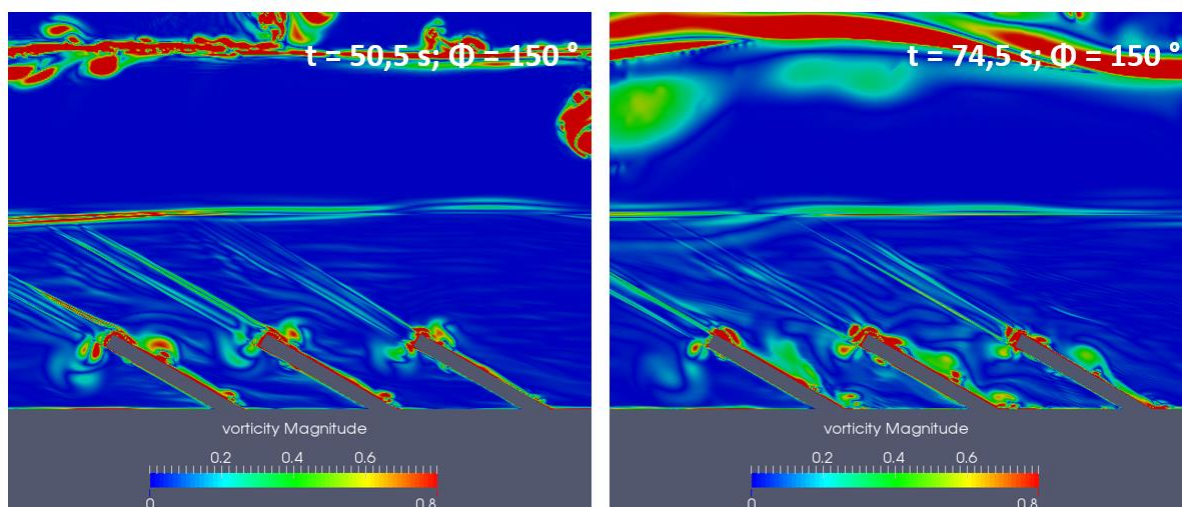
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 58 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 135° (Caso 1a)



(fonte: elaborado pelo autor)

Assim como na análise dos campos de velocidade, notam-se as instabilidades numéricas ocasionadas pelos blocos inclinados que geram células distorcidas na malha. Porém, mesmo com a ocorrência destas, é possível identificar o comportamento do escoamento, que é o objetivo de estudo deste trabalho.

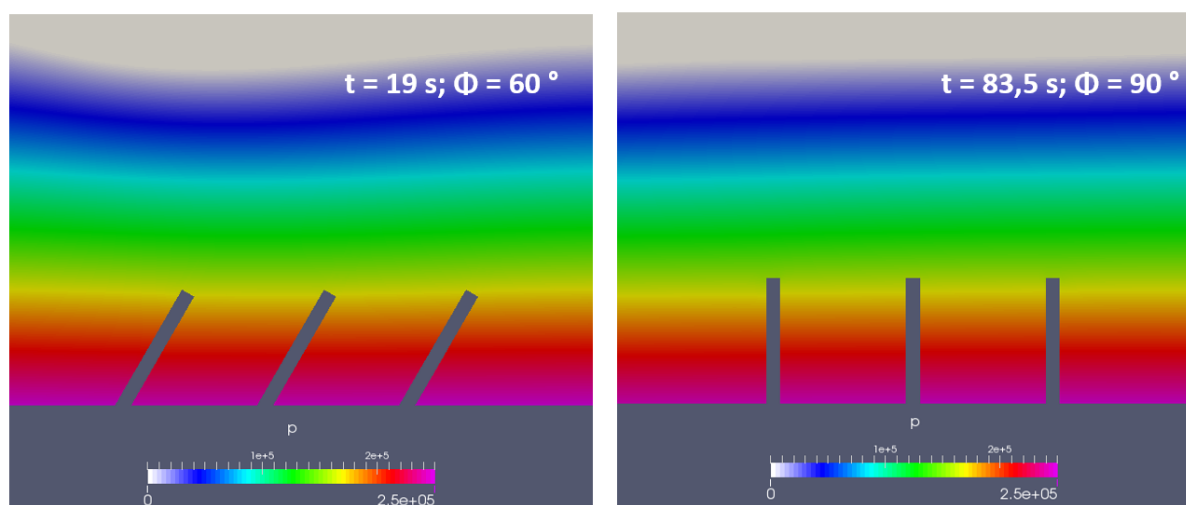
Figura 59 – Campo de vorticidade para posição angular de placas de 150° 

(fonte: elaborado pelo autor)

10.4.1.3 Pressões

As pressões não variam significativamente nas regiões de entorno das placas, independente das posições angulares assumidas pelas mesmas, mas nota-se que a maior contribuição destas é devido a parte estática. A variação do campo de pressões é suave, não sendo possível notar instabilidades numéricas nem mesmo para as placas em posições mais inclinadas.

A figura 60 apresenta o campo de pressões ao redor das placas.

Figura 60 – Campo de pressões para as posições de 60° e 90° em tempos diferentes de simulação

(fonte: elaborado pelo autor)

10.4.1.4 Forças e coeficientes de arraste e sustentação

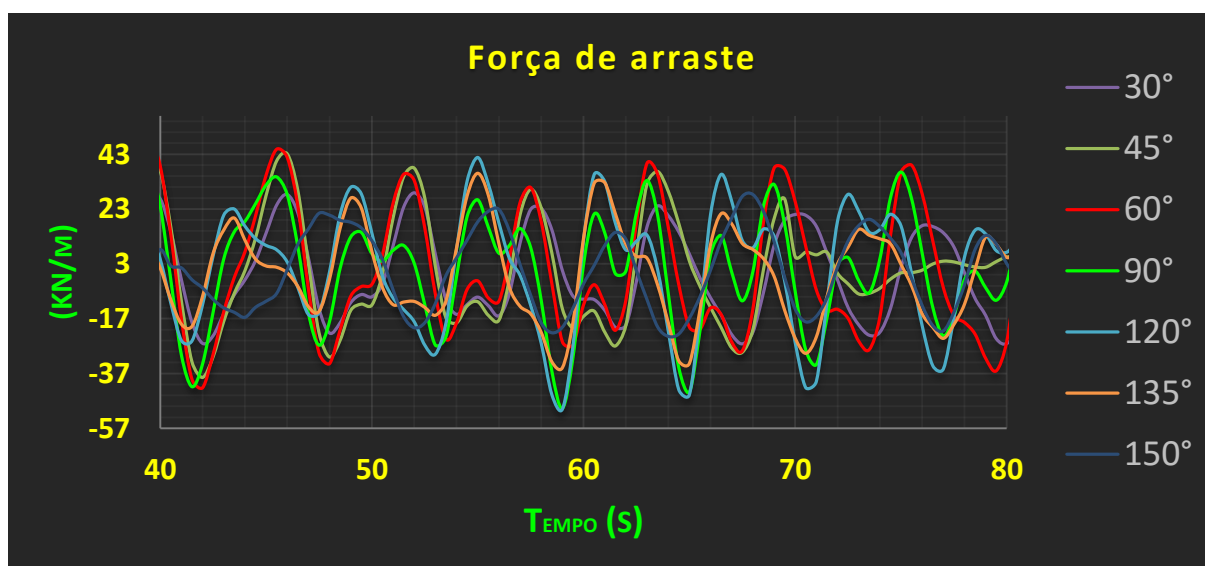
Como os coeficientes são formas adimensionais das forças, é de se esperar que o comportamento de ambos seja semelhante.

Percebe-se que com o aumento das inclinações há um aumento na magnitude da força de sustentação e, conseqüentemente, um aumento no seu coeficiente. A magnitude da força de arraste e seu coeficiente tendem a diminuir para posições mais inclinadas da placa.

Nota-se que, com maiores inclinações, oscilações secundárias nas forças e nos seus coeficientes, bem como a amplitude destas, tendem a diminuir. As placas em posições angulares opostas (cuja soma angular fecha 180°) apresentam comportamentos parecidos, porém inclinações menores que 90° tendem a causar maiores picos e oscilações que as inclinações superiores a 90° .

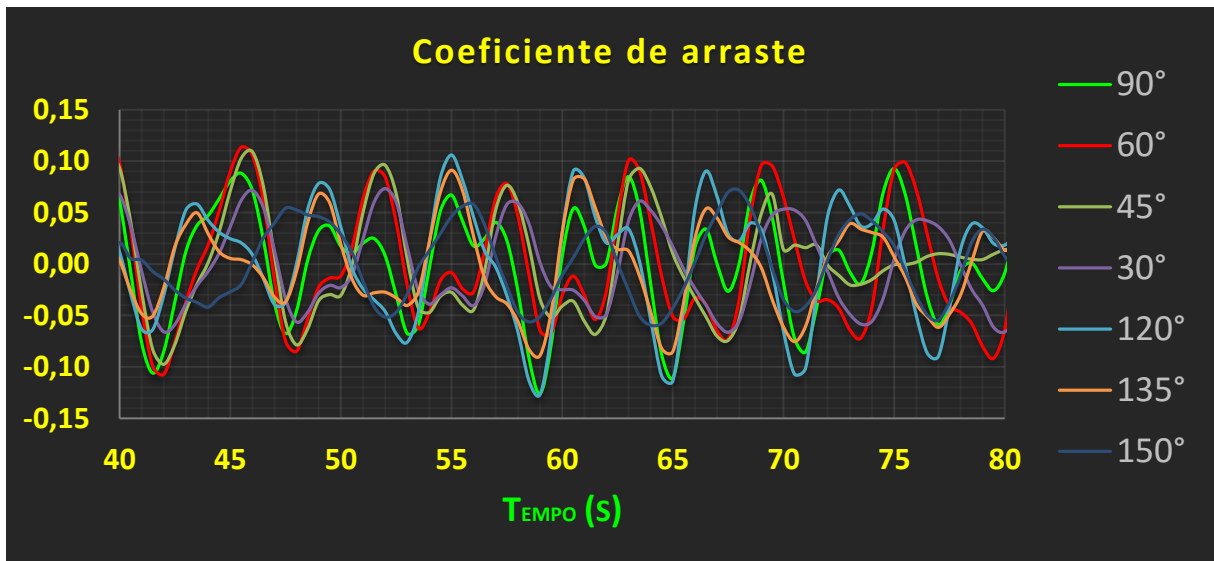
As figuras 61 a 66 representam a variação das forças de arraste e sustentação, bem como a dos seus coeficientes, ao longo do tempo; já os gráficos da figura 67 relacionam o crescimento/decrescimento da magnitude das forças de arraste e sustentação com a mudança da inclinação das placas.

Figura 61 – Comportamento da força de arraste ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a)



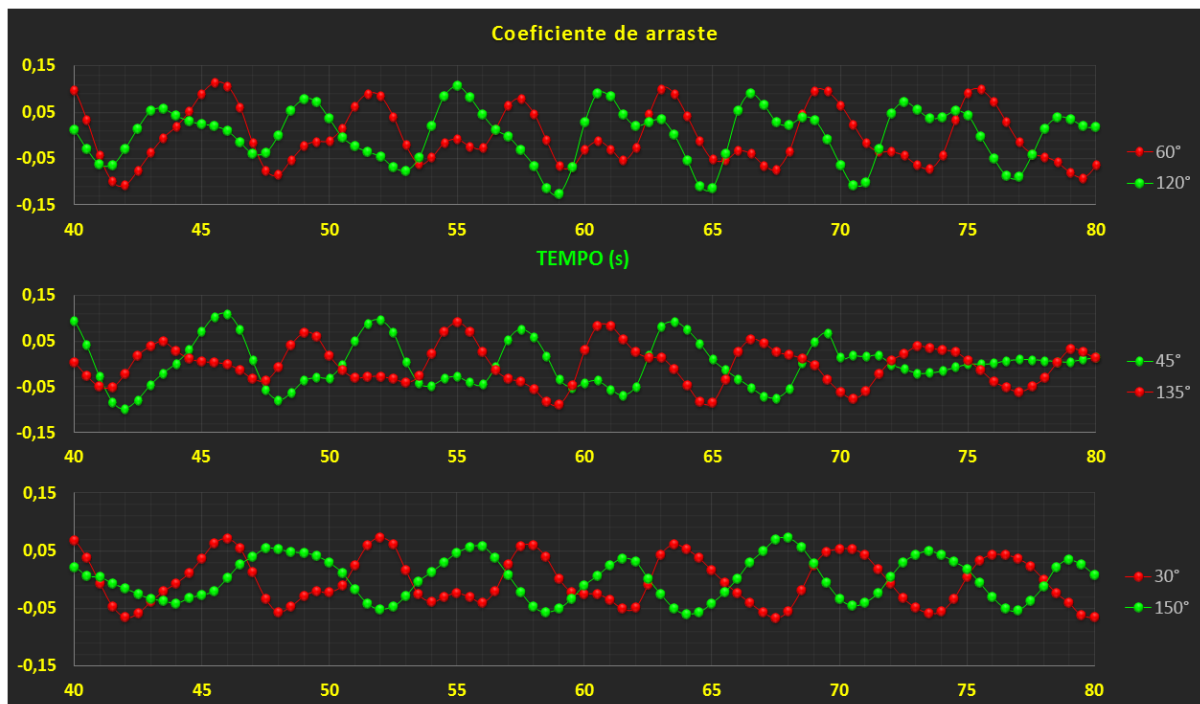
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 62 – Comportamento do coeficiente de arraste ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a)



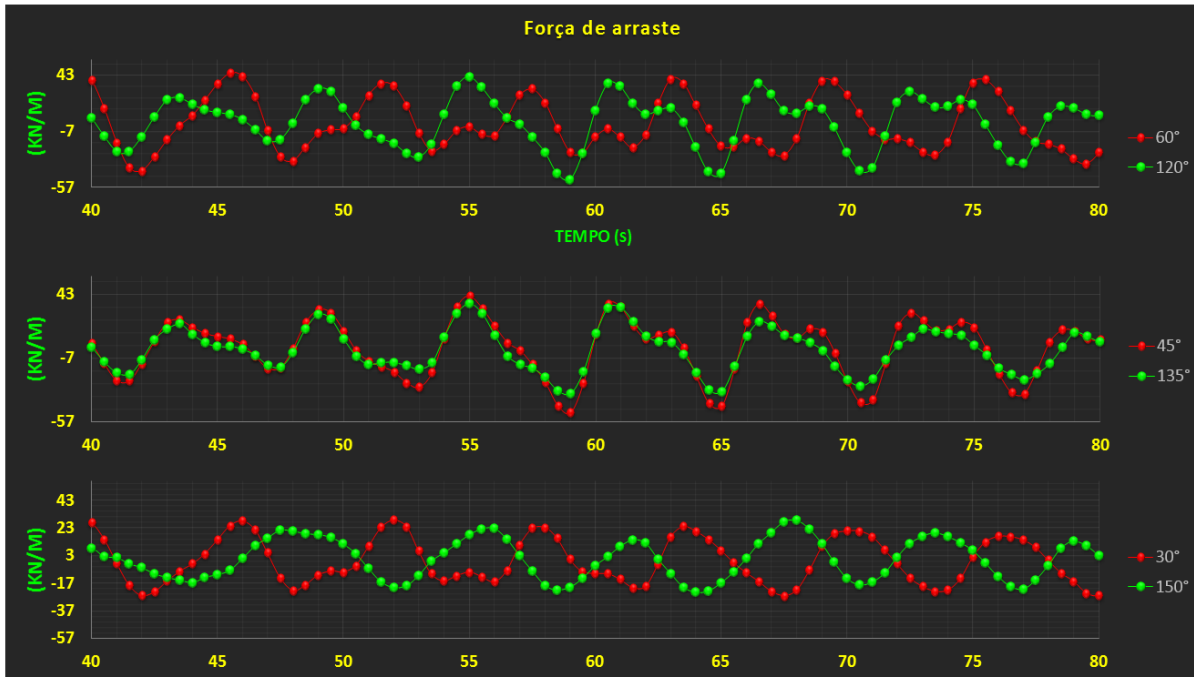
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 63 – Coeficiente de arraste ao longo do tempo para posições angulares opostas (Caso 1a)



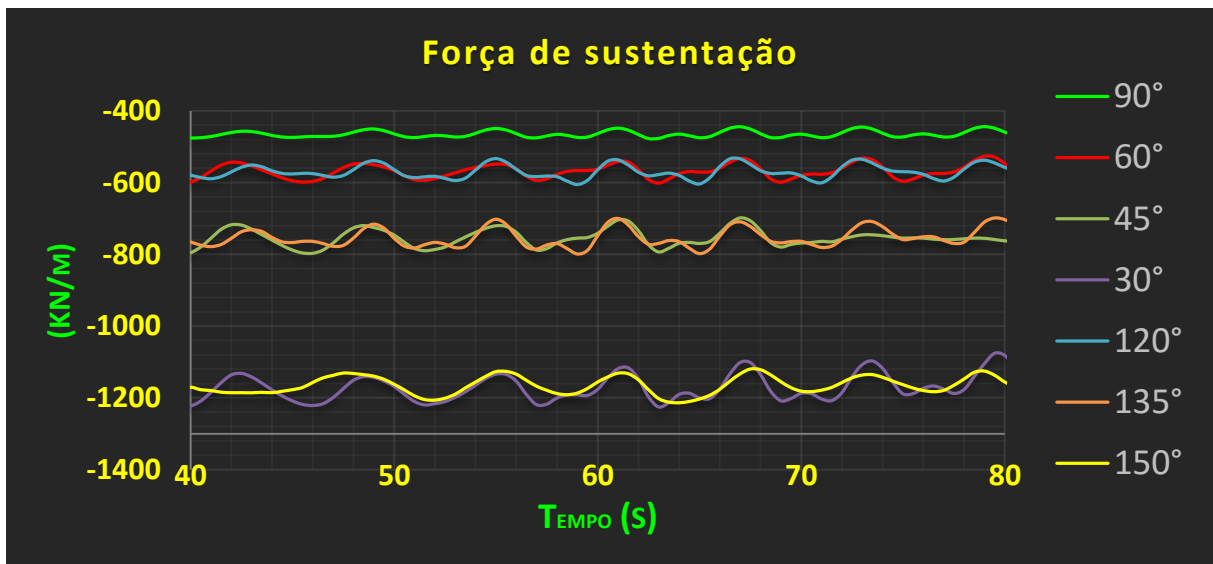
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 64 – Força de arraste ao longo do tempo para posições angulares opostas (Caso 1a)



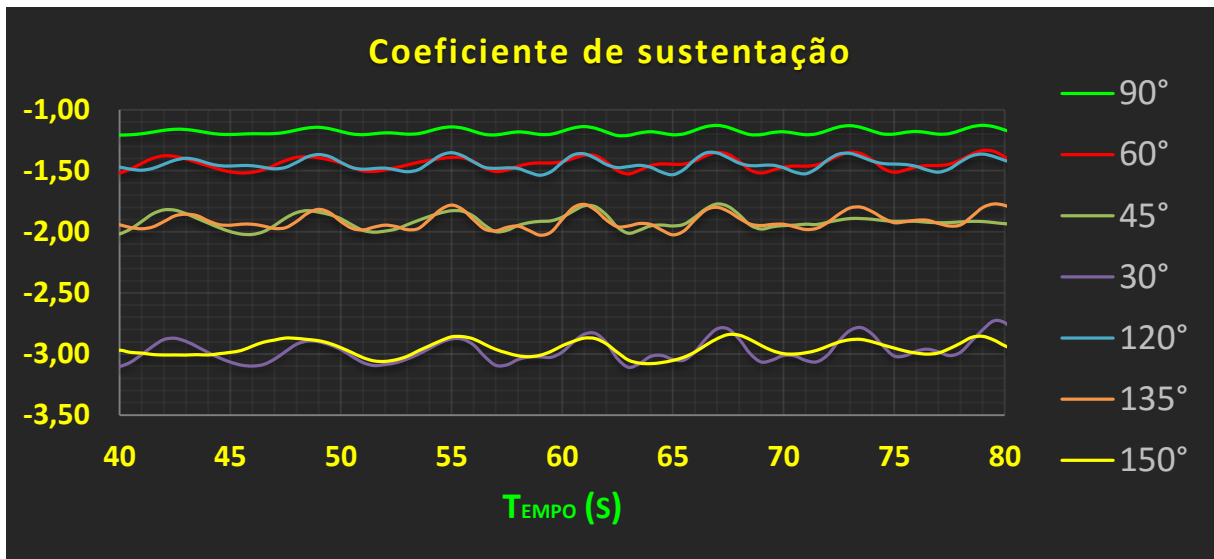
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 65 – Comportamento da força de sustentação ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a)



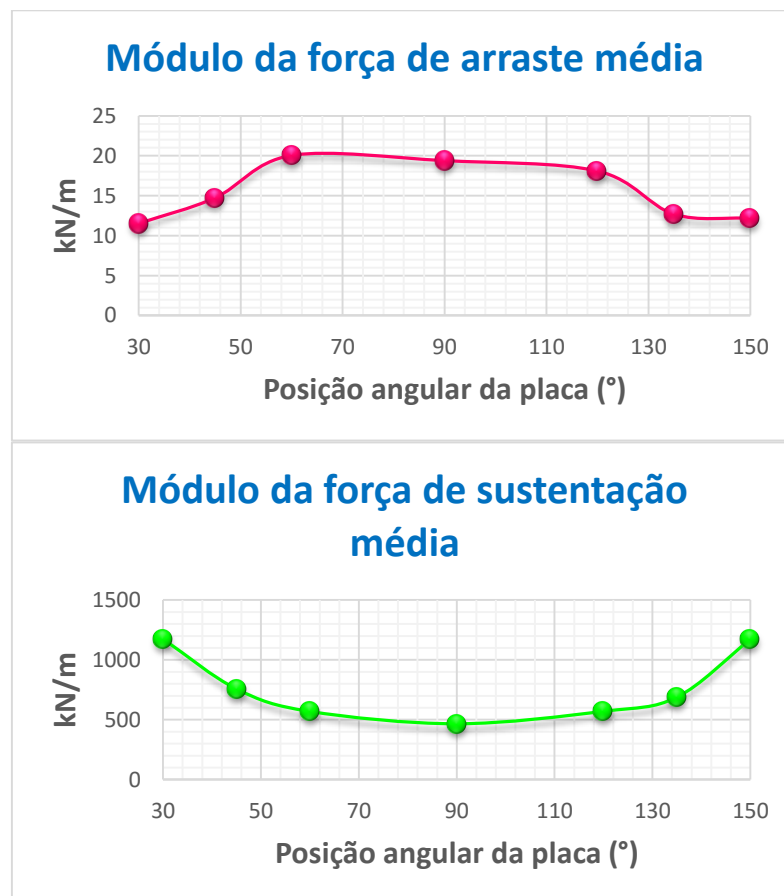
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 66 – Comportamento do coeficiente de sustentação ao longo do tempo para diversas inclinações assumidas pelas placas (Caso 1a)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 67 – Crescimento/decrescimento do módulo das forças de arraste e sustentação conforme posição angular assumida pelas placas (Caso 1a)

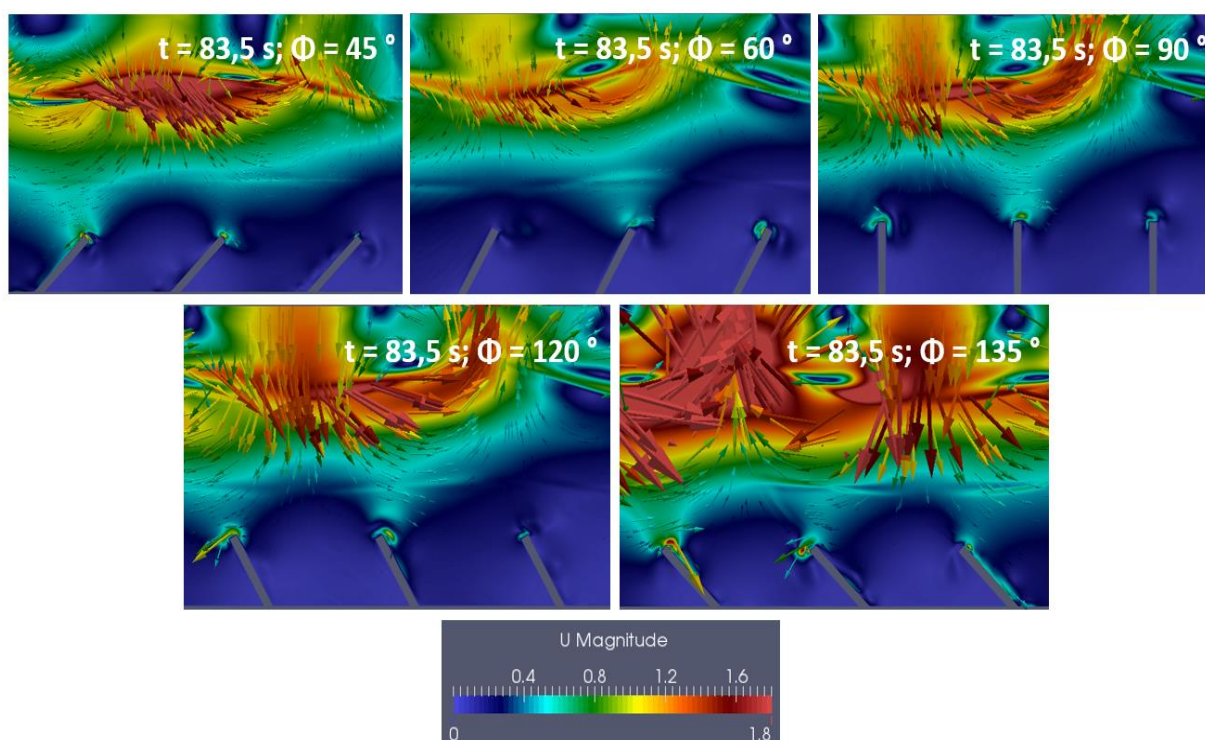


(fonte: elaborado pelo autor)

10.4.2 Placas distanciadas 18 m entre si

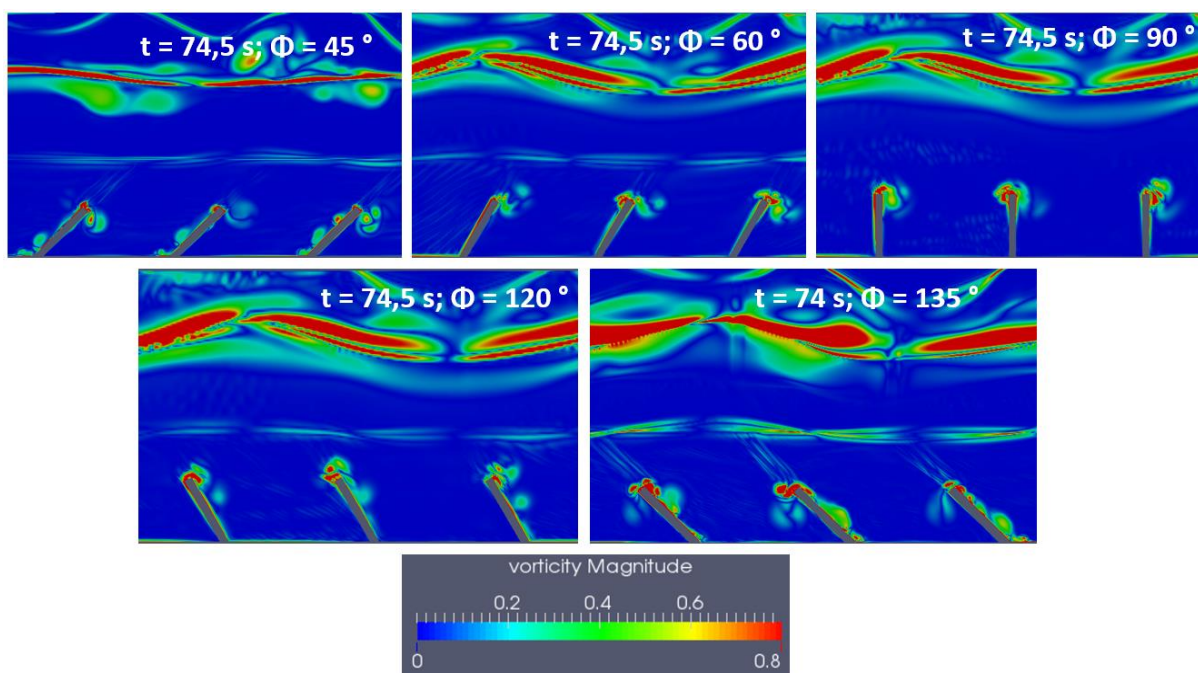
Esta situação busca analisar como o distanciamento entre placas influencia sobre as mesmas características estudadas no caso 10.4.1. Percebe-se que, se forem mantidas as mesmas configurações de onda e profundidade e aumentando a distância entre placas de 9 m para 18 m, todas as características apresentam um comportamento muito semelhante ao caso anterior. Observa-se que a força de arraste e seus coeficientes, tendem a apresentar valores muito próximos para todas as posições angulares assumidas pelas placas, o que sugere que à medida que as placas se afastam, a força de arraste age praticamente da mesma forma sobre todas as placas. As figuras 68, 69, 70 e 71 apresentam, respectivamente, o campo de velocidades, ao campo de vorticidade, a força e coeficiente de arraste ao longo do tempo e a força de sustentação e seu coeficiente também ao longo do tempo, todas para diversas inclinações das placas.

Figura 68 – Campo de velocidades para diversas posições angulares das placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b)



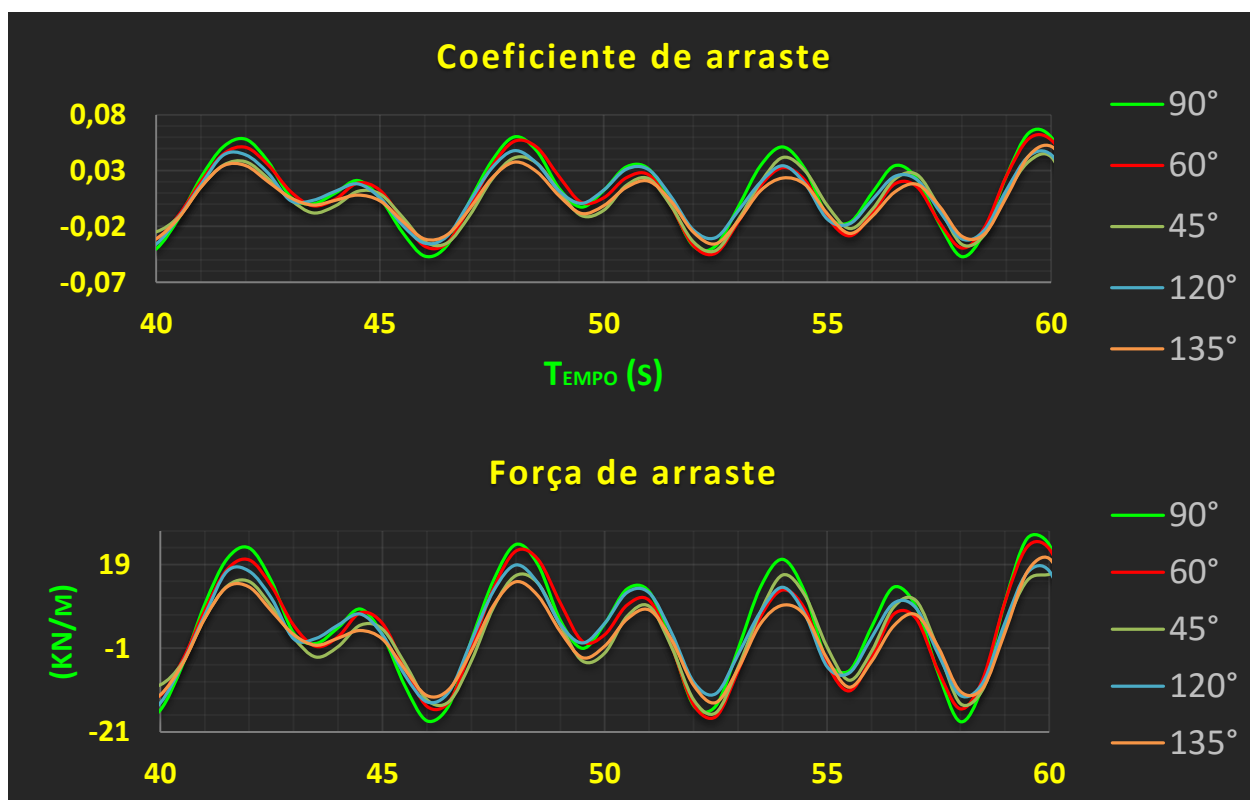
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 69 – Campo de vorticidade para diversas posições angulares das placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b)



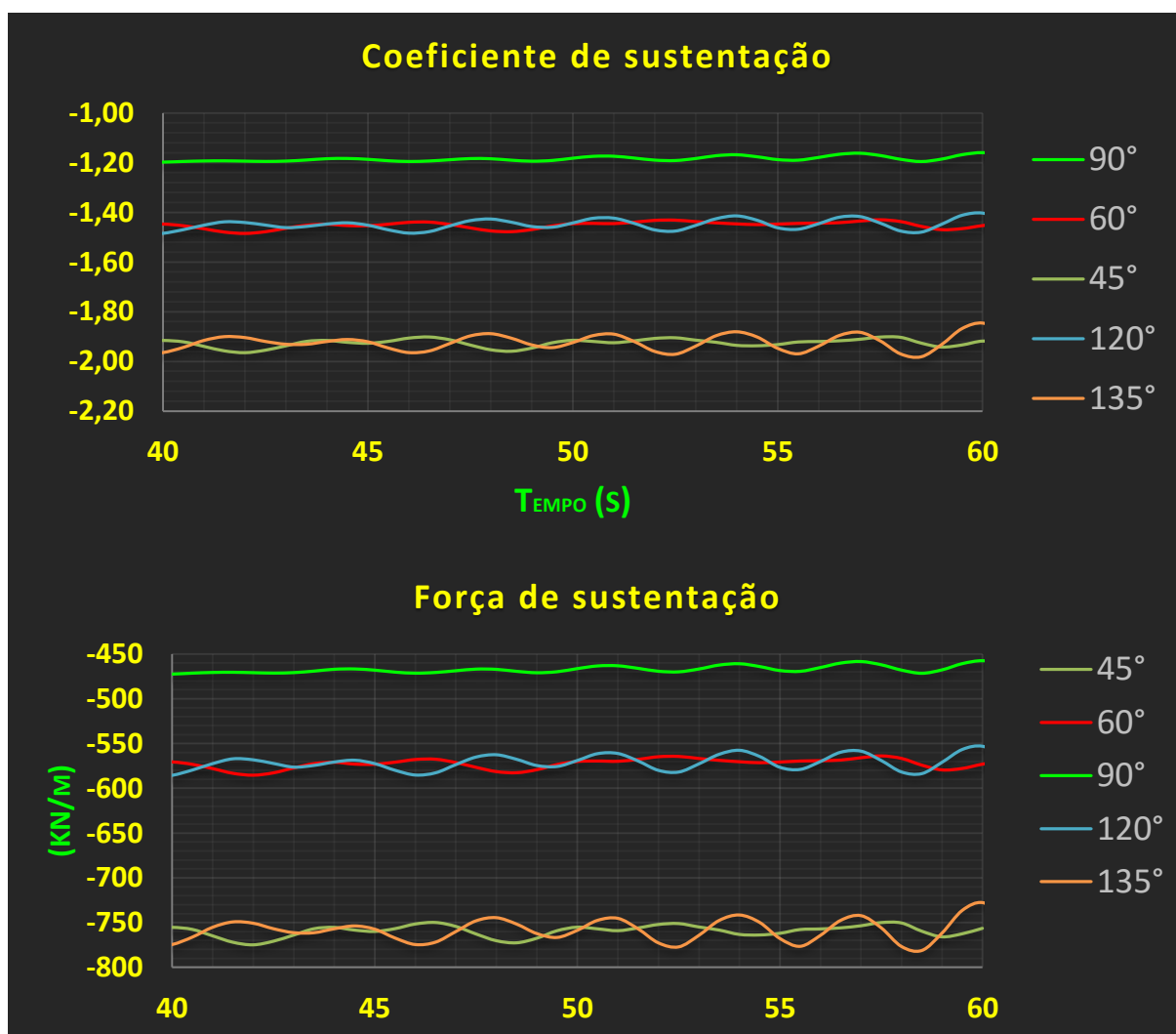
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 70 – Coeficiente e força de arraste ao longo do tempo para placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 71 – Coeficiente e força de sustentação ao longo do tempo para placas distanciadas 18 m entre si (Caso 1b)



(fonte: elaborado pelo autor)

10.5 MUDANÇA DO PERÍODO DA ONDA

Para avaliar como a mudança do período da onda incidente afeta o escoamento em torno das placas foram consideradas placas na posição angular de 90° com a horizontal, profundidade de 25 m, placas com 9 m de distância entre si e ondas com 4,712 rad de fase, levando em conta que todos os fenômenos que ocorrerem considerando esta posição irão se manifestar de forma análoga em posições mais inclinadas das placas, conforme mostrado na seção 10.4.

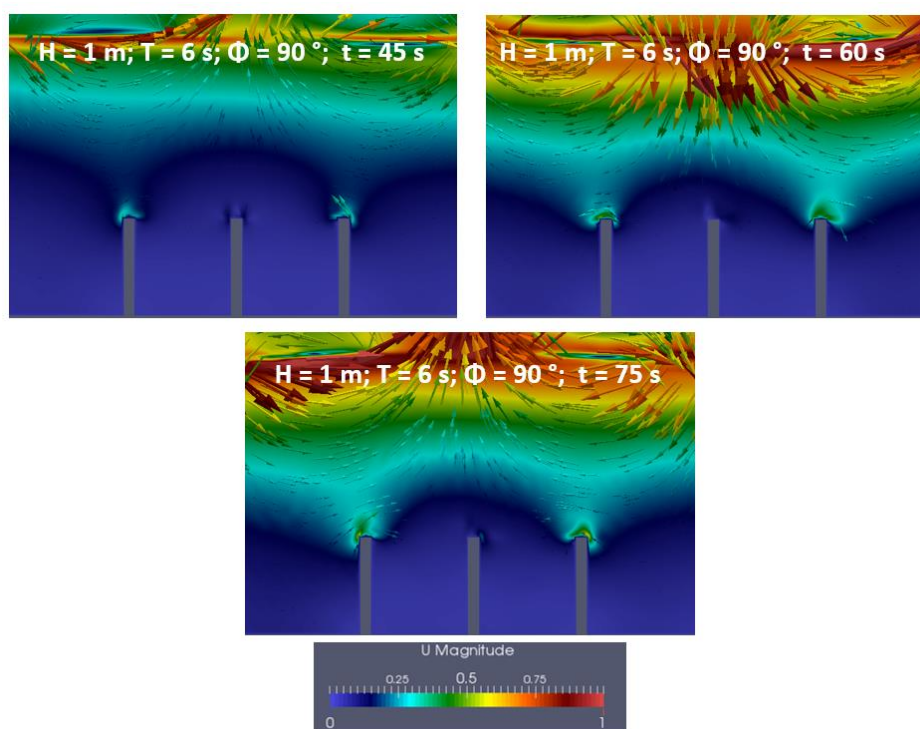
Foram estudadas as características para os períodos de onda de 6 s, 10 s e 15 s, todos avaliados considerando alturas de onda fixas de 1 m, 3 m e 4 m.

10.5.1 Campo de velocidades

À medida que o período da onda aumenta, verifica-se que as velocidades nas direções vertical e horizontal também aumentam (como mostram as equações 12 e 13), sendo que os maiores valores de velocidade concentram-se nas extremidades das placas. Outro fenômeno que é percebido, quando este aumenta, é a tendência de surgirem maiores velocidades nas regiões entre as placas. Isto pode ser explicado pelo fato de que um grande período de onda implica numa maior região de influência em função das hodógrafas mais largas que ocorrem. Fica evidente que, com o aumento do período, tende a se formar uma corrente ‘periódica’ na região entre as placas, esta se manifesta até que todo comprimento de influência da família de hodógrafas tenha passado e volta a aparecer quando uma nova família se faz presente. Nota-se que a altura de onda de 1 m não é suficiente para se observar tal fenômeno, mas é possível identificar essa tendência.

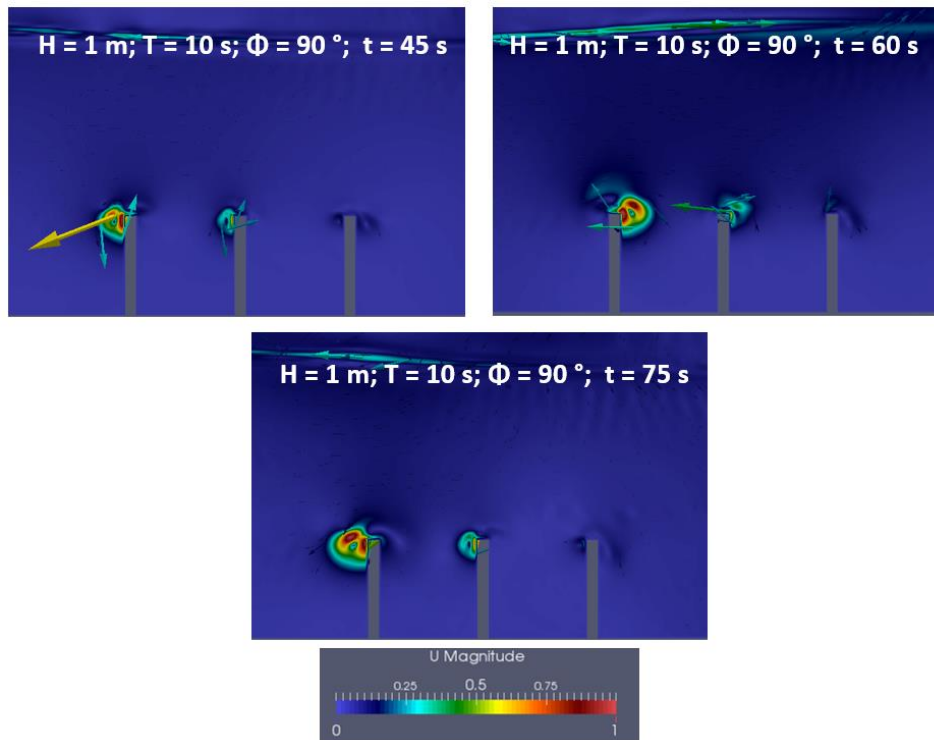
As figuras 72 a 80 mostram os campos de velocidade na região próxima às placas, em diferentes períodos para alturas fixas de onda.

Figura 72 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



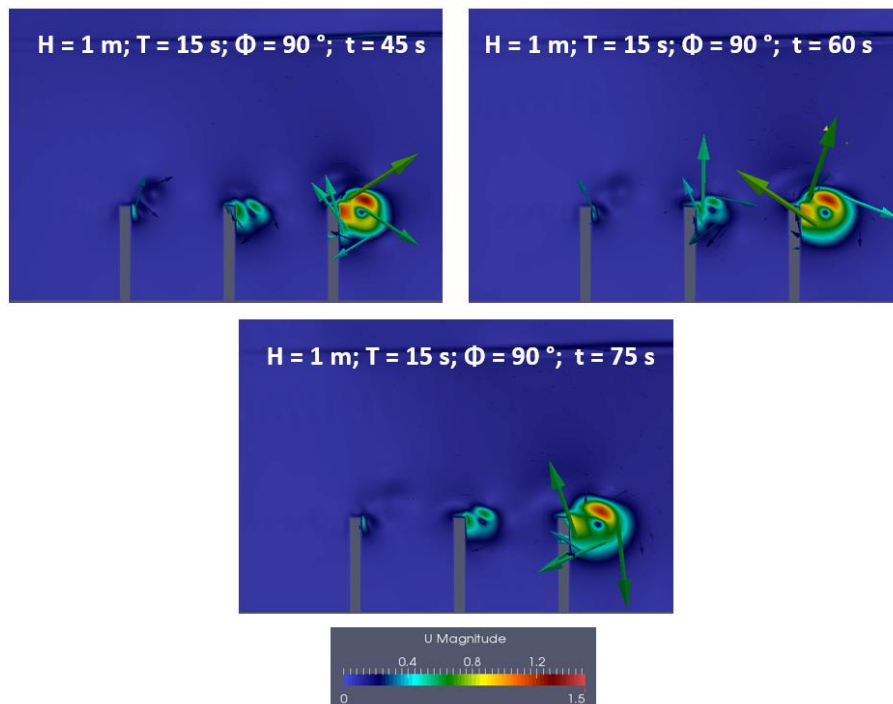
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 73 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



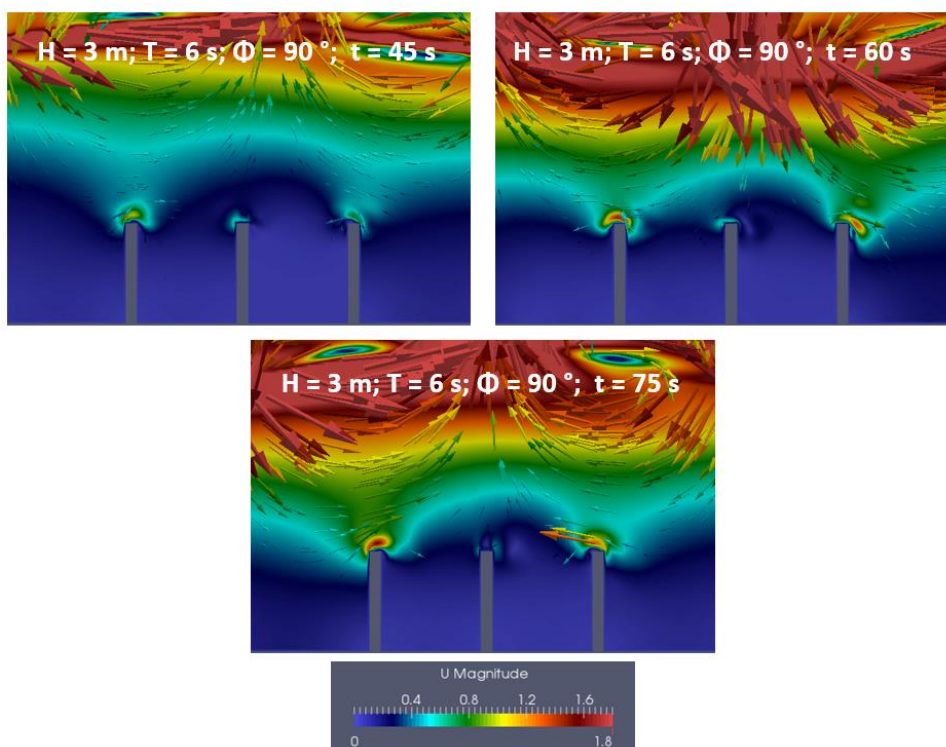
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 74 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 1 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



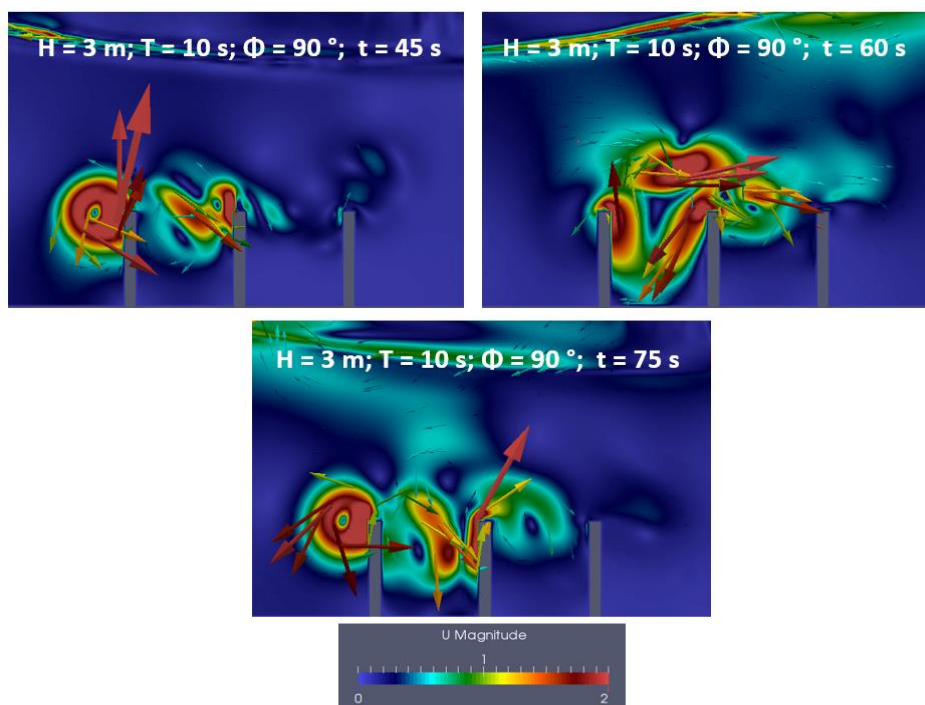
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 75 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



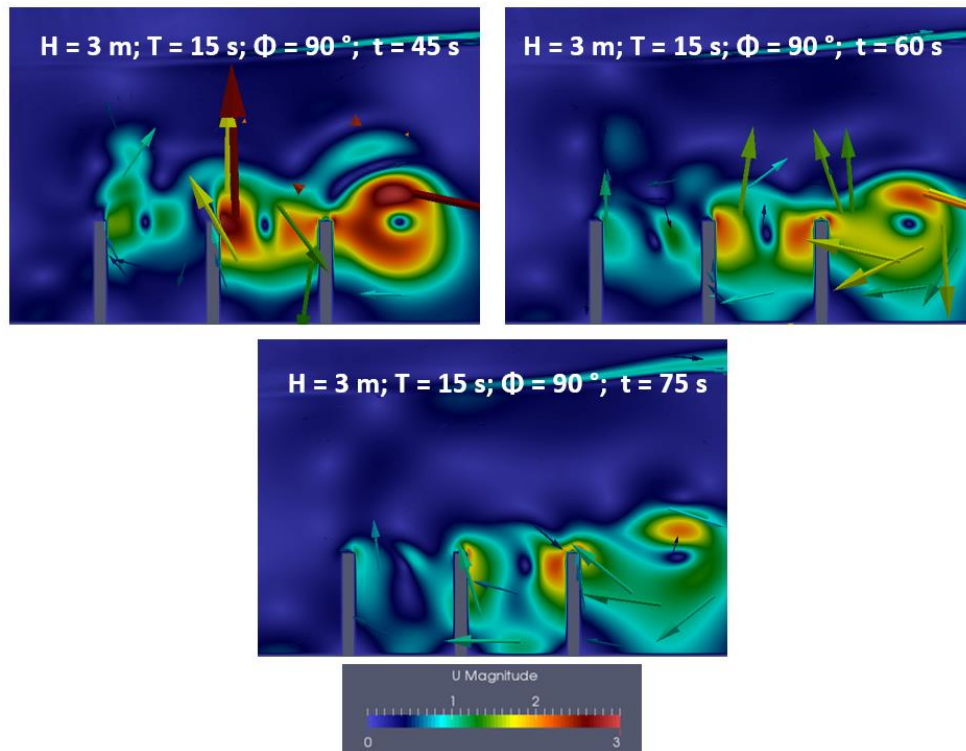
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 76 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



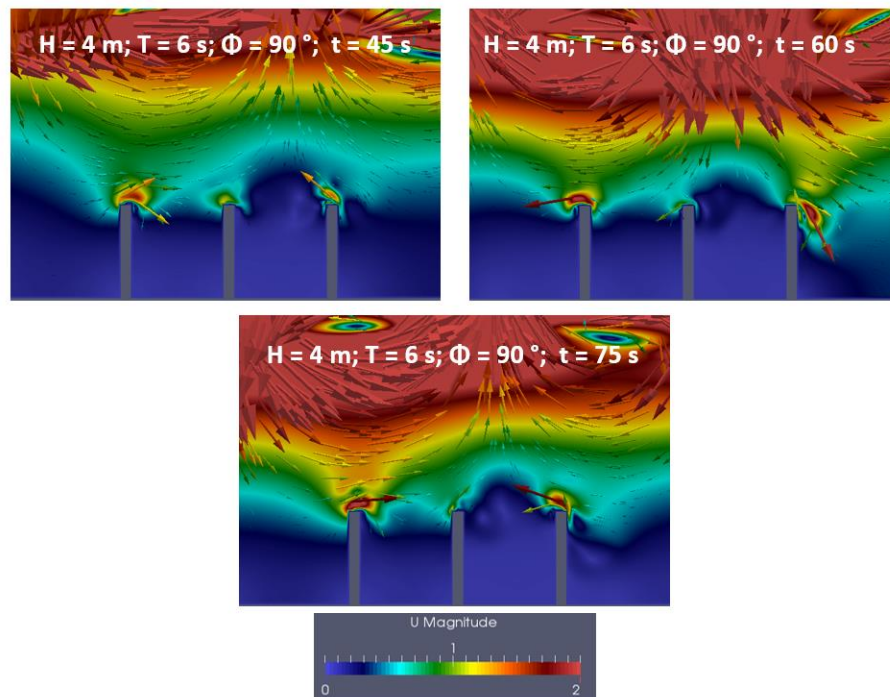
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 77 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 3 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



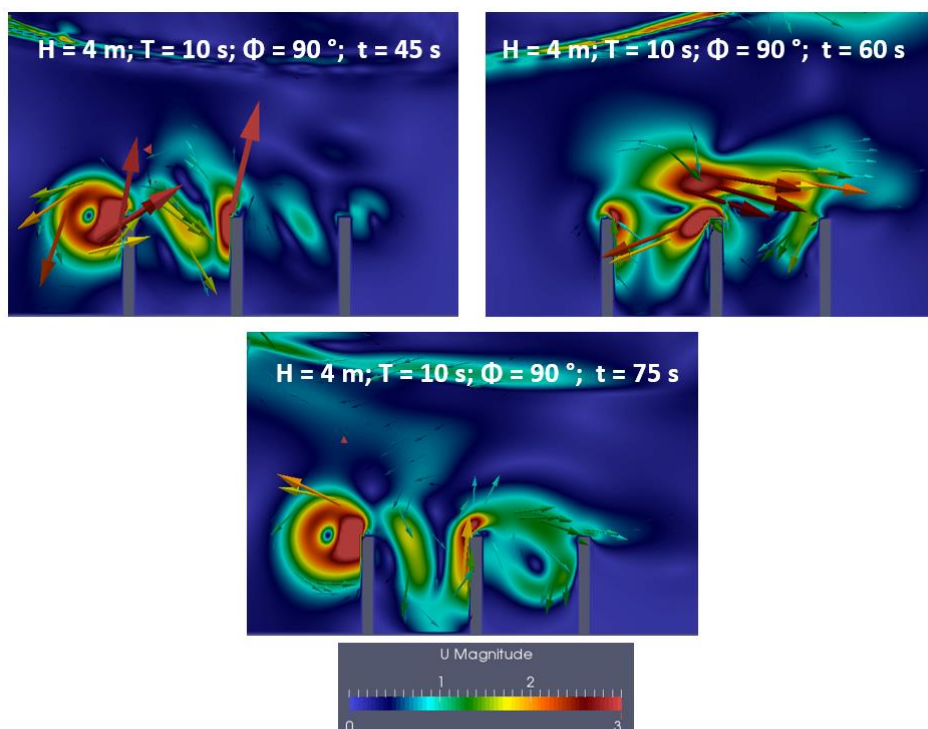
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 78 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



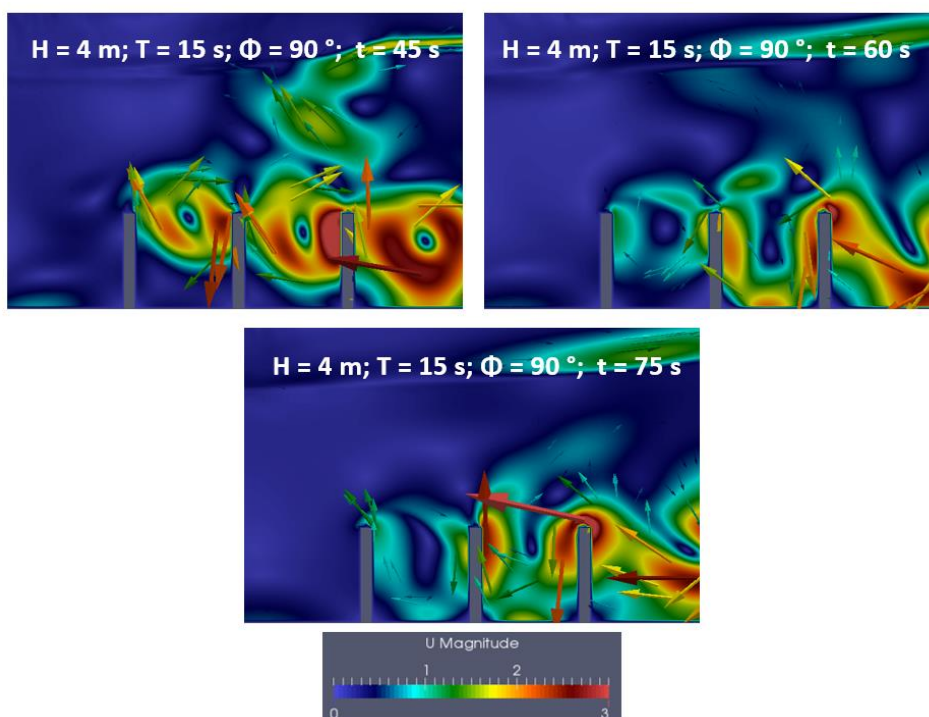
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 79 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 80 – Campo de velocidades para uma onda incidente de 4 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



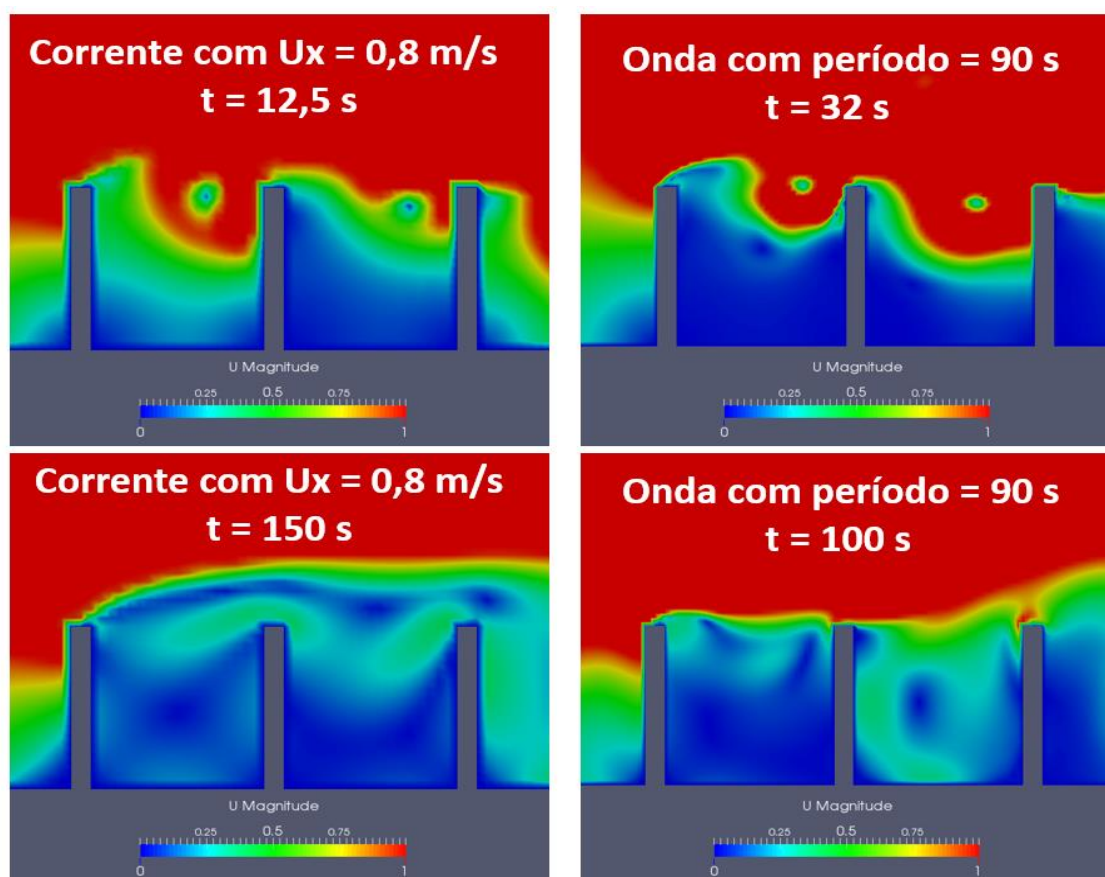
(fonte: elaborado pelo autor)

10.5.2 O efeito de corrente periódica

Um efeito observado, principalmente para ondas com períodos relativamente grandes, é o da formação de uma corrente periódica (que se repete a cada nova passagem de uma família de hidrógrafas) devido à grande extensão das elipses de ondas relacionada a estes grandes períodos. Este efeito ocasiona baixas oscilações das placas dos *Waverollers*, conseqüentemente, menores taxas de geração de energia elétrica, conforme indicam os resultados abordados no capítulo 5.

Pode-se observar, conforme a figura 81, um comportamento muito similar entre o caso de escoamento com onda incidente de 3 m de altura e 90 s de período com o de uma corrente de velocidade máxima horizontal de 0,8 m/s, ambos atuando sobre os dispositivos. Fica evidente que este efeito causa zonas de recirculação entre as placas e limita a oscilação angular das mesmas.

Figura 81 – Comparação entre o comportamento do escoamento de uma corrente de 0,8 m/s e de uma onda incidente com grande período



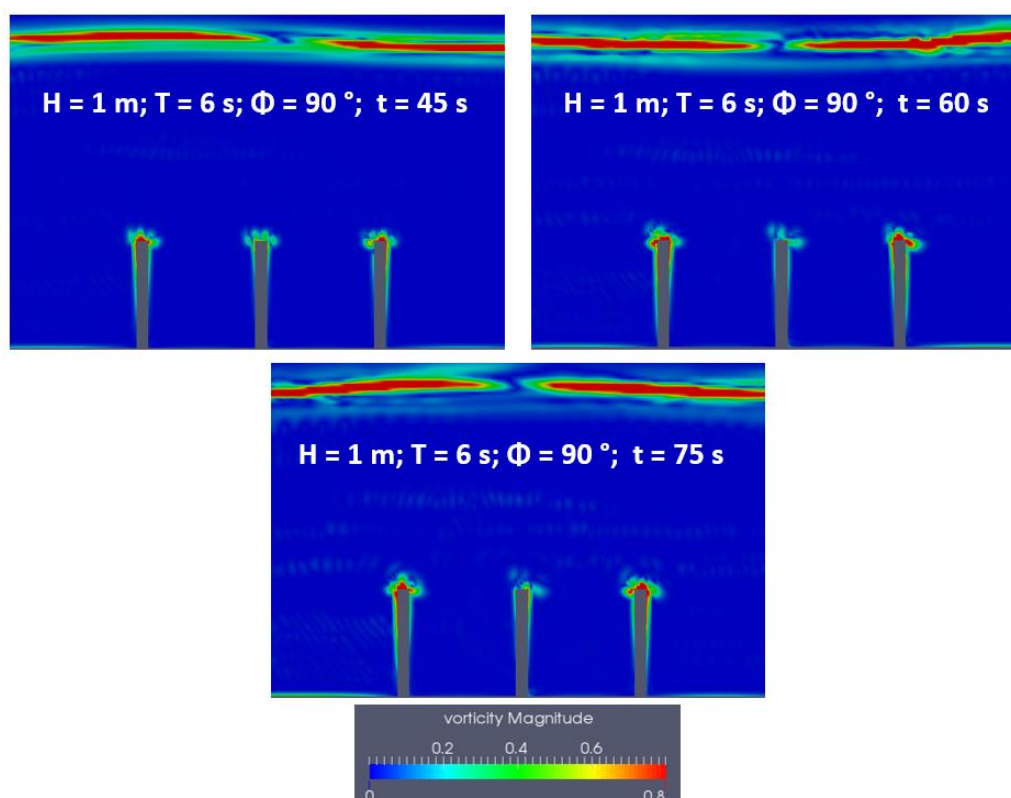
(fonte: elaborado pelo autor)

10.5.3 Vorticidade

É possível notar que a vorticidade, assim como a velocidade, tende a aumentar para maiores valores de período de onda, sendo que o período de 6 s não é suficiente para o efeito de corrente periódica se manifestar, conseqüentemente, não percebe-se o surgimento de vorticidade na região entre as placas, o qual ocorre claramente para os períodos de 10 s e 15 s. Em todos os casos há sempre geração de vorticidade na extremidade superior das placas, mostrando que esta é a região mais influenciada pelos efeitos do escoamento. O aumento da altura da onda intensifica os efeitos, favorecendo a vorticidade. Percebe-se que a onda com 1 m de altura não é suficiente para o aparecimento de efeitos significativos, indicando que esta é uma configuração mais amena do escoamento.

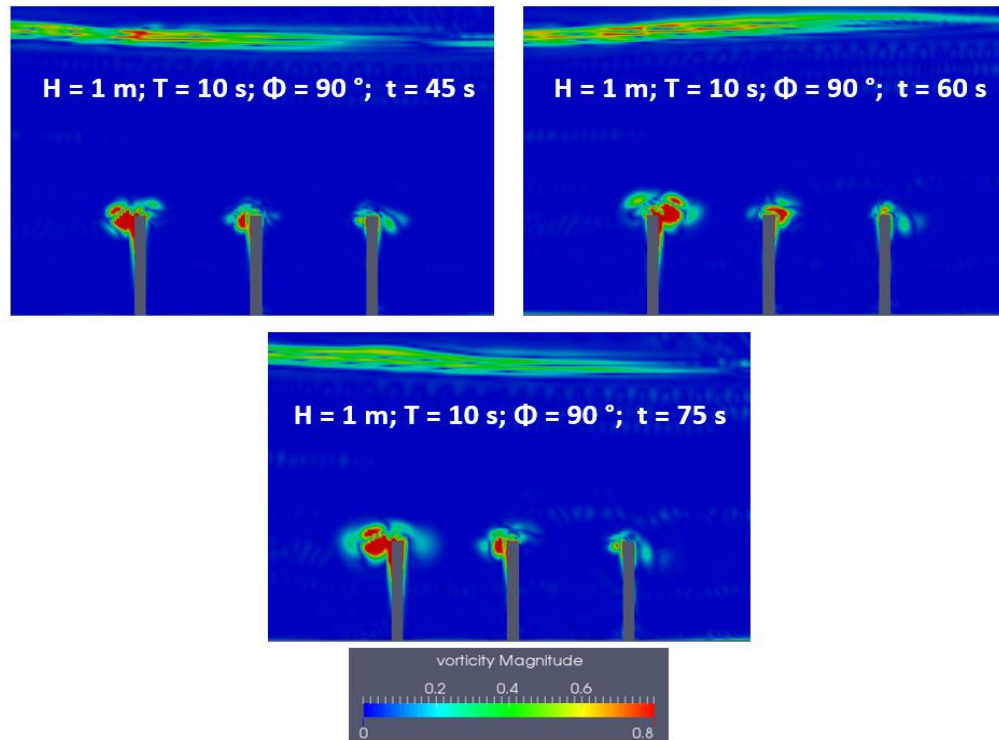
O comportamento da vorticidade em função da variação do período de onda para alturas fixas da mesma juntamente com os pontos levantados no parágrafo acima podem ser vistos nas figuras 82 a 90.

Figura 82 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



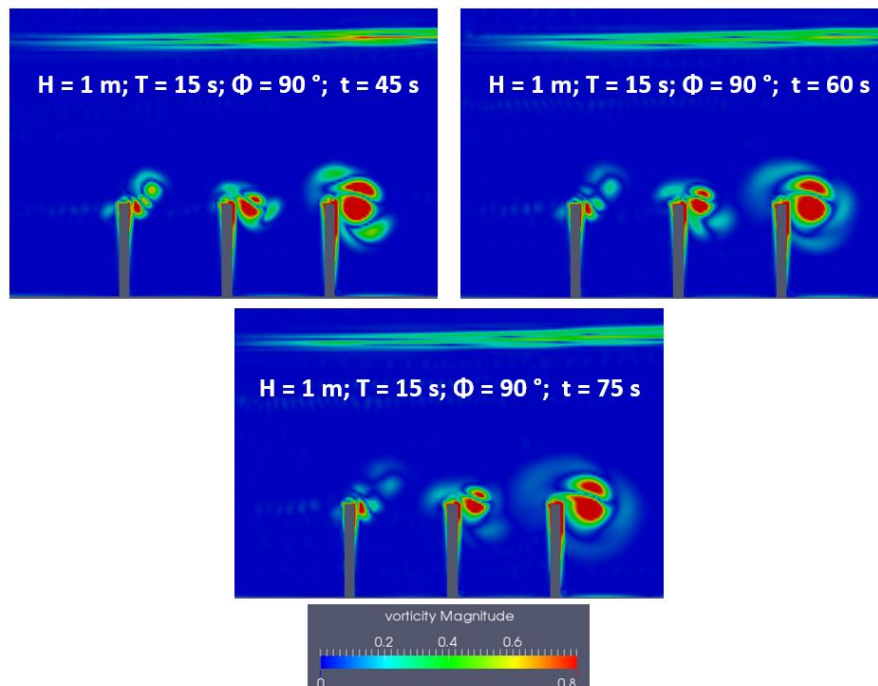
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 83 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



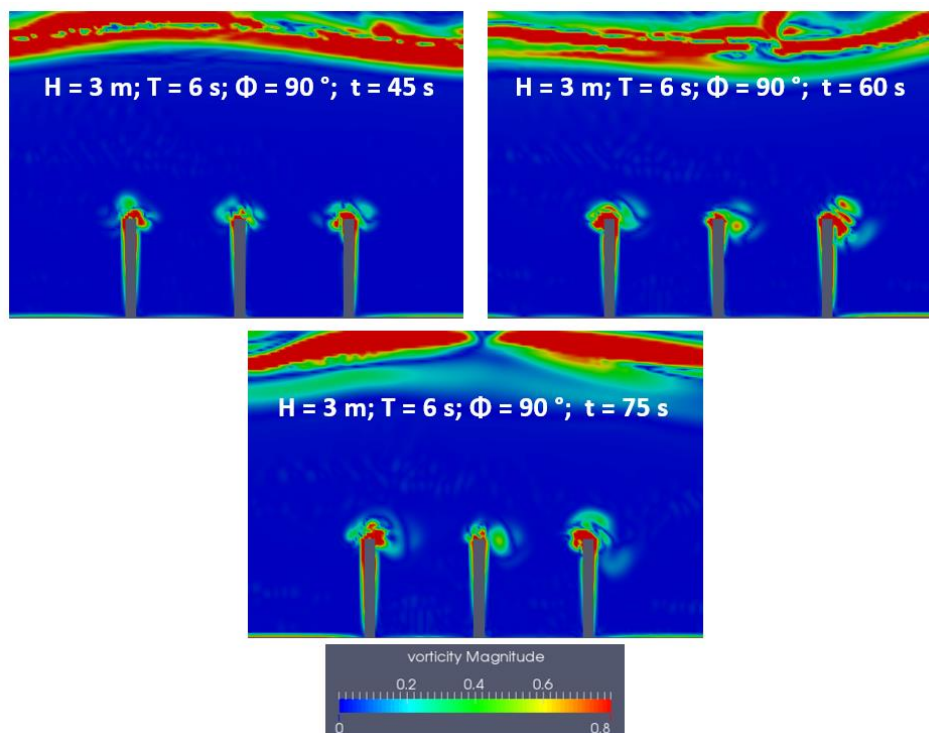
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 84 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 1 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



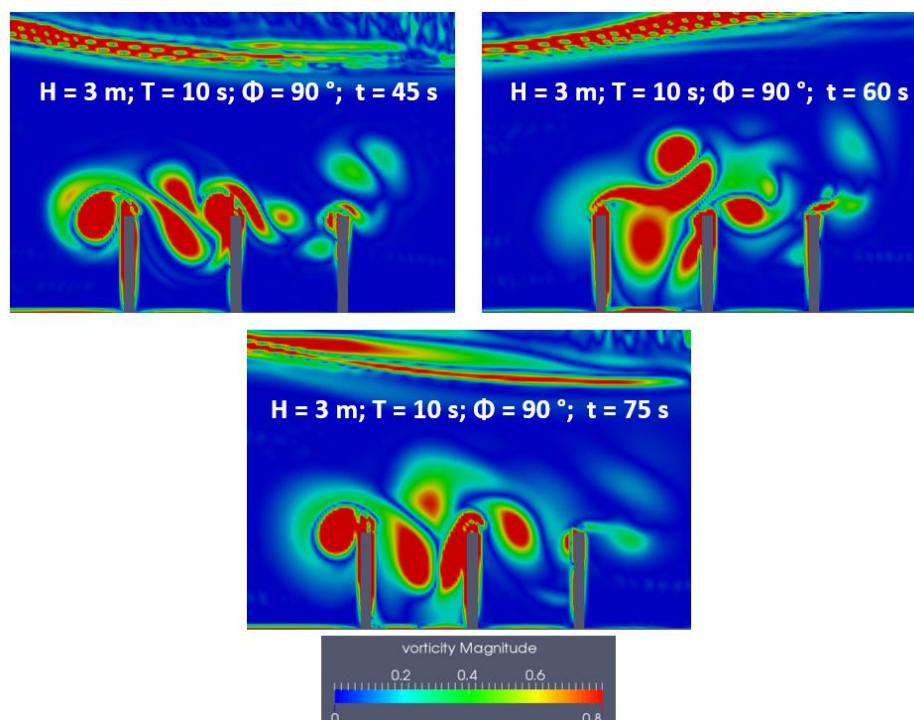
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 85 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



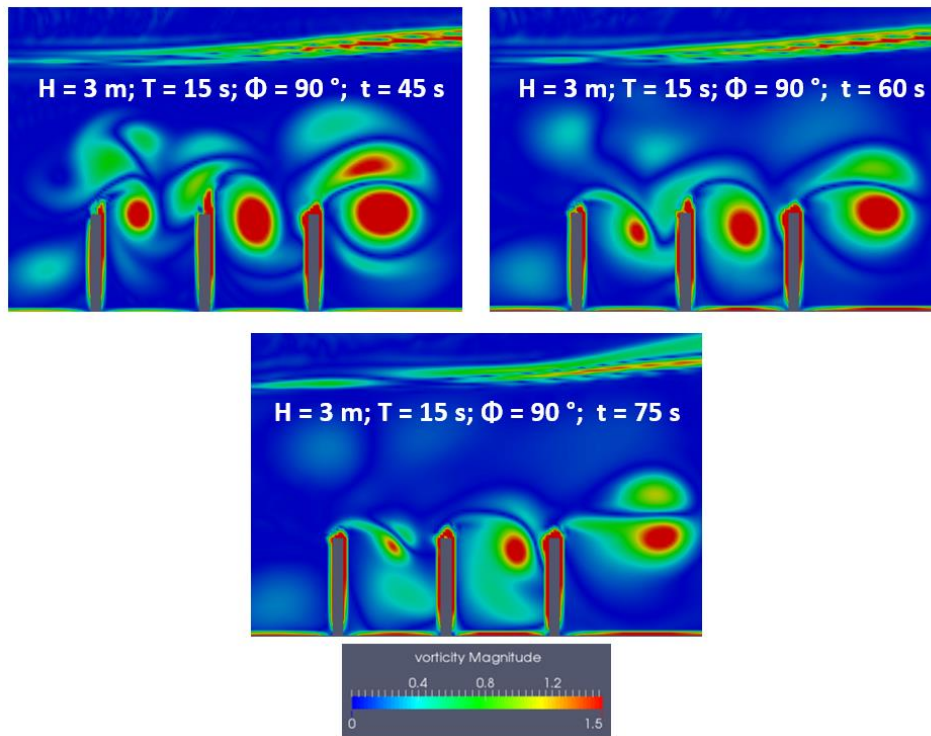
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 86 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



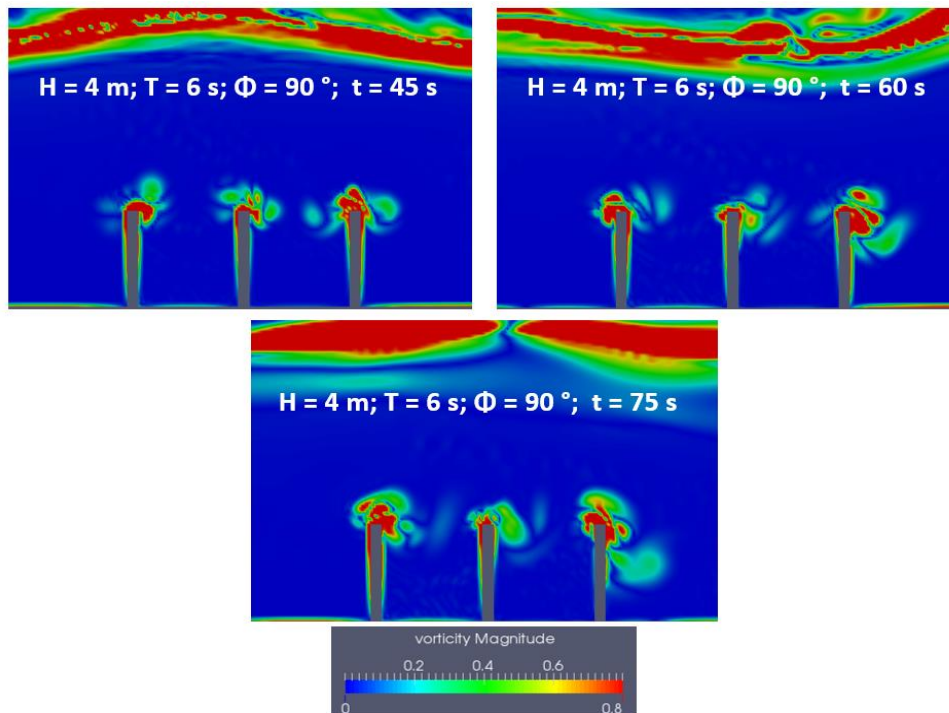
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 87 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 3 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



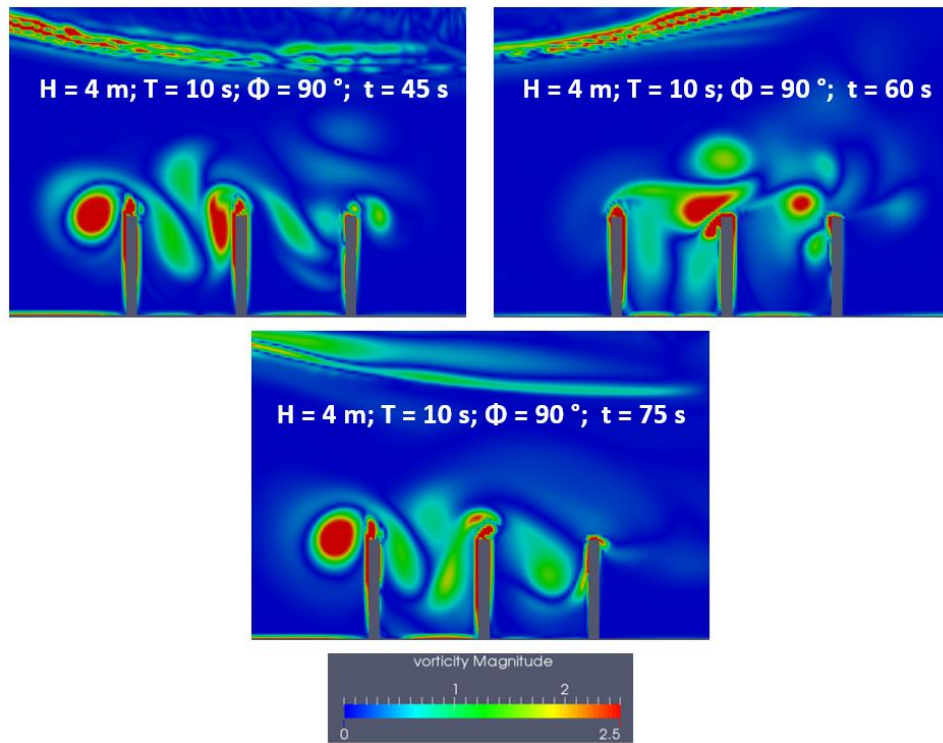
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 88 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 6 s de período (Caso 2)



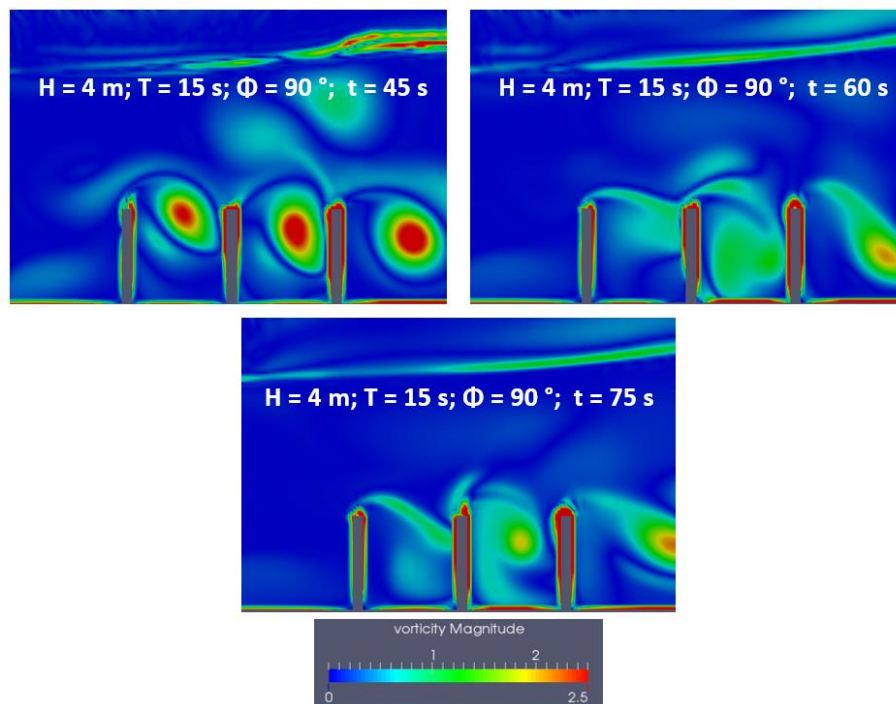
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 89 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 10 s de período (Caso 2)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 90 – Campo de vorticidade para uma onda incidente de 4 m de altura e 15 s de período (Caso 2)



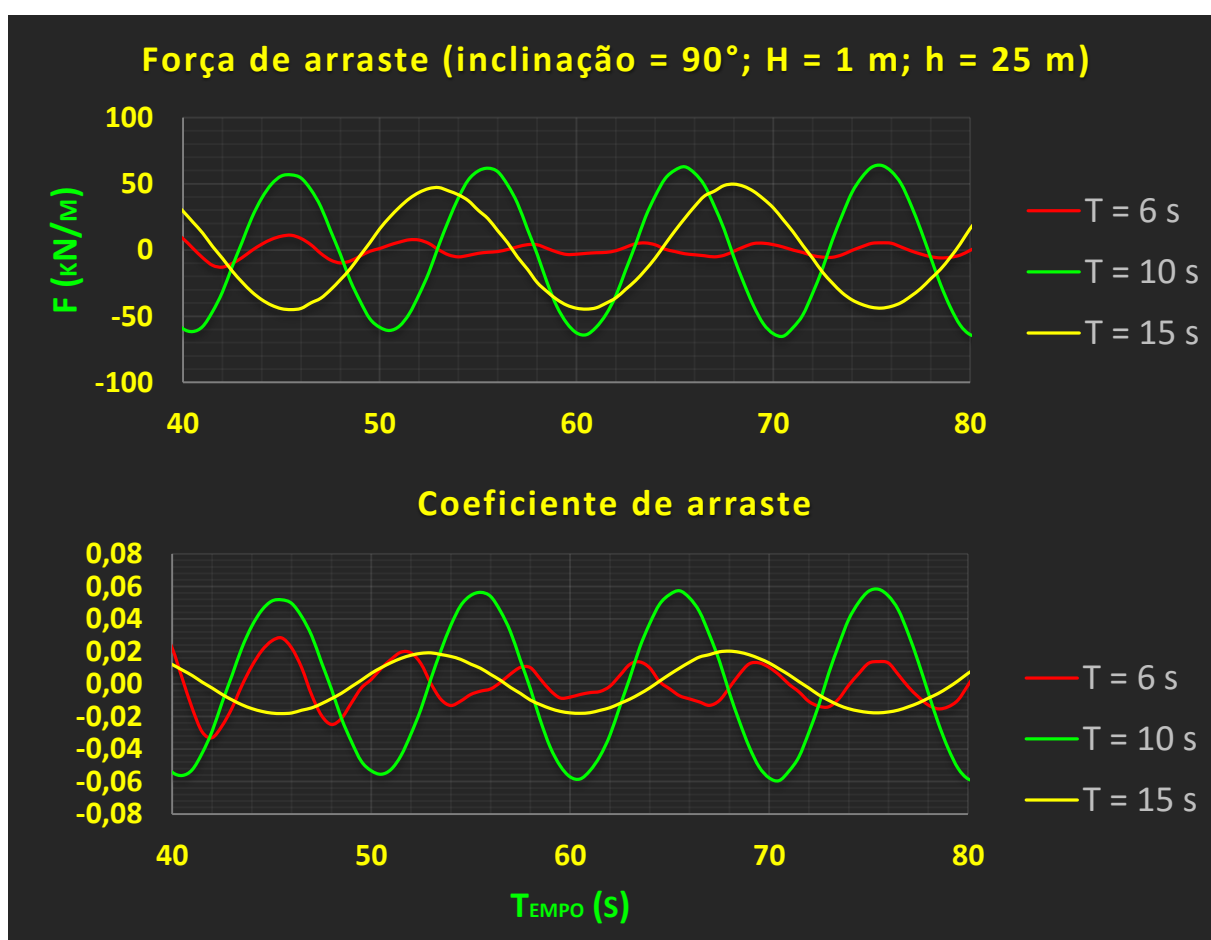
(fonte: elaborado pelo autor)

10.5.4 Forças e coeficientes de arraste e sustentação

Com o aumento do período, a força de arraste tende a aumentar e a de sustentação a diminuir (o mesmo comportamento vale para os respectivos coeficientes), levando a conclusão de que as forças na direção horizontal são mais influentes no movimento das placas. Nota-se que, com o aumento do período, desaparecem as oscilações secundárias existentes em ambas forças em decorrência do aumento da velocidade entre as placas, esse comportamento ocorre devido a presença da corrente ‘periódica’ já discutida na seção anterior.

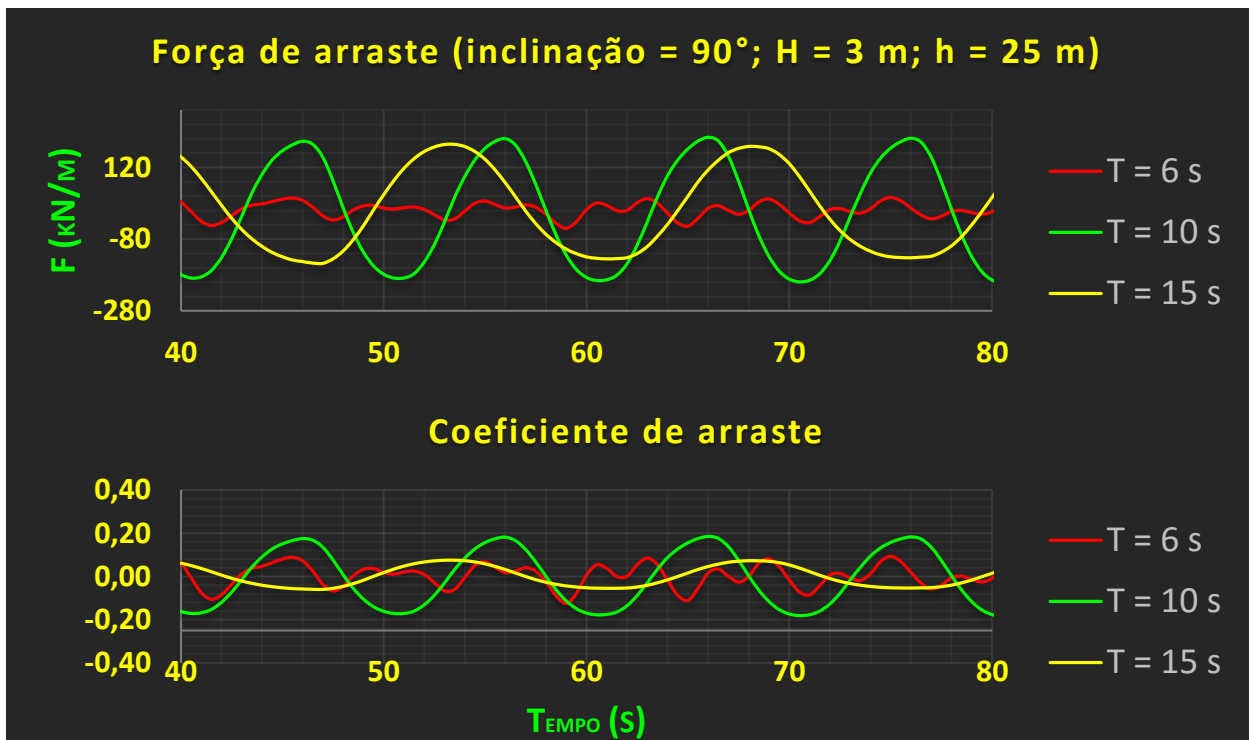
As figuras 91 a 96 mostram a variação das forças e dos coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo, considerando alturas de onda fixas, e os gráficos da figura 97 apresentam o comportamento do módulo das forças de arraste e sustentação em função da variação período de onda.

Figura 91 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 1 m (Caso 2)



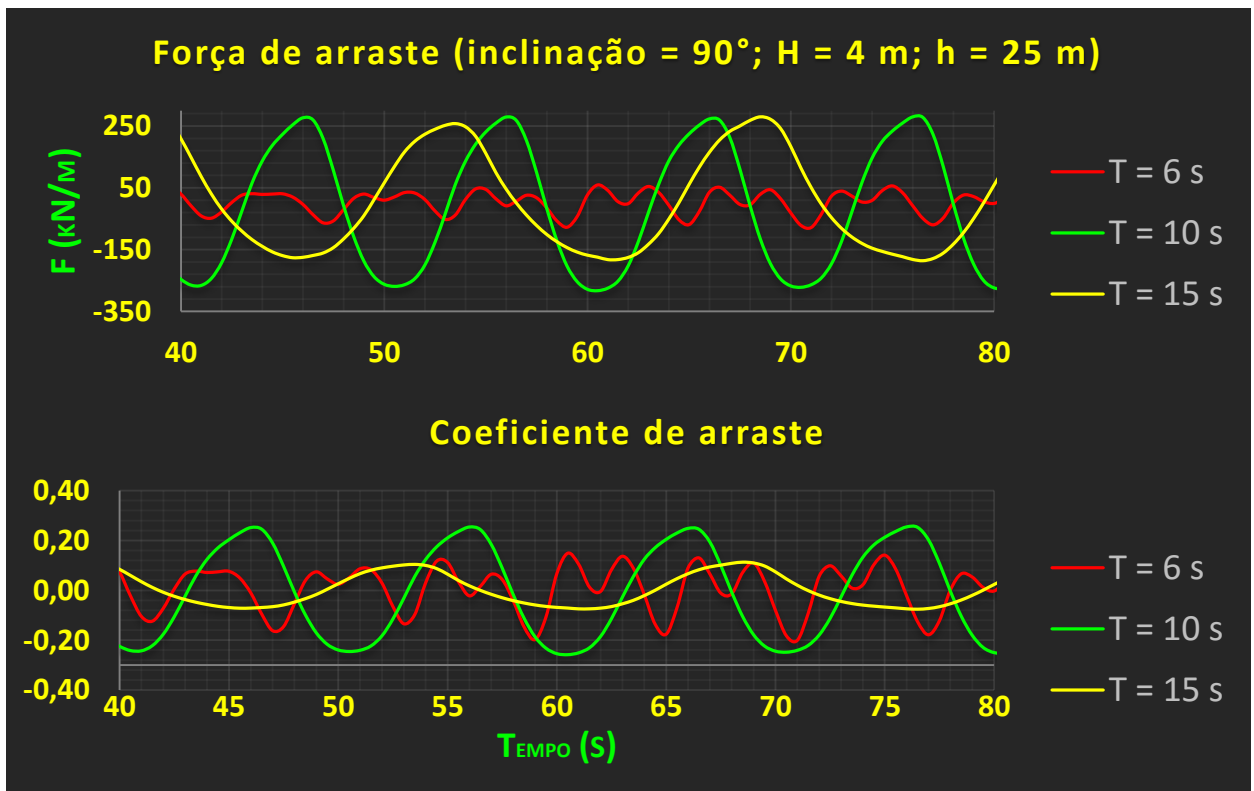
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 92 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 3 m (Caso 2)



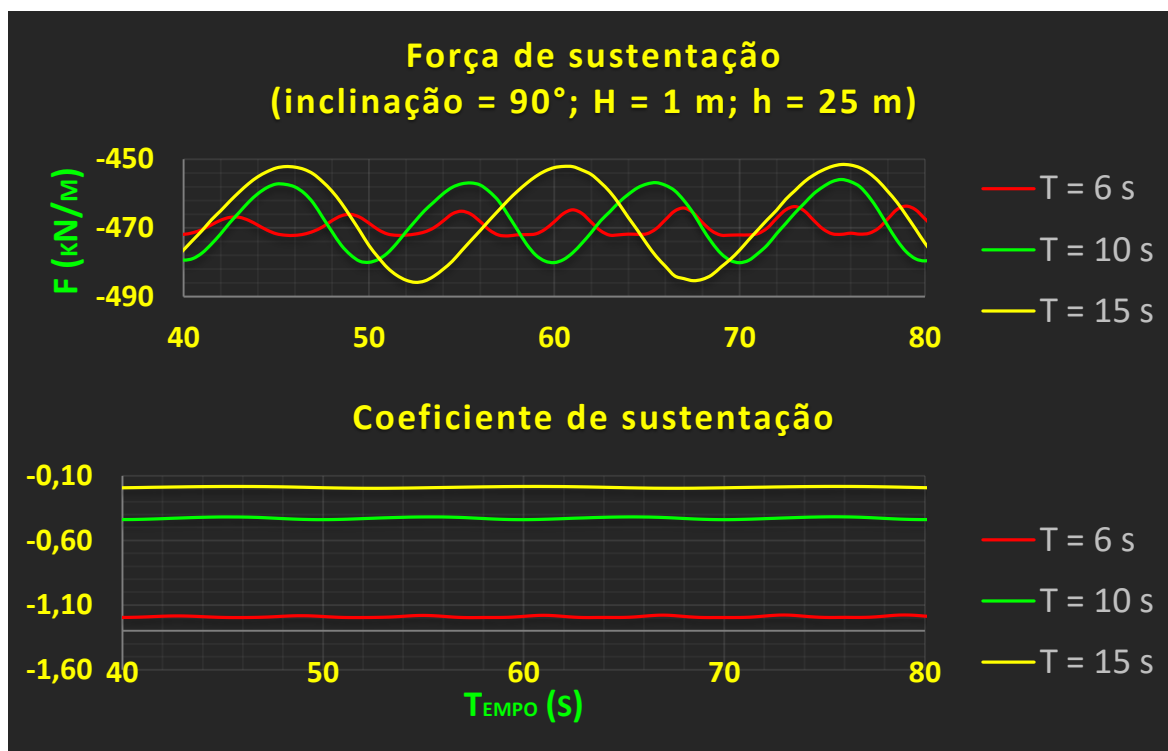
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 93 – Força e coeficiente de arraste para uma altura de onda de 4 m (Caso 2)



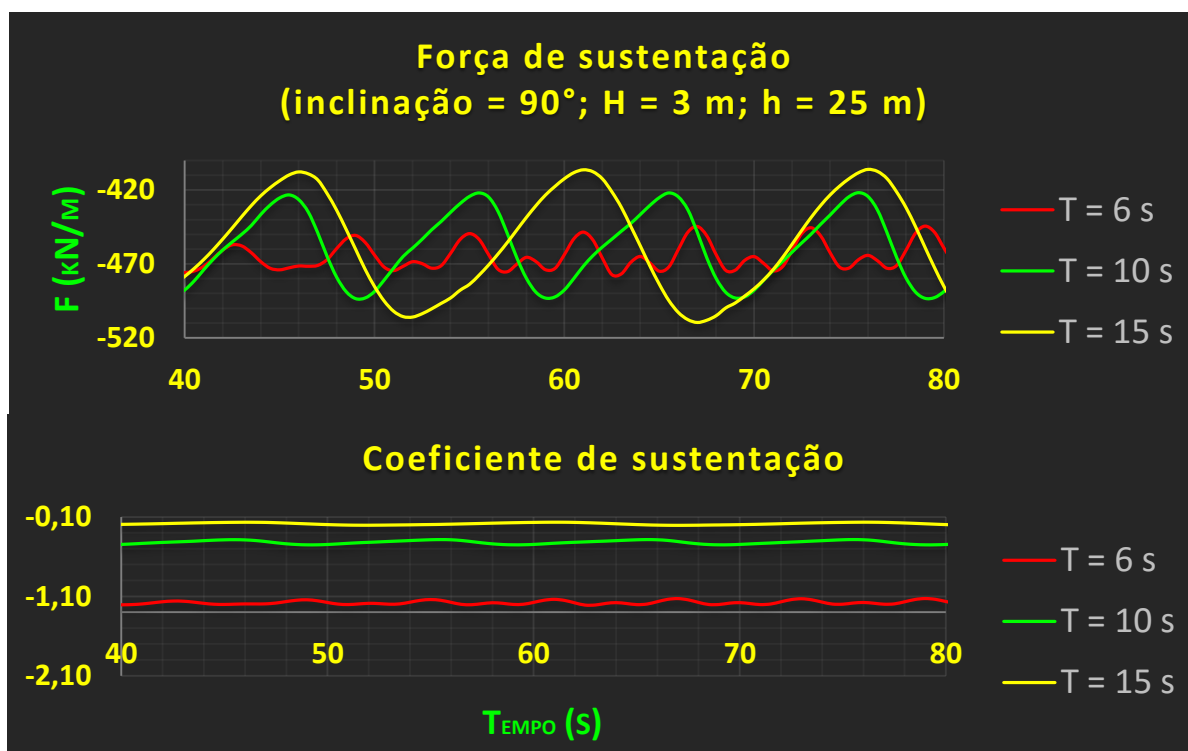
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 94 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 1 m (Caso 2)



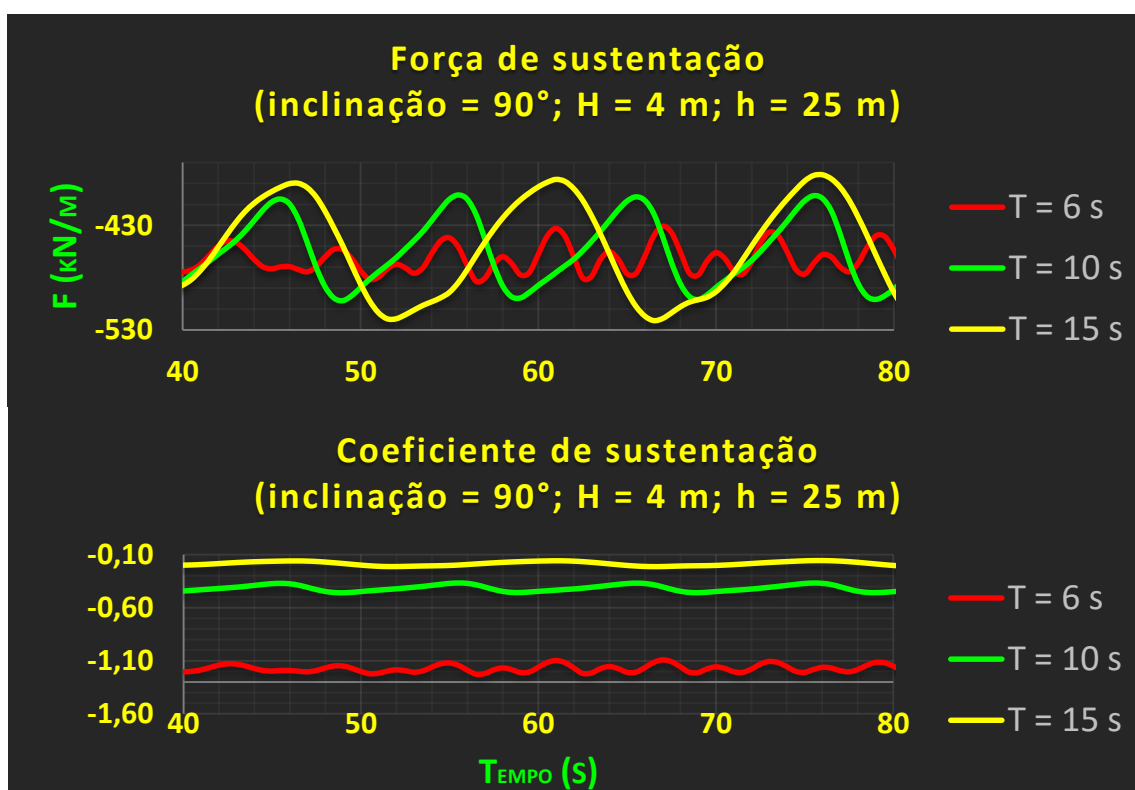
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 95 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 3 m (Caso 2)



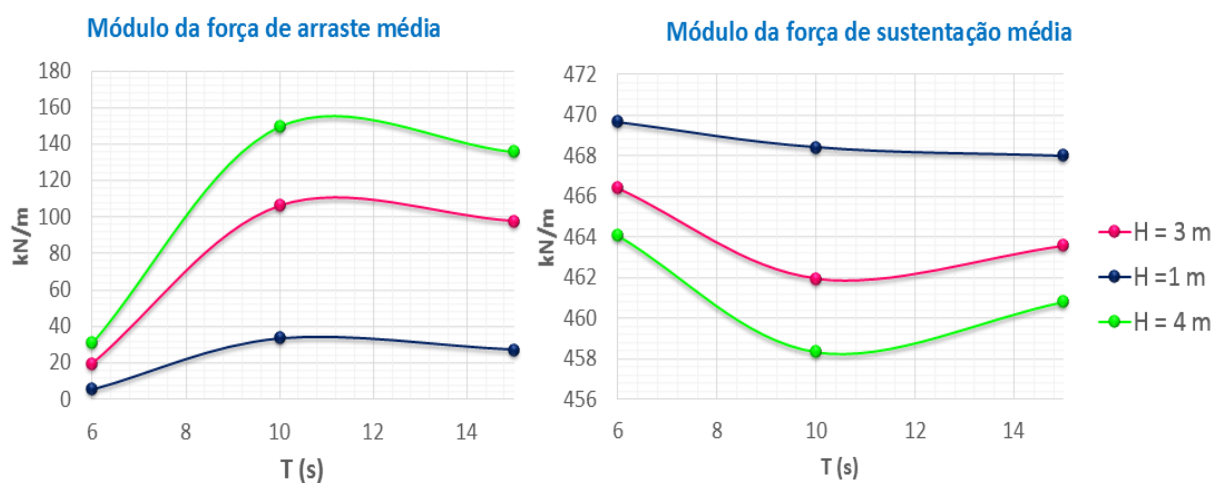
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 96 – Força e coeficiente de sustentação para uma altura de onda de 4 m



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 97 – Módulo das forças de arraste e sustentação com a variação do período considerando alturas de onda fixas



(fonte: elaborado pelo autor)

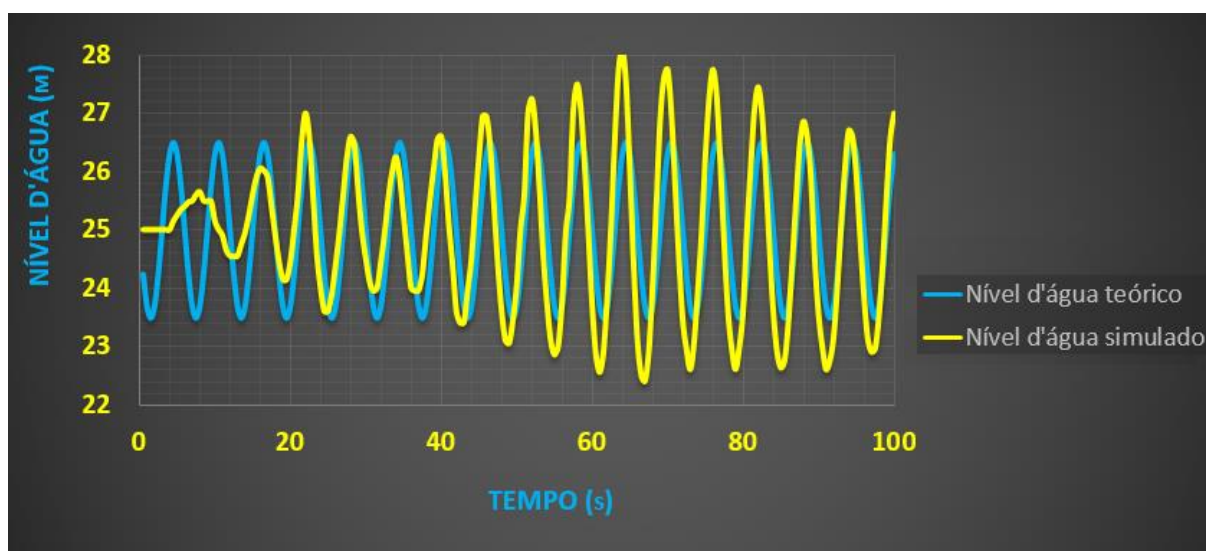
Foi feita uma comparação entre a oscilação do ponto médio da superfície da água simulado com o teórico (obtido através da equação 9), verificando que o último poderia ser utilizado com

segurança (considerando a configuração de inclinação de 90° das placas, 9 m de distância entre elas e 25 m de profundidade) para o estudo das forças de arraste e sustentação (figura 98).

Procurou-se estabelecer uma relação entre a onda incidente, representada pela oscilação do ponto médio da superfície da água ao longo do tempo, com a oscilação dos valores das forças de arraste e sustentação (figuras 99 a 101).

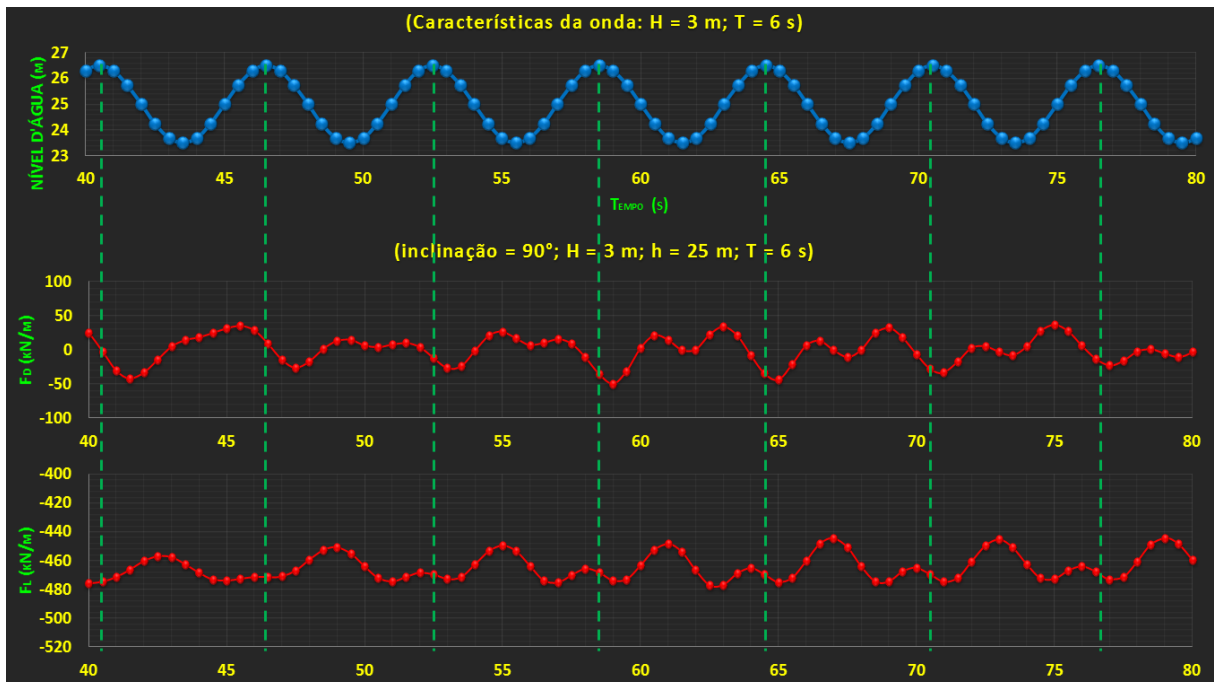
Nota-se que, em todos os casos, o período de repetição das oscilações nas forças de arraste e sustentação se mantém muito próximos ao da onda incidente, sendo que para o período de 10 s, verifica-se que, tanto a onda incidente quanto as forças de arraste e sustentação, mantêm-se em fase. Para o período de 6 s, é possível perceber que em um mesmo período, ocorrem oscilações secundárias nas forças de arraste e sustentação, tal efeito é amenizado à medida que o período aumenta, levando a crer que este comportamento está diretamente ligado ao efeito da corrente ‘periódica’ que ocorre para ondas de grandes períodos.

Figura 98 – Comparação entre o nível de água simulado e teórico (Caso 2)



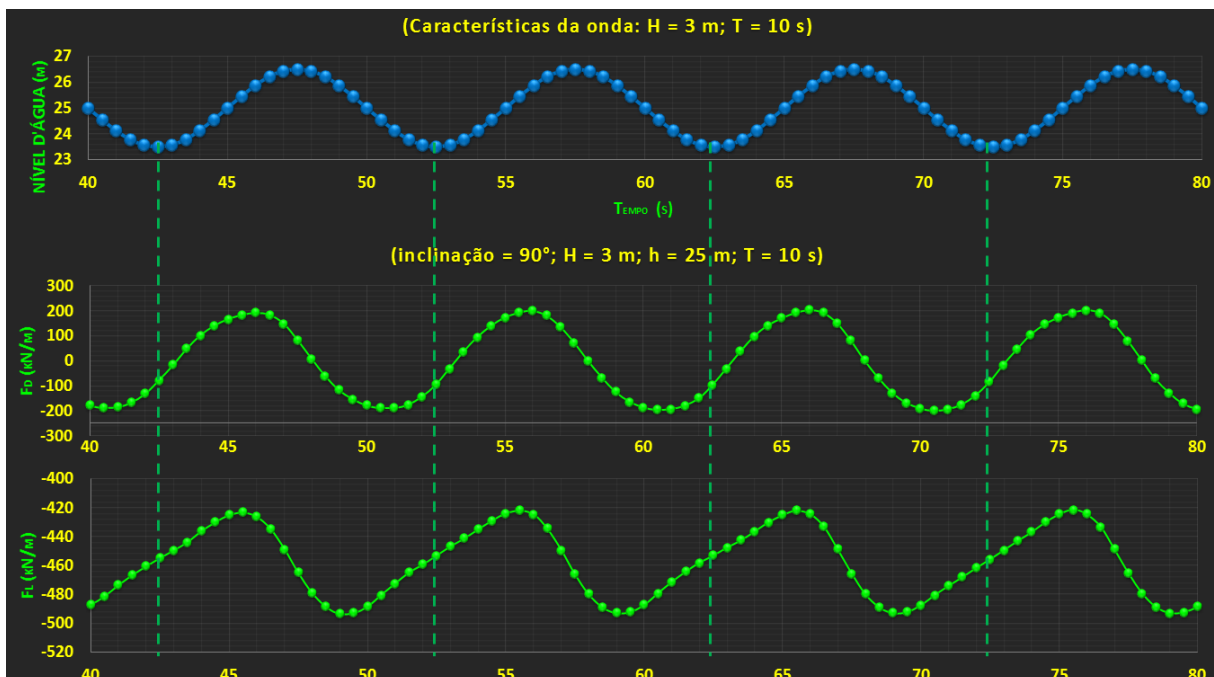
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 99 – Relação entre onda incidente com período de 6 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2)



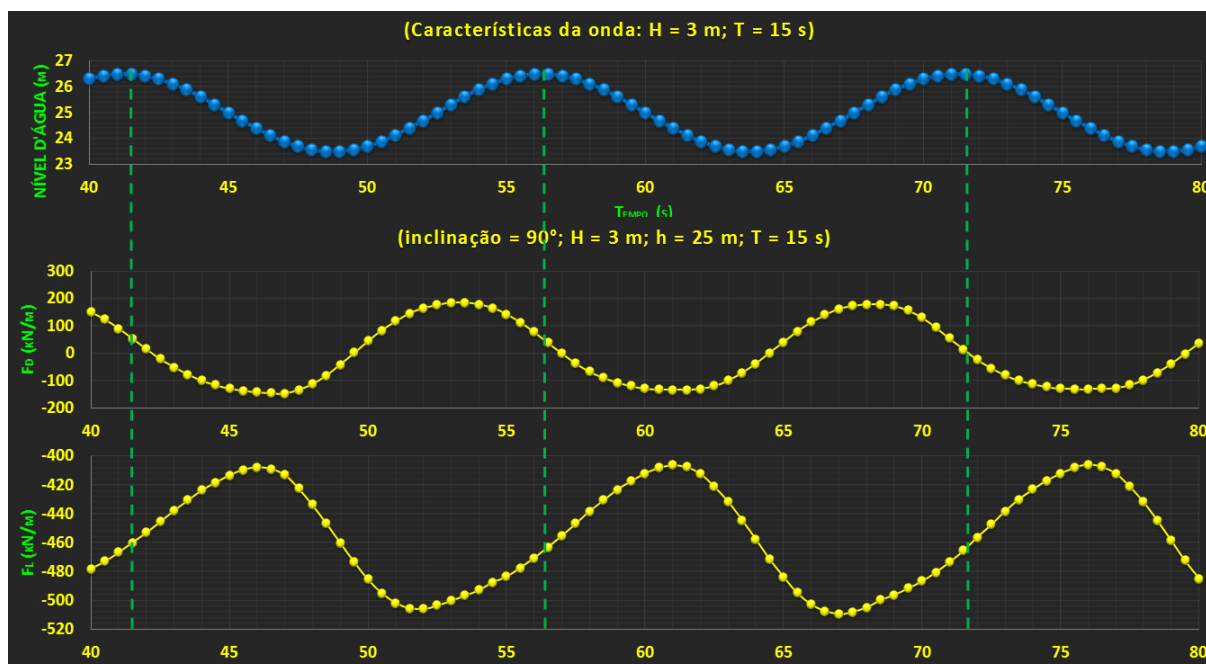
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 100 – Relação entre onda incidente com período de 10 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 101 – Relação entre onda incidente com período de 15 s e forças de arraste e de sustentação (Caso 2)



(fonte: elaborado pelo autor)

10.6 VARIAÇÃO DA ALTURA DA ONDA

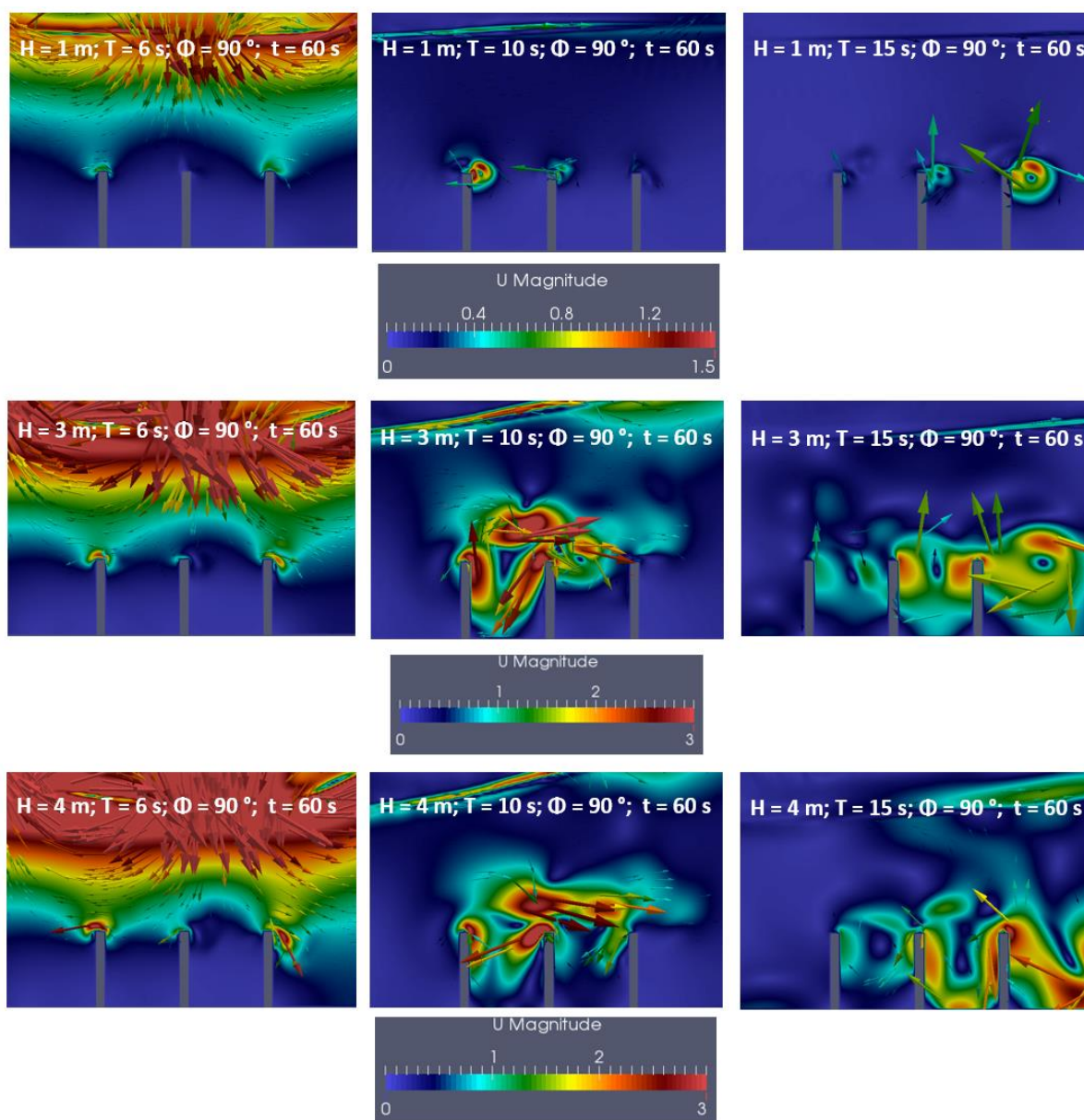
Para o estudo de como a variação na altura da onda afeta o escoamento na região próxima às placas dos *Waverollers*, foram consideradas as mesmas condições da seção 10.5, alturas de onda de 1 m, 3 m e 4 m e períodos fixos de 6 s, 10 s e 15 s.

10.6.1 Campo de velocidades

Verifica-se que, com o aumento da altura de onda, o campo de velocidades parece seguir o mesmo comportamento independente da variação desta, aumentando pouco significativamente sua magnitude. A altura de 1 m de onda corresponde a uma altura relativamente baixa, causando pequenas oscilações e não provocando efeitos tão significativos quanto o de alturas maiores. A conclusão de que o aumento da altura da onda intensifica os efeitos é verificado aqui, assim como no caso anterior.

A figura 102 mostra o campo de velocidades para diferentes alturas de onda, considerando períodos fixos da mesma.

Figura 102 – Campo de velocidades em função do aumento da altura da onda, para períodos de onda fixos de 6 s, 10 s e 15 s (Caso 3)



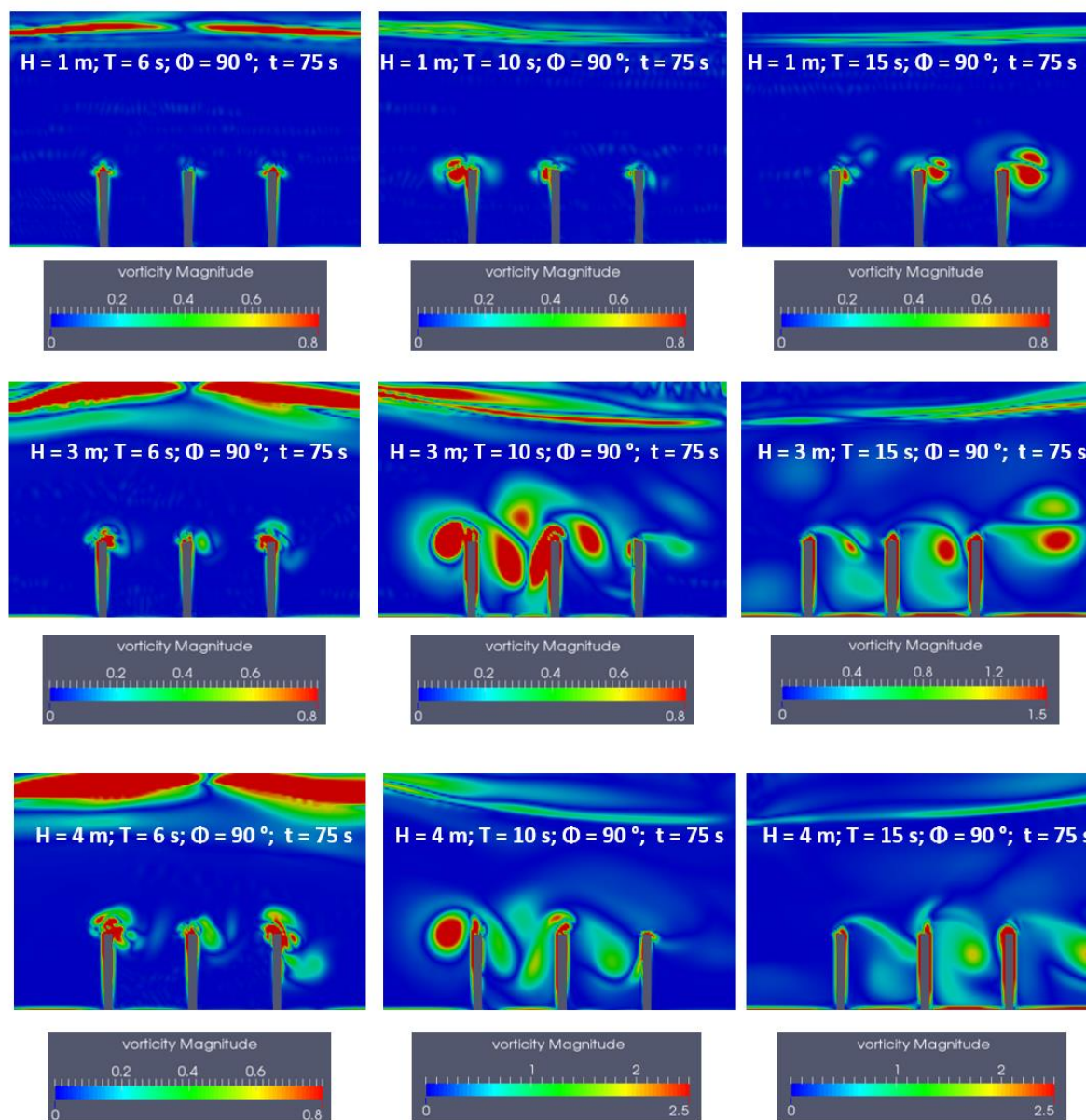
(fonte: elaborado pelo autor)

10.6.2 Vorticidade

A vorticidade segue o mesmo comportamento da velocidade, aumentando um pouco sua magnitude em função do aumento da altura da onda, considerando período fixo para esta. Da mesma forma que a velocidade, a altura de 1 m é significativamente pequena causando valores baixos de vorticidade. Porém, nota-se que o aumento da altura da onda não é tão influente no escoamento quanto o aumento do período da mesma.

A figura 103, mostra o comportamento da vorticidade para diferentes alturas de onda, considerando períodos fixos da mesma.

Figura 103 – Campo de vorticidade em função do aumento da altura da onda, para períodos de onda fixos de 6 s, 10 s e 15 s (Caso 3)



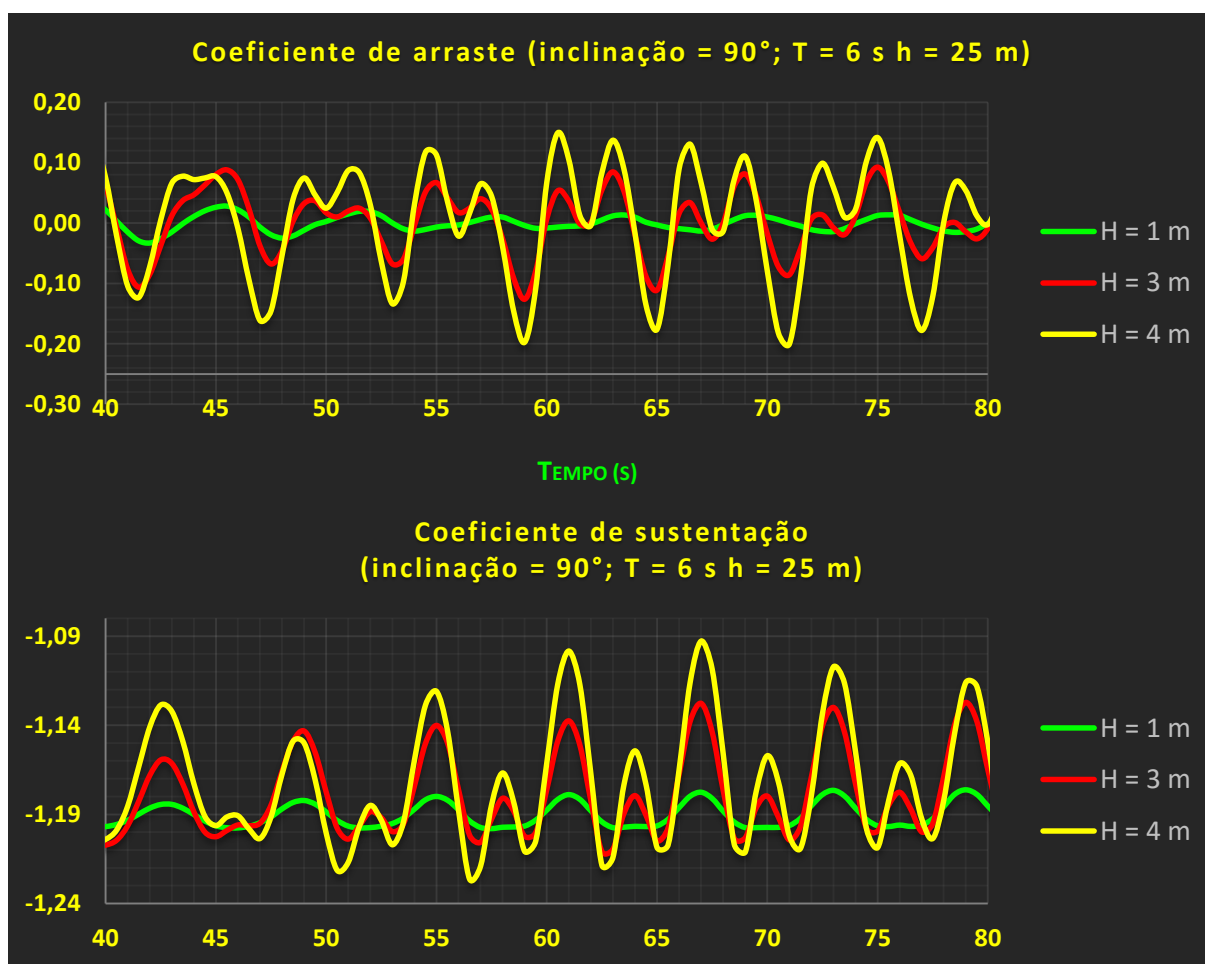
(fonte: elaborado pelo autor)

10.6.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação

De uma maneira geral, nota-se que, com o aumento da altura de onda, as oscilações entre os valores das forças de arraste e sustentação, bem como seus coeficientes, também aumentam. A variação das alturas de onda não acarretam mudanças bruscas no escoamento nem nas forças de arraste e sustentação, mantendo suas tendências, porém intensificando-as.

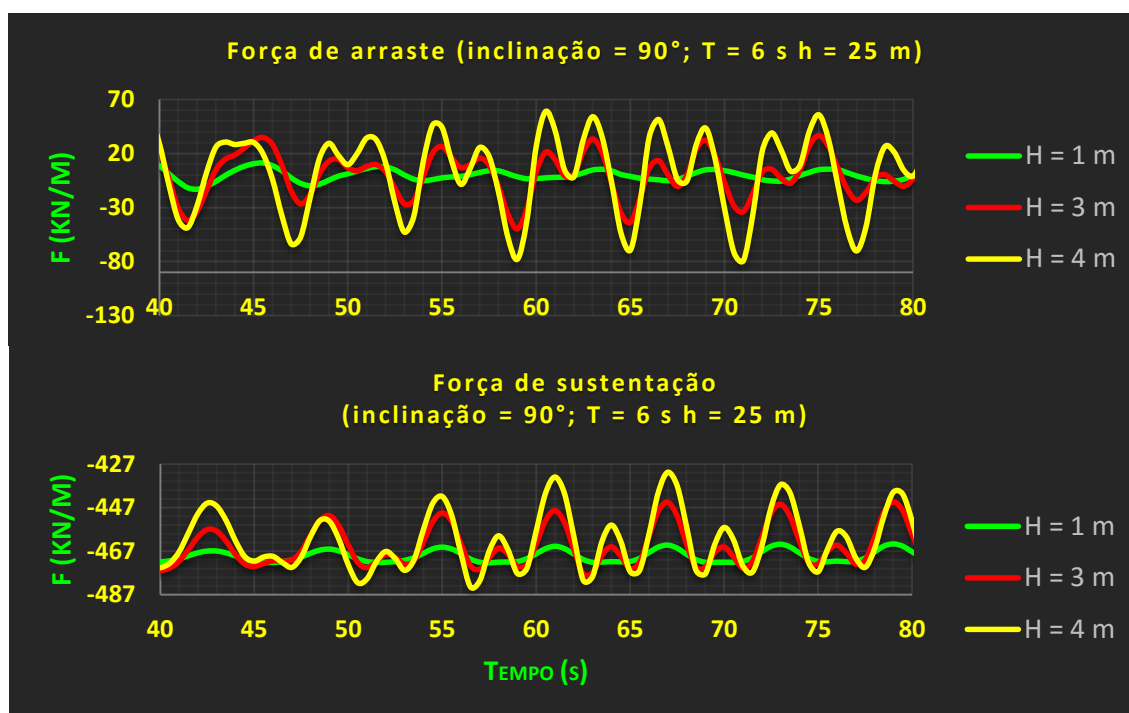
O comportamento destas forças e seus respectivos coeficientes é apresentado nas figuras 104 a 109.

Figura 104 – Coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 6 s (Caso 3)



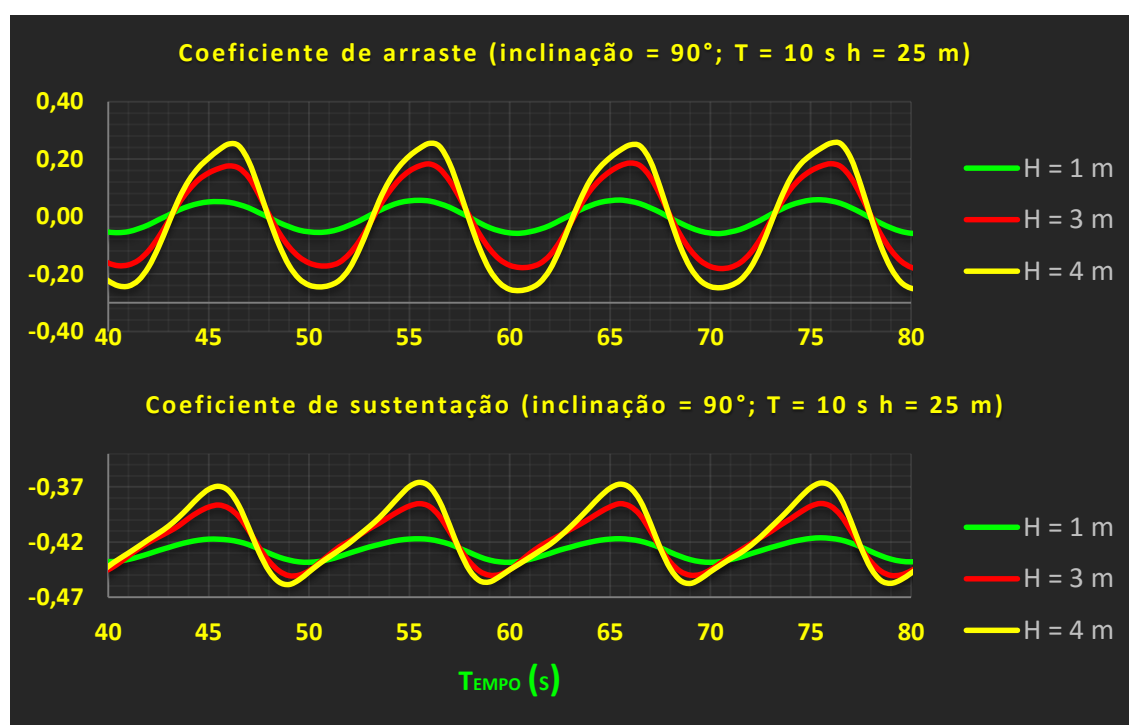
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 105 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 6 s (Caso 3)



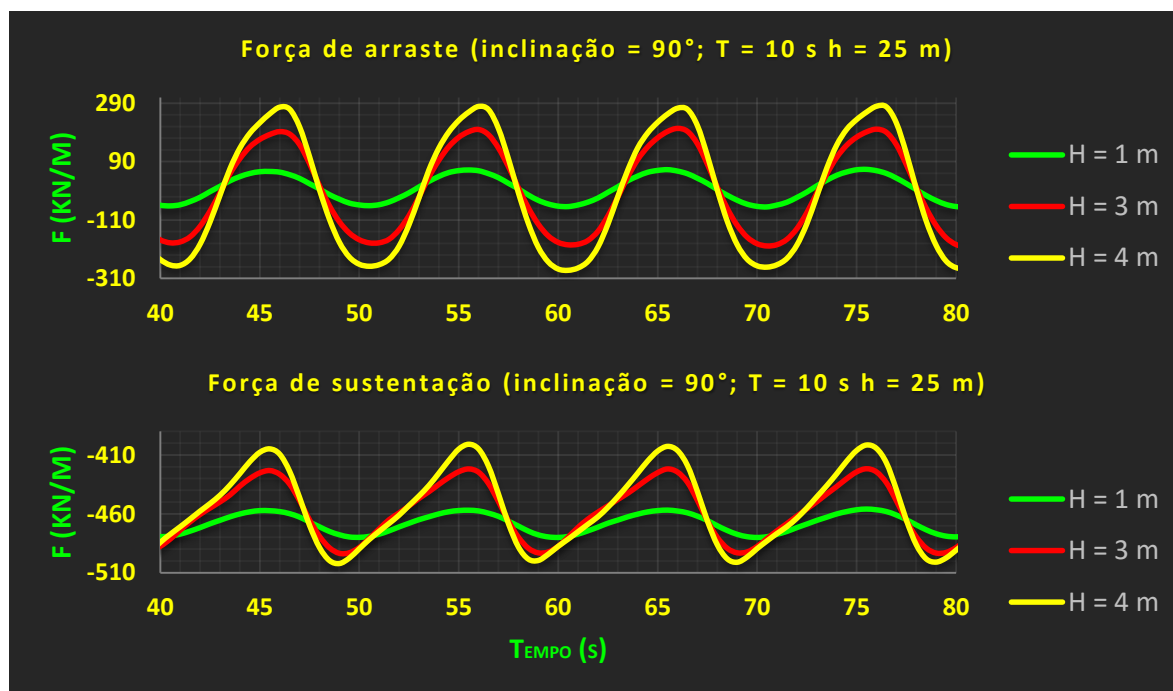
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 106 – Coeficiente de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 10 s (Caso 3)



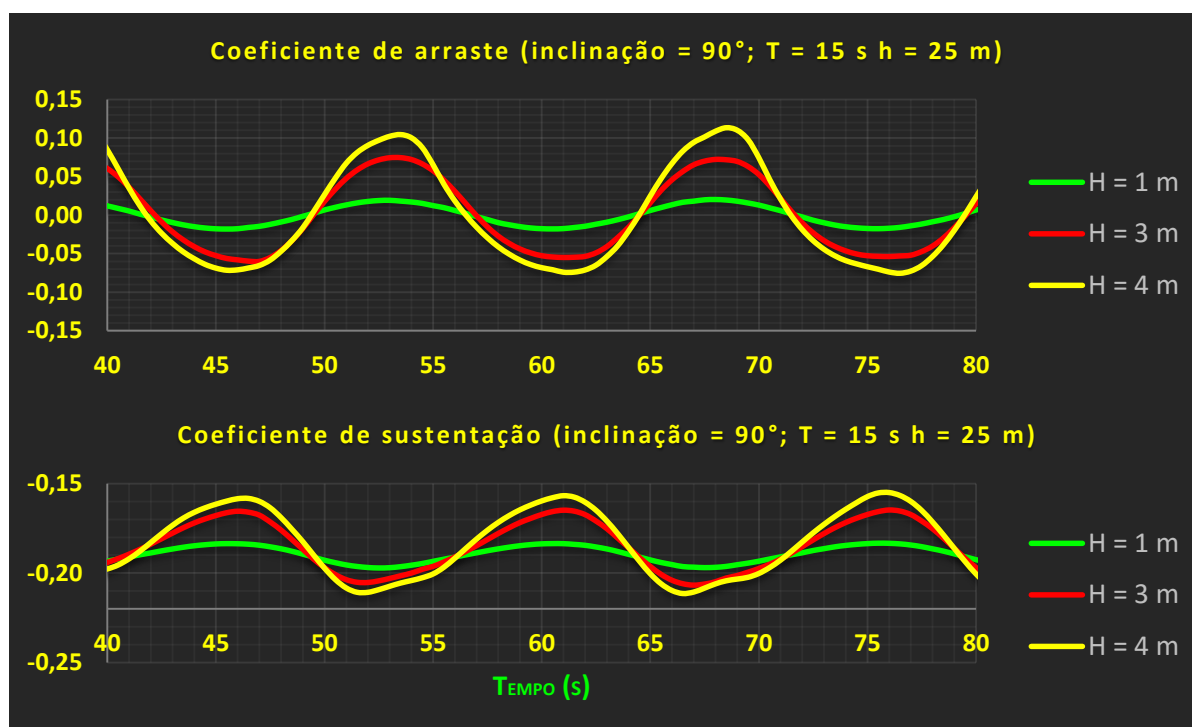
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 107 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 10 s (Caso 3)



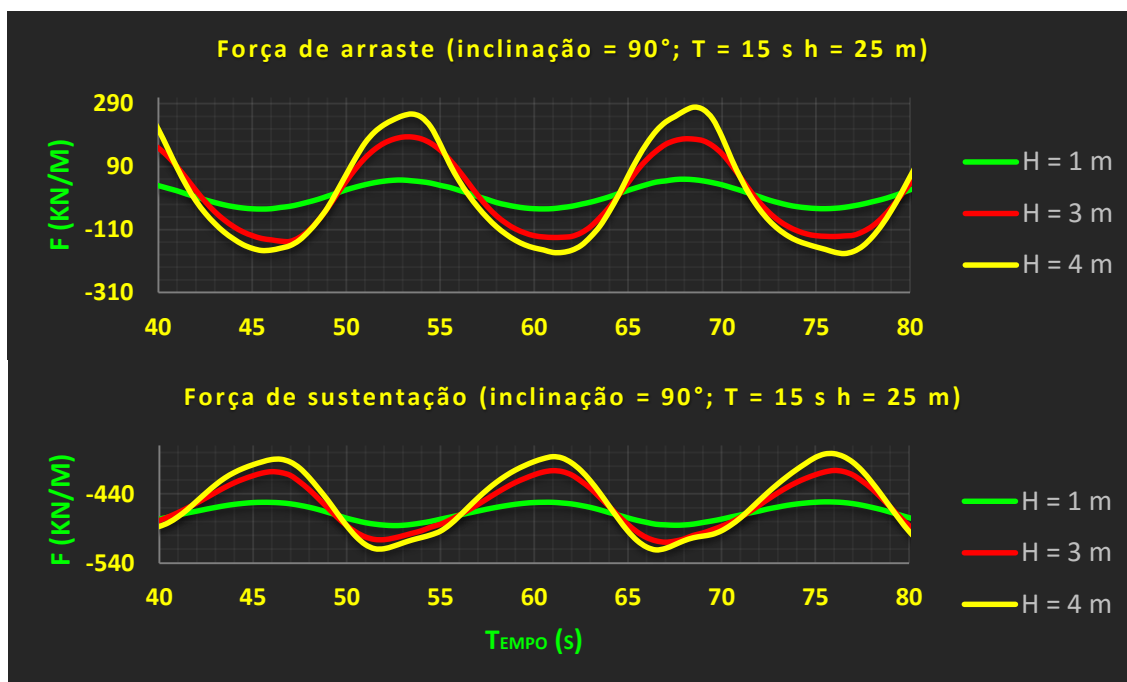
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 108 – Coeficientes de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 15 s (Caso 3)



(fonte: elaborado pelo autor)

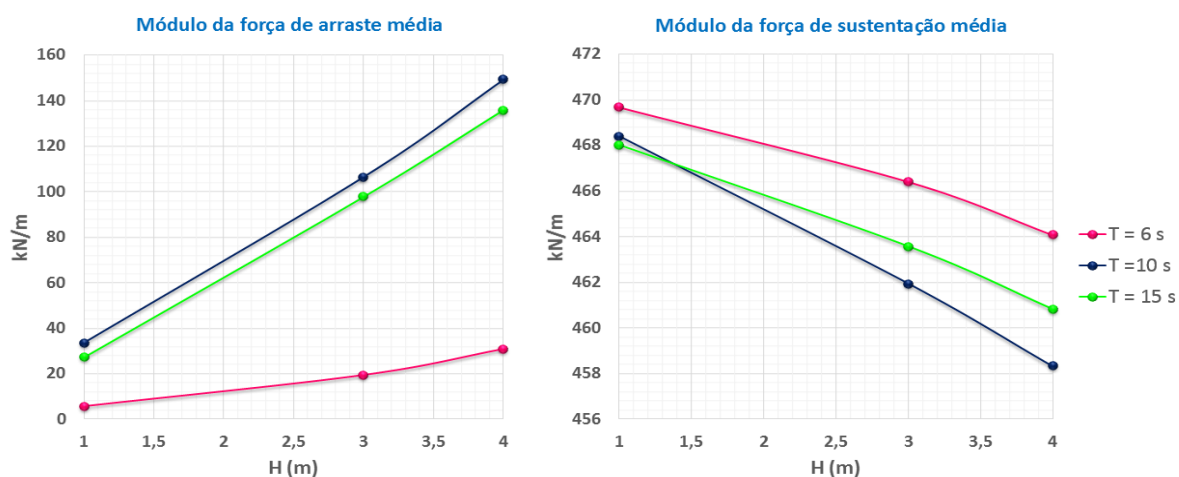
Figura 109 – Forças de arraste e sustentação ao longo do tempo em função do aumento da altura da onda, para período de onda de 15 s (Caso 3)



(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos da figura 110 mostram o comportamento do módulo das forças de arraste e sustentação em função da variação da altura de onda para períodos fixos. Pode-se concluir que com o aumento desta há um aumento no módulo da força de arraste e uma diminuição no da força de sustentação, confirmando que a primeira é mais influente no movimento das placas.

Figura 110 – Módulo das forças de arraste e sustentação em função da altura da onda, para períodos fixos da mesma



(fonte: elaborado pelo autor)

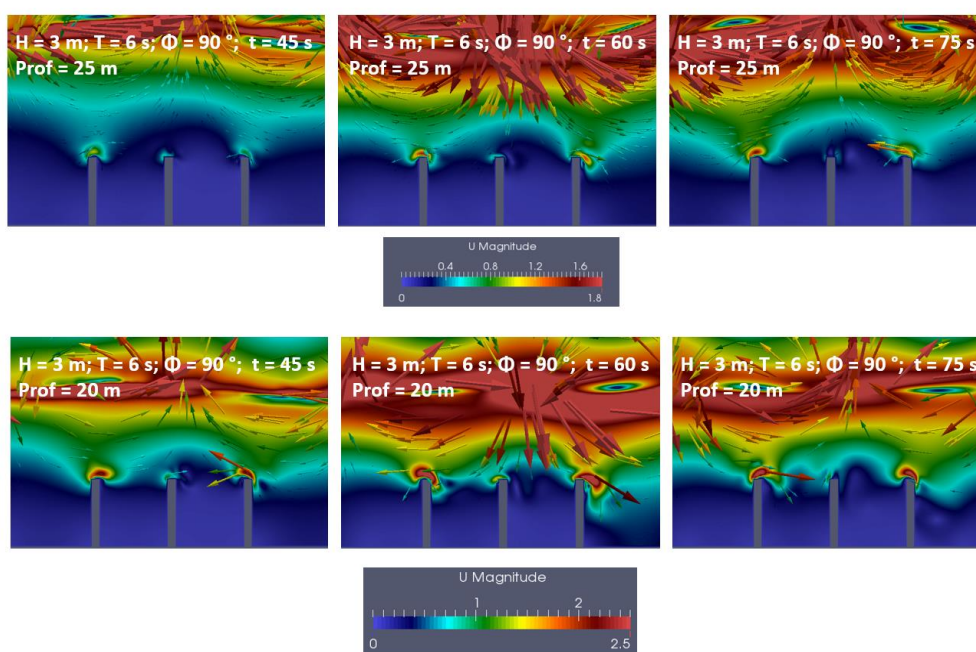
10.7 VARIAÇÃO DA PROFUNDIDADE

Partindo das mesmas considerações da seção 10.5, analisou-se a influência da profundidade nas características do escoamento das ondas do mar sobre os *Waverollers*. Para isso, foram utilizadas três profundidades (25 m, 20 m e 10 m), período ($T = 6$ s) e altura de onda ($H = 3$ m) fixos, tendo como pressuposto que a forma como escoamento se comporta para tais condições ocorre de forma análoga para diferentes alturas e períodos de onda.

10.7.1 Campo de velocidades

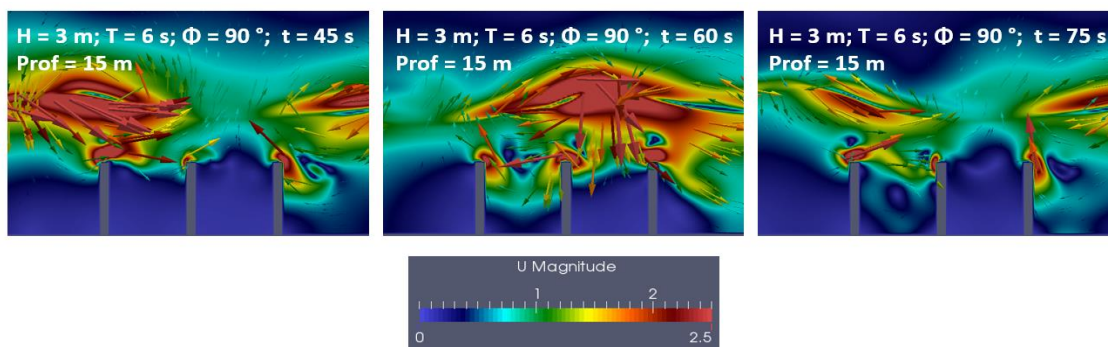
Quando a profundidade em que o dispositivo se encontra é menor, ou seja, quando este está mais próximo da costa, é possível verificar um aumento da velocidade nas regiões entre as placas, da mesma forma que se observou com o aumento do período, este aumento está relacionado ao comprimento de influência das hodógrafas que é maior, visto que as placas se encontram mais próximas da superfície em função das lâminas d'água menores, favorecendo a recirculação na região entre elas. As figuras 111 e 112 mostram o campo de velocidades para diferentes profundidades, considerando altura e período de onda fixos.

Figura 111 – Campo de velocidades para as profundidades de 25 m e 20 m, com altura e período de onda de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 112 – Campo de velocidades para a profundidades de 15 m, com altura e período de onda de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4)

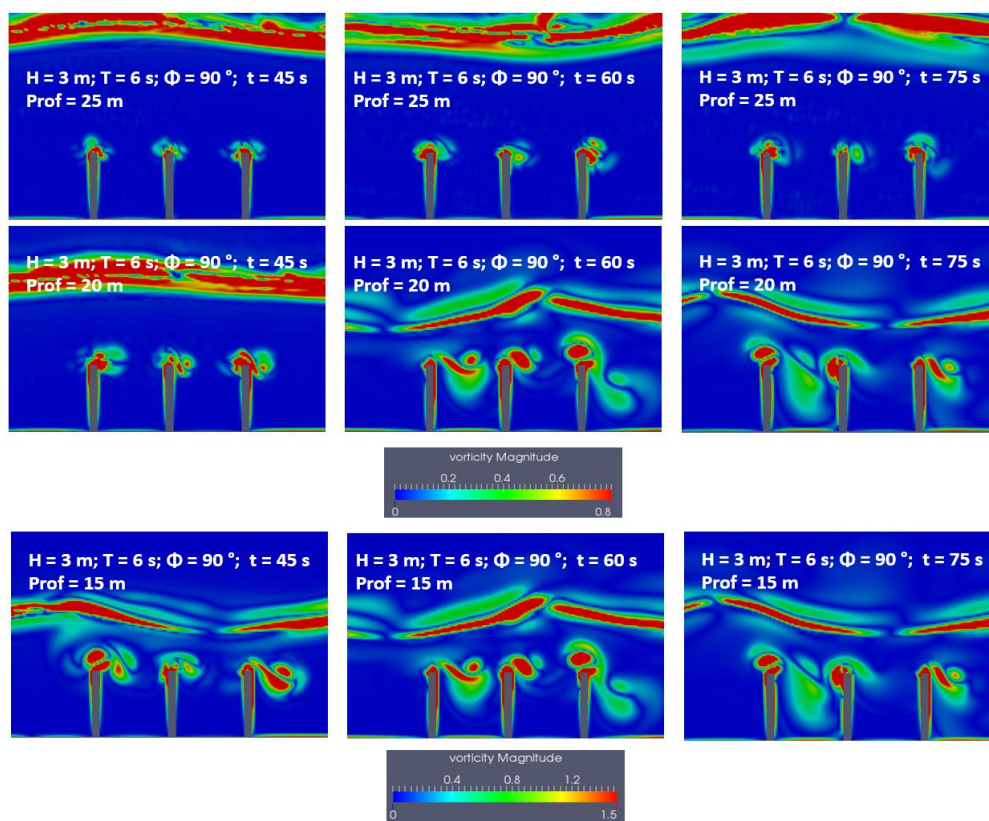


(fonte: elaborado pelo autor)

10.7.2 Vorticidade

A vorticidade tende a aumentar para profundidades menores pelos mesmos motivos que a velocidade (discutidos na seção 10.7.1). Tal comportamento é mostrado na figura 113.

Figura 113 – Campo de vorticidade em função da profundidade para onda com altura e período de 3 m e 6 s, respectivamente (Caso 4)

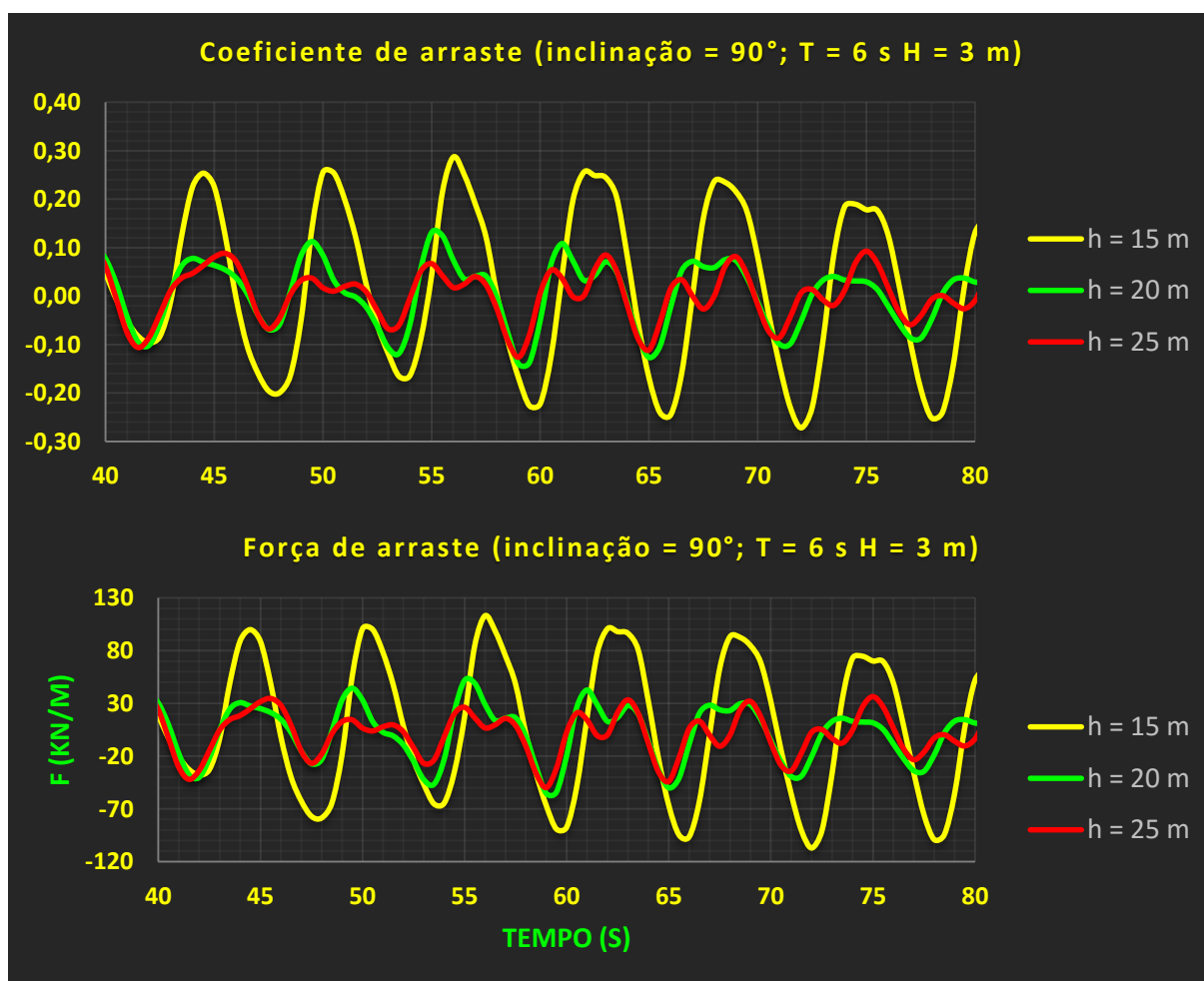


(fonte: elaborado pelo autor)

10.7.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação

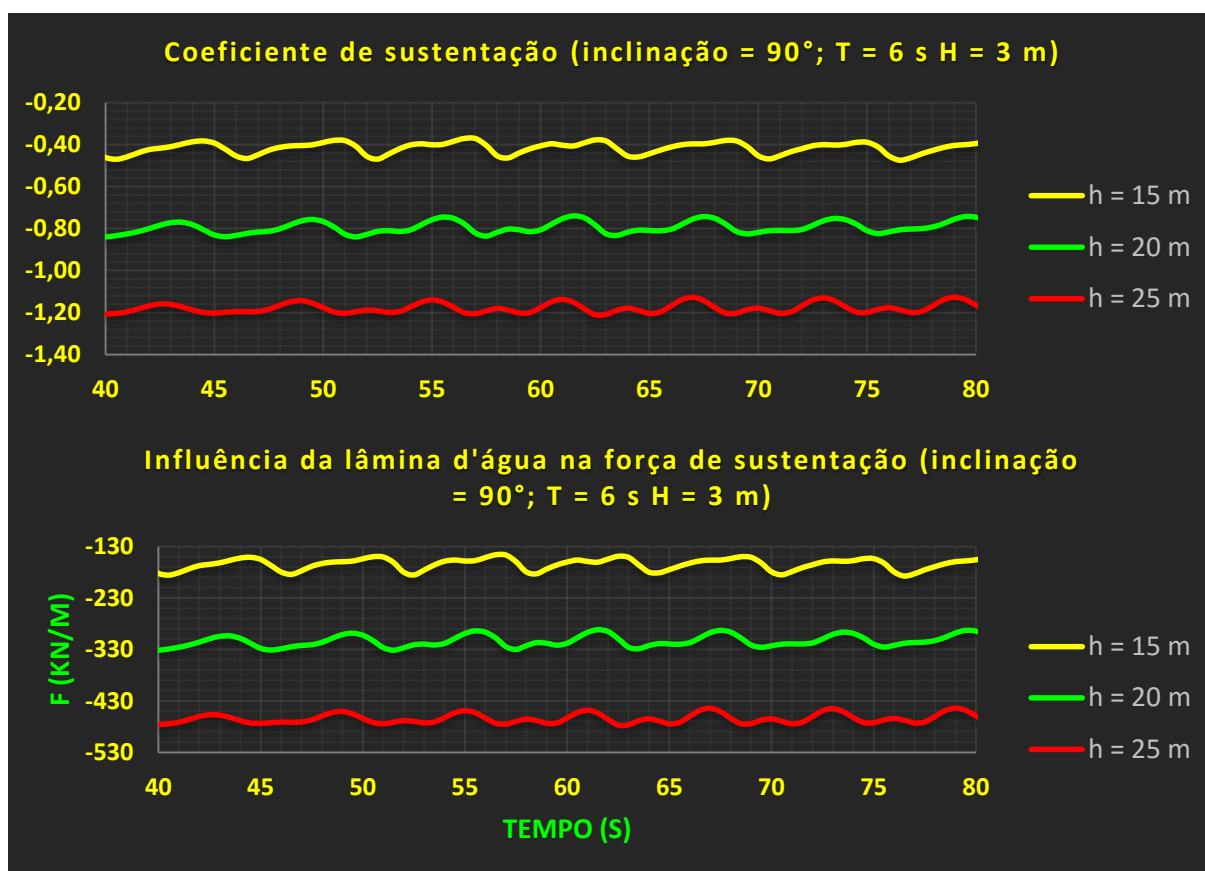
Em profundidades menores as forças e coeficientes de arraste tendem a aumentar a amplitude de suas oscilações, e, da mesma forma como ocorre com o aumento do período, devido ao surgimento de velocidades maiores nas regiões entre as placas, desaparecendo os efeitos de oscilação secundários. Já a força de sustentação e seu coeficiente são mais influenciados pela diminuição da profundidade do que a força de arraste e seu coeficiente, já que os primeiros diminuem. As figuras 114 e 115 apresentam este comportamento.

Figura 114 – Força e coeficiente de arraste em função da profundidade, para onda de 3m de altura e 6 s de período (Caso 4)



(fonte: elaborado pelo autor)

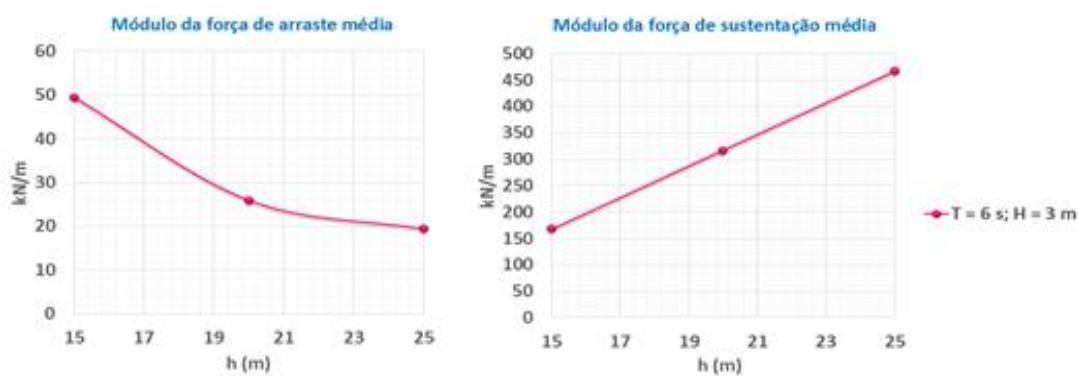
Figura 115 – Força e coeficiente de sustentação em função da profundidade, para onda de 3m de altura e 6 s de período (Caso 4)



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 116 mostra o aumento do módulo da força de arraste e diminuição do módulo da força de sustentação em função da profundidade, considerando altura e período de onda fixos de 3 m e 6 s, respectivamente.

Figura 116 – Módulo das forças de arraste e sustentação em função da profundidade, para onda de 3m de altura e 6 s de período (Caso 4)



(fonte: elaborado pelo autor)

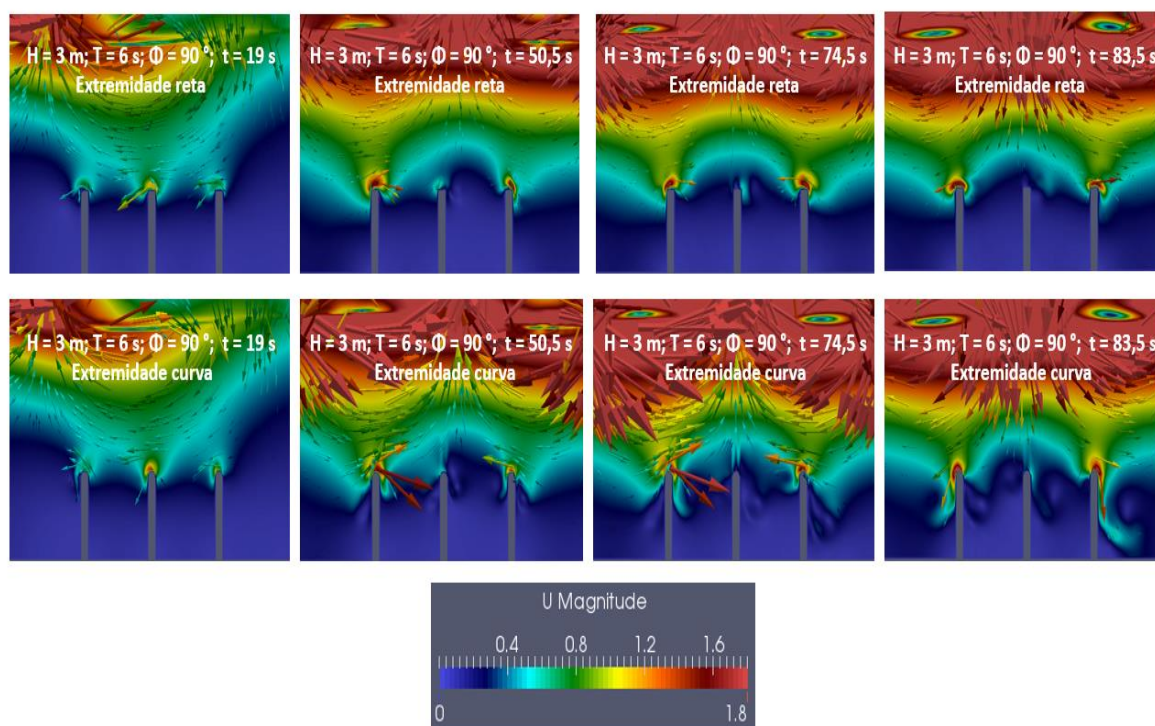
10.8 INFLUÊNCIA DA CURVATURA NA EXTREMIDADE DA PLACA

Para estudar como a curvatura na extremidade das placas afeta o escoamento que age sobre elas, foram comparados os casos das placas com extremidade reta e com extremidade curvada, considerando placas na posição angular de 90° , onda com 3 m de altura e 6 s de período, profundidade 25 m e 4,712 rad de fase.

10.8.1 Campo de velocidades

Nota-se, para esse caso, que a magnitude das velocidades e seu comportamento permanecem praticamente os mesmos em relação às placas com extremidade reta, porém a curvatura favorece a formação de vórtices no entorno das placas como mostra a figura 117.

Figura 117 – Comparação entre os campos de velocidade para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5)



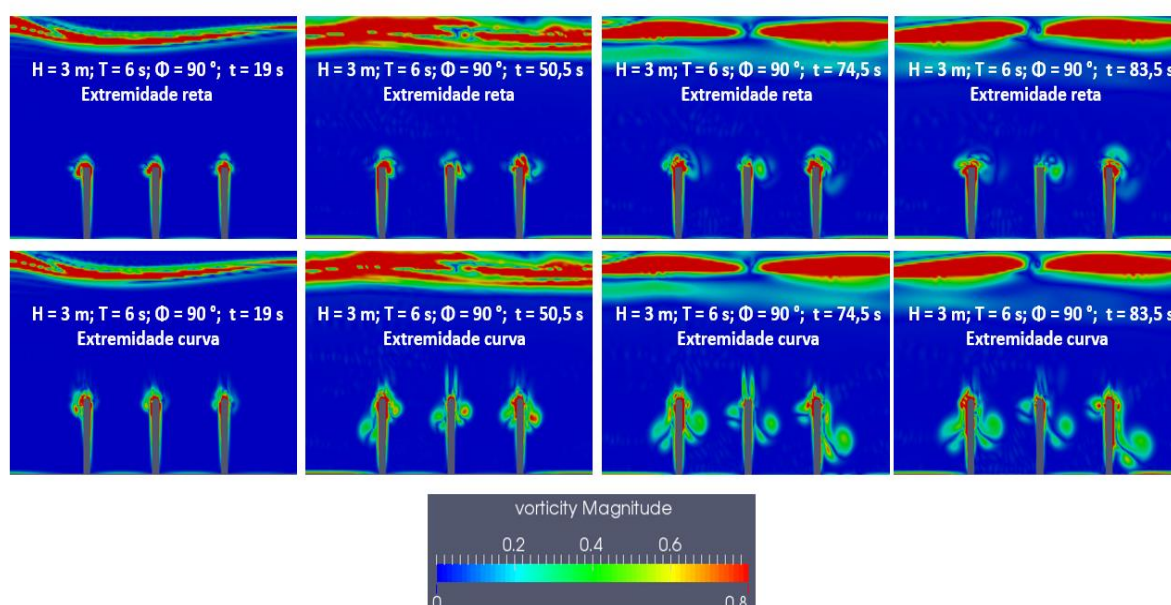
(fonte: elaborado pelo autor)

10.8.2 Vorticidade

Da mesma forma que a velocidade, as magnitudes da vorticidade permanecem praticamente as mesmas, notando-se uma distribuição mais dispersa para as placas com curvatura nas extremidades, confirmando que essa aumenta a geração de vórtices.

A comparação entre essas duas situações, considerando o comportamento da vorticidade na região de entorno das placas é mostrada na figura 118.

Figura 118 – Comparação entre os campos de vorticidade para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5)

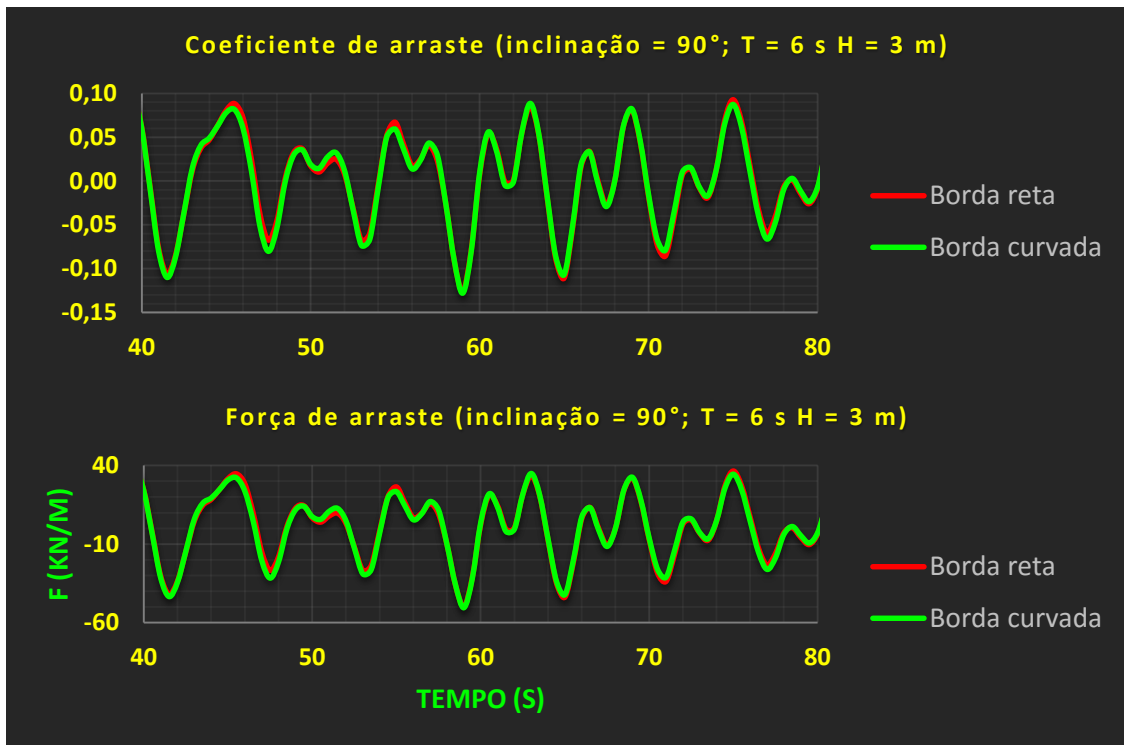


(fonte: elaborado pelo autor)

10.8.3 Forças e coeficientes de arraste e sustentação

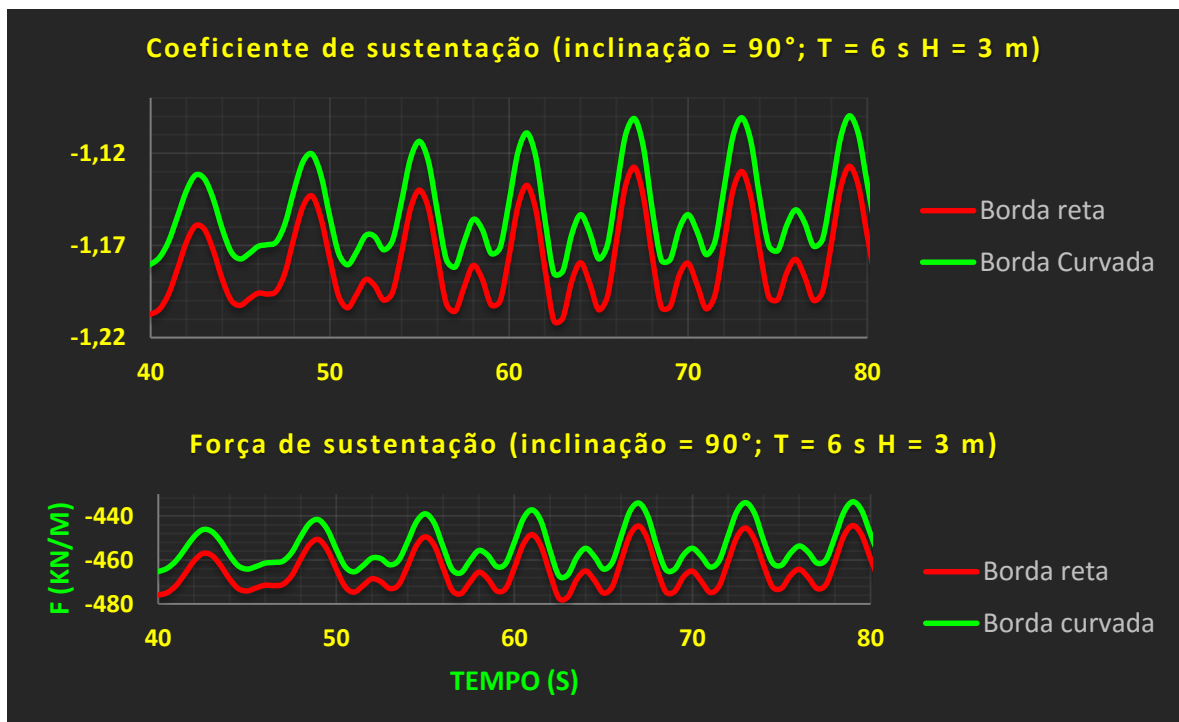
Com a curvatura na extremidade das placas pode-se perceber que a força e coeficiente de arraste não sofrem mudanças significativas se comparadas às placas de extremidade reta, o que não acontece para a força e coeficiente de sustentação, os quais tendem a diminuir. Porém, a forma das oscilações se mantem a mesma (figuras 119 e 120).

Figura 119 – Comparação entre a força e coeficiente de arraste para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 120 – Comparação entre a força e coeficiente de sustentação para placas com extremidade reta e placas com extremidade curva (Caso 5)



(fonte: elaborado pelo autor)

11 CONCLUSÕES

A simulação numérica foi utilizada para mostrar como características básicas de onda, como altura e período, afetam o escoamento em torno das placas dos *Waverollers*, e conseqüentemente a capacidade do mesmo gerar energia elétrica, tendo em vista os resultados obtidos nesse trabalho e os estudos realizados pelos autores citados no capítulo 5.

Através das simulações realizadas notou-se que o aumento do período e diminuição da profundidade de instalação provocam o aparecimento de grandes velocidades na região entre as placas, pois, em ambos os casos, nota-se a tendência da ocorrência do efeito de ‘corrente periódica’ (assim chamado neste trabalho), o qual está relacionado com a baixa produção de energia para regiões menos profundas e para ondas com grandes períodos (através do confronto dos resultados obtidos através da variação da altura e do período da onda com os resultados da figura 28) .

Pode-se dizer, acerca do aumento da altura das ondas, que este efeito não é tão significativo quanto o aumento do período, porém se estes efeitos forem combinados, o aumento da altura da onda aumentará o efeito de corrente relacionado ao maior valor de período, logo, pode-se dizer que alturas de onda muito grandes estão relacionadas a menores tendências de geração de energia.

As placas quando encontram-se em posições mais inclinadas estão sujeitas a maiores módulos de forças de sustentação e menores de forças de arraste, bem como maiores vorticidades e velocidades. Porém, como foi apresentado na seções 5.3 e 5.4, a captação de energia está diretamente associada a capacidade de giro da placa, que é mínima para posições inclinadas. O que define a capacidade de giro das placas são as oscilações nos valores das forças de arraste e sustentação, que estão associadas a menores períodos de onda. Pode-se concluir que, em razão das forças de sustentação atuarem sempre para baixo na vertical, a oscilação angular das placas é mais influenciada pelas forças de arraste.

O efeito de ‘corrente periódica’ está diretamente ligado ao comprimento de influência (largura) das hodógrafas, os quais são maiores para períodos de onda maiores e para menores profundidades em virtude das elipses mais largas que ocorrem nas águas rasas. Este fenômeno causa recirculação entre as placas e dificulta a oscilação angular da mesma, desfavorecendo o

movimento dos pistões e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica. Pode-se dizer, em suma, que esta situação é a mais desfavorável ao funcionamento dos *Waverollers*.

O *design* de placas com extremidades arredondadas diminuem as forças de sustentação e favorecem o surgimento de vórtices, porém parecem causar mudanças menos bruscas no escoamento nessa região.

Para finalizar, pode-se dizer que o *Waveroller*, se corretamente construído e instalado em região com escoamento de características favoráveis, é um dispositivo gerador de energia renovável de grande potencial, tendo em vista, principalmente, que as águas dos mares e oceanos estão sempre em movimento e com alto potencial energético.

12 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o presente trabalho foram utilizadas ondas regulares (que representam uma idealização da realidade) e características estáticas de malha, não sendo possível analisar a capacidade de movimento da estrutura em função do escoamento.

Recomenda-se, para dar continuidade aos assuntos abordados neste trabalho, seguir os seguintes pontos:

- a) utilização de malha dinâmica, associada a características da estrutura, como momento de inércia de massa, peso e coeficiente de amortecimento;
- b) ondas incidentes irregulares de períodos entre 6 s e 12 s;
- c) análise da estimativa de produção de energia em função do movimento das placas em conjunto com as características de escoamento;
- d) estudo da capacidade de captação de energia em função da profundidade, altura e período da onda.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, R. A. A. **Modelação de um sistema de conversão de energia das ondas**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- AW-ENERGY. **História da Empresa**. Vantaa, FL, [2009?]. Disponível em: <<http://aw-energy.com/pt-pt/sobre-nos-2/historia-da-empresa>>. Acesso em: 17 jun. 2015.
- CAMPOS, G. A. P. **Estudo de mecanismo aplicado na geração de energia a partir de correntes oceânicas**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Alternativas Energéticas: uma visão CEMIG**. Belo Horizonte, MG, 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Alternativas%20Energ%C3%A9ticas%20-%20Uma%20Visao%20Cemig.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- CORNETT, A. M. A global wave energy resource assessment. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 18th, 2008, Vancouver, Canada. **Proceedings...** Vancouver: ISOPE, 2008. p. 1-9. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0CFYQFjAI&url=https%3A%2F%2Fwww.u-cursos.cl%2Fingenieria%2F2009%2F1%2FCI61U%2F1%2Fmaterial_docente%2Fbajar%3Fid_material%3D221532&ei=mW2CVfbcCcW9ggTgr7C4CQ&usg=AFQjCNG1dx5tKPEIOQUhdDmsY8wC_-MD2Q&sig2=EAjkOhbAGV9ThJ80690tqA>. Acesso em: 17 jun. 2015.
- CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais**. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2004.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. 2nd ed. Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 1991.
- FAVERO, J. L. **Simulação de escoamentos viscoelásticos: desenvolvimento de uma metodologia de análise utilizando o software OpenFOAM e equações constitutivas diferenciais**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- FISCHER, A. **Avaliação do potencial energético de correntes oceânicas no litoral sul do Brasil**. 2014. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- FLEMIN, F. P. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.; HENRY, A. The performance of a wave energy converter in shallow water. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 6th, 2005, Glasgow, UK. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2005. p. 133-140. Disponível em:

<<http://aquamarinepower.com/sites/resources/Published%20papers/2478/The%20performance%20of%20a%20wave%20energy%20converter%20in%20shallow%20water.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2015.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.W.T.; VAN'T HOFF, J. The design of small seabed—mounted bottom—hinged wave energy converters. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 7th, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2007. Não paginado. Disponível em:

<<http://aquamarinepower.com/sites/resources/Published%20papers/2475/Design%20of%20small%20seabed-mounted%20bottom%20hinged%20wave%20energy%20converters.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2015.

FOX, R. W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Flúidos**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

FRAGA, R. J. P. **Desenvolvimento de um novo sistema de aproveitamento de energia das ondas**. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE CANTABRIA. **IHFOAM Manual**. Cantabria: Universidad de Cantabria, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook: executive summary** Paris, FR, 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2014sum.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2015.

KUNDU, P. K.; COHEN I. M.; DOWLING, D. R. **Fluid Mechanics**. 5th ed. Waltham: Elsevier, 2012.

LAMBERT, R. J. **Development of a numerical wave tank using OpenFOAM**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia para a Sustentabilidade) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2012.

MÄKI, T.; VUORINEN, M.; MUCHA, T. Waveroller: one of the leading technologies for wave energy conversion. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 5th, 2014, Halifax, Canada. **Proceedings...** Lisbon: OES, 2014. Não paginado. Disponível em: <<http://www.icoe-conference.com/publication/-waveroller-one-of-the-leading-technologies-for-wave-energy-conversion>>. Acesso em: 17 jun. 2015.

MARTINS, D. A. de M.; PADILLA, E.; SILVEIRA-NETO, A. da. Implementação do modelo de turbulência $\kappa-\omega$ SST em uma cavidade tridimensional. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 17., 2007,

Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2007. p. 1-6. Disponível em:
<<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/17/PDF/47.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2015.

MENTER, F. R.; KUNTZ, M.; LANGTRY, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TURBULENCE, HEAT AND MASS TRANSFER, 4th, 2003, Antalya, Turkey. **Proceedings...** New York: Begell House, 2003. Não paginado. Disponível em:
<http://cfd.mace.manchester.ac.uk/flomania/pds_papers/file_pds-1068134610Menter-SST-paper.pdf>. Acesso em: 27 out. 2015.

MORAES JUNIOR, L. T. R. de. **Recuperação energética de resíduos no médio vale do Itajaí com ênfase na conversão em energia elétrica**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

MORAIS, T. A. N. da S. **Estudo da operação de parques de sistemas de conversão de energia das ondas em energia elétrica**. 2009. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MUNICÍPIO DE PENICHE. **1 MW Wave Energy Power Plant**. Peniche, PT, 2007. Disponível em: <http://www.cm-peniche.pt/_uploads/pdf_noticias/waverollerawenergyoyeneolicasagrupolena.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2015.

PÁSCOA, I. S. N. **Aproveitamento da energia das correntes marítimas**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, [Lisboa], 2014.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D.C.; RAMADAN, B. H. **Mecânica dos Fluidos**. 4. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, M. A. C. da. **Factores de sustentabilidade em energias renováveis**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Área Departamental de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, [Lisboa], 2012.

SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SOARES, J. L. V. M. **Postos de transformação submarinos para parques de energias renováveis offshore**. 2007. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de

Computadores) – [Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia], Universidade do Porto, Porto, 2007.

SOUZA, R. de A. E. **Escolha de tecnologia de conversão da energia das ondas em energia elétrica**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 1st ed. Harlow: Longman, 1995.

WHITTAKER, T.; COLLIER, D.; FOLLEY, M.; OSTERRIED, M.; HENRY, A.; CROWLEY, M. The development of Oyster: a shallow water surging wave energy converter. In: EUROPEAN WAVE AND TIDAL ENERGY CONFERENCE, 7th, 2007, Porto, Portugal. **Proceedings...** Belfast: Queen's University Belfast, 2007. Não paginado. Disponível em:

<<http://www.aquamarinepower.com/SITES/RESOURCES/PUBLISHED%20PAPERS/2474/THE%20DEVELOPMENT%20OF%20OYSTER%20-%20A%20SHALLOW%20WATER%20SURGING%20WAVE%20ENERGY%20CONVERTER.PDF>>. Acesso em: 17 jun. 2015.