



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Análise numérica de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo placa pendular

Dissertação de:
Yanca da Cunha Pereira

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
Coorientador:
Dr. Eric Didier

Agosto de 2025

Dissertação - PPGeo – FURG

Yanca da Cunha Pereira
Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 12/09/2025 11:10:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do PPGeo

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 12/09/2025 11:09:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
Orientador — FURG/PPGeo
(Assinado por Elizaldo Domingues dos Santos – Coordenador PPGeo)

Prof. Dr. Eric Lionel Didier
Coorientador — LNEC

Documento assinado digitalmente
 **LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI**
Data: 12/09/2025 17:02:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno — FURG/PPGeo

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE LUIS BRAUN**
Data: 12/09/2025 14:49:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Luis Braun
Membro Externo — UFRGS

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 12/09/2025 11:08:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Membro Interno — FURG/PPGeo

Rio Grande, 29 de agosto de 2025

P436a	Pereira, Yanca da Cunha Análise numérica de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo placa pendular / Yanca da Cunha Pereira. – 2025. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, 2025. Orientador: Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira. Coorientador: Dr. Eric Didier. 1. Engenharia Oceânica. 2. Simulação numérica. 3. Equações de Navier-Stokes. 4. Volume of Fluid. 5. Conversor de energia das ondas. I. Teixeira, Paulo Roberto de Freitas. II. Didier, Eric. III. Título. . CDU 62(26)
-------	--

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais que foram essenciais em me apoiar e incentivar durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira e coorientador Prof. Dr. Eric Didier por me orientarem e estarem presente durante todas as etapas do trabalho. Com total dedicação e solicitude durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao CNPq agradeço pelo auxílio financeiro e ao Programa de pós-Graduação em Engenharia Oceânica que, juntamente à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), possibilitaram a realização desse trabalho com qualidade e excelência.

Resumo

Yanca da Cunha Pereira

Análise numérica de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo placa pendular

O objetivo deste trabalho é o de investigar a performance hidrodinâmica do dispositivo conversor de energia das ondas do tipo placa pendular em uma região *onshore*. A análise é feita por meio de simulação numérica usando o software ANSYS FLUENT® aplicado em um canal numérico 2D. O modelo numérico usa as equações de Navier-Stokes Média de Reynolds e a metodologia VoF (*Volume of Fluid*) para tratar o escoamento composto por dois fluidos, ar e água. O método *sliding mesh* é usado para considerar o movimento da placa rotacional causado pela ação da onda incidente. Inicialmente foi realizada uma validação do modelo quanto à ação de ondas em estruturas com movimento rotacional, considerando o caso de uma boia semi-submersa em um canal. Após, foi estudada a influência do coeficiente de amortecimento viscoso do sistema hidráulico responsável pela absorção de potência em uma placa em um canal, devido à incidência de ondas regulares de diferentes períodos, obtendo-se melhores valores entre 700 e 900 kNms/rad. Em seguida, foi analisada a influência da massa específica da placa no seu comportamento hidrodinâmico, mostrando que a massa específica de 1400 kg/m³ é a mais adequada. Uma análise detalhada do fenômeno de interação onda-estrutura foi realizada para o caso. Após, foram analisadas as influências da posição da placa e da rótula na performance do dispositivo, considerando as melhores condições das análises anteriores. Observou-se que a distância da extremidade superior da placa até a superfície livre de repouso que proporcionou a maior potência absorvida foi de 1 m, mantendo a distância da rótula até a superfície livre em 2 m, enquanto que a distância da rótula até a superfície livre que resultou a maior potência absorvida foi de 3 m, mantendo a extremidade da placa distante de 2 m em relação à superfície livre. Finalmente, um último caso foi analisado, levando em conta as melhores configurações das duas análises citadas simultaneamente. A maior potência absorvida é obtida quando a extremidade superior da placa está a 1 m da superfície livre e a rótula a 2 m da superfície livre. Assim, este trabalho permitiu entender com profundidade o processo de interação onda-estrutura do dispositivo do tipo placa oscilante pendular e as influências dos principais parâmetros envolvidos, auxiliando na elaboração de futuros projetos destes dispositivos.

Palavras-chave: Simulação numérica, Equações de Navier-Stokes, *Volume of Fluid*, Conversor de energia das ondas, Placa pendular.

Abstract

Yanca da Cunha Pereira

Numerical analysis of a pendulum plate-type wave energy conversion device

The objective of this work is to investigate the hydrodynamic performance of a pendulum plate-type wave energy converter device in an onshore region. The analysis is performed by numerical simulation using ANSYS FLUENT® software applied to a 2D numerical flume. The numerical model uses the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the VoF (Volume of Fluid) methodology to treat the flow composed of two fluids, air and water. The sliding mesh method is used to consider the rotational motion of the plate caused by the action of the incident wave. Initially, a validation of the model was performed regarding the action of waves on structures with rotational motion, considering the case of a semi-submerged buoy in a flume. Afterwards, the influence of the viscous damping coefficient of the hydraulic system responsible for the power absorption in a plate in a flume was studied, due to the incidence of regular waves of different periods, obtaining better values between 700 and 900 kNms/rad. Next, the influence of the specific mass of the plate on its hydrodynamic behavior was analyzed, showing that the specific mass of 1400 kg/m^3 is the most appropriate. A detailed analysis of the wave-structure interaction phenomenon was performed for the case. Afterwards, the influences of the position of the plate and the hinge on the performance of the device were analyzed, considering the best conditions of the previous analyses. It was observed that the distance from the upper end of the plate to the free surface resting surface that provided the greatest absorbed power was 1 m, keeping the distance from the hinge to the free surface at rest of 2 m, while the distance from the hinge to the free surface that resulted in the greatest absorbed power was 3 m, keeping the end of the plate 2 m away from the free surface. Finally, a last case was analyzed, taking into account the best positions shown in the two analyses cited simultaneously. It was noted that the greatest absorbed power is obtained when the upper end of the plate is 1 m from the free surface and the hinge is 2 m from the free surface. Thus, this work allowed an in-depth understanding of the wave-structure interaction process of the oscillating pendulum plate device and the influences of the main parameters involved, assisting in the development of future projects for these devices.

Keywords: Numerical simulation, Navier-Stokes equations, Volume of Fluid, Wave energy converter, Pendulum plate.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas	XIII
Lista de Símbolos	XIV
Lista de Siglas	XVI
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Dispositivos conversores de energia das ondas _____	5
2.1.1 Dispositivos de placas com movimento de rotação _____	7
2.1.2 Análise numérica dos dispositivos do tipo placa oscilante e pendular _____	10
2.2 Mecânica das ondas progressivas _____	12
2.2.1 Teoria Linear _____	13
2.2.2 Teorias de onda de amplitude finita _____	16
2.3 Movimento do corpo rígido de um pêndulo _____	18
3 Metodologia	19
3.1 Estudo de caso _____	19
3.2 Modelo matemático _____	21
3.3 Modelo numérico _____	23
3.4 Condições de contorno e iniciais _____	24
3.5 Características da malha de volumes finitos _____	25
3.6 Pós processamento _____	26
4 Resultados e discussões	28
4.1 Validação do modelo numérico _____	28
4.2 Teste de independência de malha e da influência do raio da circunferência _____	32
4.3 Análise da influência do coeficiente de amortecimento _____	38
4.4 Análise da influência da massa específica da placa _____	40
4.5 Análise da interação onda-estrutura para onda incidente de $T = 8$ s _____	42
4.6 Análise da posição da placa _____	48
4.7 Análise da posição da rótula _____	54
4.8 Estudo de caso com as posições da placa e da rótula de melhor performance _____	56
5 Conclusões	58

Referências	60
Apêndice A: Campo de velocidade e linhas de corrente para diferentes períodos de onda	67
Apêndice B: Campo de pressão dinâmica para diferentes períodos de onda	70
Apêndice C: Cargas distribuídas sobre a placa para diferentes períodos de onda	73
Apêndice D: Séries temporais dos parâmetros da placa para diferentes períodos de onda	76

Lista de Figuras

Página

1 • Introdução

Figura 1.1: Distribuição global aproximada da média de potência das ondas em um período de 1989-2018. Fonte: Liliana Rusu e Eugen Rusu (2021). _____ 2

2 • Revisão Bibliográfica

Figura 2.1: Classificação dispositivos de conversão de energia das ondas : a) Coluna de Água Oscilante, b) Dispositivo de Galgamento, c) Corpos Oscilantes (Adaptado de: Aderinto e Li, 2019). _____ 5

Figura 2.2: Tecnologia utilizada em um sistema hidráulico para produzir eletricidade a partir das ondas (Adaptado de: Bostrom *et al.*, 2013). _____ 6

Figura 2.3: Funcionamento do dispositivo *Oyster* (Adaptado de: Whittaker *et al.*, 2007). _____ 8

Figura 2.4: Waveroller (AW-Energy, 2023). _____ 8

Figura 2.5: Dispositivo BioWave. Fonte Power Technology, www.power-technology.com. _____ 9

Figura 2.6: Representação do dispositivo pendular (Adaptado de: Watabe, 2007). _ 10

Figura 2.7: Tipos de ondas de acordo com a força geradora e restauradora. (Adaptado de Garrison, 2009). _____ 13

Figura 2.8: Parâmetros da onda (Adaptado de Douglass e Krolak, 2008). _____ 13

Figura 2.9: Trajetória da partícula conforme profundidade (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991). _____ 16

Figura 2.10: Diagrama do campo de aplicação das teorias das ondas (adaptado de Chakrabarti, 1987). _____ 17

Figura 2.11: forças que agem no pêndulo. (fonte: Adaptado de Shabana, 2019). ____ 18

3 • Metodologia

Figura 3.1: Esquema do estudo de caso. _____ 19

Figura 3.2: Características da placa. _____ 20

Figura 3.3: Diagrama das análises realizadas. _____ 21

Figura 3.4: Domínio computacional. _____ 22

Figura 3.5: Zonas de escoamento laminar e turbulento no domínio computacional. 23

Figura 3.6: Malha em três zonas do canal, a) a barlavento da placa b) em torno da placa e c) a sotavento da placa e detalhes da malha d) em torno da placa, para um período de onda de 8 s.	26
Figura 3.7: Sondas para monitoramento C_T e C_R .	27
4 • Resultados e discussões	
Figura 4.1: Esquema do domínio computacional para o caso de validação da boia oscilante.	29
Figura 4.2: Malha usada no caso da boia oscilante para $e = 1,23$ mm.	30
Figura 4.3: Séries temporais do ângulo de rotação da boia para malhas de diferentes tamanhos de volumes (em mm).	30
Figura 4.4: Série temporal do ângulo de rotação da boia obtida numericamente para $e = 1,23$ mm.	31
Figura 4.5: Campo de velocidades para 4 instantes: a) boia na posição horizontal e velocidade angular positiva, b) boia na posição $\alpha = \alpha_{\max}$, c) boia na posição horizontal e velocidade angular negativa, e d) boia na posição $\alpha = \alpha_{\min}$.	32
Figura 4.6: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; e c) da aceleração angular para o período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m ³ .	33
Figura 4.7: Séries temporais a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para um período de onda de 12s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m ³ .	34
Figura 4.8: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; e c) da aceleração angular para o período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m ³ .	36
Figura 4.9: Séries temporais a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para um período de onda de 12s, coeficiente de amortecimento de 500kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m ³ .	37
Figura 4.10: a) Amplitudes mínima, máxima e média do ângulo de rotação da placa e b) diferença entre amplitude mínima e máxima, para diferentes coeficientes de amortecimento ao longo do período da onda incidente.	39
Figura 4.11: Média temporal da potência absorvida pelo dispositivo ao longo do período da onda.	39
Figura 4.12: Coeficientes de transmissão e reflexão da onda para diferentes coeficientes de amortecimento.	40
Figura 4.13: Séries temporais da amplitude do ângulo de rotação da placa para diferentes massas específicas.	42

Figura 4.14: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$. _____ 43

Figura 4.15: Pressão dinâmica para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$. _____ 44

Figura 4.16: Carga distribuída na parede frontal (linha vermelha) e posterior (linha azul) da placa para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$. _____ 45

Figura 4.17: Séries temporais a) do ângulo de rotação, b) da velocidade angular e c) da aceleração angular para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³. _____ 46

Figura 4.18: Série temporal do momento hidrodinâmico para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³. _____ 47

Figura 4.19: Série temporal a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³. _____ 47

Figura 4.20: Séries temporais dos momentos que atuam na placa para $T = 8$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³. _____ 48

Figura 4.21: a) Potência média absorvida para diferentes períodos e diferentes posições da placa e b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R). _____ 49

Figura 4.22: Séries temporais da potência P_{PTO} para cada posição da placa e ondas incidentes com períodos de (a) 6 s, (b) 8 s, (c) 10 s e (d) 12 s, para diferentes posições da placa. _____ 50

Figura 4.23: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de placa. 50

Figura 4.24: Campo de velocidade e comportamento do dispositivo para $a = 0$ m para uma onda incidente de $T = 6$ s. a) posição placa vertical ($T/8$); b) $T/4$; c) $3T/8$; d) $T/2$; e) $5T/8$; f) $3T/4$; g) $7T/8$; h) T . _____ 52

Figura 4.25: Campo de velocidade e comportamento do dispositivo para $a = 0$ m sobre onda incidente de $T = 12$ s. a) posição placa vertical ($T/8$); b) $T/4$; c) $3T/8$; d) $T/2$; e) $5T/8$; f) $3T/4$; g) $7T/8$; h) T . _____ 53

Figura 4.26: a) Potência média absorvida para diferentes períodos e diferentes posições da rótula. b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R). _____ 54

Figura 4.27: Séries temporais da potência de absorção para cada posição da placa e ondas incidentes com períodos de (a) 6 s, (b) 8 s, (c) 10 s e (d) 12 s, para diferentes posições da rótula. _____ 55

Figura 4.28: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de rótula. _____ 56

Figura 4.29: a) Potência média absorvida b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R) para diferentes períodos e diferentes posições da rótula e de placa. _____ 57

Figura 4.30: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de rótula e de placa. _____ 57

Apêndices

Figura 5.1: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 6$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 67

Figura 5.2: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 10$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 68

Figura 5.3: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 12$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 69

Figura 5.4: Pressão dinâmica para $T = 6$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 70

Figura 5.5: Pressão dinâmica para $T = 10$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 71

Figura 5.6: Pressão dinâmica para $T = 12$ s, $CPTO = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$. _____ 72

Lista de Tabelas

3 • Metodologia

Tabela 3.1: Casos para investigação da posição da rótula na performance do dispositivo.	21
---	----

4 • Resultados e discussões

Tabela 4.1: Amplitudes máxima e mínima do ângulo de rotação e tempo de processamento para malhas de diferentes tamanhos de volumes.	31
Tabela 4.2: Potência absorvida média, amplitude total do ângulo de rotação e tempo computacional adimensional para malhas de diferentes tamanhos de volumes	35
Tabela 4.3: Potência média absorvida, amplitude total do ângulo de rotação e tempo computacional adimensional para malhas de diferentes raios de circunferência	38
Tabela 4.4: Massa da placa (m_p), inércia de massa da placa (I_p) e potência média absorvida (P_{abs}) para cada uma das massas específicas (ρ_p) analisadas.	41
Tabela 4.5: Comparação das potências médias absorvidas (P_{abs}) para diferentes períodos de onda em diferentes posições de placa e rótula.	56

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

C	Celeridade [m/s].
g	Aceleração da gravidade [m/s ²].
H	Amplitude da onda [m].
b	Profundidade do canal [m].
I	Inércia [kgm ²].
J	Momento de inércia rotacional [kgm ²].
L	Comprimento de onda [m].
m	Massa da placa [kg].
M	Momento [Nm]
P	Potência [kW/m].
p	Pressão total [Pa].
T	Período [s].
t	Tempo [s].
u	Componente horizontal da velocidade [m/s].
$\vec{V}$	Vetor velocidade [m/s].
w	Componente vertical da velocidade [m/s].

Símbolos Gregos

ζ	Componente de deslocamento horizontal da partícula [m].
θ	Ângulo de rotação da placa [rad].
$\dot{\theta}$	Velocidade angular da placa [rad/s].
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular da placa [rad/s ²].
ξ	Componente de deslocamento vertical da partícula [m].
ρ	Massa específica [kg/m ³].
σ	Frequência da onda [Hz].

Subscritos e Superscritos

$\theta_{m\acute{a}x}$	Amplitude máxima da placa [°].
$\theta_{m\acute{i}n}$	Amplitude mínima da placa [°].
C_{PTO}	Coefficiente de amortecimento [kNms/rad].
C_R	Coefficiente de reflexão
C_T	Coefficiente de transmissão
l_p	Comprimento da placa [m].
a_r	Distância rótula e topo da placa [m].
a_p	Distância topo da placa e superfície livre [m].
M_c/M_{PTO}	Momento gerado pelo amortecimento na placa [Nm].
M_p	Momento gerado pelo peso próprio [Nm].
M_h	Momento hidráulico [N.m].
k_w	Número de onda [rad/m].
U_r	Parâmetro de Ursell.
P_{PTO}	Potência absorvida pelo dispositivo [Pa].
p_η	Pressão atmosférica [Pa].
P_{abs}	Potência média absorvida pela placa [kW/m].

Lista de Siglas

BEM	<i>Boundary Element Method.</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics.</i>
EMEC	<i>European Marine Energy Centre.</i>
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.
MVF	método dos volumes finitos.
PTO	<i>Power Take Off.</i>
SL	superfície livre.
UDF	<i>User Define Functions.</i>
VoF	<i>Volume of Fluid.</i>
WEC	<i>Waves Energy Converters.</i>

1 | Introdução

O uso de fonte de energia renovável aumentou especialmente após a crise do petróleo em 1973, mas ainda cerca de 85% da energia utilizada no mundo não é renovável (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). O mundo tem sofrido problemas ambientais devido à poluição causada pela utilização dos recursos não renováveis e, consequentemente, crescem os impactos negativos no ambiente com o uso e exploração desses elementos. A busca pela diminuição de problemas ambientais, como a emissão de gases poluentes que causam o efeito estufa, somados à finitude da matéria prima dos principais combustíveis utilizados atualmente, abriu espaço para pesquisas de novas matrizes energéticas.

A energia eólica, a energia hidrelétrica e a energia solar são fontes renováveis de energia que têm se desenvolvido como forma de diminuir o uso de fontes de energia não renováveis como o petróleo. No entanto, há algumas décadas iniciou-se o estudo da viabilidade de se aproveitar a energia das ondas do mar como uma alternativa que possa ser utilizada em concomitância com os recursos fósseis. Uma das razões é a grande quantidade de energia disponível, cerca de $30 \cdot 10^6$ GWh/ano, conforme Curto *et al.* (2020) e Aderinto e Li (2018). Alternativamente, alguns pesquisadores estimam que a potência global das ondas em águas profundas varia de 1 a 10 TW (Saket e Etamad-Shahidi, 2012; Khojasteh *et al.*, 2018) e relatam que mesmo que a energia seja distribuída de forma irregular ao redor do mundo, é considerado um valor significativo quando comparado com a demanda de energia. Além disso, a energia das ondas possui a vantagem de a densidade de potência disponível ser maior do que a da energia eólica e da energia solar. Enquanto que a densidade de potência disponível da energia das ondas é de 2 a 3 kW/m², a densidade da energia eólica é de 0,4 a 0,6 kW/m² e a da energia solar de 0,1 a 0,2 kW/m² (Wimalaratna *et al.*, 2022).

O Brasil é um país com extensa zona litorânea, possuindo grande potencial de exploração da energia das ondas. A figura 1.1 mostra o mapa global de potência média das ondas em kW/m elaborado por Rusu e Rusu (2021) para um período de 30 anos compreendido entre 1989 e 2018. O maior valor de potência média foi cerca de 119 kW/m localizado no hemisfério Sul, também entre as latitudes de 40° e 60° de ambos hemisférios, englobando parte da costa brasileira. Destaca-se que a potência das ondas se amplifica principalmente durante o inverno, que é a estação na qual os ventos são mais intensos (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).

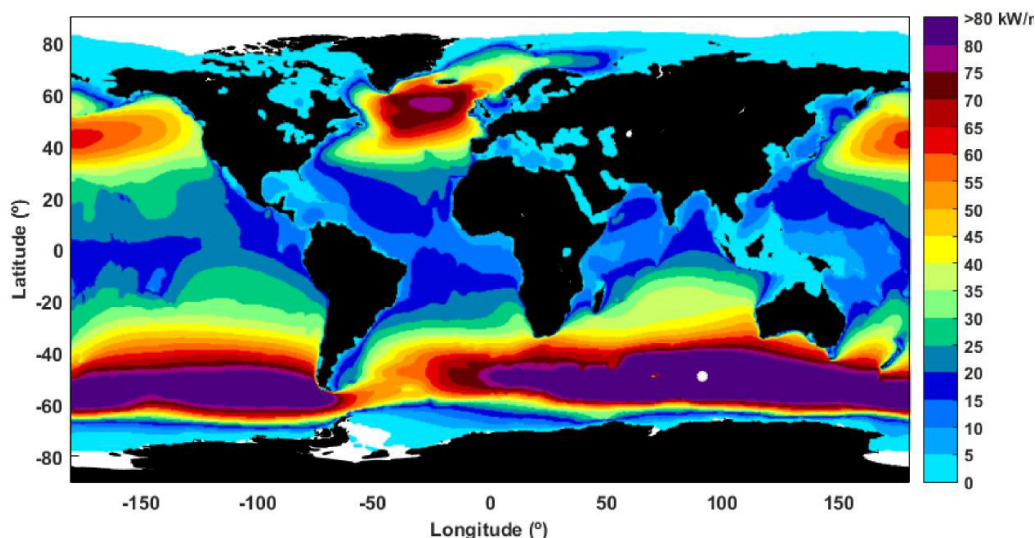


Figura 1.1: Distribuição global aproximada da média de potência das ondas em um período de 1989-2018. Fonte: Rusu e Rusu (2021).

Em se tratando da variação sazonal, essa é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Assim, em torno da costa do sul da América do Sul, Austrália e África há uma menor variação sazonal (Falcão, 2010), o que torna estas regiões mais atrativas para aproveitamento da energia das ondas. Com isso, a vasta região da costa brasileira tem grande potencial para a exploração da energia das ondas. Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) mostraram que o fluxo de energia médio anual *offshore* na costa sul do Brasil é de 22,3 kW/m, enquanto que em *nearshore* é de 6,7 kW/m. Essa diminuição se deve à refração e dissipação de energia à medida que as ondas se aproximam da costa.

Há décadas se têm estudado diferentes conceitos de dispositivos conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converters* - WEC) em energia elétrica, sendo que alguns modelos possuem até mesmo protótipos. Todavia, nenhum dos equipamentos estudados mostrou viabilidade técnico-econômica suficiente para se tornar um produto comercial. Ainda assim, os estudos acerca de propostas de melhorias para tornar os dispositivos mais eficientes e viáveis economicamente continuam. Existem diversas tecnologias propostas para a conversão de energia das ondas em energia elétrica, sendo que os dispositivos podem estar localizados em uma região *offshore* (geralmente estruturas flutuantes), *nearshore* ou *onshore* (geralmente estruturas assentadas no fundo) (Henriques *et al.*, 2013). Além do dispositivo mais estudado até o momento, o do tipo coluna de água oscilante (CAO), destacam-se os dispositivos de corpos flutuantes/oscilantes e o dispositivo de galgamento. Cada dispositivo possui suas particularidades que podem ser definidas com base no seu princípio operacional e na sua localização (Cruz e Sarmiento, 2004).

A proximidade dos dispositivos com a costa apresenta vantagens quanto à instalação, manutenção, ausência de longos comprimentos de cabos submarinos, além

de melhor fixação. Em contra partida, próximo à costa não há aproveitamento dos regimes mais intensos de ondas, encontrados em grandes profundidades (Cruz e Sarmiento, 2004; Lisboa, Teixeira e Fortes, 2017).

Tendo em vista que dispositivos próximos à costa possuem melhor custo operacional, surge os conversores de energia das ondas do tipo placa oscilante, desenvolvido para águas rasas, de modo a aproveitar o movimento elíptico das partículas da água (Whittaker e Folley, 2009). Esse dispositivo pode estar posicionado em diferentes partes do canal, podendo estar totalmente submerso ou parcialmente emerso. Além disso, seu sistema de rotação pode estar localizado no topo da parte emersa da placa, funcionando como um pêndulo (articulação superior) ou na ponta submersa, próxima ao fundo do mar, funcionando como um pêndulo inverso (articulação inferior). Grande parte desses dispositivos utilizam sistema hidráulico para extrair energia.

Dentre alguns dispositivos assentados ao fundo existentes estão o *Oyster* da Aquamarine Power, que foi implantado no Centro Europeu de Energia Marinha em agosto de 2009; posteriormente foi criado o *Oyster 2*, que foi implantado em agosto de 2011 (Whittaker e Folley, 2012). Também, o *WaveRoller* (Folley, Whittaker e Hoff, 2007a; Lopes *et al.*, 2009) é um dispositivo totalmente submerso, cujos testes iniciais ocorreram em 1999, na região de Porkkala, no sul da Finlândia. Em 2007, a empresa finlandesa AW Energy testou um protótipo em escala reduzida (1:4) em Portugal. Posteriormente, em 2015, foi instalado um protótipo em escala real em Järvenpää, na Finlândia, equipado com uma aba de 18 metros de comprimento e 10 metros de altura, com potência nominal de 350 kW (Curto, Franzitta e Guercio, 2021).

Seguindo o conceito de captação de energia através de uma placa vertical, o dispositivo que consiste em uma placa parcialmente emersa rotulada na parte superior e sujeita a ondas estacionárias dentro de um caixão foi desenvolvido em 1980 pelo Instituto de tecnologia Muroran no Japão. Foi chamado de dispositivo pendular, obtendo uma eficiência de conversão estimada em 40 a 60% na baía de Muroran em condições de pico de onda (Gunawardane, Kankanamge e Watabe, 2016). Na mesma linha, Folley, Whittaker e Osterried (2004) propuseram um conversor do tipo placa oscilante, baseado em um conceito semelhante ao do dispositivo pendular anterior. No entanto, diferentemente deste, o conversor foi instalado na parte frontal de uma parede posterior inclinada, explorando a ressonância da coluna de água localizada atrás da aba, ao invés da ressonância proporcionada por uma parede vertical. Foi observado uma melhoria na performance quando colocado a parede traseira inclinada, quando comparado sem ela.

Considerando as escassas pesquisas sobre os dispositivos do tipo placa oscilante, especialmente com movimento pendular, o presente trabalho tem como objetivo geral a análise numérica da performance de um dispositivo tipo placa pendular sujeita à ação de uma onda incidente regular, usando um modelo baseado nas equações de Navier-Stokes.

Além disso, para o movimento de corpo rígido da placa é utilizado um sistema de seis graus de liberdade, solucionado a cada instante através do *six DOF solver* existente no ANSYS FLUENT®, software utilizado para as simulações que usa o método dos volumes finitos para a discretização do domínio computacional e o método *Volume of Fluid* (VoF) para tratar o escoamento bifásico ar-água. Os objetivos específicos do estudo são os seguintes:

- Validar o modelo matemático composto de uma estrutura móvel semi-submersa com o grau de liberdade de rotação sujeito à incidência de onda em um canal;
- Estudar o comportamento da interação onda-estrutura móvel para diferentes características de ondas incidentes regulares;
- Estudar a influência do coeficiente de amortecimento viscoso característico do sistema de absorção de energia na performance da placa pendular;
- Investigar a influência da mudança de massa específica da placa na performance do dispositivo;
- Estudar a influência da posição da rótula e da posição vertical da placa na performance do dispositivo.

2 | Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados diferentes tipos de dispositivos de conversão de energia das ondas, juntamente com estudos já realizados sobre os dispositivos do tipo placa oscilante e pendular e suas respectivas contribuições. Do mesmo modo, é realizada uma revisão sobre conceitos da mecânica das ondas progressivas e do movimento de um pêndulo, destacando as equações governantes desses fenômenos.

2.1 Dispositivos conversores de energia das ondas

Embora ao longo dos anos diversos protótipos de dispositivos de conversão de energia das ondas tenham sido implementados, a energia oriunda das ondas impõe muitas dificuldades, tais como as diferentes características de estado de mar nos oceanos e mares, a sazonalidade e as condições extremas (Falcão, 2010).

Existem diferentes maneiras de classificar os dispositivos de conversão de energia das ondas, sendo que as mais usadas são aquelas que se baseiam na profundidade de instalação, no princípio de funcionamento e no tamanho do dispositivo. A figura 2.1 mostra o esquema simplificado de três tipos de dispositivos, classificados conforme o princípio de funcionamento por Aderinto e Li (2019). Os dispositivos são o do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) (Fig. 2.1a), do tipo galgamento (Fig. 2.1b) e do tipo corpos oscilantes (Fig. 2.1c).

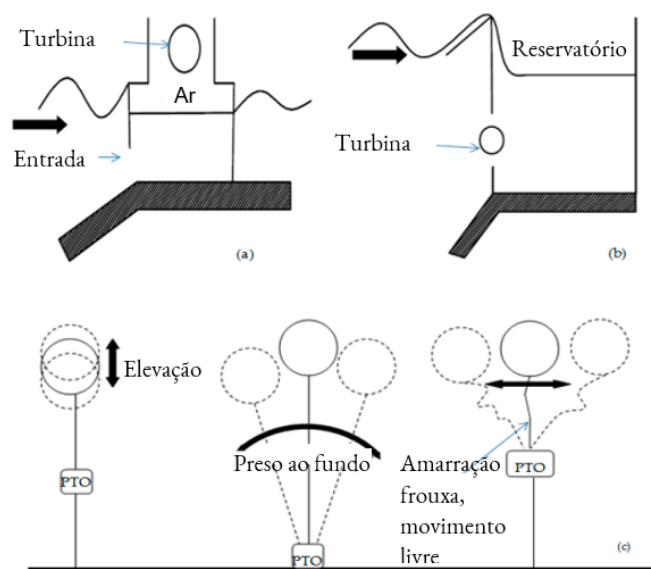


Figura 2.1: Classificação dispositivos de conversão de energia das ondas: a) Coluna de Água Oscilante, b) Dispositivo de Galgamento, c) Corpos Oscilantes (Adaptado de: Aderinto e Li, 2019).

Os dispositivos variam de forma e funcionamento conforme a localização em que estão inseridos. Por exemplo, os dispositivos atenuadores, classificados como corpo oscilante, são predominantemente offshore (Hong *et al.*, 2014), enquanto o dispositivo do tipo placa oscilante, como o denominado de *Oyster*, proposto por Whittaker *et al.* (2007), é estudado para implementação próximo a costa. De modo geral, um estudo feito por Aderinto e Li (2019) mostrou que os corpos oscilantes possuem maior eficiência hidrodinâmica por largura em comparação com os demais dispositivos existentes.

Os diferentes tipos de conversores de energia das ondas podem possuir diferentes estruturas mecânicas e diferentes sistemas de absorção da energia das ondas do mar. Tendo em vista que a energia absorvida não é constante devido à aleatoriedade das ondas do mar, a energia convertida também possui variação de amplitude e frequência, o que causa incompatibilidade com a rede elétrica, que requer constância no fornecimento de energia (Hong *et al.*, 2014). Dessa forma, é fundamental que se tenha controle e armazenamento de energia adequados.

Existem diferentes sistemas de absorção de energia das ondas, dentre eles os que usam motor hidráulico, turbina ou gerador linear (Hong *et al.*, 2014). A figura 2.2 mostra uma cadeia de conversão de energia das ondas, desde a absorção da energia hidrodinâmica imposta pela onda através de um sistema hidráulico até chegar à rede elétrica.

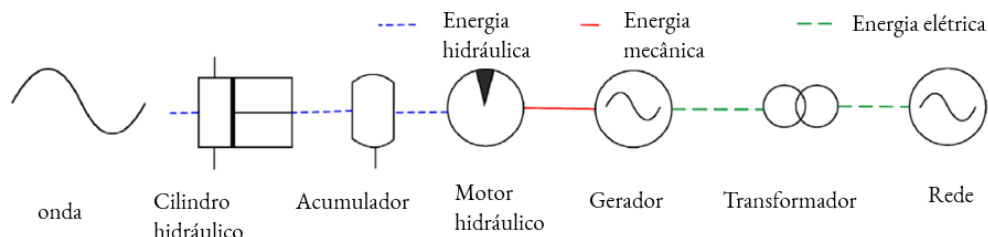


Figura 2.2: Tecnologia utilizada em um sistema hidráulico para produzir eletricidade a partir das ondas (Adaptado de: Bostrom *et al.*, 2013).

Os sistemas hidráulicos possuem duas etapas de conversão. Inicialmente a energia da onda é absorvida pelo dispositivo e convertida em energia hidráulica (água ou óleo) através de um sistema de compressão que funciona em sincronia com movimento da onda. O sistema de compressão é composto por um cilindro hidráulico, que transfere o fluido comprimido para o acumulador, do qual o fluido aciona o motor hidráulico que, por sua vez, aciona um gerador de energia elétrica. Após, a energia elétrica passa por uma estação de transformação e chega à rede elétrica para consumo (Hong *et al.*, 2014). O sistema hidráulico é frequentemente adotado em WECs por suas vantagens, como a robustez, a capacidade de gerar alta força em baixas velocidades e a ampla disponibilidade comercial dos componentes hidráulicos (Wang, Isberg e Tedeschi, 2018).

2.1.1 Dispositivos de placas com movimento de rotação

Nesta Seção, os dispositivos do tipo corpos oscilantes são apresentados, mas com destaque aos dispositivos compostos por placas que oscilam, que é o foco do trabalho. Autores como Cheng *et al.* (2020), Henry *et al.* (2014) e Benites-Munoz *et al.* (2020), estudaram dispositivos compostos por placas que recebem a ação das ondas e rotacionam em relação a um eixo horizontal posicionado ou no fundo (placa oscilante) ou na sua extremidade superior (placa pendular). Nestes dispositivos, a placa articulada é acionada pelo movimento horizontal das partículas da onda, que resulta em uma oscilação que aciona um sistema hidráulico para a geração de energia (Benites-Munoz *et al.*, 2020).

Os dispositivos de placa oscilante, que tem articulação e fixação no fundo do mar, possuem restrição quanto à sua implementação, devendo ser instalados em águas rasas ou intermediárias para melhor absorção de energia, em virtude da redução da agitação das partículas das ondas com o aumento da profundidade. Em águas rasas, o movimento horizontal das partículas é mais pronunciado e, assim, favorece a captação de energia das ondas por estes dispositivos (Wittaker e Folley, 2012). Por outro lado, existe a desvantagem de que, conforme elas se aproximam da costa, há uma dissipação de energia devido ao atrito do fundo e rebentação das ondas.

Folley e Whittaker (2009) apresentaram um estudo em que comparam a energia das ondas disponível em diferentes locais, mostrando uma perda de energia em águas com profundidade entre 10 e 20 m de apenas 10 a 20 % em comparação com a energia em profundidades de 50 a 100 m, que é um fato positivo para o uso de dispositivos de conversão de energia das ondas nesta região. Portanto, Wittaker e Folley (2012) concluíram que este tipo de dispositivo possui características apropriadas para profundidades de água de 10 a 20 m, na costa ou em áreas próximas à costa.

Um dos dispositivos de placa oscilante mais conhecido é aquele desenvolvido no reino unido, chamado de *Oyster* (Ostra), que possui dimensões grandes (8 metros de comprimento, 12 metros de largura e 4 metros de altura) e sua instalação é próxima à costa (figura 2.3). O sistema hidráulico utiliza como fluido a própria água do mar para alimentação da turbina, que fica na instalação fora do mar. A facilidade de instalação, remoção e manutenção são as principais vantagens, já que ele é localizado na costa ou próximo à costa. Este tipo de dispositivo possui uma tendência de aumentar a eficiência de captura de energia em mares de menor energia, os quais são mais comuns (Whittaker *et al.*, 2007).



Figura 2.3: Funcionamento do dispositivo *Oyster* (Adaptado de: Whittaker *et al.*, 2007).

O dispositivo possui um pistão localizado na sua parte inferior, atrás da placa oscilante, que é responsável pelo movimento e, conseqüentemente, pela pressurização da água. Essa é levada por um duto até o gerador/turbina *Pelton* que converte energia hidráulica em elétrica. Por fim, a energia é enviada para uma subestação para sua distribuição de energia elétrica (Cameron *et al.*, 2010).

Destaca-se também o dispositivo de placa oscilante denominado de *Waveroller*, desenvolvido pela empresa AW-Energy e que já recebeu o rótulo “*Solar Impulse Efficient Solution*” para o qual são avaliadas questões de viabilidade, ambientais e de rentabilidade. Assim como o *Oyster*, o *Waveroller* possui funcionamento através de um pistão que é acionado pelo movimento da onda na placa oscilante. Ele possui fixação ao fundo do mar e o sistema hidráulico com óleo fica em uma estrutura hermética dentro do dispositivo para que não fique exposto ao ambiente marinho, como observado na figura 2.4. De modo geral, é recomendado para profundidades médias de 8 a 20 m, sendo que a placa abrange toda a profundidade, desde o fundo até a superfície, absorvendo cerca de 1,5-2 MW (AW-Energy, 2023).



Figura 2.4: Waveroller (AW-Energy, 2023).

Outro dispositivo rotulado ao fundo é o *BioWave*, desenvolvido pela Universidade de Sydney juntamente com *BioPower Systems Pty. Ltd.* Seu funcionamento é baseado no movimento de plantas marinhas, em que suas lâminas movimentam conforme a onda do mar passa. Em situações extremas, esse dispositivo possui a capacidade de cessar sua operação e deitar suas lâminas ao fundo para evitar danos à estrutura (BioPower Systems, 2025). A figura 2.5 apresenta um esquema desse dispositivo.

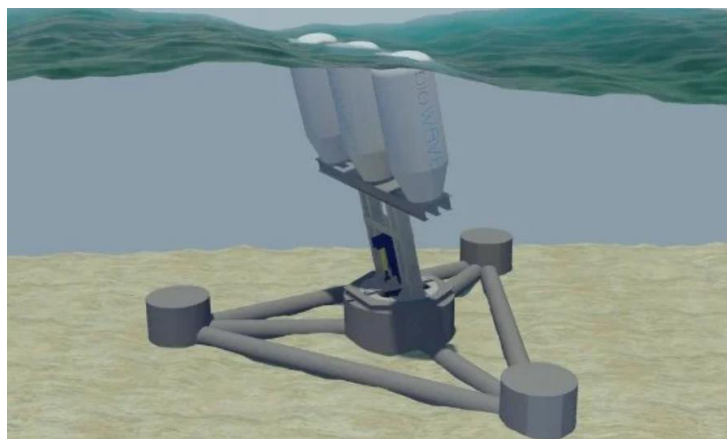


Figura 2.5: Dispositivo BioWave. Fonte Power Technology, www.power-technology.com.

Noad e Porter (2015) analisaram a influência da geometria da placa de um dispositivo totalmente submerso, com parte rígida e fixada ao fundo e parte livre para flutuar, e concluíram que o comprimento de submersão da placa tem influência significativa na eficiência de captura de potência. Nesse tipo de fixação, o peso próprio instabiliza o dispositivo, não restaurando o movimento, diferentemente do dispositivo com pivô na parte superior, em que este movimento é restaurado com o peso próprio.

O dispositivo do tipo placa pendular, que é rotulado na parte superior, é estudado desde a década de 1980, em que um grupo de pesquisa do *Muroran Institute of Technology*, Japão, desenvolveu um dispositivo pendular que teve resultados promissores no início da pesquisa, mas acabou tendo dificuldades em resolver questões relacionadas à sobrevivência do equipamento em tempestades (Kondo *et al.*, 1987). Kobayashi, Rheem e Maruyama (2013) analisaram um dispositivo pendular sujeito a ondas irregulares e regulares com uma parede posterior, concluindo que há um aumento da eficiência para ambas as ondas devido à presença da parede, sendo maior quando o dispositivo está mais próximo da parede. Neste tipo de dispositivo, a placa está inserida em um canal com parede ao fundo e sujeito à ação das ondas que provocam o movimento oscilatório da placa, que, por sua vez, aciona um circuito hidráulico para a captação da energia (ver esquema da figura 2.6). A distância entre a placa e a parede é de aproximadamente um quarto do comprimento da onda, podendo ser reduzido em até 20 % sem perda considerável de energia (Gunawardane, Kankanamge e Watabe, 2016). Seu primeiro protótipo foi instalado num quebra-mar da Ilha de Hokkaido (Japão).

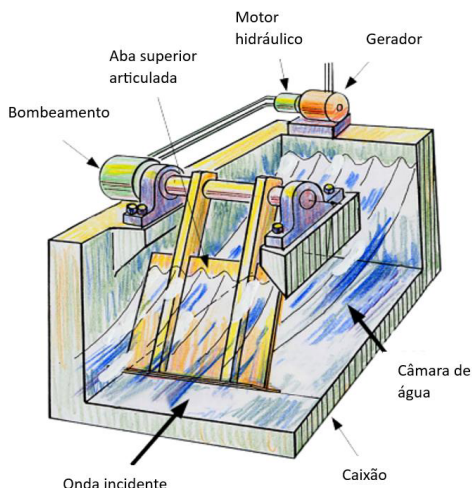


Figura 2.6: Representação do dispositivo pendular (Adaptado de: Watabe, 2007).

Embora as experiências e estudos mencionados possuam contribuições significativas no conhecimento dos dispositivos com placa oscilante, eles não fornecem informações robustas sobre os dispositivos rotulados na parte superior (placa pendular). Sendo assim, o estudo de parâmetros envolvidos na dinâmica de movimento do dispositivo com pivotamento superior possui grande relevância, podendo não apresentar comportamento similar aos dispositivos com pivôs fixados no fundo do mar.

2.1.2 Análise numérica dos dispositivos do tipo placa oscilante e pendular

Algumas pesquisas baseadas em análises numéricas foram desenvolvidas para estudar o comportamento das placas oscilantes e/ou pendulares. Amini *et al.* (2023), por exemplo, investigaram os efeitos de fatores geométricos no desempenho de um dispositivo tipo placa oscilante usando o software Flow3D e a técnica de malha dinâmica. Folley, Whittaker e Hoff (2007b) estudaram um dispositivo do tipo placa pendular de forma experimental, numérica e analítica, buscando investigar a influência da profundidade do canal na performance do equipamento. Como conclusão, observaram que a maior captação de energia ocorre em profundidades de aproximadamente 10 m, mesmo havendo perdas de energia das ondas incidentes devido ao atrito com o fundo do mar. Em profundidades inferiores a 10 m há dissipação significativa de energia das ondas em estado típico do mar, causando redução na captura de energia pelo dispositivo.

O balanço entre o custo computacional e a acurácia da solução é um tema importante que deve ser levado em conta nas análises numéricas. Os modelos baseados na teoria do escoamento potencial possuem um custo computacional mais baixo, pois surge através da simplificação das equações de Navier-Stokes, em que há a linearização do problema, considerando o escoamento irrotacional, incompressível e com tensões viscosas insignificantes. Porém essa suposição de linearização é desafiada pelos dispositivos conversores de energia, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos

(Windt, Davidson e Ringwood, 2018). Os modelos baseados na teoria do escoamento potencial são usados em diferentes análises de dispositivos conversores de energia das ondas. Autores como Renzi e Dias (2012, 2013), Noad e Porter (2015), Moretti, Fontana e Vertechy (2015) e Zhang *et al.* (2024) estudaram dispositivos do tipo placa oscilante. Já os autores Evans e Porter (1996), Alves, Brito-Melo e Sarmento (2002), Folley, Whittaker e Henry (2007b) e Gunawardane, Kankanamge e Watabe (2016) analisaram os dispositivos do tipo placa pendular usando mesma teoria do escoamento potencial. Essa teoria apresenta dificuldade em se tratando da reprodução dos efeitos complexos não lineares.

Alguns estudos numéricos podem ser destacados pelo uso das equações de Navier Stokes para problemas de dispositivos do tipo placa oscilante, tais como o de Schmitt e Elsaesser (2015), Henry *et al.* (2014), Ghasemi *et al.* (2017), Brito *et al.* (2020), Amini *et al.* (2023), Benites-Munoz, Huang e Thomas (2024) e Ahmed *et al.* (2024). No entanto, não há relato de estudos de dispositivos do tipo placa pendular que analisaram o comportamento e desempenho desses baseados nas equações de Navier-Stokes.

Os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes são mais adequados para simular escoamentos com maior acurácia, mas demandam um maior custo computacional. Além disso, as técnicas usadas para a reprodução do movimento do corpo podem introduzir erros de solução. Existem diferentes técnicas usadas para acompanhar o movimento de corpo rígido de uma estrutura móvel sujeita às ações de um escoamento. No método *immersed boundary* (Causon *et al.*, 2000), o corpo é cortado da malha de fundo e o seu movimento é considerado repetindo processo de corte a cada novas condições de contorno ao longo do tempo. O método *fast-fictitious-domain* (Sharma e Patankar, 2005) consiste em aplicar um método baseado na fração de volume para acompanhar o corpo sólido nas células do domínio, funcionando de forma similar ao método *Volume of Fluid* (VoF). Esse método foi utilizado para analisar um dispositivo de placa oscilante no trabalho de Ghasemi *et al.* (2017). Outro método, conhecido como *overset*, utiliza malhas sobrepostas com movimento relativo e as variáveis de solução são interpoladas entre elas (Chan, 2009; Ma *et al.*, 2018). Como exemplo da utilização do método *overset*, destaca-se o estudo de Benites-Munoz, Huang e Thomas (2024), que analisaram o desempenho de três dispositivos do tipo placa oscilante em um tanque numérico 3D.

Existe também a técnica de malha dinâmica em que as células pertencentes a um domínio que engloba o objeto se deformam a cada passo de tempo para acompanhar o seu movimento (Windt, Davidson e Ringwood, 2018, e ANSYS FLUENT®, 2022). Em Henry *et al.* (2014), foi aplicada esta metodologia utilizando também a técnica de *remeshing* para investigar um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo placa oscilante sujeito a estados de mar extemos. O uso da mesma metodologia também é encontrado no trabalho de Ahmed *et al.* (2024), que estudou um dispositivo de placa oscilante duplo em um tanque numérico 3D. Outra alternativa é a técnica de malha deslizante, em que as células pertencentes a uma malha no entorno do objeto se movimentam, havendo um deslizamento em relação a uma malha estática. Assim, ocorre

uma interpolação das variáveis do escoamento a cada passo de tempo na interface das malhas. O uso desta técnica pode ser encontrado no estudo de Schmitt e Elsaesser (2015), em que é simulado um dispositivo tipo placa oscilante. Essa técnica é interessante tendo em vista o menor custo computacional, já que a técnica de malha dinâmica demanda 1,3 vezes o tempo computacional da malha deslizante, aplicados para um mesmo caso e apresentando valores semelhantes de potências médias absorvidas (Pereira, Teixeira e Didier, 2025).

Um tópico muito relevante é o elevado custo computacional dos modelos que se baseiam na solução das equações de Navier-Stokes quando há necessidade de discretização da camada limite próxima à superfície do corpo, já que demanda um elevado nível de refinamento de malha nessa região. Porém, nos casos de interesse deste trabalho, diversos estudos foram levantados para investigar a influência da força de cisalhamento viscosa em dispositivos do tipo placa oscilante. Dentre eles, os autores Schmitt *et al.* (2012), que observaram através de testes numéricos e experimentais de uma placa oscilante que as forças de cisalhamento viscosas são inferiores a 1 % da força total de impulso. Além disso, Wei *et al.* (2015) estudaram a influência das forças viscosas no desempenho de um conversor de energia das ondas do tipo placa oscilante utilizando software ANSYS FLUENT® e descobriram que a tensão de cisalhamento na superfície da placa é muito inferior à pressão hidrostática. Os autores Windt, Davidson e Ringwood (2021), durante o estudo dos efeitos de escala no conversor de energia das ondas *Wavestar*, utilizaram a ferramenta de código aberto OpenFOAM e para tal estudo os autores notaram que a camada limite não se desenvolve no tempo, sendo que os valores de y^+ mudam constantemente passando por valores nulos com frequência. Essa investigação levou os autores a desconsiderarem o efeito do torque devido às forças viscosas no torque total responsável pelo deslocamento do dispositivo. Logo, pode-se concluir que a contribuição da tensão de cisalhamento no torque total atuante sobre a placa oscilante pode ser desprezada e infere-se que esta hipótese também pode ser usada para as placas pendulares.

2.2 Mecânica das ondas progressivas

As forças mais importantes na natureza que geram as ondas no mar com significativa energia são a maré, o vento e o maremoto, como indica a figura 2.7, que mostra os tipos de ondas formadas no mar ao longo do período (Garrison, 2009). As ondas geradas pelo vento têm como força restauradora preponderante a gravidade e são aquelas que tem maior constância e quantidade de energia na natureza (Garrison, 2009). Por esta razão, as investigações de dispositivos de conversão de energia das ondas se dedicam à aplicação em ondas geradas pelo vento.

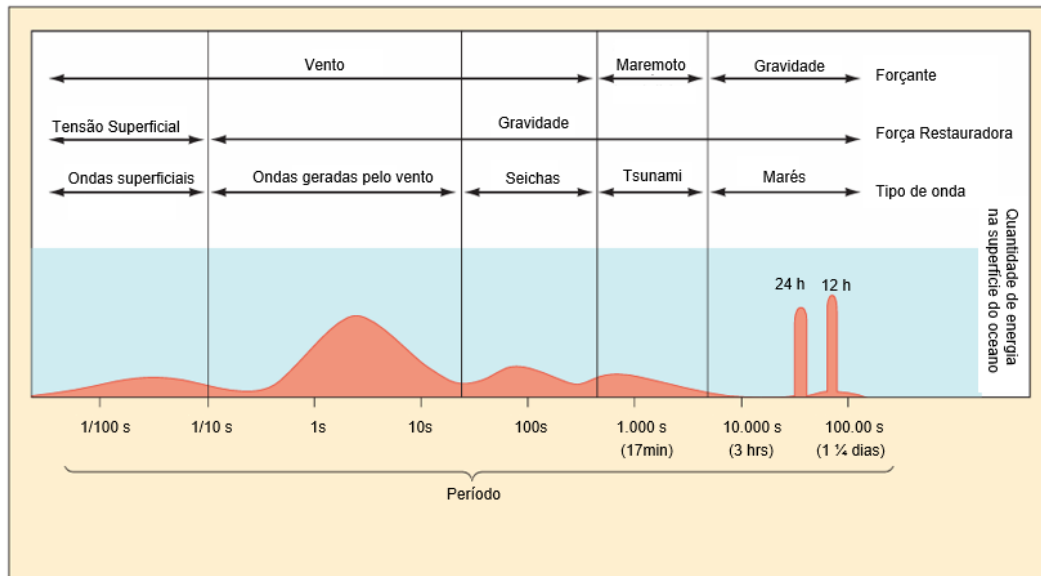


Figura 2.7: Tipos de ondas de acordo com a força geradora e restauradora. (Adaptado de Garrison, 2009).

2.2.1 Teoria Linear

O comportamento das ondas monocromáticas em um canal horizontal impermeável de profundidade h se repete em um comprimento L no espaço e em um período T ao longo do tempo. A interface entre a água e o ar é chamada de superfície livre, cuja posição a cada ponto e instante é η , considerando como origem a superfície de repouso. A altura da onda H é a distância vertical entre a cava e a crista da onda (ver figura 2.8). A velocidade da onda, chamada de celeridade C é a razão entre o comprimento de onda e o período (Garrison, 2009).

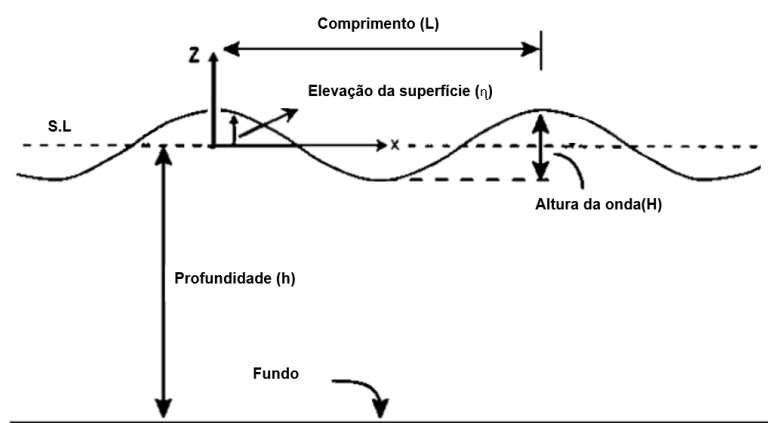


Figura 2.8: Parâmetros da onda (Adaptado de Douglass e Krolak, 2008).

A teoria linear das ondas vem de uma solução analítica da propagação da onda em um canal de fundo horizontal e impermeável. São consideradas as simplificações de que

o escoamento é potencial (incompressível e irrotacional), as tensões superficiais são desprezíveis e a pressão atmosférica é constante (Garrison, 2009). Assim, o escoamento é governado pela equação de Laplace da função potencial de velocidade $\emptyset$, como segue:

$$\nabla^2 \emptyset = \frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \emptyset}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

onde x é a coordenada horizontal no sentido de propagação da onda e z é a coordenada vertical com origem na superfície de repouso da água. Embora $\emptyset$ varie tanto no espaço quanto no tempo, considera-se a propagação de uma onda monocromática, cujo comportamento é periódico no tempo com apenas uma frequência de oscilação, caracterizando um problema de valor de contorno. As condições de contorno aplicadas no problema são:

- Condições de contorno cinemáticas na superfície livre e no fundo:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{em } z = \eta(x, t) \quad (2.2)$$

$$w = -\frac{\partial \emptyset}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = -h \quad (2.3)$$

onde u e w são as componentes de velocidade horizontal e vertical, respectivamente e η a elevação da superfície.

- Condição de contorno dinâmica da superfície livre (Equação de Bernoulli) (Dean e Dalrymple, 1991):

$$-\frac{\partial \emptyset}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p_\eta}{\rho} + gz = C_B(t) \quad (2.4)$$

sendo p_η a pressão atmosférica, tomada como a pressão manométrica nula, ρ a massa específica, g a aceleração da gravidade e $C_B(t)$ um parâmetro constante no espaço.

- Condição de contorno nas fronteiras laterais (periodicidade no tempo e no espaço):

$$\emptyset(x, z, t) = \emptyset(x, z, t + T) \quad (2.5)$$

$$\emptyset(x, z, t) = \emptyset(x + L, z, t) \quad (2.6)$$

Após a integração da equação (2.1) e a aplicação das condições de contorno, tem-se a solução particular do problema, resultando nas seguintes expressões para $\emptyset$ e η (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\emptyset = \frac{-Hg \cosh(k_w(h+z)) \sin(k_w x - \sigma t)}{2\sigma \cosh(k_0 h)} \quad (2.7)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (2.8)$$

sendo σ a velocidade angular da onda ($2\pi/T$) e k_w o número de onda ($2\pi/L$). A aplicação da condição de contorno cinemática da superfície livre resulta na chamada equação de dispersão, dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\sigma^2 = k_w g \tanh(k_w h) \quad (2.9)$$

A solução do problema permite determinar as equações das componentes de velocidade (u e w) e da pressão (p) do escoamento, como segue:

$$u = \frac{H\sigma \cosh(kh + kz)}{2 \sinh(kh)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (2.10)$$

$$w = \frac{H\sigma \sinh(kh + kz)}{2 \sinh(kh)} \sin(k_w x - \sigma t) \quad (2.11)$$

$$p = -\rho g z + \frac{\rho H}{2} \frac{\cosh(h + z)}{\cosh(kh)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (2.12)$$

Observa-se na equação (2.12) que o primeiro termo corresponde à pressão hidrostática, enquanto o segundo termo se refere à contribuição da presença da onda, chamada de pressão dinâmica.

A formulação teórica de uma onda linear permite calcular o deslocamento aproximado de uma partícula no escoamento da forma (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\zeta = \frac{-H \cos(k_w h + k_w z)}{2 \sinh(k_w h)} \sin(k_w x - \sigma t) \quad (2.13)$$

$$\xi = \frac{H \sin(k_w h + kz)}{2 \sinh(k_w h)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (2.14)$$

onde ζ e ξ são as componentes de deslocamento horizontal e vertical, respectivamente, da partícula em torno de um ponto médio da trajetória. As equações (2.13) e (2.14) indicam que as partículas descrevem uma trajetória elíptica, conforme ilustra a figura 2.9. Observa-se que a trajetória de uma partícula em águas rasas tem uma forma elíptica mais achatada, influenciada pela presença do fundo. Por outro lado, em águas profundas as partículas apresentam uma trajetória circular, sendo que o movimento se torna praticamente insignificante à profundidade correspondente a metade do comprimento de onda (Garrison, 2009).

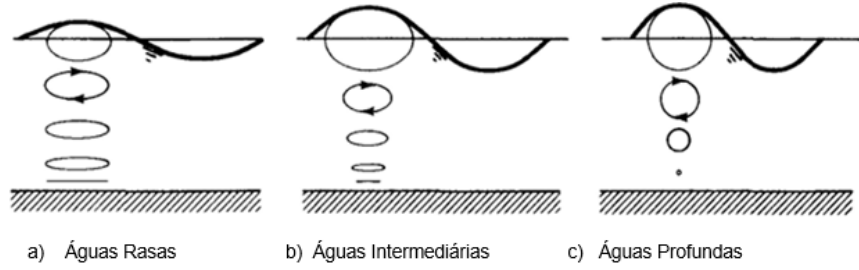


Figura 2.9: Trajetória da partícula conforme profundidade (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).

O fluxo de energia (potência) da onda por largura de frente de onda é dado por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$P = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{\sigma}{k_w} \left[1 + \frac{2k_w h}{\sinh(2k_w h)} \right] \quad (2.15)$$

onde ρ é a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, H a altura da onda, σ a frequência da onda, k_w o número da onda, h a profundidade da propagação.

2.2.2 Teorias de onda de amplitude finita

De modo geral, a teoria linear aplica-se em ondas onde a declividade $H/L < 5\%$ e a profundidade relativa $h/L > 0,01$. Existem algumas teorias que contemplam os efeitos não-lineares que não são considerados na teoria linear. A aplicabilidade de cada teoria pode ser avaliada através do parâmetro de Ursell, (U_r) (Dean e Dalrymple, 1991):

$$U_r = \frac{HL^2}{h^3} \quad (2.16)$$

A teoria linear está limitada a parâmetros de Ursell, $U_r < 1$. Outras teorias de amplitude finita permitem ser usadas em casos de parâmetros de Ursell mais elevados. Por exemplo, as teorias não lineares de Stokes são aplicadas para $U_r < 30$, a teoria Cnoidal para $U_r > 10$ e a teoria Solitária para $U_r \rightarrow \infty$. Outra forma de identificar a teoria mais adequada para a análise de propagação das ondas é considerar a declividade da onda, medida em H/T^2 , e da profundidade relativa h/T^2 , resultando em um diagrama como está mostrado na figura 2.10 (Chakrabarti, 1987).

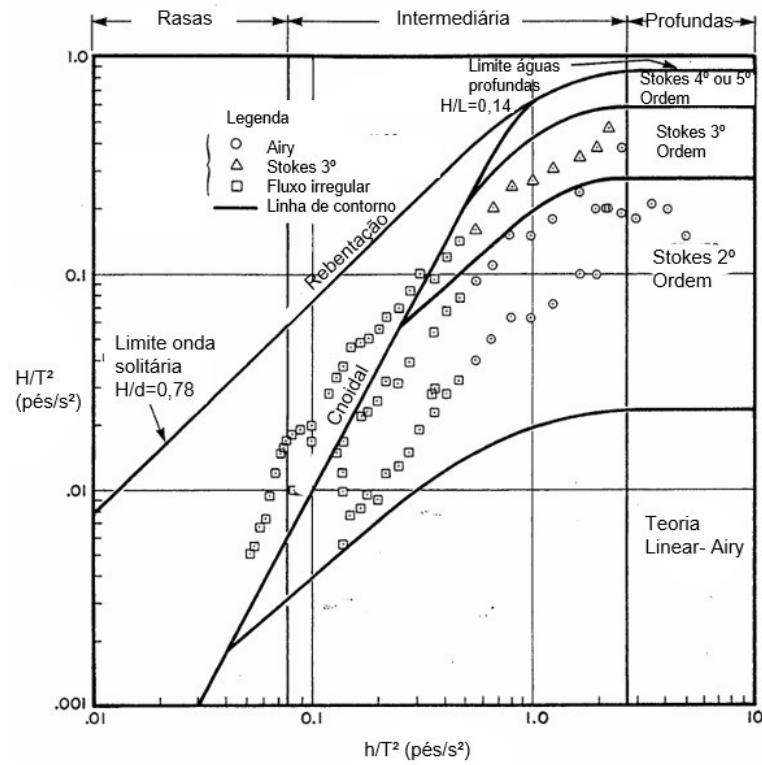


Figura 2.10: Diagrama do campo de aplicação das teorias das ondas (adaptado de Chakrabarti, 1987).

A teoria de Stokes de 2ª ordem se destaca pela região do diagrama que permite aplicá-la em muitos casos de ondas se propagando em profundidades próximas à costa. Além disso, as equações que descrevem as componentes de velocidade e elevação de superfície livre são relativamente simples, dadas por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$u = \frac{Hgk_w \cosh k_w (h+z)}{2\sigma \cosh(k_w h)} \cos(k_w x - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k_w \cosh 2k_w (h+z)}{16 \sinh^4(k_w h)} \cos(k_w x - \sigma t) \quad (2.17)$$

$$w = \frac{Hgk_w \sinh k_w (h+z)}{2\sigma \cosh(k_w h)} \sin(k_w x - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k_w \sinh 2k_w (h+z)}{16 \sinh^4(k_w h)} \sin(k_w x - \sigma t) \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(k_w x - \sigma t) + \frac{H^2 k_w \cosh k_w h}{16 \sinh^3(k_w h)} (2 + \cosh 2k_w h) \cos 2(k_w x - \sigma t) \quad (2.19)$$

2.3 Movimento do corpo rígido de um pêndulo

O dispositivo do tipo placa pendular sofre a ação dos esforços causados pela ação das ondas e experimenta um movimento de corpo rígido de um grau de liberdade de rotação. O modelo matemático do estudo de caso pode ser representado pelo movimento de rotação de um pêndulo no plano (x, y) , como mostra a figura 2.11. O pêndulo está sujeito a um momento hidrodinâmico gerado pela onda (M_h), um momento devido ao peso próprio localizado no centro de gravidade do pêndulo (M_p), além do momento devido ao amortecimento causado pelo sistema de absorção de energia (M_c). A equação da segunda lei de Newton referente ao movimento de rotação pode ser aplicada, como segue (Shabana, 2019):

$$M_I = M_h + M_c + M_p \quad (2.20)$$

onde M_I é o momento devido à inércia, dado por:

$$M_I = J\ddot{\theta} \quad (2.21)$$

onde $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular do pêndulo e J representa o momento de inércia rotacional.

M_p é o momento devido ao peso próprio, dado por:

$$M_p = -mgdsen\theta \quad (2.22)$$

onde m é a massa da placa, g é a aceleração da gravidade e d é a distância da rótula até o centro de gravidade da placa. Nota-se que o momento M_p está sempre em sentido contrário ao do ângulo de rotação θ .

M_c é o momento devido à absorção de energia do dispositivo. Neste trabalho, o amortecimento provocado pelo sistema de absorção de energia é considerado do tipo viscoso, seguindo o que foi adotado também por outros autores, tais como Cheng *et al.* (2020) e Benites-Munoz *et al.* (2020). Assim, o momento devido à absorção de energia fica como segue (Shabana, 2019):

$$M_c = -c\dot{\theta} \quad (2.23)$$

onde c é o coeficiente de amortecimento e $\dot{\theta}$ é a velocidade angular da placa.

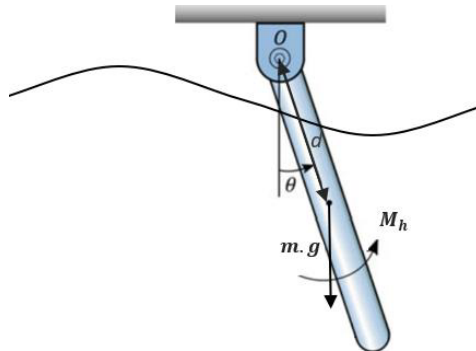


Figura 2.11: forças que agem no pêndulo. (fonte: Adaptado de Shabana, 2019).

3 | Metodologia

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso da pesquisa e os modelos matemático e numérico usados nas simulações. Também são descritas as condições de contorno e iniciais impostas, bem como as configurações da malha de volumes finitos. Por fim, são mostradas as variáveis de interesse monitoradas para fins de pós-processamento.

3.1 Estudo de caso

O estudo de caso consiste em uma placa submersa ou semi-submersa no mar a uma profundidade h de 10,0 m e submetida a ondas regulares. Por hipótese, considera-se que as ondas incidem perpendicularmente à placa devido às transformações significativas de refração das ondas esperadas nesta profundidade (Dean e Darlymple, 1991). Ademais, os efeitos de borda que surgem no escoamento devido à ação das ondas são desprezados, permitindo que se adote a condição de que a placa esteja inserida em um canal 2D aberto, como mostra a figura 3.1. A extremidade superior da placa está a um nível a em relação ao nível da superfície livre em repouso e é rotulada em um eixo horizontal posicionado verticalmente a um nível b . A conexão entre a placa e a rótula é feita por hastes laterais à placa que não impedem a passagem de água em caso de galgamento. Um sistema de cilindros hidráulicos acoplado à placa é responsável pelo movimento pendular do equipamento.

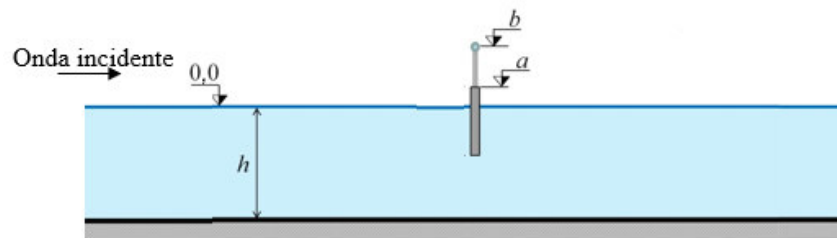


Figura 3.1: Esquema do estudo de caso.

A placa possui comprimento l_f de 7,0 m, distância da rótula até centro de gravidade (CG) l_c (varia com posição da placa e rótula), espessura de 0,5 m e massa específica ρ_p uniformemente distribuída. Neste estudo, a placa tem uma largura de 1,0 m, por considerar os fenômenos de interação onda-estrutura com comportamento bidimensional. Um esquema da placa pode ser observado na figura 3.2 e sua posição é definida pelo ângulo de rotação θ em relação ao eixo vertical.

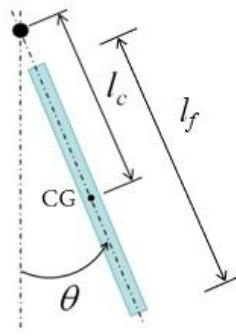


Figura 3.2: Características da placa.

O momento de inércia M_I é calculado conforme equação (3.1), de modo a considerar que a espessura da placa é significativamente menor que o comprimento da mesma. Sendo m a massa da placa (Shabana, 2019):

$$M_I = m \left(\frac{l_f^2}{12} + l_c^2 \right) \quad (3.1)$$

sendo m a massa da placa calculada pelo produto da massa específica pelo volume da placa.

A distância l_c é determinada através da equação (3.2):

$$l_c = \frac{l_f}{2} + (b - a) \quad (3.2)$$

Os estudos foram feitos de forma que a melhor configuração obtida da análise dos resultados obtidos em cada etapa foi levada para a próxima análise, conforme o diagrama da figura 3.3. Inicialmente foi investigada a influência do coeficiente de amortecimento (C_{PTO}) característico do sistema hidráulico para placa com massa específica de 1400 kg/m^3 distribuída de forma homogênea. As posições verticais da placa e da rótula foram definidas pelos níveis $a = b = 2,0 \text{ m}$ (ver figura 3.1). Foram investigados coeficientes de valores de 500, 700, 900 e 1100 kNms/rad para períodos de onda de 6, 8, 10 e 12 s e uma altura de onda incidente $H = 1,5 \text{ m}$, buscando encontrar qual coeficiente apresenta melhor performance do dispositivo.

Após, com o coeficiente de amortecimento que apresentar o melhor resultado para os diferentes períodos de onda e ainda $a = b = 2,0 \text{ m}$, foi realizada a análise da massa específica mais adequada, testando os valores de 600, 1000, 1400, 1800 e 2200 kg/m^3 . Neste estudo, o período da onda incidente usado foi de 12 s e a altura de onda incidente $H = 1,5 \text{ m}$, sendo que este período foi escolhido por impor o maior fluxo de energia sobre a placa e, consequentemente, se esperar um maior potencial para impor uma possível instabilidade da placa.

Com a massa específica e o coeficiente de amortecimento mais adequados, foram realizadas análises das melhores posições da rótula e da placa, considerando períodos de onda de 6, 8, 10 e 12 s e uma altura de onda incidente $H = 1,5 \text{ m}$. Na análise da melhor posição da rótula, é mantida constante a posição vertical da placa ($a = 2,0 \text{ m}$) e a posição da rótula (b) varia conforme a tabela 3.1. Na análise da influência da posição vertical da

placa, a distância da rótula em relação à superfície livre (b) foi mantida constante em 2 m e o nível a variou conforme a tabela 3.1. Nestes casos, as combinações de a e b mostradas na tabela 3.2 são propostas para obterem-se diferentes partes submersas da placa. Portanto, os quatro casos indicados na tabela 3.2 representam a parte submersa da placa de 5,0, 6,0, 7,0 m (placa totalmente submersa) e, por último, quando a extremidade superior da placa está a 1,0 m de profundidade.

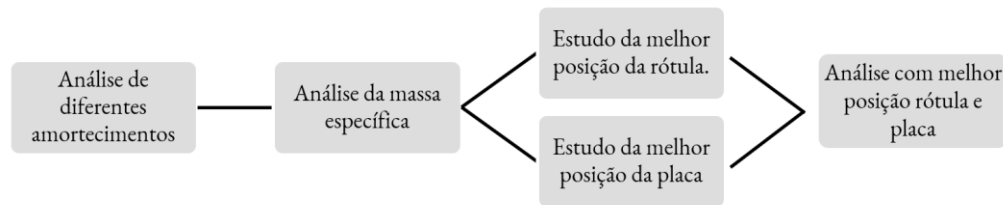


Figura 3.3: Diagrama das análises realizadas.

Tabela 3.1: Casos para investigação da posição da rótula na performance do dispositivo.

a (m)	b (m)
2,0	2,0
2,0	3,0
2,0	4,0
2,0	5,0

Tabela 3.2: Casos para investigação da posição da placa na performance do dispositivo.

a (m)	b (m)
2,0	2,0
1,0	2,0
0,0	2,0
-1,0	2,0

Ao final, foi investigada a combinação dos casos com melhor performance obtidos das análises das melhores posições da placa e da rótula.

3.2 Modelo matemático

O domínio computacional consiste em um canal bidimensional de comprimento $6L$ (L é o comprimento da onda incidente) com uma placa vertical localizada ao centro, conforme figura 3.4. A placa está livre para girar em torno da rótula posicionada no nível

b , devido às forças impostas pelas ondas incidentes. Seu movimento é regido pela equação oriunda da Segunda Lei de Newton, equação 2.2. No início do canal, existe um batedor de ondas e no fim um contorno onde é imposta uma condição de radiação. O fundo do canal é não deslizante e no topo do canal são consideradas as condições atmosféricas. A metodologia usada pelo modelo numérico para a aplicação destas condições de contorno estão descritas na Seção 3.4.

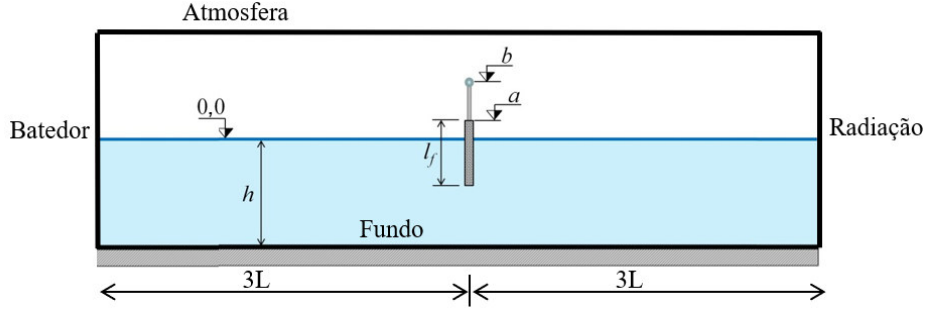


Figura 3.4: Domínio computacional.

Os fenômenos de interação onda-estrutura são governados pelas equações (3.3) e (3.4), correspondentes às equações da continuidade e da quantidade de movimento, respectivamente, para um escoamento incompressível (Schlichting, 1979).

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

sendo $i, j = (1, 2)$ para escoamentos 2D, t é o tempo, u_i as componentes de velocidade, x_i as coordenadas, p a pressão termodinâmica, g_i a aceleração da gravidade, ρ a massa específica, e τ_{ij} é o tensor de tensão viscosa, dada por:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.5)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

Neste estudo, são usadas as equações de Navier-Stokes Média de Reynolds (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* - RANS) para modelar o escoamento. Estas equações são baseadas no fato de que os campos de pressão e velocidade são decompostos em termos médios e flutuantes. Esse processo incorpora um termo de tensões de Reynolds $-\rho(\overline{u'_i u'_j})$ associado à turbulência, que, considerando a hipótese de Boussinesq, resulta:

$$-\rho(\overline{u'_i u'_j}) = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta e κ é a energia cinética da turbulência por massa. Assim, esta formulação exige a adição de um modelo de turbulência para o fechamento das equações. Neste trabalho, é adotado o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\omega$ SST (Menter, 1994) de forma híbrida. O modelo híbrido considera o escoamento laminar na zona de propagação da onda no canal, evitando qualquer dissipação numérica originada do modelo de turbulência, pois nesta zona o escoamento é praticamente potencial; enquanto que na zona ao redor da placa, o escoamento é turbulento (Zhan *et al.*, 2020; Didier e Teixeira, 2023). A figura 3.5 mostra as zonas do canal com os diferentes tipos de escoamentos. O escoamento laminar correspondente à faixa de $2,5L$ do início do canal e $2,5L$ do final. A parte central próxima à placa é a zona de escoamento turbulento. Estas dimensões foram determinadas por observação do comportamento do escoamento para alguns casos estudados. Nas simulações numéricas, estas zonas são definidas diretamente na plataforma computacional ANSYS FLUENT® (2022).

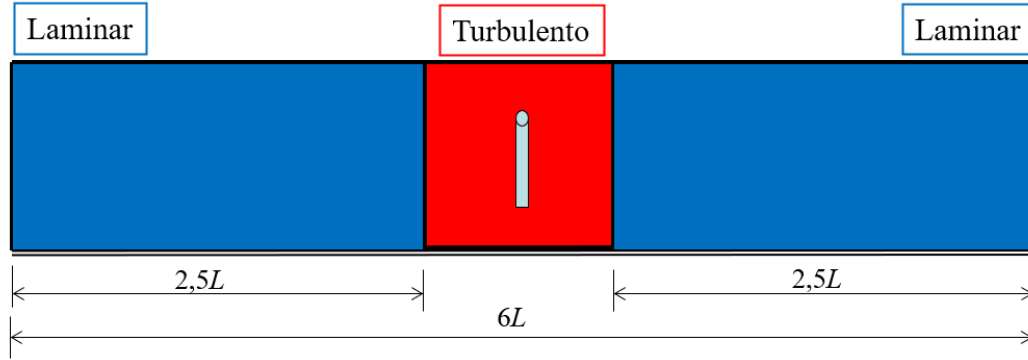


Figura 3.5: Zonas de escoamento laminar e turbulento no domínio computacional.

Para tratar o escoamento bifásico ar-água é usado o método *Volume of Fluid* (VoF) (Hirt e Nichols, 1981), mais adequado para casos em que os fluidos não possuem mistura significativa. O método consiste em determinar as interfaces ar-água (superfície livre) a partir da fração de volume α que assume valores 0 para o ar e 1 para a água, através da equação:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (3.7)$$

3.3 Modelo numérico

O domínio computacional é discretizado espacialmente usando o método dos volumes finitos (MVF). Essa aplicação é recomendada em problemas não lineares com termos altamente advectivos, conservando as propriedades físicas entre volumes elementares do domínio (Maliska, 2012). Para as simulações, foi usada a plataforma computacional ANSYS FLUENT® (2022) no qual os códigos são baseados na

integração numérica das equações RANS usando o MVF. O método PRESTO! (*Pressure Staggering Option*) é usado para a discretização espacial da pressão. As equações da quantidade de movimento, energia cinética de turbulência e taxa de dissipação turbulenta são discretizadas pelo esquema de terceira ordem MUSCL. Foi utilizado o método segregado SIMPLEC como solucionador. O método de reconstrução da interface ar-água é o *Geo-Reconstruct*. Os fatores de relaxamento adotados foram de 0,3 para a pressão, 0,7 para o momento e 0,8 para a energia cinética de turbulência (κ) e a taxa de dissipação (ω). Esta metodologia foi empregada por Didier e Teixeira (2022, 2023), Teixeira e Didier (2023), Neves *et al.* (2021), dentre outros.

O movimento de corpo rígido da placa é governado por um sistema de seis graus de liberdade baseado na aplicação da segunda lei de Newton, solucionado a cada instante através do *six DOF solver* existente no ANSYS FLUENT® (2022), usando um método implícito. No caso da placa pendular, apenas a equação referente ao grau de liberdade de rotação (Eq. 2.20) é solucionada, mantendo as outras equações restringidas. Uma função específica (*Define_Sdof_Properties*), por meio de uma UDF (*User Define Functions*), é usada para implementar o momento restaurador devido ao peso próprio e o momento de absorção da placa.

3.4 Condições de contorno e iniciais

O batedor de ondas usado é estático (figura 3.4), em que são impostas as componentes de velocidade da onda, segundo teoria de Stokes segunda ordem, além da fração de volume, conforme elevação da superfície livre da onda. É usado o método de absorção ativa, o qual permite eliminar a reflexão das ondas para dentro do canal, tanto no batedor como no contorno de radiação. Este método foi desenvolvido e aplicado por Mendonça *et al.* (2018), Teixeira, Gonçalves e Didier (2020) e Teixeira e Didier (2023) para canais de ondas 2D, Lisboa, Teixeira e Didier (2017) e Teixeira e Didier (2021) para ondas aleatórias em canais de ondas 2D e Didier, Teixeira e Neves (2017), Teixeira e Didier (2017) e Didier e Teixeira (2024) para tanques de ondas 3D por meio de funções UDF definidas pelo usuário (ANSYS FLUENT®, 2007). No fundo do canal aplica-se a condição cinemática de velocidade nula, no contorno da placa a condição de não deslizamento e no contorno do topo do canal a pressão atmosférica.

As condições iniciais do escoamento incluem a superfície livre em repouso, com componentes de velocidade iguais a zero, além da pressão hidrostática na água e a pressão atmosférica no ar. Também se considera κ igual a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ e ω igual a 1 s^{-1} no domínio, conforme os estudos de Lin e Liu (1998) e Elhanafi *et al.* (2016). O número de *courant* foi definido como 0,7, usando um passo de tempo variável com limites de $T/19.200$ e $T/640$, com 20 iterações não lineares por passo de tempo. A placa inicialmente encontra-se no repouso na posição vertical.

3.5 Características da malha de volumes finitos

O programa utilizado para desenvolvimento da geometria do canal e da malha foi o Workbench, pertencente à ANSYS. Para que fosse desenvolvida a geometria do canal foram definidas zonas de limite, principalmente a zona de propagação da onda e a zona ao redor da estrutura. Neste estudo, o método usado para contemplar o movimento de corpo rígido da placa foi o da malha deslizante. Um exemplo de malha usada para um caso em que a onda incidente tem um período de 8 s está mostrado na figura 3.6.

As regiões de propagação da onda no canal, a montante e a jusante da placa, têm malhas estruturadas. Na direção horizontal, as células possuem tamanho de $L/70$ e há zonas de transição de tamanho de volumes localizadas nos limites do batedor, do contorno de radiação e próximo à zona central, a barlavento (figura 3.6a) e sotavento (figura 3.6c), em que a malha é não estruturada em torno da placa (figura 3.6b). Na direção vertical, existe uma zona ao redor da superfície livre de altura $2H$, com tamanhos de volumes de $H/20$. Esses parâmetros de resolução de malha foram validados e aplicados previamente em diversos trabalhos, como Teixeira *et al.* (2013), Mendonça *et al.* (2018), Teixeira e Didier (2023), Güths, Teixeira e Didier (2022) e Wiener, Teixeira e Didier (2022).

Na região central, figura (3.6b), uma malha não estruturada composta de quadriláteros está em torno da placa e inserida em um círculo cujo centro localiza-se na posição da rótula da placa (Brown *et al.*, 2016; Devolver, Trough e Rauwoens, 2018). Esta zona tem um tamanho de elemento constante definido na análise de convergência de malha apresentada na Seção 4.2. Um detalhe da malha nesta região está apresentado na figura (3.6d). Este círculo desliza em relação ao resto da malha estática, conforme as equações governantes do movimento de rotação da placa.

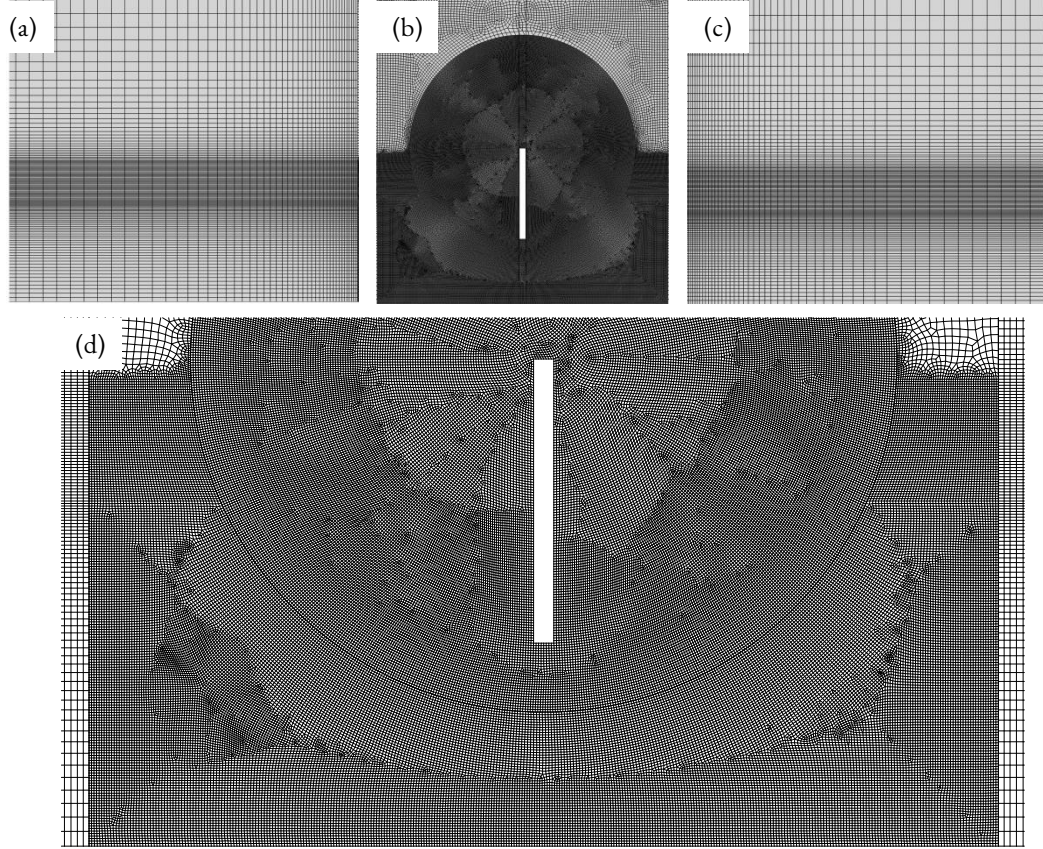


Figura 3.6: Malha em três zonas do canal, a) a barlavento da placa b) em torno da placa e c) a sotavento da placa e detalhes da malha d) em torno da placa, para um período de onda de 8 s.

3.6 Pós processamento

O movimento da placa é monitorado através do registro da série temporal da velocidade angular ($\dot{\theta}$), via UDF, do ângulo de rotação (θ) e do momento hidrodinâmico (M_h), ambos como variáveis de saída do software ANSYS FLUENT®. Também são monitoradas as séries temporais do momento devido ao peso próprio (M_p) e do momento PTO devido à energia absorvida pela placa (M_{pto}), registradas através de uma UDF, de acordo com as equações (2.22) e (2.23), respectivamente. A série temporal da aceleração angular da placa ($\ddot{\theta}$) é calculada através de um código próprio a partir da série temporal da velocidade angular, usando a formulação de diferença finita progressiva. A potência média absorvida pelo dispositivo é calculada conforme equação (3.8) por meio de um código próprio de pós processamento.

$$P_{abs} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{PTO} dt = \frac{1}{T} \int_0^T M_{PTO} \dot{\theta} dt \quad (3.8)$$

As séries temporais da superfície livre à frente do batedor e próximo ao contorno de radiação são registradas através das sondas S1 e S2 (figura 3.7), localizadas a 1 m dos respectivos contornos. Os coeficientes de reflexão e de transmissão são obtidos usando sondas entre o batedor e a placa (S3, S4 e S5) e entre a placa e o contorno de radiação (S6, S7 e S8), respectivamente, conforme mostra a figura 3.7. É usado o método dos três pontos (Mansard e Funke, 1980), originalmente derivado por Marcou (1969), e foi amplamente utilizado para obter coeficientes de reflexão em casos de ondas periódicas (Mansard, 1976), apresentando resultados confiáveis. Esse método permite calcular o coeficiente de reflexão da onda (C_R), em que a primeira sonda, S3, fica a uma distância de $1,5L$ da placa, enquanto as sondas S4 e S5 estão a $0,1L$ e $0,27L$ de S3, respectivamente (Gaspar, Teixeira e Didier, 2020; Güths, Teixeira e Didier, 2022; Teixeira e Didier, 2023). Já o coeficiente de transmissão da onda (C_T) é obtido usando o mesmo método, com primeira sonda S6 localizada a $1,5L$ da placa, e as sondas S7 e S8 a $0,1L$ e $0,27L$ de S6, respectivamente (figura 3.7).

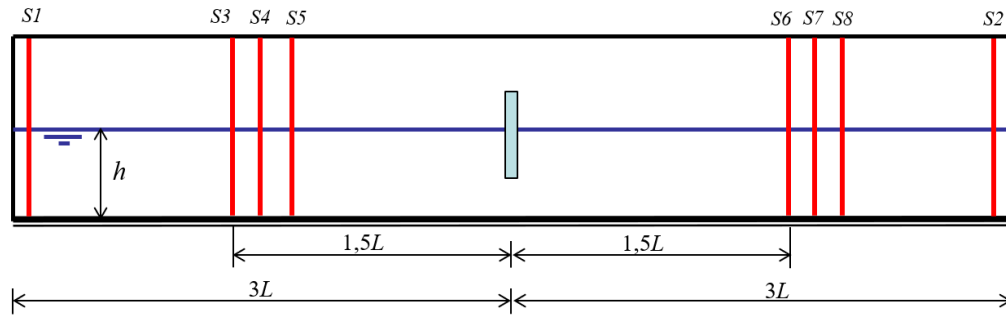


Figura 3.7: Sondas para monitoramento C_T e C_R .

4 | Resultados e discussões

Neste capítulo, primeiramente o modelo numérico é validado em um caso de uma boia semi-submersa livre para rotacionar em um plano sujeita a incidência de uma onda regular. Após, são realizadas as análises de independência de malha e da influência do tamanho da circunferência em torno da placa nos resultados do estudo de caso. Também é analisada a influência do coeficiente de amortecimento viscoso usado para a imposição do momento devido ao amortecimento para diferentes períodos de onda incidente regular e da massa específica da placa na performance do dispositivo para uma onda incidente de período de 12 s. Na sequência, são analisadas a influência da posição vertical da placa no canal e da rótula em relação à superfície livre para ondas incidentes de diferentes períodos. Por último, é analisado um caso combinado com as melhores performances obtidas para a posição da placa e da rótula.

4.1 Validação do modelo numérico

Aqui, o modelo numérico é validado para casos de interação onda-estrutura em que a estrutura é rígida e sofre apenas o movimento de rotação em um plano usando a técnica de *Sliding Mesh*. Esta situação apresenta condições de escoamento e de movimento estrutural semelhante àquela existente nos casos da interação das ondas com a placa oscilante. Por essa razão as condições impostas no ANSYS FLUENT® para esse caso são as mesmas tratadas para os casos da placa pendular.

O estudo de caso da validação tem como referência o experimento de Jung (2004), que analisou o comportamento de uma boia retangular semi-submersa com apenas o grau de liberdade de rotação sujeita à ação de ondas regulares em um canal. O canal tem 0,9 m de largura, 36 m de comprimento e 1,2 m de profundidade. Numa extremidade tem um batedor do tipo placa e na outra existe uma praia de absorção de inclinação 1:5,5 para eliminar os efeitos de reflexão das ondas. A boia ocupa toda a largura do canal e tem altura e comprimento de 0,1 e 0,3 m, respectivamente, proporcionando um escoamento de comportamento praticamente bidimensional. A boia está livre para girar em torno do centro de gravidade, que, por sua vez, se encontra no nível de repouso da superfície livre. O momento de inércia da boia é $I = 0,236 \text{ kgm}^2$. Para este experimento, a profundidade do canal é $h = 0,9 \text{ m}$ e a onda incidente tem um período $T = 0,93 \text{ s}$ e uma altura de $H = 0,027 \text{ m}$.

Um esquema do domínio computacional adotado para este caso está mostrado na figura 4.1. O canal numérico tem $6L$ de comprimento ($L = 1,35 \text{ m}$ para uma onda de pequena amplitude), com a boia localizada no centro do canal. Na extremidade esquerda tem um batedor estático em que se usa a técnica de absorção ativa e na direita uma

condição de absorção ativa para evitar que haja ondas refletidas para o interior do canal. Para monitoramento da elevação da superfície livre ao longo do canal, existem as sondas usadas para o uso da técnica de absorção ativa, distantes de $L/50$ em relação ao batedor e à extremidade final do canal. Além disso, também são monitorados os momentos hidrodinâmico e o causado pelo atrito viscoso e a rotação da boia ao longo do tempo.

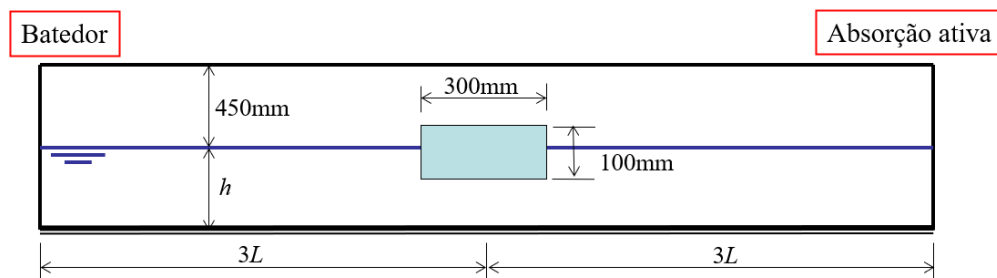


Figura 4.1: Esquema do domínio computacional para o caso de validação da boia oscilante.

O momento de inércia da boia usado na simulação numérica bidimensional é $I = 0,262 \text{ kgm}^2$, diferente do momento de inércia usado nos experimentos ($I = 0,236 \text{ kgm}^2$) para levar em conta a diferença entre a largura do canal do experimento (0,9 m) e a do domínio computacional (1 m). Um momento devido ao atrito do tipo viscoso foi considerado para reproduzir o atrito que ocorre no eixo durante a rotação da boia no experimento. O coeficiente de amortecimento adaptado para uma largura de canal de 1 m é $c = 0,3056 \text{ Nms/rad}$, que é o valor ótimo encontrado por Calderer *et al.* (2014) para este caso (0,275 Nms/rad para uma largura de 0,9 m), que reproduziu o caso através de simulação numérica.

A figura 4.2 apresenta a malha construída no Workbench para um tamanho de elemento em torno da boia $e = 1,23 \text{ mm}$, que é um dos tamanhos usado na análise de convergência de malha apresentada a seguir. Basicamente, a malha possui as zonas de propagação da onda a montante e a jusante da boia e uma zona central em torno da boia.

Nas zonas de propagação da onda, que compreende do batedor até a zona central em torno da boia e desta até o contorno final do canal, a malha é estruturada e os tamanhos dos volumes são definidos na direção horizontal em $L/70$. Existem zonas de transição para adaptar a diminuição do tamanho dos volumes próximo ao batedor/contorno final do canal e em e (tamanho dos volumes ao redor da boia) no encontro com a zona próxima à placa. Na direção vertical desta zona de propagação, existe uma região de altura $2H$ em torno da superfície livre de repouso com tamanhos de volumes de $H/20$. Desta região até o fundo e até o topo, ocorre um estiramento na malha.

Na zona central em torno da placa, a malha é não-estruturada e existe um domínio circular em que se aplica a técnica de *sliding mesh* com um raio de circunferência de 0,4

m. O tamanho dos volumes dentro do círculo em que a boia está inserida é e . Na parte externa da circunferência, os volumes em torno da superfície livre de repouso permanecem com o tamanho e ; os volumes sofrem um aumento de tamanho em direção ao fundo (em torno de 2,5 vezes maior que e); e existe um aumento bem maior na direção do topo do domínio, em que o fluido é o ar.

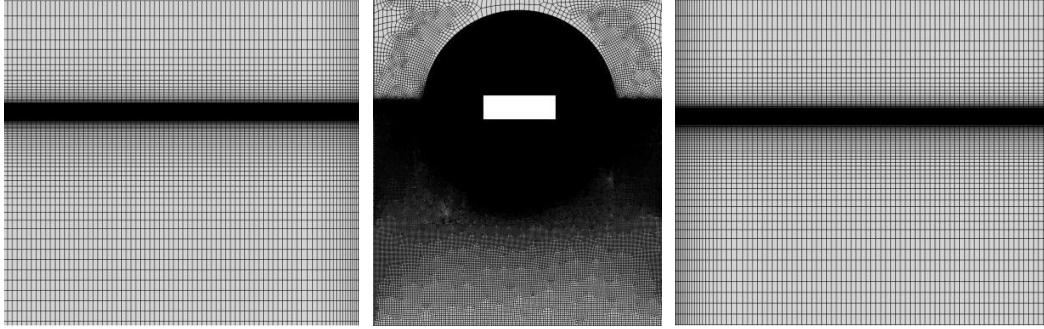


Figura 4.2: Malha usada no caso da boia oscilante para $e = 1,23$ mm.

Foi realizada uma análise de convergência de malha com diferentes tamanhos de volumes em torno da boia, $e = 7,40$; $5,55$; $3,70$; $1,85$ e $1,23$ mm, mas mantendo a mesma configuração descrita anteriormente. A figura 4.3 mostra a série temporal do ângulo de rotação da boia para as quatro malhas juntamente com o resultado experimental de Jung (2004). Observa-se que as malhas com $e = 1,85$ e $1,23$ mm apresentam resultados com excelente acurácia. Além disso, existe uma convergência assintótica com os resultados do experimento à medida que e diminui.

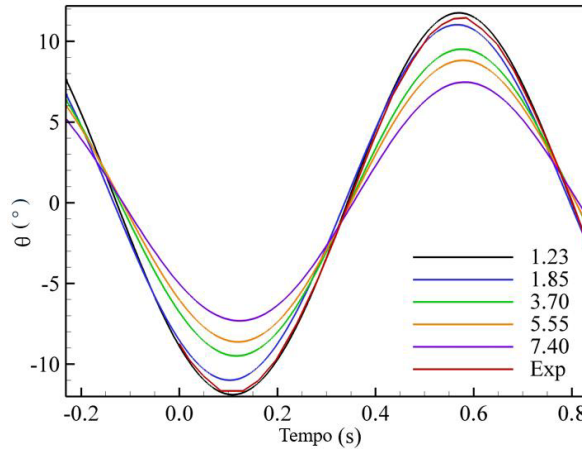


Figura 4.3: Séries temporais do ângulo de rotação da boia para malhas de diferentes tamanhos de volumes (em mm).

A tabela 4.1 apresenta as amplitudes mínima e máxima do ângulo de rotação para cada tamanho de elemento (θ_{min} e θ_{max} , respectivamente) e o tempo adimensional t_c (s/s), calculado pela relação entre o tempo computacional e a duração da simulação. Também é mostrada a diferença percentual (Dif) entre $(\theta_{max} - \theta_{min})$ obtido numericamente com relação àquele obtido no experimento. Como foi observado na

figura 4.3, a tabela mostra as menores diferenças encontradas para as malhas $e = 1,85$ e $1,23$ mm. Essas malhas apresentam maior tempo computacional adimensional, mas são as que possuem resultados com melhor acurácia.

Tabela 4.1: Amplitudes máxima e mínima do ângulo de rotação e tempo de processamento para malhas de diferentes tamanhos de volumes.

e (mm)	θ_{min} (°)	θ_{max} (°)	Dif (%)	t_c (s/s)
Jung (2004)	-11,66	11,43	-	-
1,23	-11,89	11,76	2,42	402337
1,85	-10,99	11,02	4,70	237779
3,70	-9,49	9,52	17,67	8113
5,55	-8,62	8,83	24,43	7422
7,40	-7,32	7,46	35,99	1468

A figura 4.4 mostra a série temporal num intervalo de tempo entre 0 e 40 s do ângulo de rotação da boia obtida numericamente para a malha de $e = 1,23$ mm. Pode-se observar a estabilização do sinal a partir de 34 s. Assim, tem-se o regime periódico estável em que a amplitude do ângulo máximo é $11,76^\circ$ e do ângulo mínimo se mantém em $-11,89^\circ$.

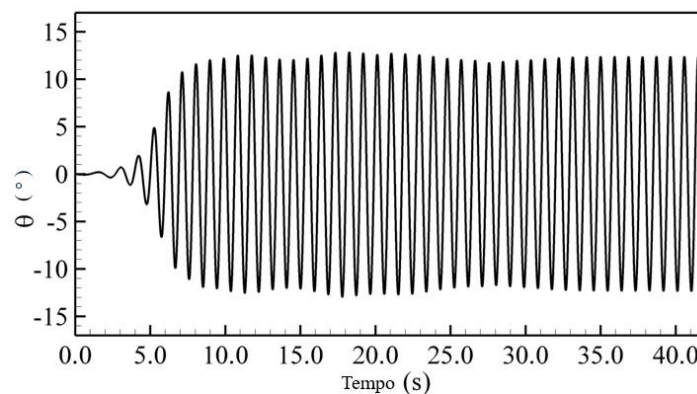


Figura 4.4: Série temporal do ângulo de rotação da boia obtida numericamente para $e = 1,23$ mm.

A figura 4.5 mostra o campo de velocidades ao redor da boia para 4 instantes: quando a boia está na posição horizontal ($\theta = 0^\circ$) e com velocidade angular positiva, ou seja, no sentido anti-horário; quando a boia está na posição de máxima inclinação ($\theta = \theta_{max}$); quando a boia está na posição horizontal ($\theta = 0^\circ$) e com velocidade angular negativa (sentido horário); e quando a boia está na posição $\theta = \theta_{min}$. Observam-se as maiores magnitudes de velocidade no entorno da boia, como era de se esperar, principalmente nas laterais e quinas submersas da boia.

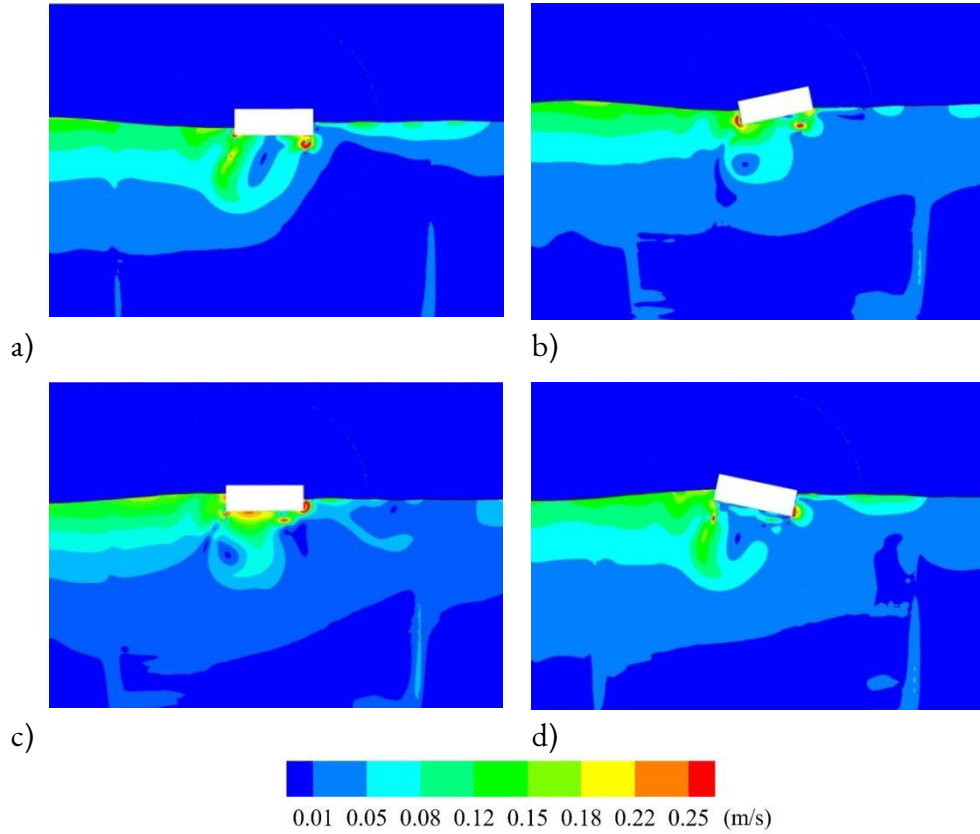


Figura 4.5: Campo de velocidades para 4 instantes: a) boia na posição horizontal e velocidade angular positiva, b) boia na posição $\theta = \theta_{max}$, c) boia na posição horizontal e velocidade angular negativa, e d) boia na posição $\theta = \theta_{min}$

4.2 Teste de independência de malha e da influência do raio da circunferência

Na análise de convergência de malha, é importante observar não só a acurácia do resultado, mas, também, o tempo computacional requerido, o qual aumenta com o aumento do número de volumes da malha. A análise de convergência de malha realizada neste trabalho é feita para o caso da placa inserida no canal em que os níveis a e b são iguais a 2,0 m e está sujeita a uma onda incidente de período $T = 12$ s. O coeficiente de amortecimento e a massa específica do dispositivo utilizados para as análises são respectivamente $c_{PTO} = 500$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³. São simulados casos com um domínio circular de raio $r = 9,5$ m ao redor do dispositivo com malhas de tamanhos de volumes em torno da placa de 0,093 (M_1), 0,062 (M_2) e 0,052 m (M_3). Inicialmente, a placa se mantém fixa até o escoamento encontrar estabilidade e, após, a placa é deixada livre para oscilar até o escoamento estabilizar novamente.

Foram plotadas, na figura 4.6, as séries temporais a) do ângulo de rotação da placa em movimento (θ), b) da velocidade angular ($\dot{\theta}$) e c) da aceleração angular ($\ddot{\theta}$) ao longo de um período de onda. Pode-se observar que, para o período de onda analisado de 12s,

a placa tem maior rotação no sentido anti-horário, positivo, e os resultados para as diferentes malhas apresentam valores próximos entre elas. As maiores diferenças ocorrem entre os picos das séries temporais das malhas M_1 e M_3 , sendo de 3,46 %, 5,94 % e 8,35 % no ângulo, na velocidade angular e na aceleração angular, respectivamente.

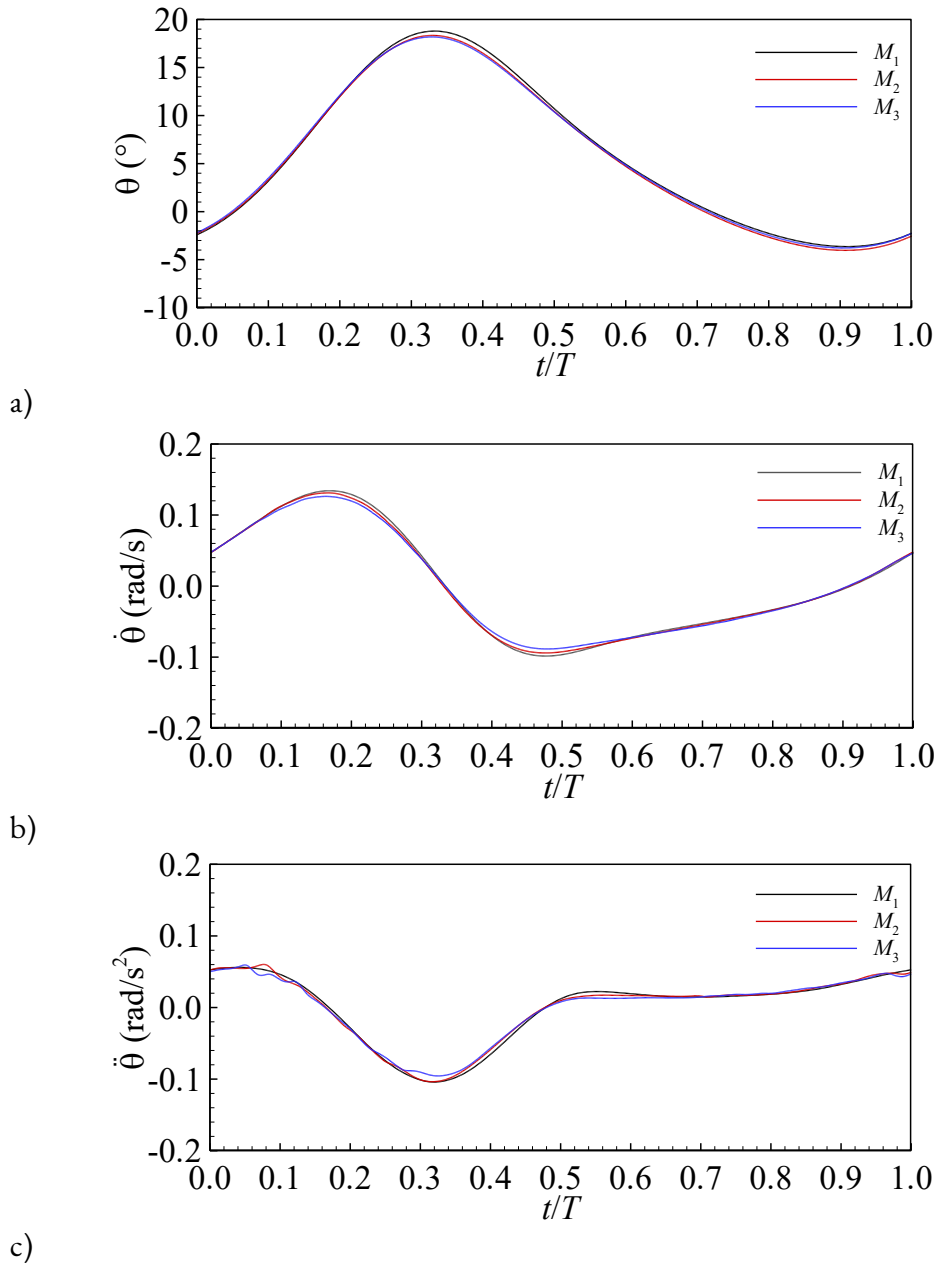


Figura 4.6: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; e c) da aceleração angular para o período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m³.

Já a figura 4.7 apresenta as séries temporais a) do momento de amortecimento da placa e b) da potência absorvida pela placa. Em ambos os casos, os resultados apresentados pelas malhas são próximos. No caso do momento de amortecimento da

placa, a maior diferença entre os picos é de 6,8 % entre M_1 e M_3 . Quanto à potência absorvida, a amplitude máxima encontrada na malha M_1 é de 9,01 kW/m, enquanto a potência em M_2 e M_3 são respectivamente de 8,61 e 8,48 kW/m.

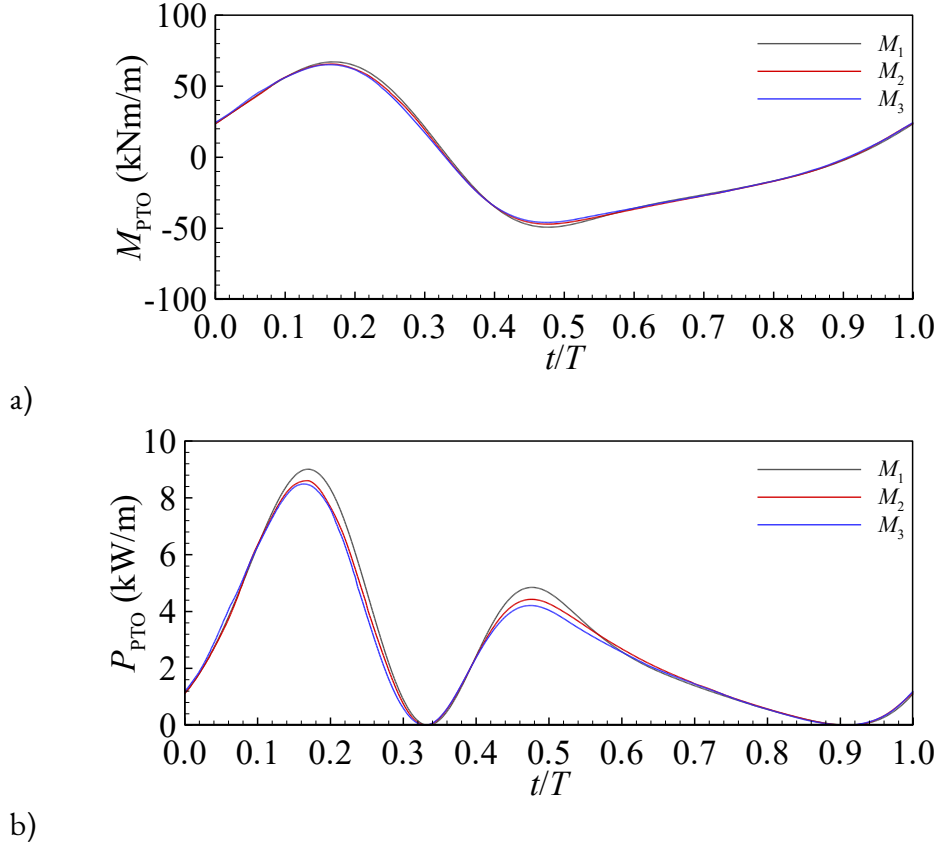


Figura 4.7: Séries temporais a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para um período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m³.

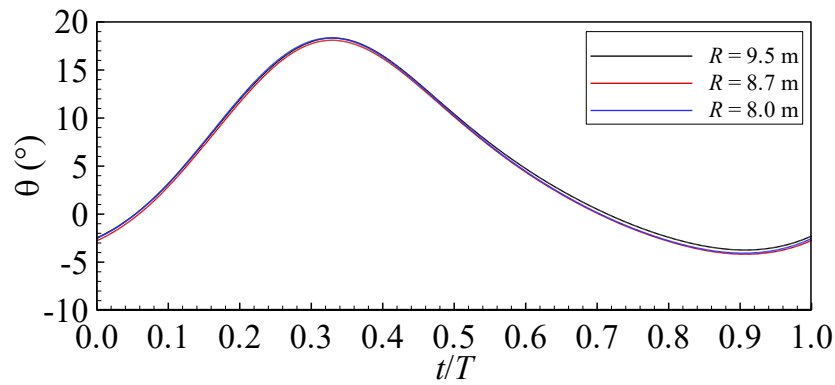
A tabela 4.2 mostra a potência média absorvida obtida em cada uma das malhas, a amplitude total do ângulo de rotação ($\Delta\theta$) e o tempo computacional adimensional (t_c), definido como a relação entre o tempo computacional e o tempo de simulação. Observa-se que os resultados estão muito próximos entre si. As diferenças percentuais, Dif_1 e Dif_2 , correspondem às diferenças entre a potência média absorvida e a amplitude total do ângulo de rotação obtidas para cada malha em relação aos resultados da malha mais grosseira. A diferença da potência média de M_2 em relação à M_3 é de -4,2 %, sendo um valor aceitável levando em consideração as incertezas envolvidas na simulação numérica. A diferença percentual da amplitude total do ângulo de rotação entre essas malhas é de -1,2 %, podendo notar uma acurácia entre os casos. Portanto, a malha M_2 é escolhida para as simulações realizadas neste estudo, considerando a precisão e o tempo computacional apresentando.

Tabela 4.2: Potência média absorvida, amplitude total do ângulo de rotação e tempo computacional adimensional para malhas de diferentes tamanhos de elementos.

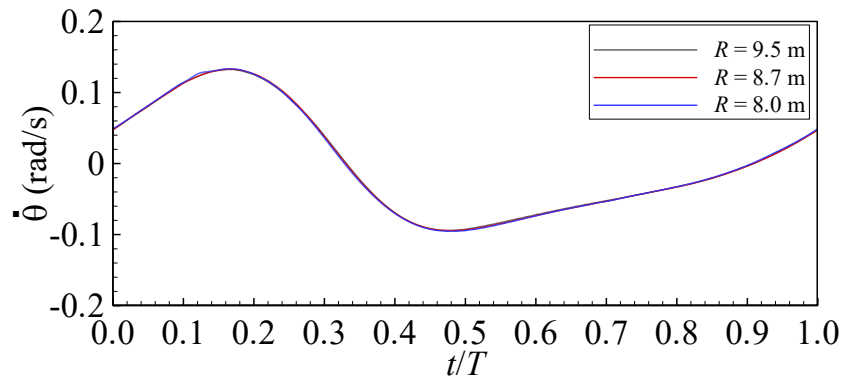
e (mm)	P_{abs} (kW/m)	Dif ₁ (%)	$\Delta\theta(^{\circ})$	Dif ₂ (%)	t_c (s/s)
93	2,85	-	22,59	-	881
62	2,73	-4,2	22,31	-1,2	1578
52	2,66	-2,6	21,95	-1,6	1824

Seguindo as análises para encontrar a melhor configuração da malha para implementar nos casos de simulação, foi investigado o raio de circunferência utilizado ao redor do dispositivo no qual a malha é não estruturada e influência de forma direta na quantidade de volumes. Essa etapa é fundamental para definir o raio mais adequado, que não seja tão grande que exija muito custo computacional e que não seja tão pequeno que proporcione perda de acurácia na solução pela proximidade da circunferência à placa, colocando o contorno de interpolação sujeito a variações muito grandes das variáveis do escoamento. Dessa forma, foram analisados para uma onda incidente com $T = 12$ s, $C_{PTO} = 500$ kNms/rad, $\rho_p = 1400$ kg/m³ e $a = b = 2$ m, os raios $R_1 = 9,5$, $R_2 = 8,7$ e $R_3 = 8$ m, nos quais as menores distâncias da circunferência até a ponta submersa da placa para esses três casos são 2,5, 1,7 e 1,0 m, respectivamente. Para as comparações, os resultados obtidos para o raio R_1 são considerados como de referência, visto que se trata do caso cuja circunferência tem a maior distância da placa.

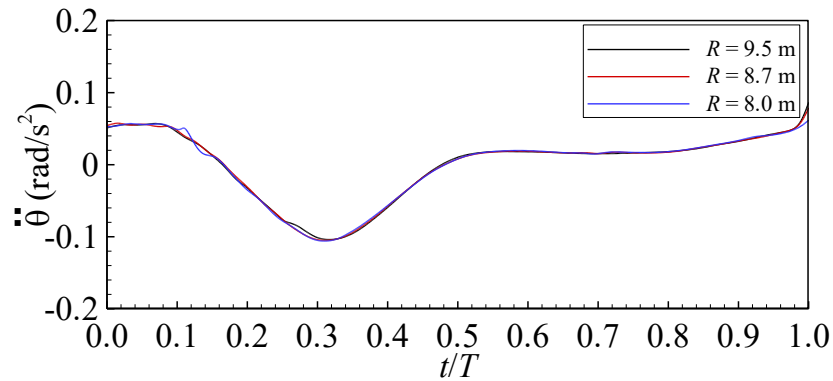
A figura 4.8 mostra as séries temporais a) do ângulo de rotação da placa em movimento (θ), b) da velocidade angular ($\dot{\theta}$) e c) da aceleração angular ($\ddot{\theta}$) para um período de onda. Na figura 4.8 a) as curvas apresentam comportamento semelhante, com pequenas diferenças de magnitude, sendo a amplitude do ângulo de rotação máxima de 1,3 % entre R_1 e R_2 . Entretanto, na figura 4.8 b), ao observar a velocidade de rotação, percebe-se que a diminuição do raio acrescenta instabilidades nas séries temporais. O mesmo ocorre na aceleração, figura 4.8 c), sendo ainda mais perceptível. A velocidade e a aceleração apresentam maior oscilação na janela temporal correspondente às velocidades de rotação positiva. Como resultado, a maior diferença encontrada entre as séries temporais da velocidade e aceleração está entre raios R_1 e R_2 , sendo de 0,03% e 0,09%, respectivamente.



a)



b)



c)

Figura 4.8: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; e c) da aceleração angular para o período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m³.

Na figura 4.9 estão apresentadas as séries temporais a) do momento de amortecimento da placa e b) da potência absorvida pela placa, ambos ao longo de um período de onda de 12 s. Nessa análise se nota uma diferença de resultados menor do que a diferença encontrada na análise de malhas com diferentes tamanhos de elemento, figura 4.7. A maior diferença percentual entre as amplitudes dos momentos e amortecimentos encontradas entre R_1 e R_2 de apenas 0,4 %, ou seja, a mudança do raio da circunferência afeta o custo computacional já que aumenta o número de células e consequentemente

demanda um maior tempo de simulação numérica, mas dentre as circunferências analisadas os resultados mostraram pouca alteração. As diferenças na amplitude máxima da potência absorvida para R_2 e R_3 em comparação com R_1 são de 0,9 % e 2,3 %, respectivamente, destacando o aumento dessa diferença com a redução do raio.

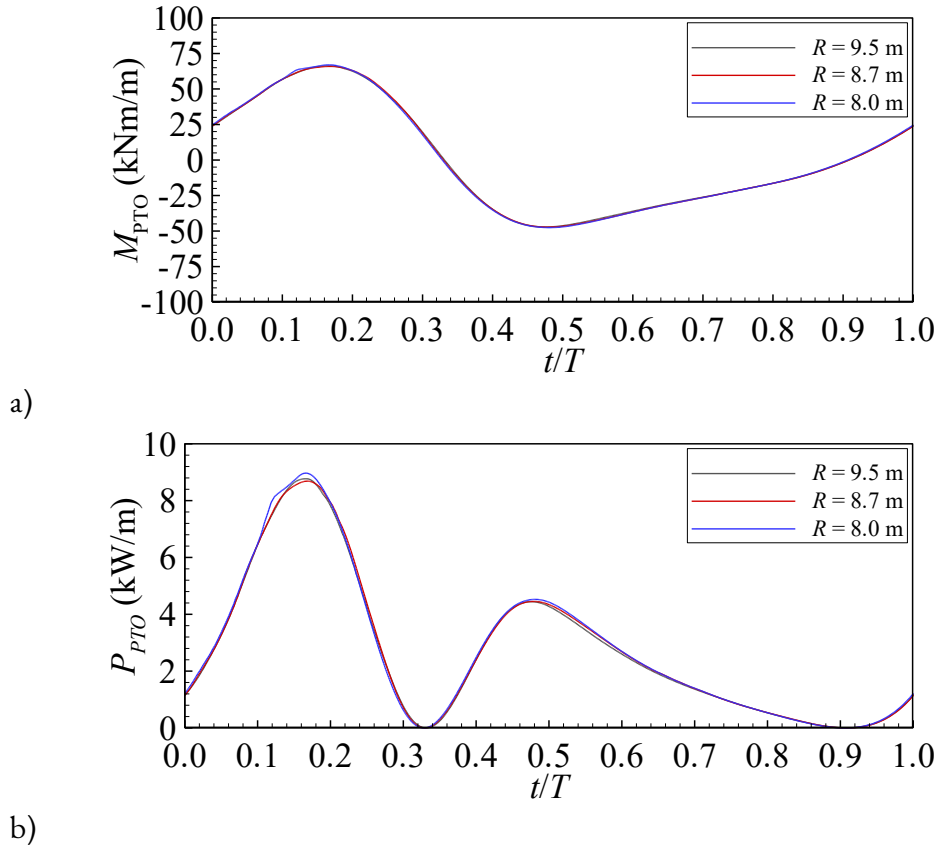


Figura 4.9: Séries temporais a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para um período de onda de 12 s, coeficiente de amortecimento de 500 kNms/rad e massa específica de 1400 kg/m³.

Por fim, a tabela 4.3 mostra os resultados da potência média absorvida, a amplitude total do ângulo de rotação ($\Delta\theta$) e o tempo computacional adimensional (t_c). Assim, pode-se perceber que ângulos de rotação dos três casos apresentam valores muito semelhantes, com diferenças das amplitudes totais ($\Delta\theta$) obtidas por R_2 e R_3 para R_1 de 0,82 % e 1,09 %, mostrando que R_2 obtém resultados mais próximos de R_1 . Dessa forma, considerando o tempo computacional e a precisão dos resultados encontrados na figura 4.8 e 4.9 o raio utilizado para as análises foi R_2 .

Tabela 4.3: Potência média absorvida, amplitude total do ângulo de rotação e tempo computacional adimensional para malhas de diferentes raios de circunferência.

R	P_{abs} (kW/m)	Dif ₁ (%)	$\Delta\theta(^{\circ})$	Dif ₂ (%)	t_c (s/s)
R_1	2,73	-	22,03	-	1519
R_2	2,76	1,10	22,21	0,82	1176
R_3	2,79	2,20	22,27	1,09	780

4.3 Análise da influência do coeficiente de amortecimento

Nesta seção é apresentada a análise da influência do coeficiente de amortecimento na performance do dispositivo com massa específica $\rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3$, sendo a placa posicionada com ambos os níveis a e b iguais a 2,0 m. O estudo foi feito para os períodos de onda incidente de 6, 8, 10 e 12 s. Foram testados os coeficientes com valores de 500, 700, 900 e 1000 kNms/rad.

A figura 4.10 mostra as amplitudes máxima (θ_{max}) e mínima (θ_{min}) do ângulo de rotação da placa, no sentido da propagação da onda e no sentido contrário, respectivamente, e o ângulo médio (θ_m) obtidos para os diferentes coeficientes de amortecimento e períodos de onda incidente. A figura 4.10 também mostra a amplitude $\Delta\theta(\theta_{max} - \theta_{min})$ para cada caso. Nota-se que há um aumento de θ_{max} , θ_{min} e $\Delta\theta$ conforme aumenta o período da onda para todos os casos. Por exemplo, $\Delta\theta$ para $T = 6$ e 12 s e $C_{PTO} = 500 \text{ kNms/rad}$ são iguais a 15,0° e 22,3°, respectivamente. Além disso, ao aumentar o coeficiente de amortecimento, há uma redução de θ_{max} , θ_{min} e $\Delta\theta$, que é um comportamento esperado, pois o momento resistente ao movimento (M_{PTO}) também aumenta. Por exemplo, $\Delta\theta$ para $C_{PTO} = 1100 \text{ kNms/rad}$ cai para valores iguais a 10,5° e 14,4° para $T = 6$ e 12 s, respectivamente. Há uma exceção em $T = 6$ s para θ_{max} , cujos valores para $C_{PTO} = 500 \text{ kNms/rad}$ são menores que os dos outros.

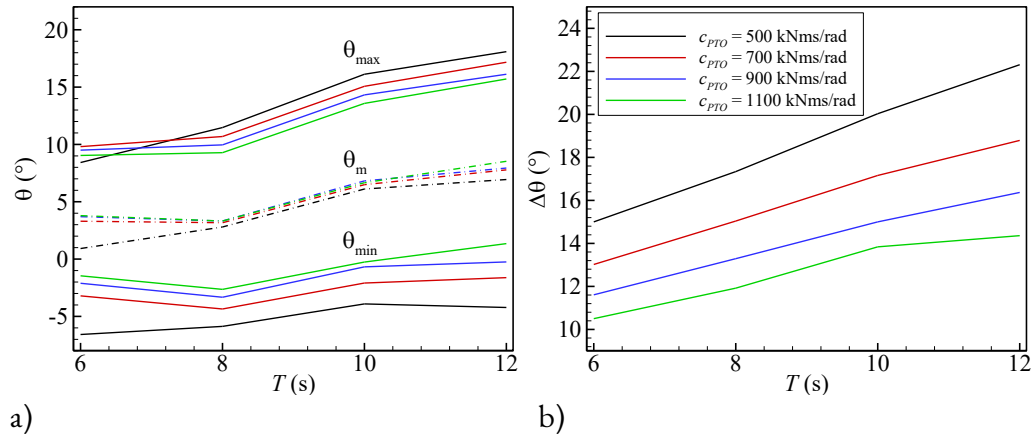


Figura 4.10: a) Amplitudes mínima, máxima e média do ângulo de rotação da placa e b) diferença entre amplitude mínima e máxima, para diferentes coeficientes de amortecimento ao longo do período da onda incidente.

Ademais, foi analisada a média temporal da potência absorvida (P_{abs}) para os diferentes coeficientes de amortecimento, conforme apresentado na figura 4.11. Pode-se notar que a potência média absorvida reduz com o aumento do período, independentemente do coeficiente de amortecimento, porém essa variação de valor é relativamente baixa. A variação máxima ocorre entre $C_{PTO} = 500$ e 1100 kNms/rad, que é menor que 7,8 %. O coeficiente de amortecimento que proporcionou a maior potência absorvida é de 900 kNms/rad para os períodos de onda de 6 e 8 s e de 700 kNms/rad para os períodos maiores, 10 e 12 s. Esses resultados estão alinhados com estudos que se baseiam em um sistema totalmente linear, que indicam que o coeficiente de amortecimento ótimo varia de acordo com a frequência da onda (Falnes, 2002). Ainda assim, a diferença entre eles é muito baixa (menor que 1,5%), e pode-se concluir que o coeficiente de amortecimento que fornece a P_{abs} máxima está entre 700 e 900 kNms/rad.

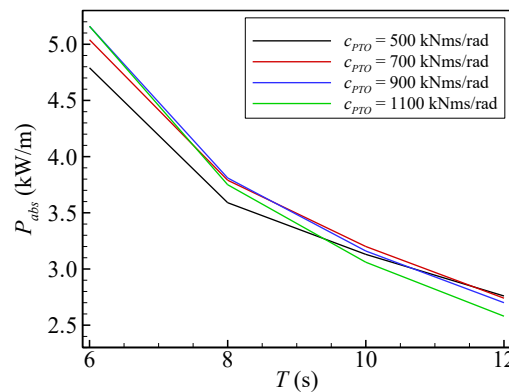


Figura 4.11: Média temporal da potência absorvida pelo dispositivo ao longo do período da onda.

Outra análise realizada é a dos coeficientes de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R), mostrados na figura 4.12. De modo geral, o valor de C_T , que varia entre 0,68 e 0,89, é

muito maior do que o C_R , que fica entre 0,09 e 0,23. O C_T tende a aumentar conforme o período da onda aumenta, enquanto o C_R apresenta um comportamento oposto, exceto na condição de $T = 8$ s. Além disso, o C_T diminui à medida que o coeficiente de amortecimento aumenta, enquanto o C_R mostra o efeito contrário. Isso sugere que, quanto mais próxima da condição de placa estática, maior é a reflexão da onda. As maiores diferenças em C_T e C_R , causadas pela variação do coeficiente de amortecimento, são observadas em $T = 6$ s, onde C_T varia de 0,68 a 0,76 e C_R de 0,14 a 0,23.

Diante dos resultados mostrados e analisados, considera-se que o coeficiente de amortecimento mais adequado é aquele que proporciona a maior potência absorvida e está entre 700 e 900 kNms/rad. Neste trabalho, o coeficiente de amortecimento de 900 kNms/rad foi adotado para as análises seguintes.

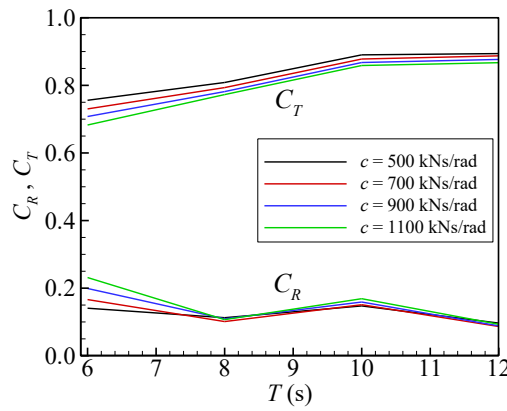


Figura 4.12: Coeficientes de transmissão e reflexão da onda para diferentes coeficientes de amortecimento.

4.4 Análise da influência da massa específica da placa

A massa específica da placa influencia na sua inércia de massa e no seu peso próprio e, por consequência, na sua resposta de movimento. A massa específica usada originalmente nos casos apresentados nas Seções anteriores é de 1400 kg/m³. Para analisar a influência da massa específica da placa na sua performance, mantendo as outras características da placa constantes, foram testados casos com placas de massas específicas de 600, 1000, 1400, 1800 e 2200 kg/m³ distribuídas de forma homogênea. O período da onda incidente escolhido para a análise é $T = 12$ s, pelo fato de ter um maior fluxo de energia que causa um maior θ_m (ver figura 4.13) e, consequentemente, reduz significativamente a captação de energia quando a placa se movimenta no sentido contrário ao da propagação da onda. O coeficiente de amortecimento adotado é de 900 kNms/rad, que proporciona valores mais altos de potência absorvida pelo dispositivo, conforme Seção 4.3. A massa total da placa (m_p), a inércia de massa (I_p) e a potência média absorvida (P_{abs}) para cada massa específica (ρ_p) estão mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Massa da placa (m_p), inércia de massa da placa (I_p) e potência média absorvida (P_{abs}) para cada uma das massas específicas (ρ_p) analisadas.

ρ_p (kg/m ³)	m_p (kg)	I_p (kgm ²)	P_{abs} (kW/m)
600	2100	34300	1,12
1000	3500	57167	2,41
1400	5005	81748	2,70
1800	6300	102900	2,65
2200	7700	125767	2,75

Dois aspectos devem ser considerados nesta análise. O primeiro é quanto à influência da massa específica na potência absorvida pela placa. O segundo aspecto é quanto à estabilização da placa, considerando que quanto menor a massa específica, menor é o efeito de restauração implementado pelo peso próprio da placa.

Em se tratando da potência média absorvida, pode-se notar na tabela 4.4 que, a partir da massa específica de 1400 kg/m³, a potência média absorvida tem muita pouca variação e são maiores do que aquelas obtidas para massas específicas menores.

A figura 4.13 mostra as séries temporais do ângulo de rotação da placa para as diferentes massas específicas. De maneira geral, o ângulo de rotação médio da placa aumenta com o tempo, até ter uma estabilização. Além disso, o ângulo de rotação médio é maior para massas específicas menores que 1400 kg/m³, enquanto que acima dela, as séries temporais dos ângulos são similares. Quando a massa específica é de 600 kg/m³, o ângulo de rotação médio alcança um valor de 62,60°, que torna a condição inviável. Este comportamento do ângulo de rotação médio está de acordo com o que acontece com a potência média absorvida, considerando que os dois casos de massa específica, 600 e 1000 kg/m³, proporcionam altos valores de ângulo de rotação médio e, também, valores baixos de potência média absorvida.

Ressalta-se que se a placa fosse rotulada no fundo, como em alguns conceitos de dispositivos já conhecidos (ver Capítulo 2), o efeito da massa específica seria inverso, ou seja, quanto menor a massa específica, melhor é a estabilização do movimento da placa. Cabe lembrar também que esta análise não leva em conta a capacidade da placa de resistir aos esforços impostos sobre ela e, portanto, o valor da massa específica da placa deve ser escolhido também considerando este critério. Sendo assim, para este caso, a massa específica de 1400 kg/m³ permite obter uma potência média absorvida semelhante àquela obtida para massas específicas maiores e ainda tem a vantagem de proporcionar um peso da placa menor, facilitando aspectos de montagem e instalação do equipamento.

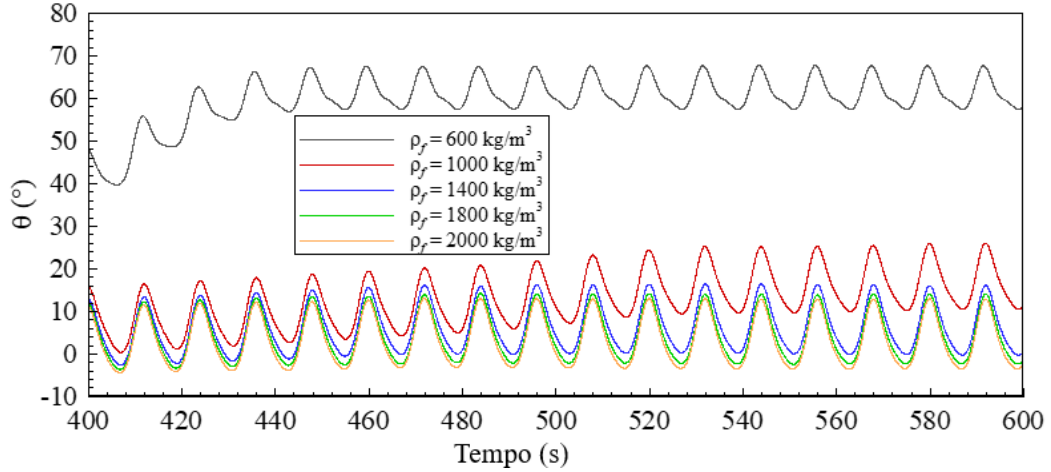


Figura 4.13: Séries temporais da amplitude do ângulo de rotação da placa para diferentes massas específicas.

4.5 Análise da interação onda-estrutura para onda incidente de $T = 8$ s

O processo de interação onda-estrutura para os diferentes períodos de ondas incidentes tem comportamentos similares. Nesta seção, o comportamento da interação onda-estrutura é analisado em detalhe na condição de regime periódico estacionário para uma onda incidente de período $T = 8$ s, uma placa com massa específica de 1400 kg/m^3 com os níveis a e b iguais a $2,0$ m e um coeficiente de amortecimento de 900 kNms/rad . Este período de onda é o escolhido por estar em uma posição média dos limites de períodos simulados neste trabalho. A massa específica e o coeficiente de amortecimento adotados se justificam por terem mostrado melhor desempenho para o dispositivo nesta configuração. Os resultados obtidos para os períodos de onda 6, 10 e 12 s são apresentados nos Apêndices A a D.

A figura 4.14 mostra o módulo de velocidade ao redor da placa e as linhas de corrente em quatro instantes do escoamento: (a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, (b) placa na posição de ângulo máximo $\theta = \theta_{max}$, (c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa e (d) placa na posição de ângulo mínimo $\theta = \theta_{min}$. Quando analisada a superfície livre, é notório que não há galgamento para nenhum dos instantes observados, mantendo esse padrão para os demais períodos de onda, conforme as figuras mostradas no Apêndice A. Além disso, são constatados valores maiores do módulo de velocidade ao redor da extremidade submersa da placa. Nos instantes (a) e (b), o escoamento local está no sentido da propagação da onda e o módulo de velocidade é maior na região a montante da placa junto à extremidade submersa e tem valores menores a jusante da placa. Nos instantes (c) e (d), o escoamento está no sentido contrário da propagação da onda e o módulo de velocidade a jusante da placa é suavemente maior do que a montante. Nota se também no instante (b) que o módulo da velocidade tem uma intensidade relativamente elevado perto do fundo do canal, o que pode igualmente ser observado para os outros períodos de onda, a intensidade aumentando com o aumento do período (Apêndice A).

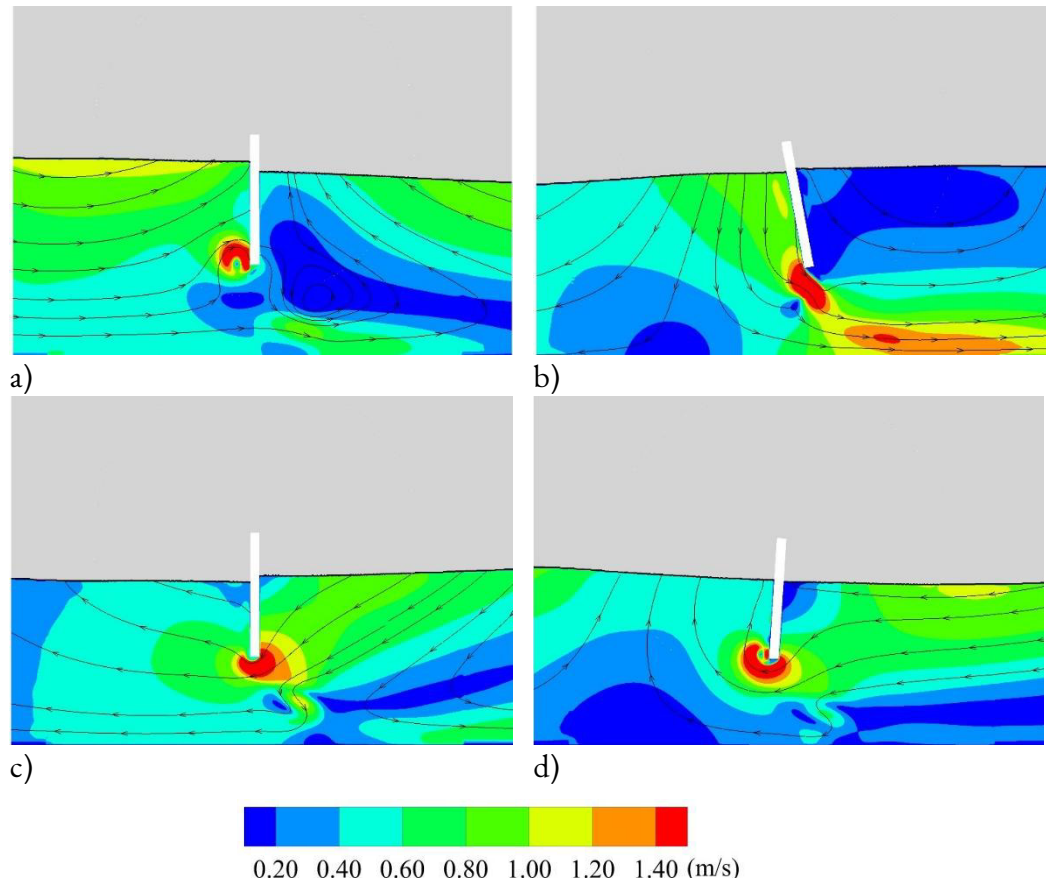


Figura 4.14: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

Na figura 4.15, é mostrada a pressão dinâmica (pressão total descontada da pressão hidrostática do fluido em repouso) nos 4 instantes do escoamento. De forma geral, o módulo da pressão dinâmica é maior na parte mais próxima à superfície livre, devido à natureza de comportamento da propagação da onda. No instante (a), a pressão dinâmica tem valores maiores a montante da placa, pois a placa está sendo impulsionada no sentido da propagação da onda. No instante (b), nota-se um maior equilíbrio de pressão entre os dois lados da placa, sendo suavemente maior a jusante da placa. No instante (c), a placa está sendo impulsionada no sentido contrário ao da propagação da onda e, por esta razão, a pressão a jusante da placa é maior do que a montante. No instante (d), a pressão dinâmica na parte a montante da placa passa a ser novamente maior do que a jusante, indicando o início de reversão do movimento. A mesma sequência se observa para os outros períodos de onda (Apêndice B).

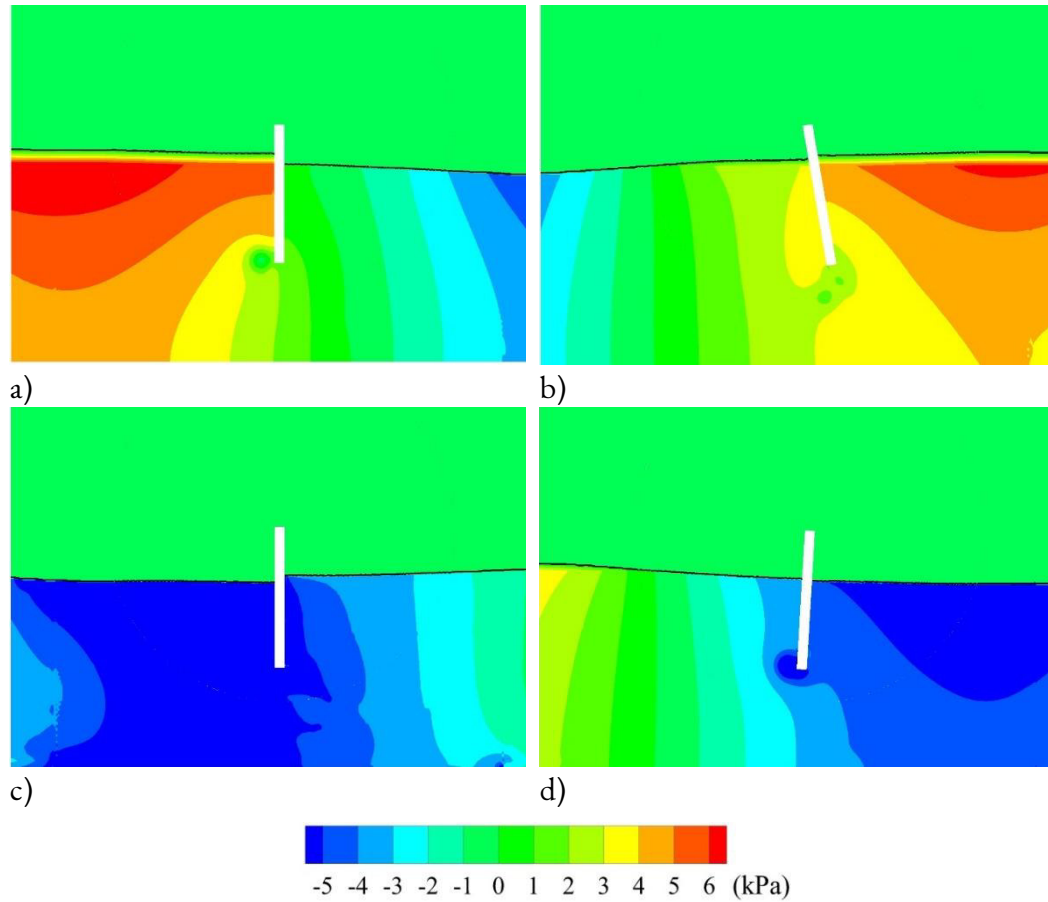


Figura 4.15: Pressão dinâmica para $T = 8 \text{ s}$, $C_{PTO} = 900 \text{ kNms/rad}$ e $\rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

Na figura 4.16, é apresentada a carga distribuída (q) na parede frontal e posterior da placa, devido à pressão dinâmica, para os 4 instantes do escoamento. A carga é considerada positiva no sentido de compressão à parede. No instante (a), as cargas dos dois lados são positivas, sendo a carga na parede frontal maior do que a carga sobre a parede posterior, conforme esperado, já que a placa está sendo impulsionada no sentido da propagação da onda. Além disso, nota-se que, enquanto a carga na parede frontal decresce com a profundidade, ocorre o inverso para a carga na parede posterior. No instante (b), existe um relativo equilíbrio entre as cargas na parede frontal e posterior da placa, sendo ambas positivas. Além disso, a distribuição de carga tem pouca variação ao longo das paredes. No instante (c), as cargas em ambas as paredes são negativas e, também, estão em relativo equilíbrio, com suave predominância de magnitude da carga na parede frontal. No instante (d), as cargas ainda são negativas, mas com leve predomínio da magnitude da carga na parede posterior, indicando um esforço resultante no sentido de inverter o sentido de movimento da placa. As cargas no caso dos outros períodos de onda apresentam um comportamento parecido, e pode se verificar que nos

instantes (c) e (d) as cargas nas duas paredes têm tendência a ficar similares com o aumento do período (Apêndice C).

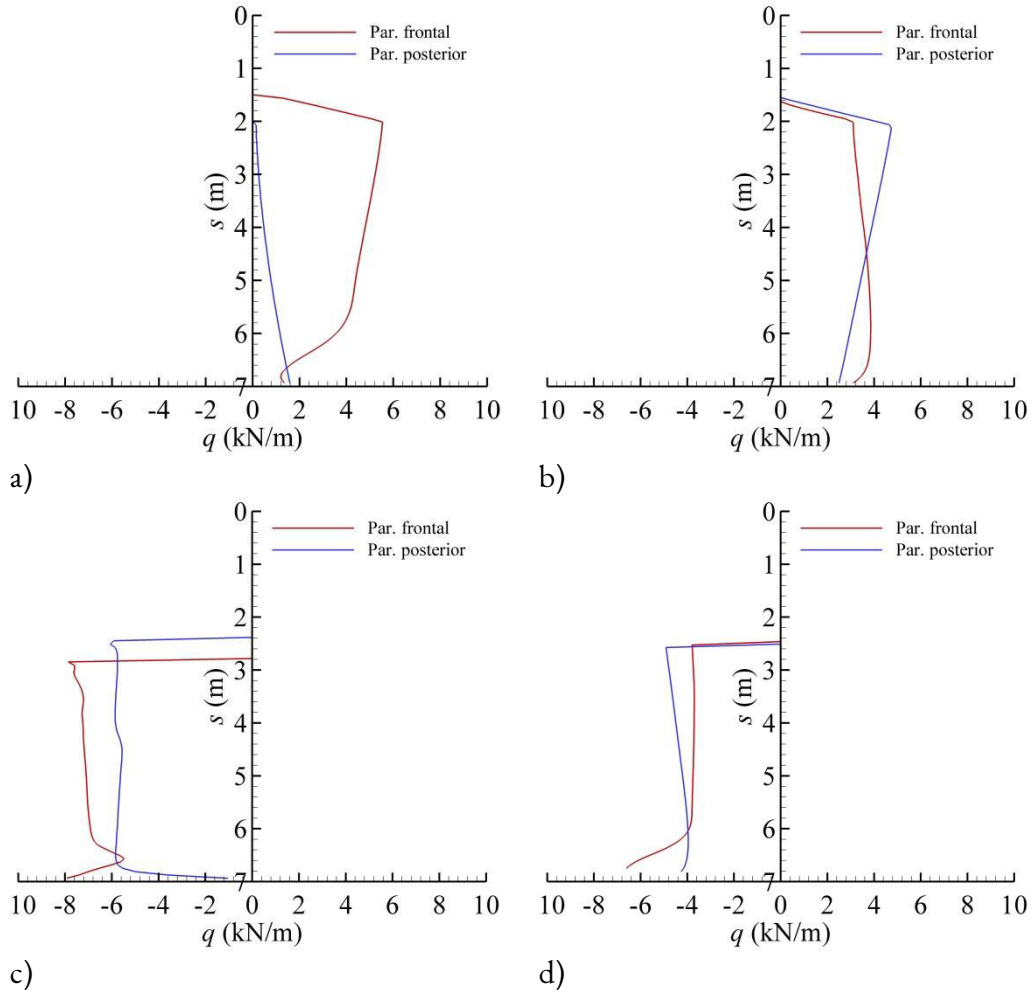


Figura 4.16: Carga distribuída na parede frontal (linha vermelha) e posterior (linha azul) da placa para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

As séries temporais do ângulo de rotação, da velocidade angular e da aceleração angular da placa estão apresentadas na figura 4.17. Na série temporal do ângulo (figura 4.17 a), pode-se notar que a placa oscila segundo a frequência fundamental da onda incidente de forma relativamente linear. Nota-se uma assimetria entre a amplitude positiva e negativa do ângulo, sendo $\theta_{max} = 9,98^\circ$ e $\theta_{min} = -3,27^\circ$. Essa diferença é também observada para diferentes períodos de onda incidente (Apêndice D). Para $T = 6$ s tem-se $\theta_{max} = 9,5^\circ$ e $\theta_{min} = -2,1^\circ$, enquanto que, para $T = 12$ s, $\theta_{max} = 16,1^\circ$ e $\theta_{min} = -0,3^\circ$. A assimetria aumenta com o período da onda, com θ_{max} que aumenta e θ_{min} que se aproxima de zero. Na série temporal da velocidade e aceleração (figura 4.17 b e c), observa-se um aumento da não linearidade da oscilação. Além disso, pode-se destacar

que a aceleração (figura 4.17 c) se mostra com pico positivo mais achatado em comparação com o pico negativo.

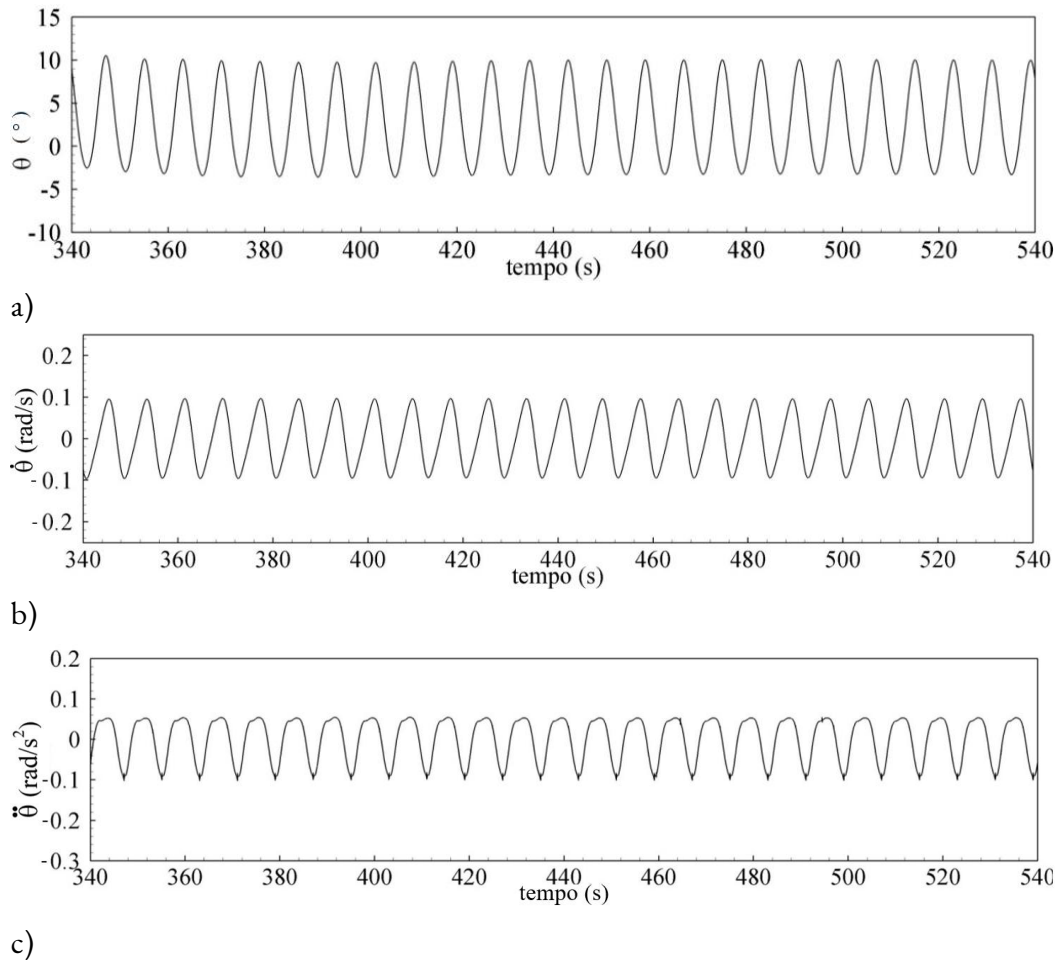


Figura 4.17: Séries temporais a) do ângulo de rotação, b) da velocidade angular e c) da aceleração angular para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.

A figura 4.18 mostra a série temporal do momento hidrodinâmico (M_b) imposto sobre a placa. Como era de se esperar, o momento hidrodinâmico oscila na frequência fundamental da onda incidente. A amplitude positiva, no sentido de propagação da onda, é de 100 kNm/m, enquanto que a negativa é de -73 kNm/m, ou seja, menor do que a positiva. Esta constatação está de acordo com o comportamento da placa, em que a amplitude positiva do ângulo também é maior do que a negativa.

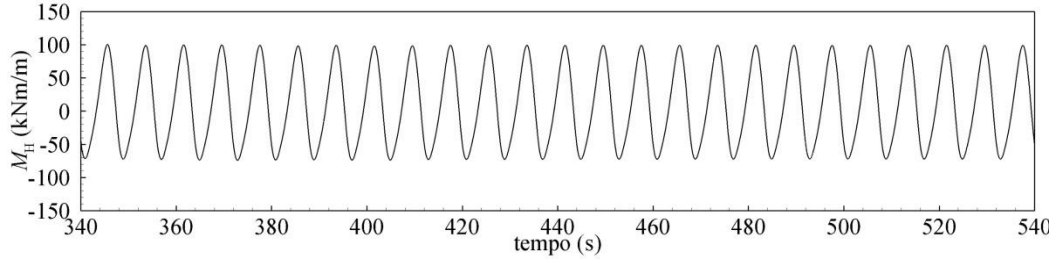


Figura 4.18: Série temporal do momento hidrodinâmico para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.

A figura 4.19 mostra o momento devido ao amortecimento (M_{PTO}) e a correspondente potência absorvida pelo dispositivo (P_{PTO}). O momento M_{PTO} tem um comportamento cuja oscilação segue a frequência fundamental da onda incidente. O momento é proporcional à velocidade angular e contrário ao movimento. Assim, seu comportamento é similar ao da velocidade angular ao longo do tempo, mas no sentido inverso. Neste caso, $T = 8$ s, a amplitude máxima e mínima de M_{PTO} são muito próximas (99 e 72 kNm/m, respectivamente), semelhante ao comportamento para $T = 6$ s (Apêndice D). Neste caso, a potência absorvida P_{PTO} máxima no sentido da propagação da onda e no sentido inverso é similar para ambos períodos. No entanto, para os períodos mais altos (10 e 12 s), quando a placa se movimenta no sentido da propagação da onda, a amplitude de M_{PTO} é bem maior do que a do sentido inverso. Este fato causa uma potência absorvida bem maior quando a placa se desloca no sentido de propagação de onda do que no sentido inverso; em $T = 12$ s, por exemplo, a amplitude quando a placa gira no sentido positivo é de 87 kNm/m, enquanto que é apenas de 60 kNm/m no sentido contrário. A potência absorvida máxima no sentido da propagação da onda é assim maior (em torno do dobro) que no sentido inverso.

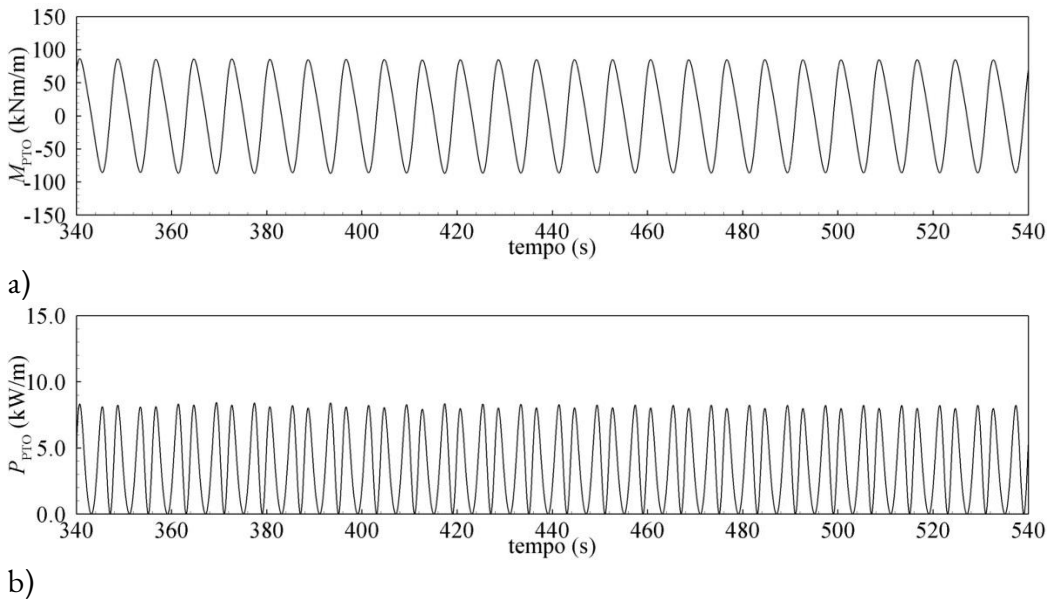


Figura 4.19: Série temporal a) do momento de amortecimento e b) da potência absorvida pela placa para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.

Para verificar se a equação do balanço dos momentos (equação 2.20) está sendo respeitada ao longo do tempo, a equação é reescrita na forma:

$$Res = M_h + M_{PTO} + M_p - M_I \quad (4.1)$$

onde $M_{PTO} = M_c$ e Res é o resíduo.

A figura 4.20 mostra as séries temporais dos momentos presentes na equação 4.1. O resíduo (Res) apresentou pouca variação em torno de zero, com o valor absoluto máximo de 0,17 kNm/m, que representa apenas 0,1% do momento hidrodinâmico (M_h), sendo, portanto, um valor insignificante, indicando que a equação de balanço de momentos está sendo corretamente simulada. Em se tratando do momento de inércia (M_I), observa-se uma pequena amplitude em relação aos outros momentos (em torno de 8,01 kNm/m) e está praticamente na fase oposta à do ângulo de rotação da placa, como acontece com a aceleração apresentada na figura 4.17 c). O momento devido ao peso próprio (M_p) está em fase com o momento de inércia e seu valor máximo na direção da propagação da onda é de 29,7 e 9,96 kNm/m na direção contrária da propagação. Isso ocorre porque o ângulo de rotação na direção da propagação da onda é maior que o da direção inversa. Os momentos hidrodinâmicos (M_h) e de PTO (M_{PTO}) estão praticamente em fase oposta, como esperado.

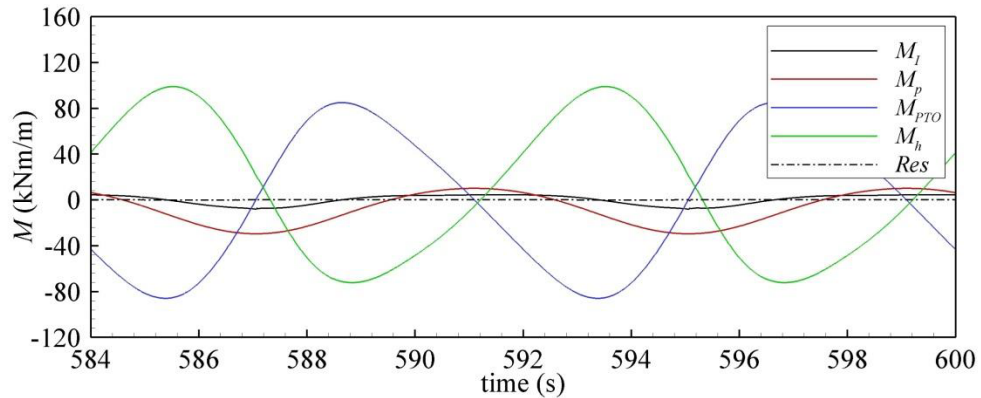


Figura 4.20: Séries temporais dos momentos que atuam na placa para $T = 8$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.

4.6 Análise da posição da placa

Nesta análise, a placa tem massa específica $\rho_p = 1400$ kg/m³ e o coeficiente de amortecimento é de $C_{PTO} = 900$ kNms/rad, que são os valores que apresentaram melhor performance do dispositivo. Durante as investigações referentes à mudança de posição da placa, o nível da rótula é mantido em $b = 2$ m e são testados diferentes valores de a : 2,0; 1,0; 0,0 e -1,0 m para diferentes períodos de onda de 6, 8, 10 e 12 s. O momento de inércia de massa I_p para cada caso é calculado segundo as equações (3.1) e (3.2).

Como forma de observar o desempenho para diferentes períodos, a figura 4.21 mostra curvas com a) potência média absorvida e b) os coeficientes de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R), para diferentes valores de a . A maior potência média absorvida ocorre

para $a = 1$ m, para todos os períodos, e os valores são semelhantes aos obtidos para $a = 0$ m, com exceção de $T = 6$ s. Para $a = 1$ m, $P_{abs} = 5,76$ e $3,51$ kW/m para $T = 6$ e 12 s, respectivamente. A menor potência média absorvida é obtida para $a = -1$ m, que é o caso em que a placa está na posição mais profunda, com $P_{abs} = 3,12$ e $2,68$ kW/m para $T = 6$ e 12 s, respectivamente. As curvas têm a tendência de reduzir a potência média absorvida com o aumento do período, exceto nos casos em que $a = 0$ e -1 m para $T = 6$ s, em que P_{abs} sofre uma redução significativa. As curvas da figura 4.21 a) apresentam comportamento semelhante, sendo reduzido o valor de potência com o aumento do período de onda. É importante destacar que os casos com $a = 0$ e -1 m são os que apresentam o galgamento da onda na extremidade da placa.

Na figura 4.21 b), observa-se que os coeficientes de transmissão (C_T) são muito maiores que os coeficientes de reflexão (C_R). Há um aumento suave do C_T e diminuição do C_R com o aumento do período de onda, os valores de C_R diminuem de $0,19$ a $0,07$ e os de C_T variam de $0,73$ a $0,89$ entre os períodos 6 e 12 s. O caso em que $a = -1$ m apresenta maiores valores de C_T , provavelmente pelo fato de a placa estar totalmente submersa.

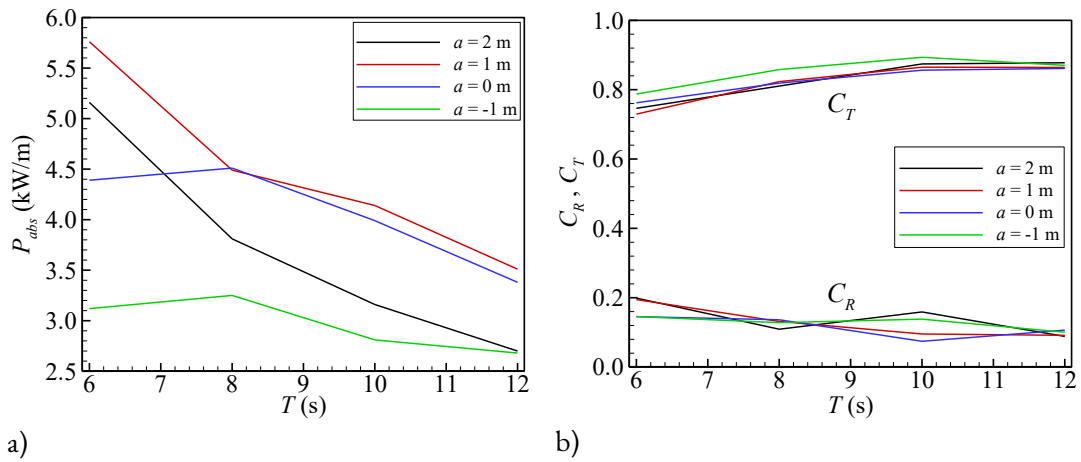


Figura 4.21: a) Potência média absorvida para diferentes períodos e diferentes posições da placa e b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R).

A figura 4.22 mostra as séries temporais da potência absorvida para cada posição da placa e períodos de onda. O tempo $t/T = 0$ se refere ao início de absorção de potência no sentido anti-horário ($P_{PTO} = 0$ kW/m), em que a placa se desloca no sentido da propagação de onda. A partir do próximo valor nulo de P_{PTO} , a potência absorvida ocorre no sentido contrário. Pode-se notar que quando $a = 1$ m, as amplitudes de potência absorvida são maiores em ambas direções de rotação do dispositivo, como observado nos valores da potência média absorvida na figura 4.21. Como foi observado nas análises anteriores, o tempo durante o qual a placa se move e absorve energia na direção da propagação da onda diminui à medida que o período da onda aumenta. Além disso, o pico de P_{PTO} durante a rotação da placa na direção da propagação da onda é maior do que na direção oposta e esta diferença aumenta com o aumento do período da onda. Para o caso de $a = 1$ m, os picos de P_{PTO} atingem valores $0,90$ e $1,97$ vezes maiores na direção da propagação da onda em relação à direção oposta para $T = 6$ e 12 s, respectivamente.

Já as relações entre as potências médias de absorção nesses casos são de 1,95 e 1,57, respectivamente.

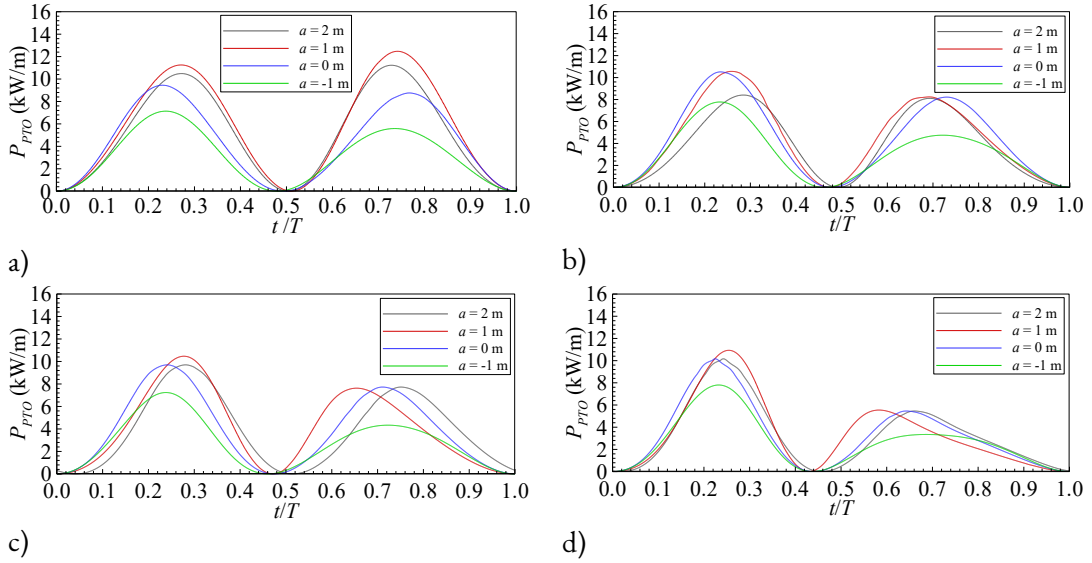


Figura 4.22: Séries temporais da potência P_{PTO} para cada posição da placa e ondas incidentes com períodos de (a) 6 s, (b) 8 s, (c) 10 s e (d) 12 s, para diferentes posições da placa.

Dando continuidade, foi analisado o ângulo de rotação máximo (θ_{max}), mínimo (θ_{min}) e a variação de ângulo ($\Delta\theta$) para os diferentes períodos de onda, conforme figura 4.23. O aumento do ângulo também ocorre com o aumento de T , exceto em $T = 8$ s para $a = 0$ m em que há uma leve queda do ângulo. Esse comportamento é imprevisível tendo em vista a dinâmica do comportamento fluido e estrutura. O menor valor de ângulo é $10,17^\circ$ em $T = 8$ s para $a = 0$ m e o maior valor é $17,87^\circ$ em $T = 12$ s para $a = 1$ m. A maior diferença angular ocorre para $a = 1$ m que também apresenta o maior ângulo de rotação máximo, independentemente do período da onda.

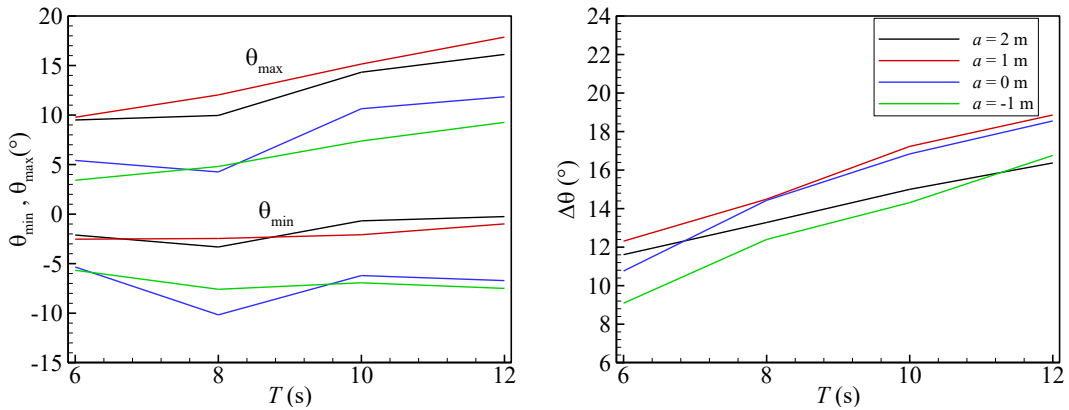


Figura 4.23: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de placa.

Para entender melhor o fenômeno de galgamento no desempenho do dispositivo, é feita uma comparação entre os campos de velocidade e de superfície livre para a posição da placa em que ocorre o galgamento, $a = 0$ m, para os períodos $T = 6$ e 12 s. Foram considerados os períodos de onda extremos da análise, $T = 6$ e 12 s. Na figura 4.24 tem-se representada a velocidade para um período de onda de 6 s em 8 instantes de tempo para $a = 0$ m. Os maiores valores de velocidade ocorrem acima da placa na qual a onda passa sobre o topo do dispositivo. Entretanto, ao observar a imagem 4.24 h), pode-se notar uma rebentação decorrente do galgamento da placa que tende a reduzir a potência absorvida. Quando observado a figura 4.25 que representa 8 instantes em um período de onda de 12 s, também se tem uma maior velocidade no topo da placa, mas não se encontra uma rebentação com formato da imagem 4.24 h). Inferindo-se que, para períodos maiores, existe um caminho preferencial do escoamento abaixo da placa, não gerando tanta perda de potência como ocorrida em períodos menores. Esse fato pode justificar o decréscimo da potência média ocorrido em 6 s para níveis de placa de $a = 0$ m e $a = -1$ m, ambos sujeitos a onda passante sobre o dispositivo. Provavelmente estes fatos ocorram porque o fluxo de energia se distribui de forma mais uniforme ao longo da profundidade à medida que aumenta o período (Dean e Dalrymple, 1991). Para o período de 6 s, o fluxo de energia localizado mais próximo à superfície tende a ser mais importante quando comparado com fluxo de energia para o período de 12 s, a posição da placa em $a = 0$ m (e -1 m também) não permitindo a captação da energia contida na zona da superfície livre. Além disso, a energia no fundo do canal é bem menor no caso do período 6 s que 12 s, o que agrava ainda a redução da potência.

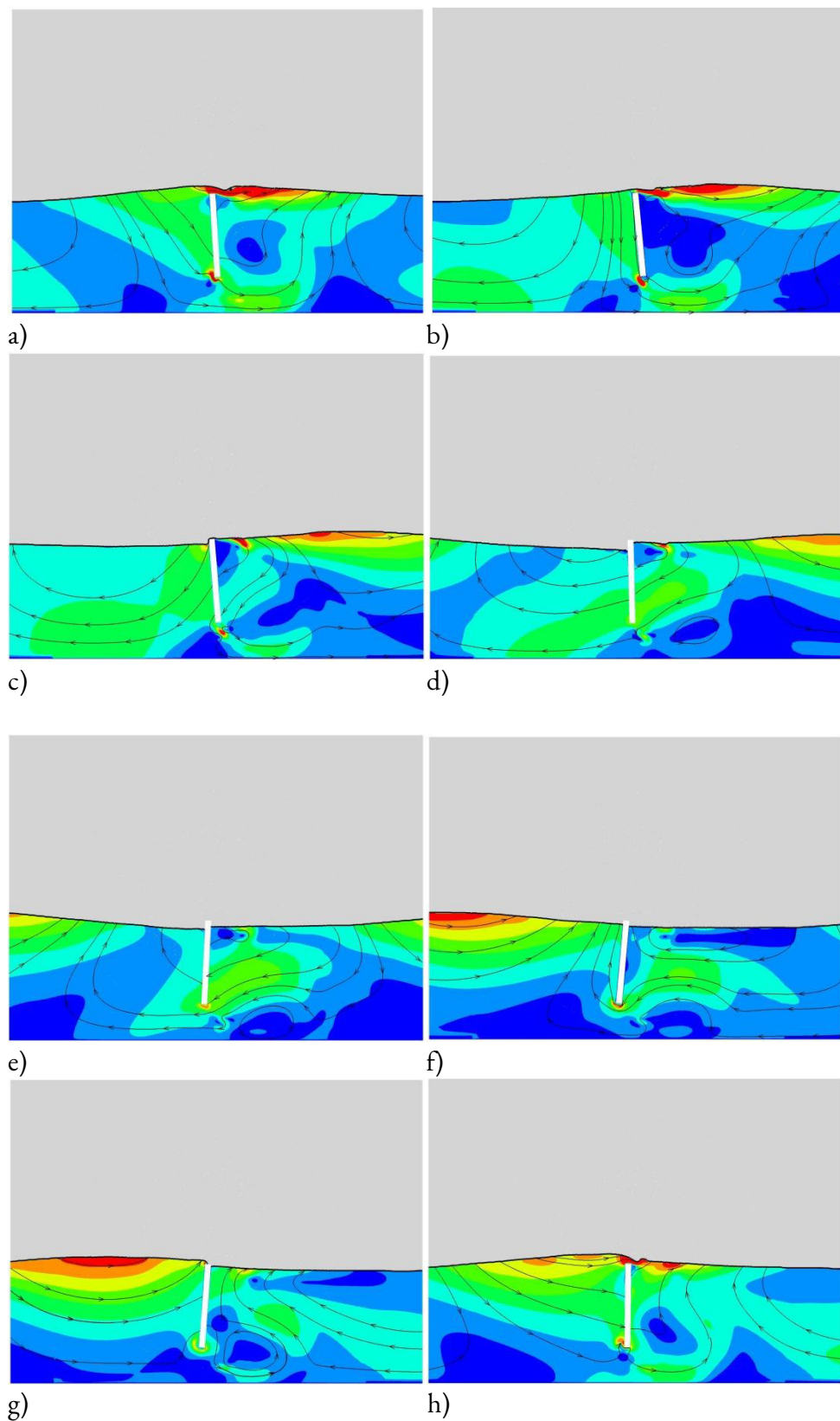


Figura 4.24: Campo de velocidade e comportamento do dispositivo para $a = 0$ m para uma onda incidente de $T = 6$ s. a) posição placa vertical ($T/8$); b) $T/4$; c) $3T/8$; d) $T/2$; e) $5T/8$; f) $3T/4$; g) $7T/8$; h) T .

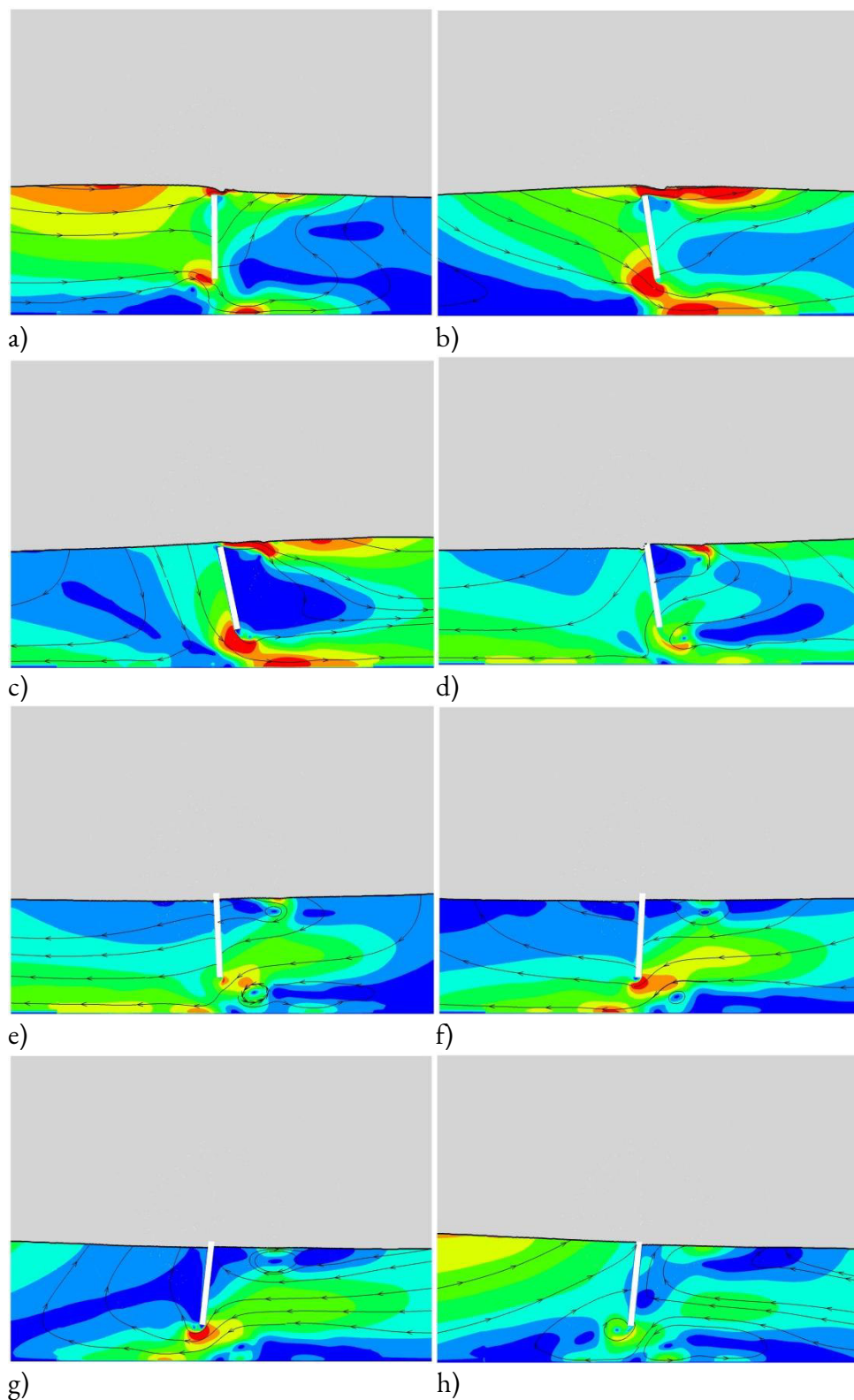


Figura 4.25: Campo de velocidade e comportamento do dispositivo para $a = 0$ m sobre onda incidente de $T = 12$ s. a) posição placa vertical ($T/8$); b) $T/4$; c) $3T/8$; d) $T/2$; e) $5T/8$; f) $3T/4$; g) $7T/8$; h) T .

4.7 Análise da posição da rótula

Nesta Seção a placa foi mantida com as características da Seção anterior 4.6, com coeficiente de amortecimento $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e a massa específica $\rho_p = 1400$ kg/m³. De forma a buscar a melhor potência absorvida pelo dispositivo, foram testados diferentes valores de posição da rótula b : 2, 3, 4, 5 m, mantendo a posição da placa em $a = 2$ m para períodos de 6, 8, 10 e 12 s. O momento de inércia de massa I_p para cada caso é calculado segundo as equações (3.1) e (3.2).

A figura 4.26 mostra as curvas a) da potência média absorvida e b) dos coeficientes de transmissão (C_T) e reflexão (C_R) para as diferentes posições da rótula. Pode-se perceber uma redução na potência (figura 4.26 a)) conforme aumenta o período de onda para diferentes níveis de rótula. Os maiores valores de potência absorvida ocorrem em $b = 3$ m, para todos os períodos, em que $P_{abs} = 5,16$ e $2,93$ kW/m para $T = 6$ e 12 s, respectivamente. A maior diferença percentual em relação ao caso com $b = 2$ m ocorre em $T = 12$ s (8,5 %), não sendo uma diferença expressiva. Em se tratando dos coeficientes C_T e C_R , figura 4.26 b), existem algumas variações com a posição da rótula que se pode destacar; a diferença máxima em $T = 6$ s ocorre entre $b = 2$ e 5 m ($C_R = 0,20$ e $0,11$, respectivamente), e a diferença máxima em $T = 12$ s ocorre entre $b = 3$ e 5 m ($C_R = 0,14$ e $0,08$, respectivamente). O coeficiente de transmissão da onda aumenta com o aumento de b e com o período da onda. As diferenças em $T = 6$ s são maiores ($C_T = 0,71$ e $0,81$ para $b = 2$ e 5 m, respectivamente) e diferenças menores são obtidas em $T = 12$ s ($C_T = 0,88$ e $0,90$ para $b = 2$ e 5 m, respectivamente). Além disso, pode-se notar que os coeficientes de transmissão possuem valores significativamente maiores que os coeficientes de reflexão. Esse fato indica que a instalação do dispositivo tipo placa pendular a frente a uma parede reflexiva pode permitir o aproveitamento de energia que se perde por transmissão.

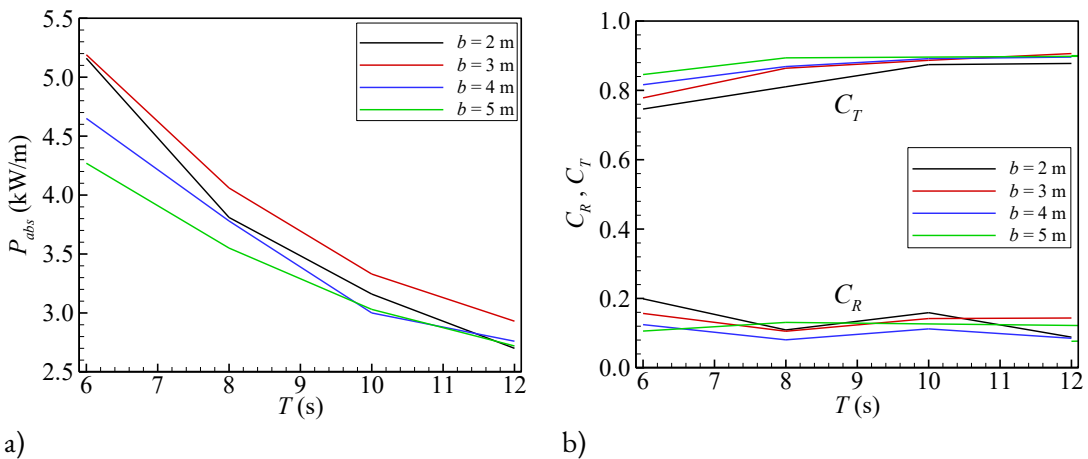


Figura 4.26: a) Potência média absorvida para diferentes períodos e diferentes posições da rótula. b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R).

A potência absorvida para um período em diferentes ondas incidente é apresentada na figura 4.27 para os níveis de rótula testados. Assim como na figura 4.22, a primeira

parte da série temporal entre valores nulos de potência corresponde à rotação da placa na direção da propagação da onda. Uma observação a ser destacada é quanto à redução de tempo de duração em que o dispositivo se move e absorve a potência na direção da propagação da onda conforme há o aumento do período da onda, reduzindo de aproximadamente $0,5 T$ para $0,4 T$. Observa-se também que o caso com $b = 3$ m apresenta maiores amplitudes de potência em ambas as direções da aba, exceto em $T = 8$ s, no qual a curva para $b = 4$ m possui maior amplitude no sentido contrário a propagação da onda. O maior valor de amplitude de potência foi encontrado em $T = 6$ s no sentido contrário a propagação, que é de 11,33 kW/m. Nos demais casos, a potência maior ocorre no sentido da onda. No caso de $b = 3$ m, os picos de P_{PTO} durante o movimento na direção de propagação da onda são 0,91 e 2,12 vezes os picos na direção inversa em $T = 6$ e 12 s, respectivamente, enquanto a relação entre as potências médias absorvidas são 1,98 e 3,15, respectivamente.

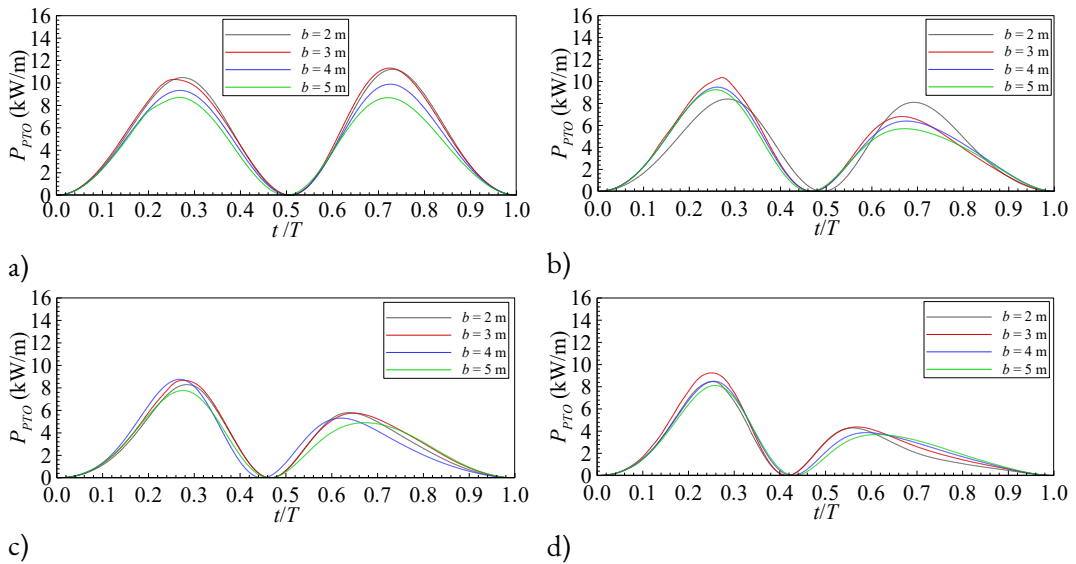


Figura 4.27: Séries temporais da potência de absorção para cada posição da placa e ondas incidentes com períodos de (a) 6 s, (b) 8 s, (c) 10 s e (d) 12 s, para diferentes posições da rótula.

Da mesma forma, foram analisados os ângulos θ_{min} e θ_{max} e a variação de ângulo ($\Delta\theta$) para os diferentes períodos de onda conforme figura 4.28. Em geral, θ_{min} e θ_{max} aumentam com o aumento do período de onda, exceto em $T = 8$ s para $b = 2, 3$ e 4 m onde se nota uma suave redução. Também é notório a crescente da variação de ângulo com o aumento de T . A variação de ângulo com o período é similar para os diferentes b , a maior variação de ângulo sendo obtida para $b = 3$ m, e as diferenças entre as curvas de b são inferiores a 2° . Os maiores valores de θ_{min} e θ_{max} são $-4,35^\circ$ e $16,1^\circ$, respectivamente para $T = 6$ e 12 s.

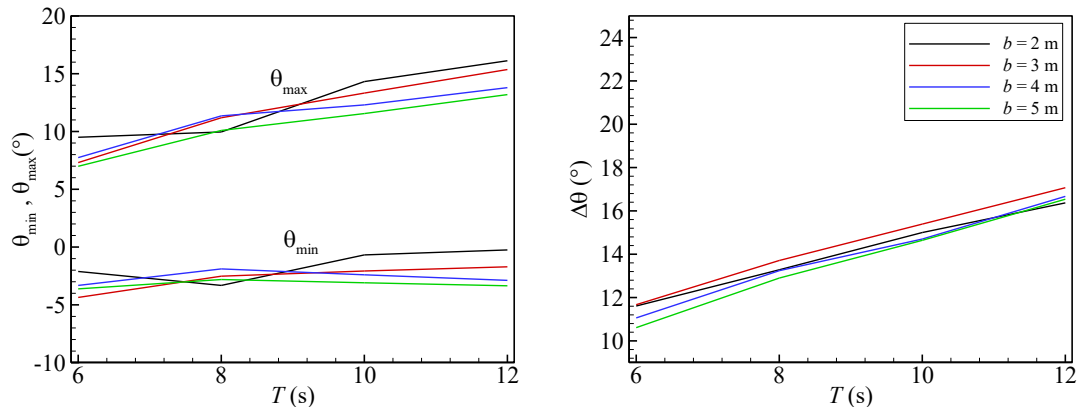


Figura 4.28: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de rótula.

4.8 Estudo de caso com as posições da placa e da rótula de melhor performance

Nesta sessão foi investigada a combinação da melhor posição da placa $a = 1$ m e melhor posição da rótula $b = 3$ m. O objetivo foi entender se uma variável possuía maior influência do que outra no desempenho do dispositivo e na potência absorvida. Assim como na Seção 4.6 e 4.7, foram utilizados $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e massa específica $\rho_p = 1400$ kg/m³. São apresentados na tabela 4.5 os valores de potência média absorvida para $T = 6, 8, 10$ e 12 s para a combinação $a = 1$ m e $b = 3$ m e a comparação com as melhores combinações obtidas na Seção 4.6, $a = 1$ m e $b = 2$ m, e a Seção 4.7, $a = 2$ m e $b = 3$ m. Pode-se observar uma melhoria significativa na potência quando comparada à encontrada na Seção 4.7, que trata da melhor posição da rótula encontrada em $a = 2$ m e $b = 3$ m. Entretanto, quando comparado o resultado com a Seção 4.6, que apresenta a melhor posição para a placa, $a = 1$ m e $b = 2$ m, a potência média absorvida foi significativamente menor para $T = 6$ s mais da mesma ordem de grandeza para os outros períodos, com uma melhoria muito pequena de cerca de 0,5 %, por exemplo, para $T = 12$ s.

Tabela 4.5: Comparação das potências médias absorvidas (P_{abs}) para diferentes períodos de onda em diferentes posições de placa e rótula.

Período $T(s)$	$P_{abs}(kW/m)$ $a = 1$ m $b = 2$ m	$P_{abs}(kW/m)$ $a = 2$ m $b = 3$ m	$P_{abs}(kW/m)$ $a = 1$ m $b = 3$ m
6	5,76	5,20	5,33
8	4,49	4,06	4,54
10	4,14	3,33	4,06
12	3,51	2,93	3,53

A figura 4.29 mostra a) a potência média absorvida e b) os coeficientes de transmissão e reflexão para o caso de melhor resultado da Seção 4.6, 4.7 e da combinação

de ambos níveis. A potência decresce com o aumento do período. Além disso, a curva em $a = 1$ m e $b = 2$ m (melhores resultados da Secção 4.6) apresentou as melhores potências médias absorvidas comparadas com as obtidas na Secção 4.7, $a = 2$ m e $b = 3$ m, e com as da configuração $a = 1$ m e $b = 3$ m, com um aumento significativo da potência média absorvida para $T = 6$ s. Quando analisado a figura 4.29 b), nota-se que o coeficiente de transmissão cresce com o aumento do período enquanto que o coeficiente de reflexão decresce com aumento do período, exceto para o caso de $a = 2$ m e $b = 3$ m, em que houve um leve aumento para os dois períodos 10 e 12 s. A maior diferença encontrada no C_T é entre a posição de $a = 2$ m e $b = 3$ m e $a = 1$ m e $b = 2$ m com valor de 0,055.

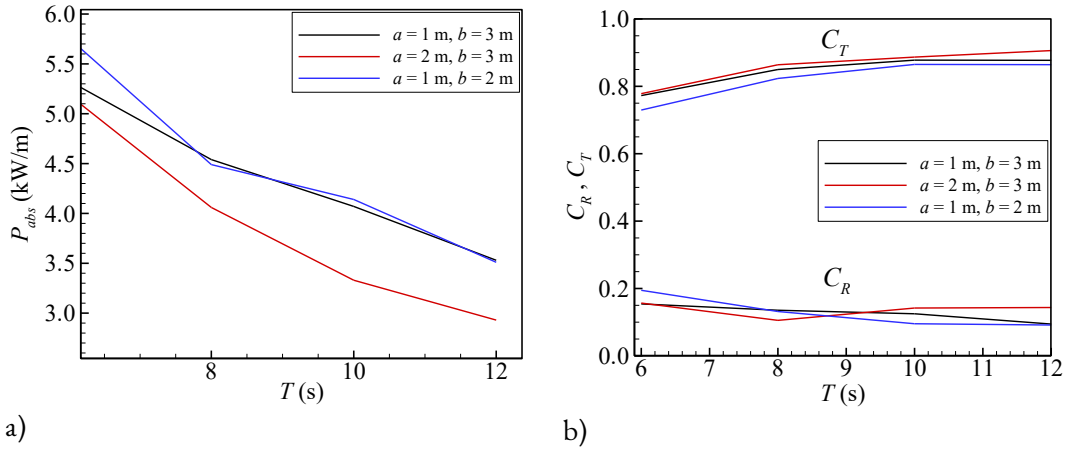


Figura 4.29: a) Potência média absorvida b) coeficiente de transmissão (C_T) e de reflexão (C_R) para diferentes períodos e diferentes posições da rótula e de placa.

Ao observar os resultados obtidos para o ângulo e variação angular, figura 4.30, obteve-se resultado similar às demais análises. Quando observado o ângulo de rotação máximo (θ_{max}) e mínimo (θ_{min}), nota-se um crescimento com o aumento do período de onda, o ângulo no sentido da propagação de onda, θ_{max} , possui valor em módulo superior ao ângulo no sentido contrário da propagação. O resultado de $a = 1$ m e $b = 2$ m apresentou maior diferença e maior $\Delta\theta$.

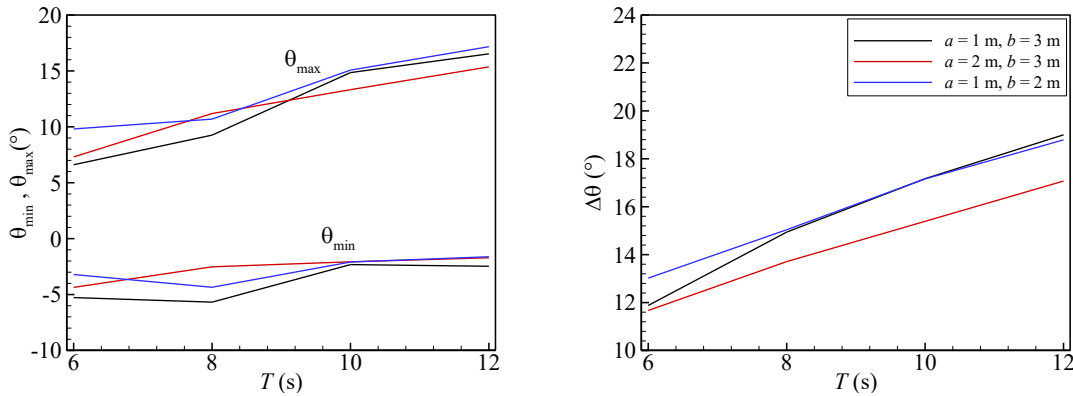


Figura 4.30: Ângulo de rotação e diferença angular para diferentes posições de rótula e de placa.

5 | Conclusões

O presente trabalho trata da análise da performance de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo placa oscilante rotulada na parte superior (placa pendular) inserida em um canal. Para a construção do domínio computacional bidimensional foi utilizado o software Workbench e o ANSYS FLUENT®, por meio do método dos volumes finitos, para a resolução das equações governantes do problema proposto. A metodologia de *sliding mesh* foi aplicada para considerar o movimento da placa causado pela ação de uma onda incidente regular. O estudo de caso consiste em uma placa de 7 m de comprimento e 0,5 m de espessura inserida em um canal de 10 m de profundidade.

Primeiramente, foram realizadas a verificação da propagação da onda no canal numérico e a validação da interação onda-estrutura em corpos flutuantes com o grau de liberdade de rotação no plano. Este último se baseou no experimento de Jung (2014) em escala reduzida, que consiste em uma boia com movimento de rotação livre sujeito à ação de uma onda incidente. A série temporal da rotação da boia foi comparada com a do experimento, mostrando resultados muito similares.

Após, com a placa inserida no canal, foi analisada a influência de diferentes coeficientes de amortecimento viscoso usados no cálculo do momento imposto pelo sistema hidráulico na placa, sendo eles de 500, 700, 900 e 1000 kNms/rad para períodos de onda de 6, 8, 10 e 12 s e altura de onda de 1,5 m. Como resultado, o coeficiente de amortecimento que proporcionou a maior potência absorvida para períodos de 6 e 8 s foi de 900 kNms/rad e para períodos de 10 e 12 s foi de 700 kNms/rad. Concluiu-se que os coeficientes e amortecimento que proporcionam o melhor desempenho do dispositivo está entre 700 e 900 kNms/rad.

A seguir, foi investigada a influência da massa específica na performance do dispositivo inserido em um canal. As análises foram feitas para massas específicas de 600, 1000, 1400, 1800 e 2200 kg/m³, considerando uma onda incidente de período de 12 s e altura de 1,5 m e um coeficiente de amortecimento de 900 kNms/rad. Observou-se que a potência média absorvida pelo dispositivo aumenta até a massa específica de 1400 kg/m³ e que, acima deste valor, a potência média se estabiliza em valores similares. Além disso, valores abaixo de 1400 kg/m³ proporcionam uma oscilação assimétrica significativa, fazendo com que o eixo médio da placa fique distante da direção vertical. Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a massa específica mais adequada é de 1400 kg/m³, pois é aquela que proporciona uma potência absorvida dentre as maiores com menor peso da placa.

No seguimento deste trabalho, foi analisado a influência da posição vertical da placa e da posição da rótula na performance do dispositivo inserido em um canal sujeito às ondas incidentes de períodos de 6, 8, 10 e 12 s e altura de 1,5 m. Para isso, ao investigar a posição da placa, foi mantido a rótula à 2 m de distância da superfície livre e variando

a posição da placa em $a = -1, 0, 1$ e 2 m. Nessa análise, a posição de $a = 1$ m foi a que apresentou melhor potência e melhor variação de ângulo do dispositivo. Posteriormente, analisando a posição da rótula, a posição da placa se manteve a 2 m da superfície livre e a posição da rótula foi variada em $b = 2, 3, 4$ e 5 m. Nessa investigação o melhor resultado encontrado foi na posição de $b = 3$ m e $a = 2$ m.

Tendo em vista os dois resultados que apresentaram melhor performance, como forma de identificar se uma variável possuía maior influência sobre a placa, juntou-se ambos resultados e foi testado, via simulação numérica, o caso de $a = 1$ m e $b = 3$ m. Nesta situação a potência encontrada foi maior do que a melhor situação em que se variou a posição da rótula, mas inferior ao resultado encontrado quando se variou a posição da placa. Assim, entende-se que a melhor performance ocorre quando o dispositivo ocupa a posição de $a = 1$ m e $b = 2$ m.

Embora diversos casos tenham sido investigados para entender o comportamento do dispositivo de placa pendular, este trabalho desencadeia uma série de outras investigações que podem ser realizadas futuramente. Destacam-se as análises das influências da profundidade do canal, do comprimento e do formato da placa na performance do dispositivo. Também, propor uma lei de resposta do sistema hidráulico mais próxima a realidade para estes dispositivos, incluindo todos os efeitos do sistema. Além disso, pelo fato de o coeficiente de transmissão de onda ter sido muito alto para todos os casos, sugere-se colocar o dispositivo à frente de uma parede vertical com a expectativa de se obter uma maior potência absorvida. Adicionalmente, é importante que se entenda o efeito tridimensional da ação das ondas sobre o dispositivo e, assim, propor uma análise com o dispositivo em um tanque numérico, cujos efeitos de difração devido à influência das bordas sejam considerados. Por último, analisar a resposta do dispositivo devido à presença de ondas incidentes irregulares, que são as condições mais próximas da realidade.

Concluindo, entende-se que esta dissertação permitiu compreender o comportamento de uma placa pendular em um canal e a influência dos principais parâmetros envolvidos no processo de captação de energia das ondas. As análises apresentadas neste trabalho podem auxiliar a desenvolver futuros projetos destes dispositivos para que se tornem mais eficientes.

Referências

- Aderinto, T. e H. Li (2018). “Ocean wave energy converters: status and challenges”. Em: *Energies* 11, 1250.
- Aderinto, T. e H. Li (2019). “Review on Power Performance and Efficiency of Wave Energy Converters”. Em: *Energy* 12, 4329.
- Ahmed, A., J. Mi, J. Huang, R. Datla, K. Connington, L. Zuo, e M.R. Hajj (2024). “Power capture and power take-off load of a self-balanced dual-flap oscillating surge wave energy converter”. Em: *Energy* 291, 130431.
- Alves, M., A. Brito-Melo, e A.J.N.A. Sarmento (2002). “Numerical modelling of the pendulum ocean wave power converter using panel method”. Em: *Proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan*.
- Amini, E., M. Nasiri, N.S. Pargoo, Z. Mozhgani, D. Golbaz, M. Baniesmaeil, M.M. Nezhad, M. Neshat, D.A. Garcia, e G. Sylaios (2023). “Design optimization of ocean renewable energy converter using a combined Bi-level metaheuristic approach”. Em: *Energy Conversion and Management: X*, 100371.
- ANSYS FLUENT. Version 6.3.16 – User’s Guide, ANSYS Inc. 2007.
- ANSYS FLUENT. Theory Guide, ANSYS Inc. 2022.
- AW Energy Oy. “WaveRoller-AW Energy Oy”. Disponível em: < <https://aw-energy.com/waveroller/> >. Acesso em 01 jul. 2023.
- Benites-Munoz, D., L. Huang, E. Anderlini, e J. Marín-Lopez (2020). “Hydrodynamic Modelling of An Oscillating Wave Surge Converter Including Power Take-Off”. Em: *J. Mar. Sci. Eng.* 8(10), 771.
- Benites-Munoz, D., L. Huang, e G. Thomas (2024). “Optimal array arrangement of oscillating wave surge converters: An analysis based on three devices”. Em: *Renewable Energy* 222, 119825.
- BioPower Systems Pty. Ltd., *bioWAVE*, www.biopowersystems.com. Acesso em 07 mar 2025.
- Bostrom, C., B. Ekegard, R. WaterS, M. Eriksson, e M. Leijon (2013). “Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit”. Em: *IEEE Journal of Ocean Eng.* 38, pp. 255–262.
- Brito, M., R. Canelas, O. García-Feal, J. Domínguez, A.J.C. Crespo, R. Ferreira, M.G. Neves, e L.A. Teixeira (2020). “Numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints”. Em: *Renew. Energy* 146, pp. 2024-2043.
- Brown, S.A., D.M. Greaves, V. Magar, e D.C. Conley (2016). “Evaluation of turbulence closure models under spilling and plunging breakers in the surf zone”. Em: *Coastal Engineering* 114, pp. 177–193.

- Calderer, A., K. Seokkoo, e F. Sotiropoulos (2014). "Level set immersed boundary method for coupled simulation of air/water interaction with complex floating structures". Em: *Journal of Computational Physics* 277, pp. 201-227.
- Cameron, L., R. Doherty, A. Henry, K. Doherty, J. Hoff, D. Kaye, S. Naylor, S. Bourdier, e T. Whittaker (2010). "Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter". Em: *3rd International Conference on Ocean Energy*, pp. 1-12.
- Causon, D.M., D.M. Ingram, C.G. Mingham, G. Yang, e R.V. Pearson (2000). "Calculation of shallow water flowa using a Cartesian cut cell approach". Em: *Advances in Water Resources* 23, pp. 545-562.
- Chakrabarti, S.K. (1987). *Hydrodynamics of offshore structures: Mathematical theory and its applications in structures*. United States.
- Chan, W.M. (2009). "Overset grid technology development at NASA Ames Research Center". Em: *Computers & Fluids* 38, pp. 496-503.
- Cheng, Y., C. Ji, G. Zhai, e Z. Ma (2020). "Fully nonlinear simulation of wave-current interaction with an oscillating wave surge converter". Em: *Journal of Marine Science and Technology* 1, pp. 93-110.
- Cruz, J. M. B. P. E. e A. J. N. A. Sarmiento (2004). *Energia das ondas. Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*, Instituto do Ambiente, Alfragide, Portugal.
- Curto, D., A. Viola, V. Franzitta, M. Trapanese, e F. Cardona (2020). "A New Solution for Sea Wave Energy Harvesting, the Proposal of an Ironless Linear Generator". Em: *J. Mar. Sci. Eng.* 8, 93.
- Curto, D., V. Franzitta, e A. Guercio (2021). "Sea wave energy. A review of the current technologies and perspectives". Em: *Energies* 14, 6604.
- Dean, R. G. e R.A. Dalrymple (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World scientific publishing Co. Pte. Ltd., London.
- Devolver, B., P. Trough, e P. Rauwoens (2018). "Performance of a buoyancy-modified $k-\omega$ and $k-\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®". Em: *Coastal Engineering* 138, pp. 49-65.
- Didier, E., P.R.F. Teixeira, e M.G. Neves (2017). "Um tanque de ondas numéricas 3D para estudos de engenharia costeira". Em: *Defect and Diffusion Forum* 372, 1-10.
- Didier, E. e P.R.F. Teixeira (2022). "Validation and Comparisons of Methodologies Implemented in a RANS-VoF Numerical Model for Applications to Coastal Structures". Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 10(9), 1298.
- Didier, E. e P.R.F. Teixeira (2023). "A RANS-based Numerical Model to Simulate Overtopping-type Wave Energy Converters Integrated into Breakwaters". Em: *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 33(4), pp. 420-427.
- Didier, E. e P.R.F. Teixeira (2024). "Numerical analysis of 3D hydrodynamics and performance of an array of oscillating water column wave energy converters integrated into a vertical breakwater". Em: *Renew Energ* 225(4), 120297.
- Douglass, S.L. e J. Krolak (2008). "Highways in the Coastal Environment". Em: *Hydraulic Engineering Circular* 25. Contract.

- Elhanafi, A., A. Fleming, Z. Leong, e G. Macfarlane (2016). "Effect of RANS-based turbulence models on nonlinear wave generation in a two-phase numerical wave tank". Em: *Progress in Computational Fluid Dynamics* 17 (3), pp. 141–158.
- Empresa de pesquisa energética. Matriz energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 28 mai.2023.
- Evans, D.V. e R. Porter (1996). "Hydrodynamic characteristics of a thin rolling plate in finite depth of water". Em: *Appl. Ocean Res.* 18, pp. 215–228.
- Falcão, A.F.O. (2010). "Wave energy utilization: A review of the technologies". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 899-918.
- Falnes, J. (2002). "Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction". Cambridge University Press, 275p.
- Folley, M., T.W.T. Whittaker, e J. Hoff (2007a). "The design of small seabed-mounted bottom hinged wave energy converters". Em: 7th European Wave and Tidal energy conference, Porto.
- Folley, M., T.J.T. Whittaker, e A. Henry, (2007b). "The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter". Em: *Ocean Engineering* 34, pp. 1265-1274.
- Folley, M., T.J.T. Whittaker, e M. Osterried (2004). "The oscillating wave surge converter". Em: ISOPE, Toulon, France.
- Folley, M. e T.J.T. Whittaker (2009). "Analysis of the nearshore wave energy resource". Em: *Renew. Energy* 34, pp. 1709–1715.
- Garrison, T. (2009). "Essentials of Oceanography". Orange Coast College, University of Southern California, 5 ed.
- Gaspar, A.L., P.R.F. Teixeira, e E. Didier (2020). "Numerical analysis of the performance of two onshore oscillating water column wave energy converters at different chamber wall slopes". Em: *Ocean Engineering* 201, 107119.
- Ghasemi, A., M. Anbarsooz, A. Malvandi, e F. Hedayati (2017). "A nonlinear computational modeling of wave energy converters: A tethered point absorber and a bottom-hinged flap device". Em: *Renewable Energy* 103, pp. 774-785.
- Gunawardane, S., C. Kankanamge, e T. Watabe (2016). "Study on the performance of the "pendulum" wave energy converter in an array configuration". Em: *Energies* 9, 282.
- Güths, A.K., P.R.F. Teixeira, e E. Didier (2022). "A novel geometry of an onshore Oscillating Water Column wave energy converter". Em: *Renewable Energy* 201, pp. 938–949.
- Henriques, J.C.C., J.J. Cândido, M.T. Pontes, e A.F.O. Falcão (2013). "Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal". Em: *Energy* 63, pp. 52-60.
- Henry, A., O. Kimmoun, J. Nicholson, G. Dupont, Y. Wei, e F. Dias (2014). "A two dimensional experimental investigation of slamming of an oscillating wave surge

- converter”. Em: Proceedings of the 24th international offshore and polar engineering conference, Busan Korea.
- Hirt, C.W. e B.D. Nichols (1981). “Volume of Fluid (VoF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”. Em J. Comput. Phys. 39.1, pp. 201–225.
- Hong, Y., R. Waters, C. Bostrom, M. Eriksson, e J. Engstrom (2014). “Review on electrical control strategies for wave energy converting systems”. Em: Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 329-342.
- Jung, K.H. (2004). “Experimental study on rectangular barge in beam sea”. Tese de Doutorado. Texas A&M University.
- Khojasteh, D., R. Kamali, A. Beyene, e G. Iglesias (2018). “Assessment of renewable energy resources in Iran; with a focus on wave and tidal energy”. Em: Renew. Sustain. Energy Rev. 81, pp. 2992–3005.
- Kobayashi, H., C.-K. Rhee, e K. Maruyama (2013). “Avaliação do Sistema de Geração de Energia de Ondas do Tipo Pêndulo (Leme de Ondas) para Ondas Irregulares”. Em: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Engenharia Costeira).
- Kondo, H., T. Watabe, K. Okuda, T. Matsuda, e Y. Dote (1987). “Synthesis of wave power utilization study 1976-1986 at muroran institute of technology”. Annual report of muroran institute of technology, 37, pp. 251-266
- Lagoun, M.S., A. Benalia, e M.E.H. Benbouzid (2010). “Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status”. Em: Conferência Internacional de Energia IEEE 2010, Fance, pp. 636-641.
- Lin, P. e P.L.-F. Liu (1998). “A numerical study of breaking waves in the surf zone”. Em: J. Fluid Mech. 359, pp. 239-264.
- Lisboa, R.C., P.R.F. Teixeira, e C.J. Fortes (2017). “Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil”. Em: Energy 121, pp.176-184.
- Lisboa, R.C., P.R.F. Teixeira, e E. Didier (2017). “Regular and Irregular Wave Propagation Analysis in a Flume with Numerical Beach Using a Navier-Stokes Based Model”. Em: Defect Diffus. Forum 372, pp. 81–90.
- Lopes, M.F.P., J.C.C. Henriques, M.C. Lopes, L.M.C. Gato, e A. Dente (2009). “Design of a non-linear power take-off simulator for model testing of rotating wave energy devices”. Em: 8th European wave energy and tidal energy conference, Uppsala, pp. 715-721.
- Ma, Z.H., L. Qian, P.J. Martínez-Ferrer, D.M. Causon, C.G. Mingham, e W. Bai (2018). “An overset mesh based multiphase flow solver for water entry problems”. Em: Computers and Fluids 172, pp. 689-705.
- Maliska, C. (2012). Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ª Edição. LTC Editora.
- Mansard, E.P.D. (1976). “Contribution a l'etude experimentale de la propagation de la houle & travers des obstacles en forme de diaphragme”. Tese de Doutorado, Grenoble.

- Mansard, E.P.D. e E.R. Funke (1980). "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method". Hydraulics Laboratory Technical Report LTRHY-72, National Research Council.
- Marcou, C. (1969). "Contribution experimentale a l'étude de la houle complexe du laboratoire". Tese de Doutorado, Grenoble.
- Mendonça, A., J. Dias, E. Didier, C.J.E.M. Fortes, M.G. Neves, M.T. Reis, J.M.P. Conde, P. Poseiro, e P.R.F. Teixeira (2018). "An Integrated Tool for Modelling OWC-WECs in Vertical Breakwaters: Preliminary Developments". Em: *J. Hydro-environ Res.* 19, pp. 198–213.
- Menter, F.R. (1994). "Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". Em: *AIAA J.* 32(8), pp. 1598–1605.
- Moretti, G., M. Fontana, e R. Vertechy (2015). "Model-based design and optimization of a dielectric elastomer power take-off for oscillating wave surge energy converters". Em: *Soft Mechatronics* 50, pp. 2797-2813.
- Neves, M.G., E. Didier, M. Brito, e M. Clavero (2021). "Numerical and physical modelling of wave overtopping on a smooth impermeable dike with promenade under strong incident waves". Em: *J. Mar. Sci. Eng.* 9(8), 865.
- Noad, I. e R. Porter (2015). "Wave energy absorption by submerged flap-type oscillating wave surge converters". Em: *Proceedings of the 11th European wave and tidal energy conference*, Nantes.
- Pereira, Y.C., P.R.F. Teixeira, e E. Didier (2025). "Analysis of the performance of two moving mesh methods applied to semi-submerged structures with a rotational DOF". Em: *SeatifiC Journal* 5.1, Article 2.
- Renzi, E. e F. Dias (2012). "Relations for a periodic array of flap-type wave energy converters". Em: *Appl. Ocean Res.* 39, pp. 31–39.
- Renzi, E. e F. Dias (2013). "Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean". Em: *Eur. J. Mech. B/Fluids* 41, pp. 1–10.
- Rusu, L. e E. Rusu (2021). "Evaluation of the worldwide wave energy distribution based on ERA5 data and altimeter measurements". Em: *Energies* 14, 394.
- Saket, A. e A. Etemad-Shahidi (2012). "Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran". Em: *Renew. Energy* 40, pp. 90–97.
- Schmitt, P. e B. Elsaesser (2015). "On the use of OpenFOAM to model oscillating wave surge converters". Em: *Ocean Engineering* 108, pp. 98-104.
- Schmitt, P., S. Bourdier, D. Sarkar, E. Renzi, F. Dias, K. Doherty, T. Whittaker, e J. van't Hoff (2012). "Hydrodynamic loading on a bottom hinged oscillating wave surge converter". Em: *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), pp. 550–557.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill, New York.
- Shabana, A. (2019). *Theory of vibration*. Chicago: Springer.

- Sharma, N. e N.A.Patankar (2005). "A fast computation technique for the direct numerical simulation of rigid particle flows". Em: *Jouranl of Computational Physics* 205, pp. 439-457.
- Teixeira, P.R.F., D.P. Davyt, E. Didier, e R. Ramalhais (2013). "Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations". Em: *Energy* 61, pp. 513-530.
- Teixeira, P.R.F., R.A.A.C. Gonçalves, e E. Didier (2020). "A RANS-VoF numerical model to analyze the output power of an OWC-WEC equipped with Wells and Impulse turbines in a hypothetical sea-state". Em: *China Ocean Engineering* 34(6), pp. 760–771.
- Teixeira, P.R.F. e E. Didier (2021). "Numerical analysis of the response of an onshore oscillating water column wave energy converter to random waves". Em: *Energy* 220, 119719.
- Teixeira, P.R.F. e E. Didier (2023). "Numerical analysis of performance of an oscillating water column wave energy converter inserted into a composite breakwater with rubble mound foundation". Em: *Ocean engineering* 278, 114421.
- Wang, L., J. Isberg, e E. Tedeschi (2018). "Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, pp. 366-379.
- Watabe, T. (2007). "Utilization of the Ocean Wave Energy". Fuji Print Company Ltd.: Muroran, Japan.
- Wei, Y., A. Rafiee, A. Henry, e F. Dias (2015). "Wave interaction with an oscillating wave surge converter, Part I: Viscous effects". Em: *Ocean Engineering* 104, pp. 185-203.
- Whittaker, T., D. Collier, M. Folley, M. Osterried, A. Henry, e M. Crowley (2007). "The development of Oyster – A shallow water surging wave energy converter". Em: 7th European Wave and Tidal energy conference, Porto, 2007.
- Whittaker, T. e M. Folley (2009). "Analysis of the nearshore wave energy resource". Em: *Renewable Energy* 34, pp. 1709–1715.
- Whittaker, T. e M. Folley (2012). "Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster". Em: *Philosophical Transaction of the Royal Society* 370, pp. 345–364.
- Wiener, G.F., P.R.F. Teixeira, e E. Didier (2022). "Numerical Evaluation of Optimal Sizes of Wells Turbine and Chamber of a Cluster of Oscillating Water Columns Integrated into a Breakwater on the Southern Brazilian Coast". Em: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 148(4), 04022009.
- Wimalaratna, Y.P., A. Hassan, H.N. Afrouzi, K. Mehranzamir, J. Ahmed, B.M. Siddique, e S.C. Liew (2022). "Comprehensive review on the feasibility of developing wave energy as a renewable energy resource in Australia". Em: *Clean Energy Syst.* 3, 100021.
- Windt, C., J. Davidson, e J.V. Ringwood (2018). "High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid mechanics-based

- numerical wave tanks”. Em: Renewable and Sustainable Energy Reviews 93, pp. 601-630.
- Windt, C., J. Davidson, e J.V. Ringwood (2021). “Numerical analysis of the hydrodynamic scaling effects for the Wavestar wave energy converter”. Em: Journal of Fluids and Structures 105, 103328.
- Zhan, J.-M., Q. Fan, W.-Q. Hu, e Y.-J. Gong (2020). “Hybrid Realizable $\hat{\epsilon}$ - ϕ /Laminar Method in the Application of 3D Heaving OWCs”. Em: Renewable Energy 155, pp. 691–702.
- Zhang, Y., Y. Li, W. Zhu, Q. Xu, X. Dong, e Y. Meng (2024). “Hydrodynamic performance of a periodic array of flap-type devices installed on the stepped bottom topography in the front of the coastal wall”. Em: Physics of FLuids 36, 027117.

Apêndice A: Campo de velocidade e linhas de corrente para diferentes períodos de onda

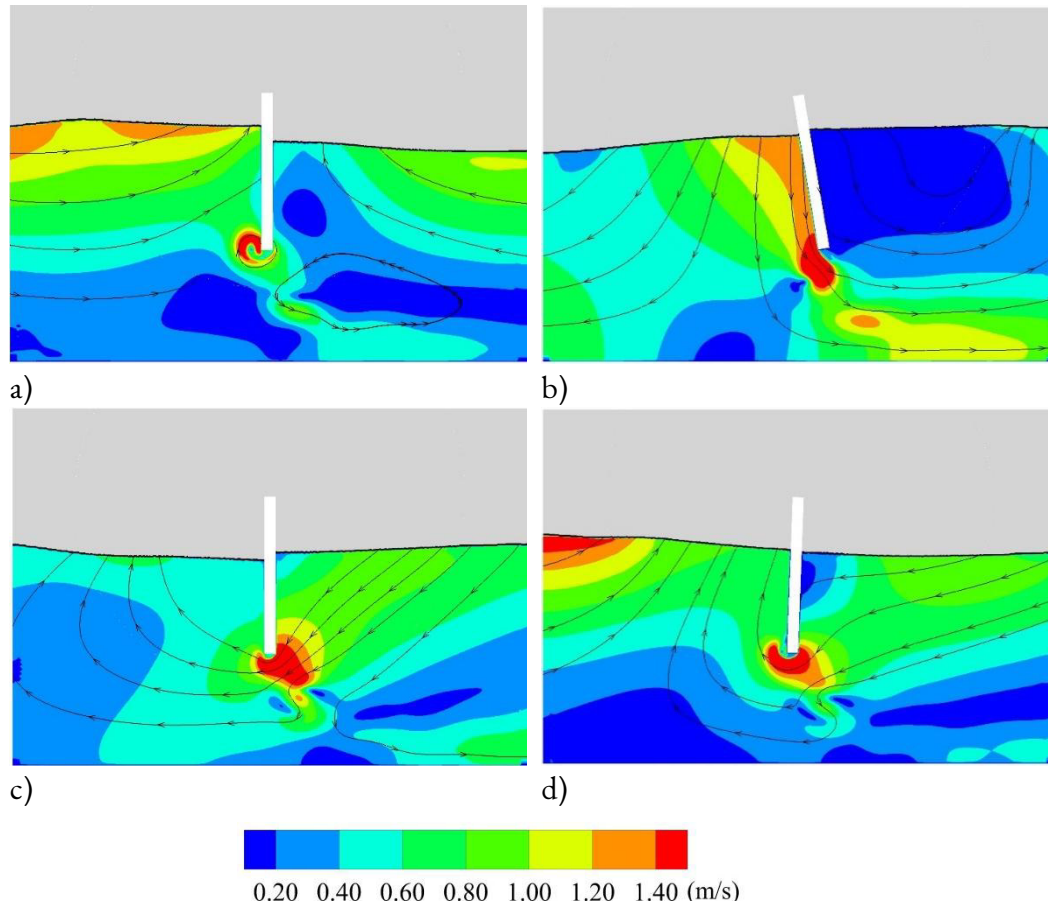


Figura 5.1: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 6$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

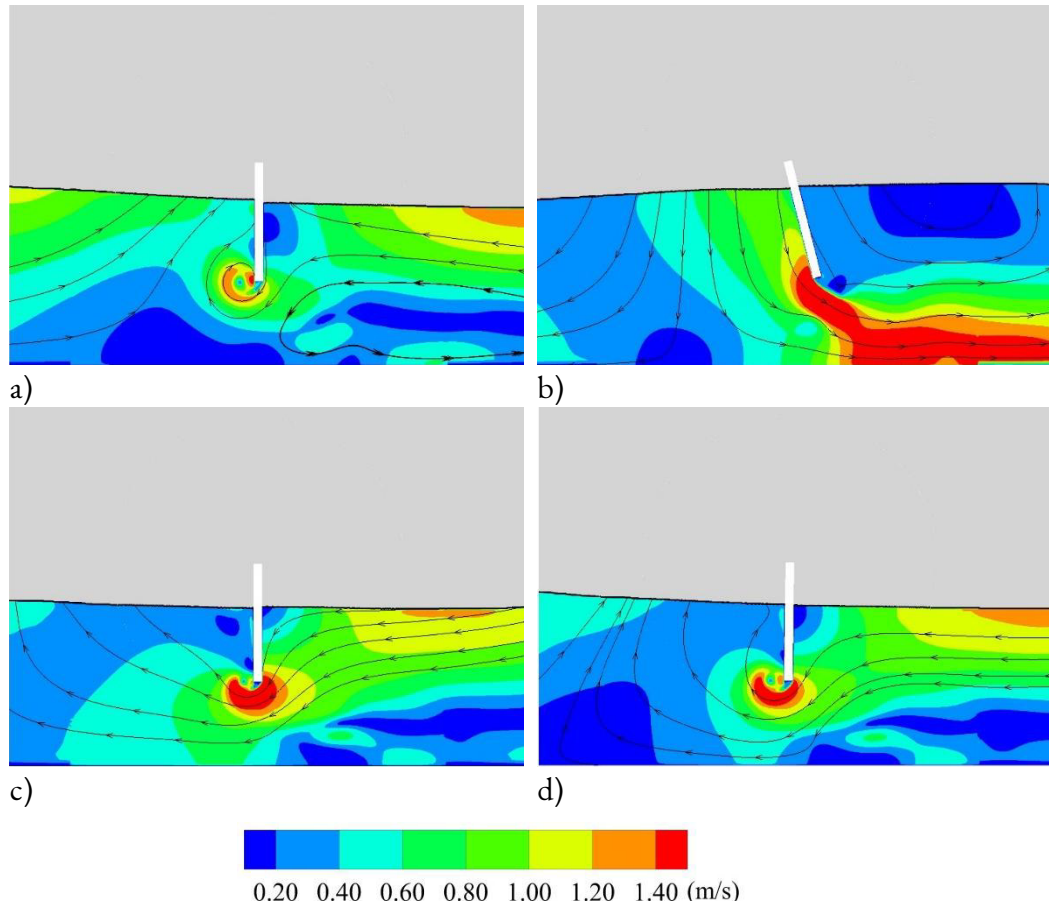


Figura 5.2: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 10$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 400\text{kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

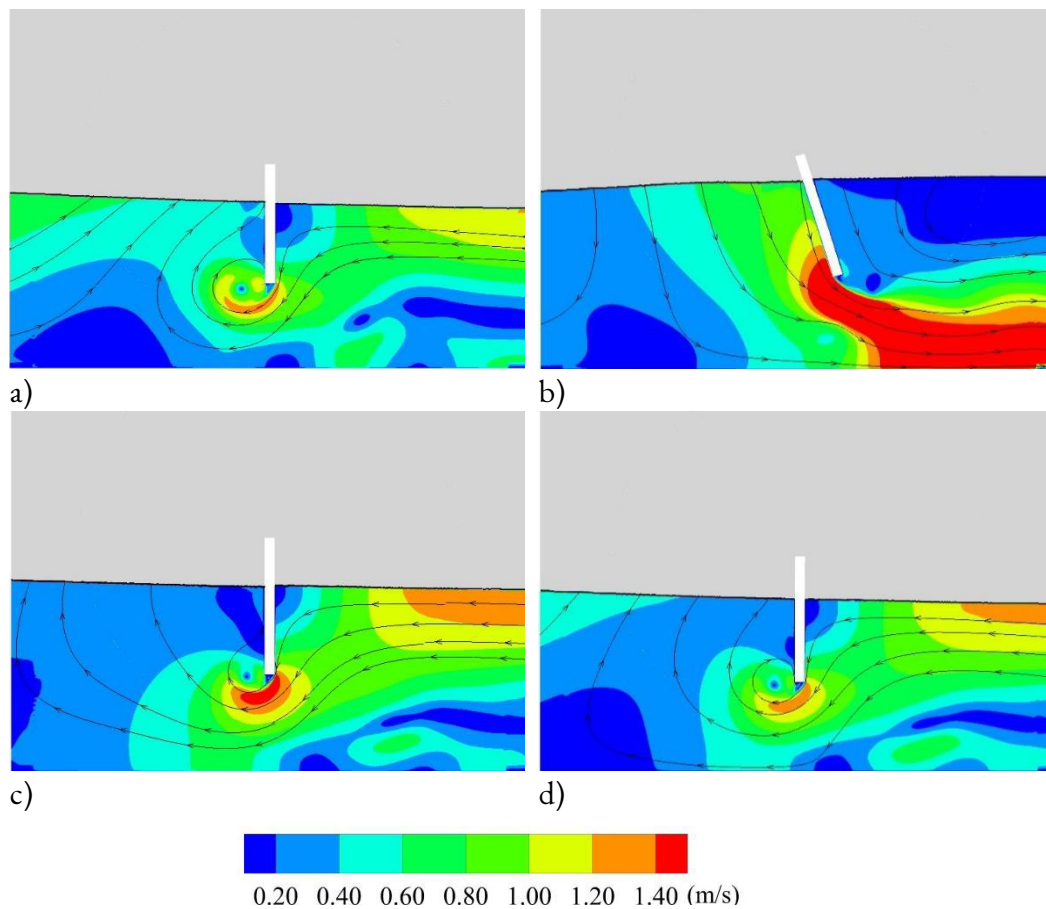


Figura 5.3: Módulo de velocidade e linhas de corrente para $T = 12$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

Apêndice B: Campo de pressão dinâmica para diferentes períodos de onda

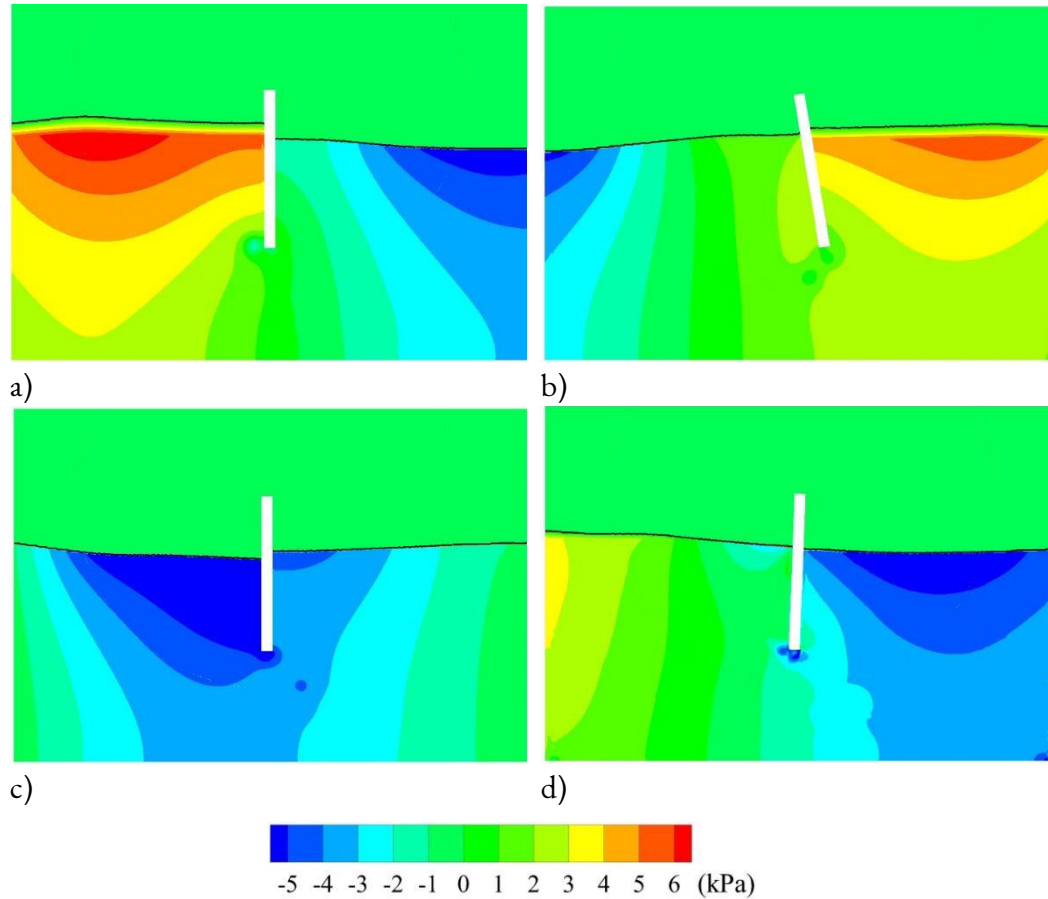


Figura 5.4: Pressão dinâmica para $T = 6 \text{ s}$, $C_{PTO} = 900 \text{ kNms/rad}$ e $\rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

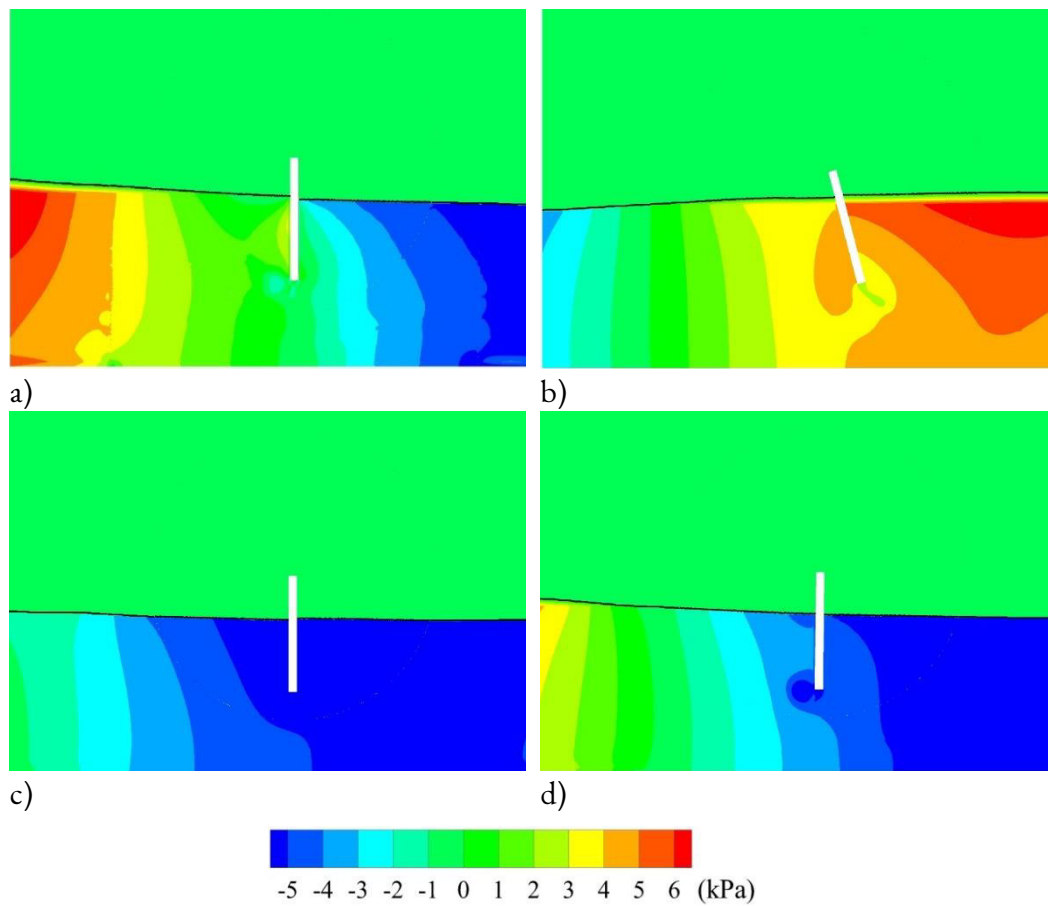


Figura 5.5: Pressão dinâmica para $T = 10\text{ s}$, $C_{PTO} = 900\text{ kNms/rad}$ e $\rho_p = 1400\text{ kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

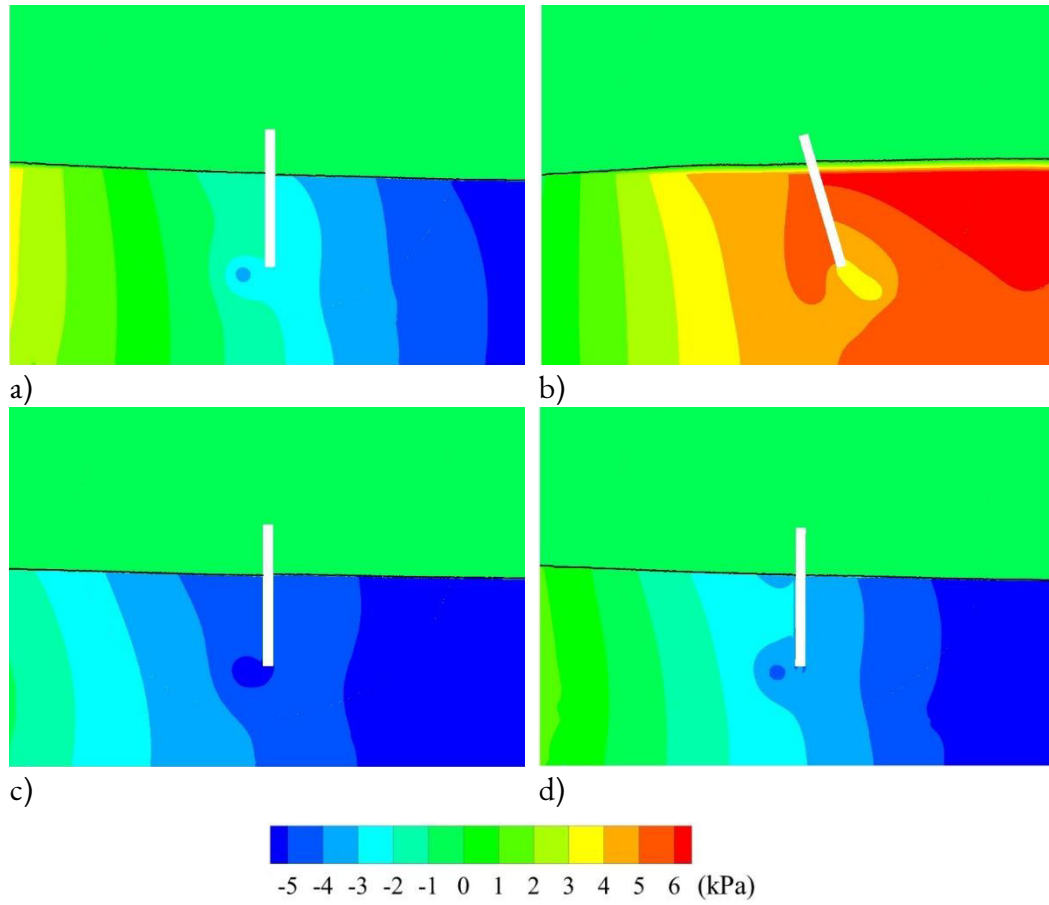


Figura 5.6: Pressão dinâmica para $T = 12\text{ s}$, $C_{PTO} = 900\text{ kNms/rad}$ e $\rho_p = 1400\text{ kg/m}^3$ em 4 instantes: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{\max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{\min}$.

Apêndice C: Cargas distribuídas sobre a placa para diferentes períodos de onda

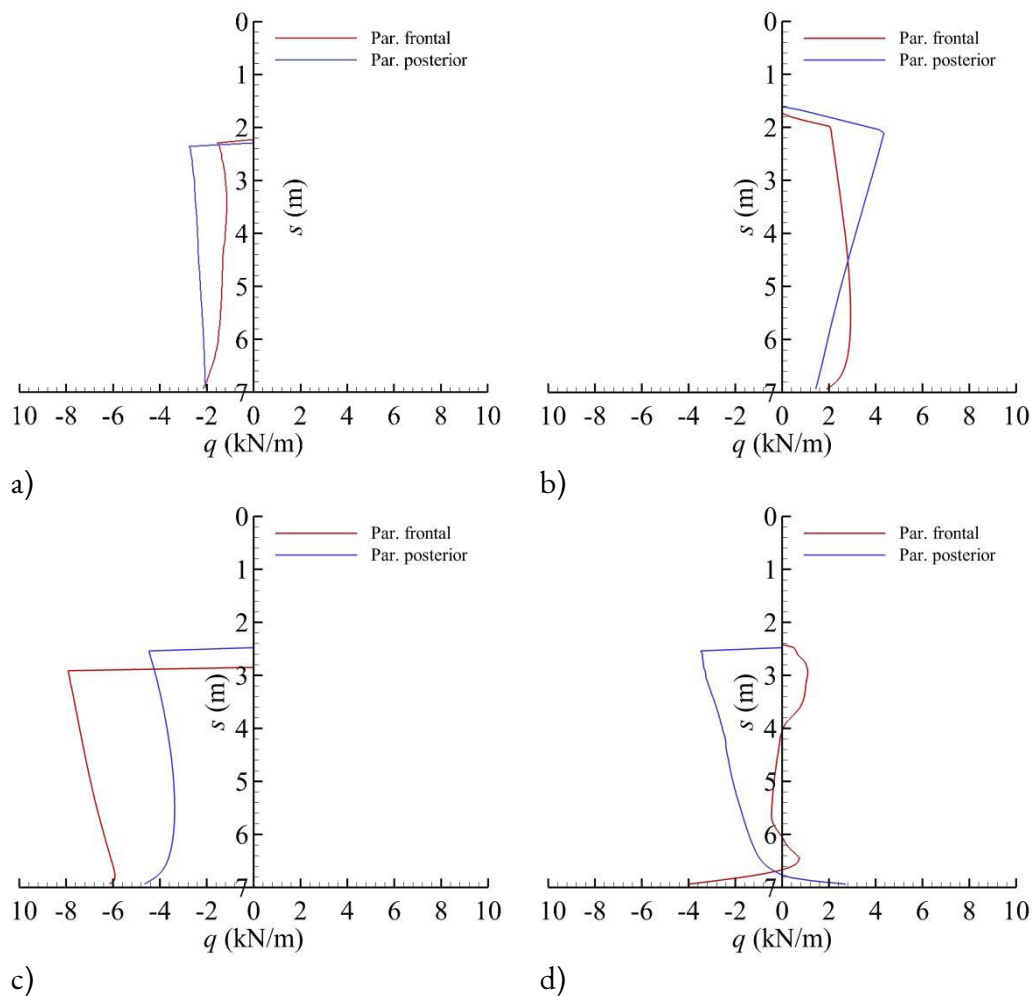


Figura 5.7: Carga distribuída na parede frontal (linha vermelha) e posterior (linha azul) da placa para $T = 6$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

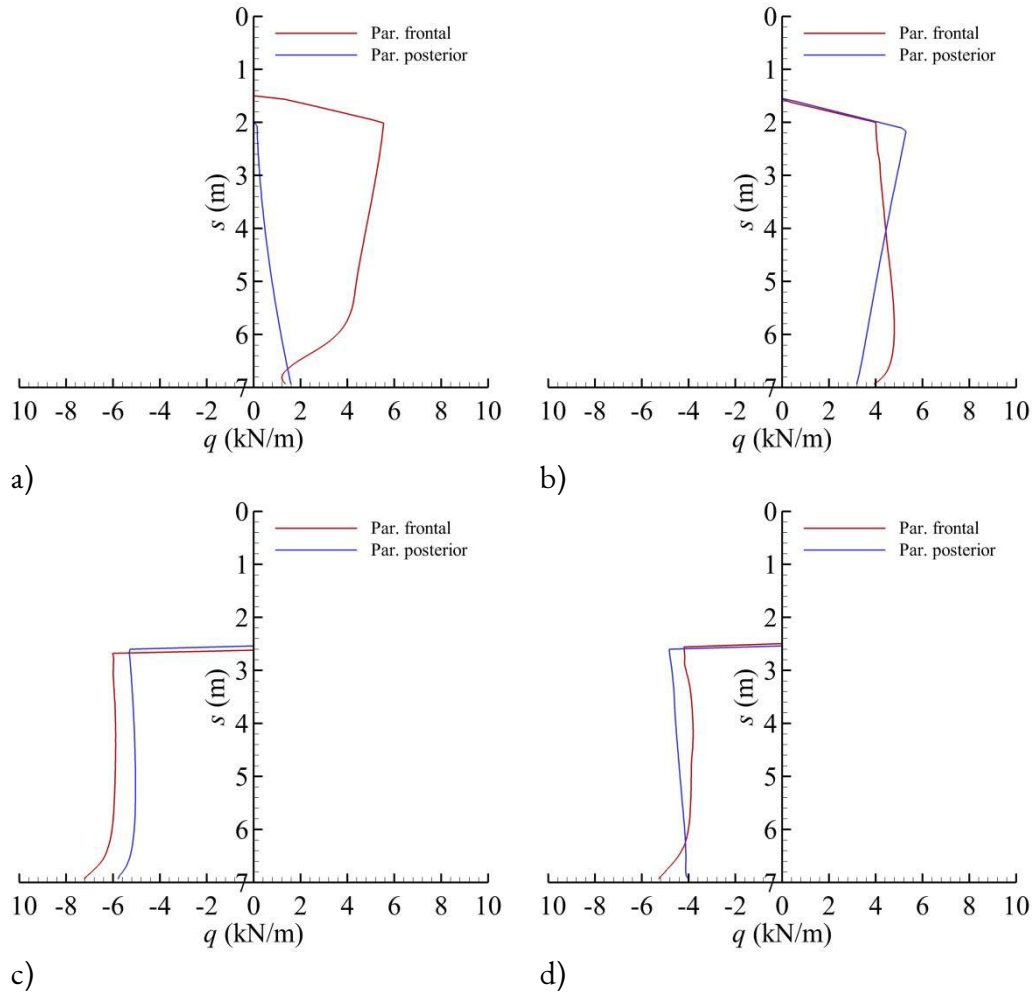


Figura 5.8: Carga distribuída na parede frontal (linha vermelha) e posterior (linha azul) da placa para $T = 10$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

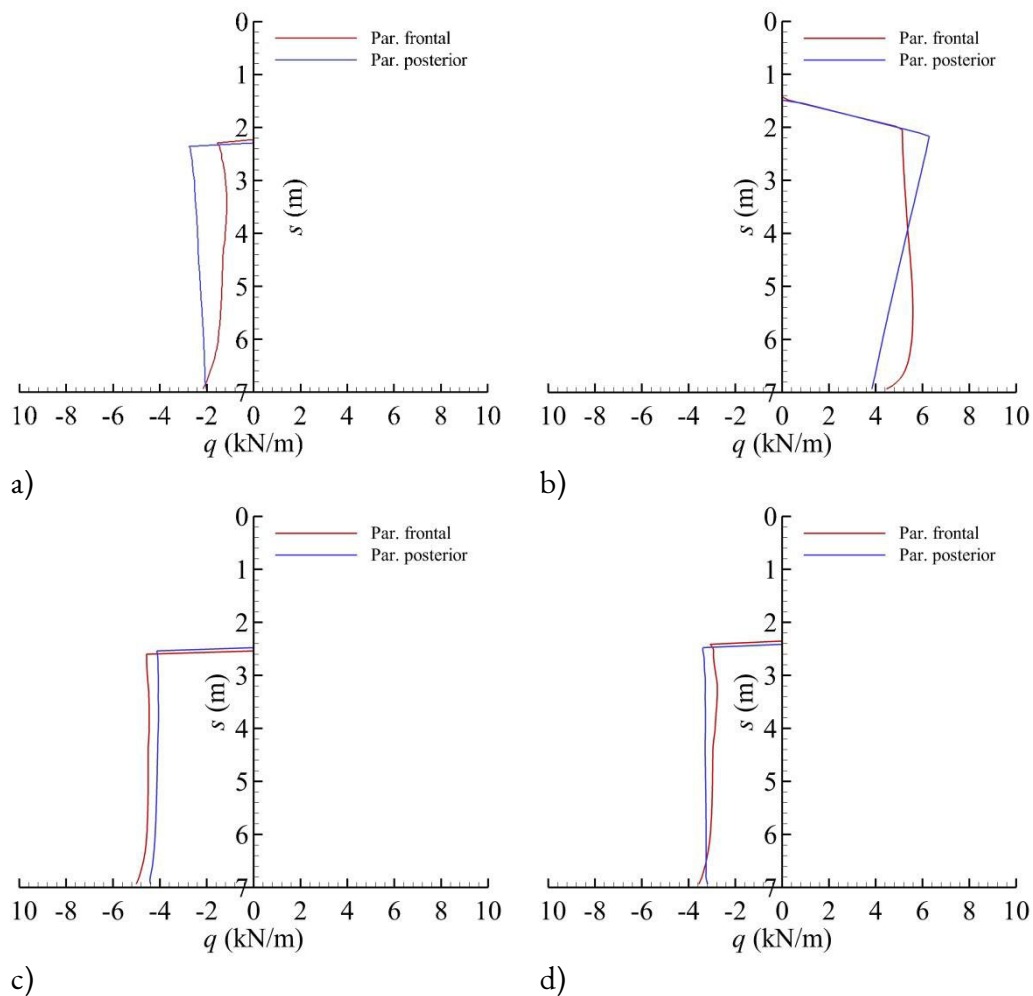
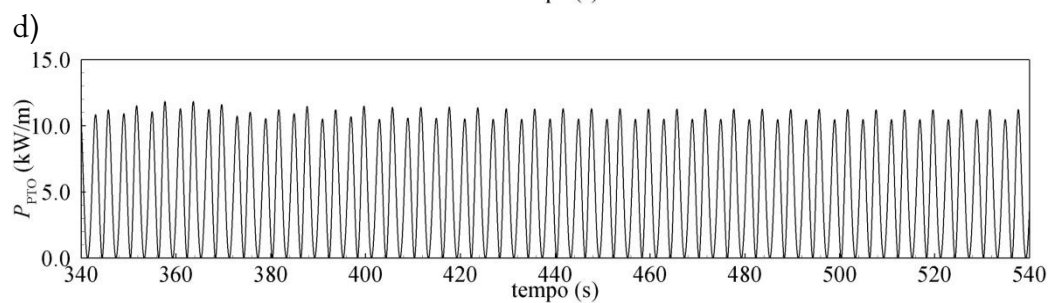
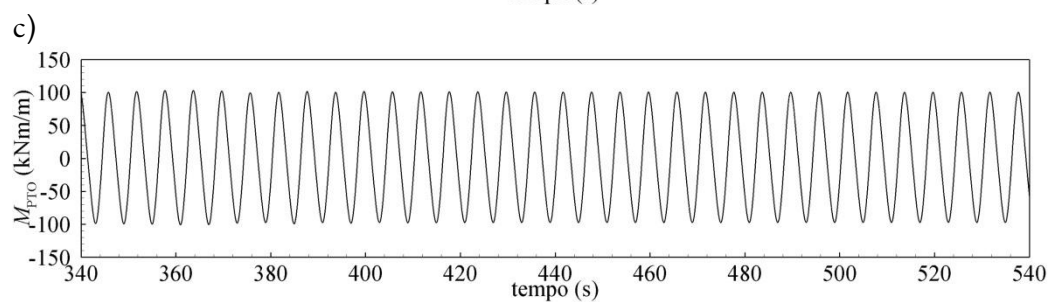
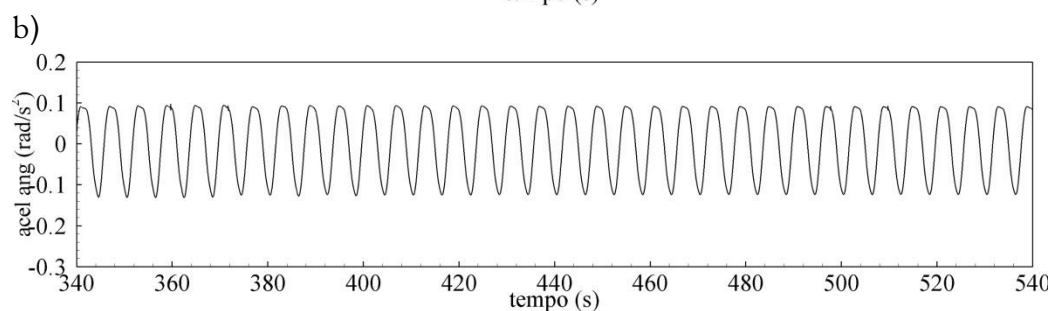
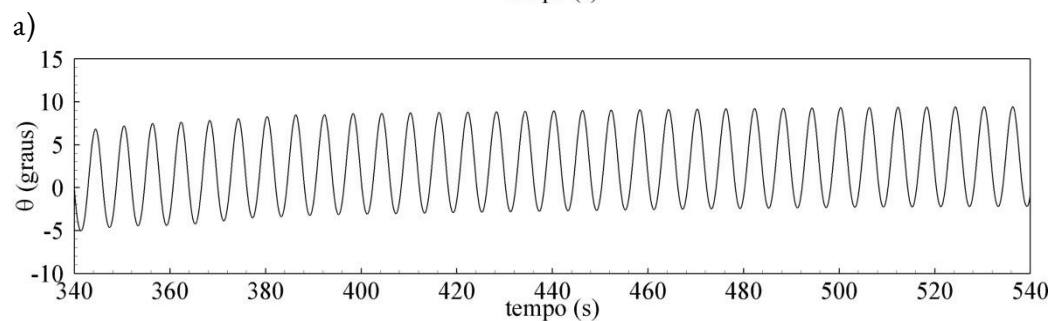
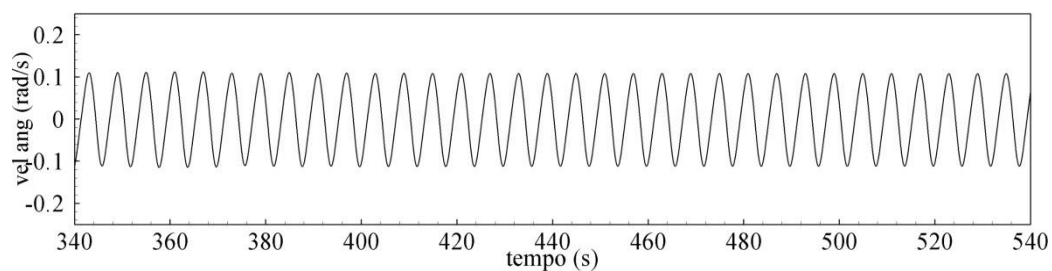
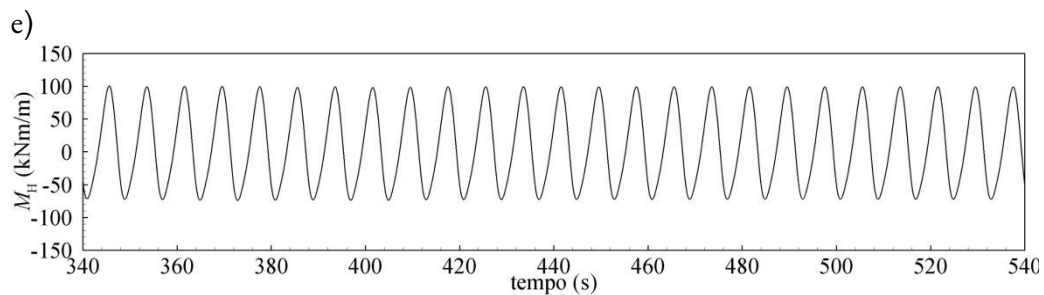


Figura 5.9: Carga distribuída na parede frontal (linha vermelha) e posterior (linha azul) da placa para $T = 12$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³: a) placa na posição vertical e velocidade angular positiva, b) placa na posição $\theta = \theta_{max}$, c) placa na posição vertical e velocidade angular negativa, e d) placa na posição $\theta = \theta_{min}$.

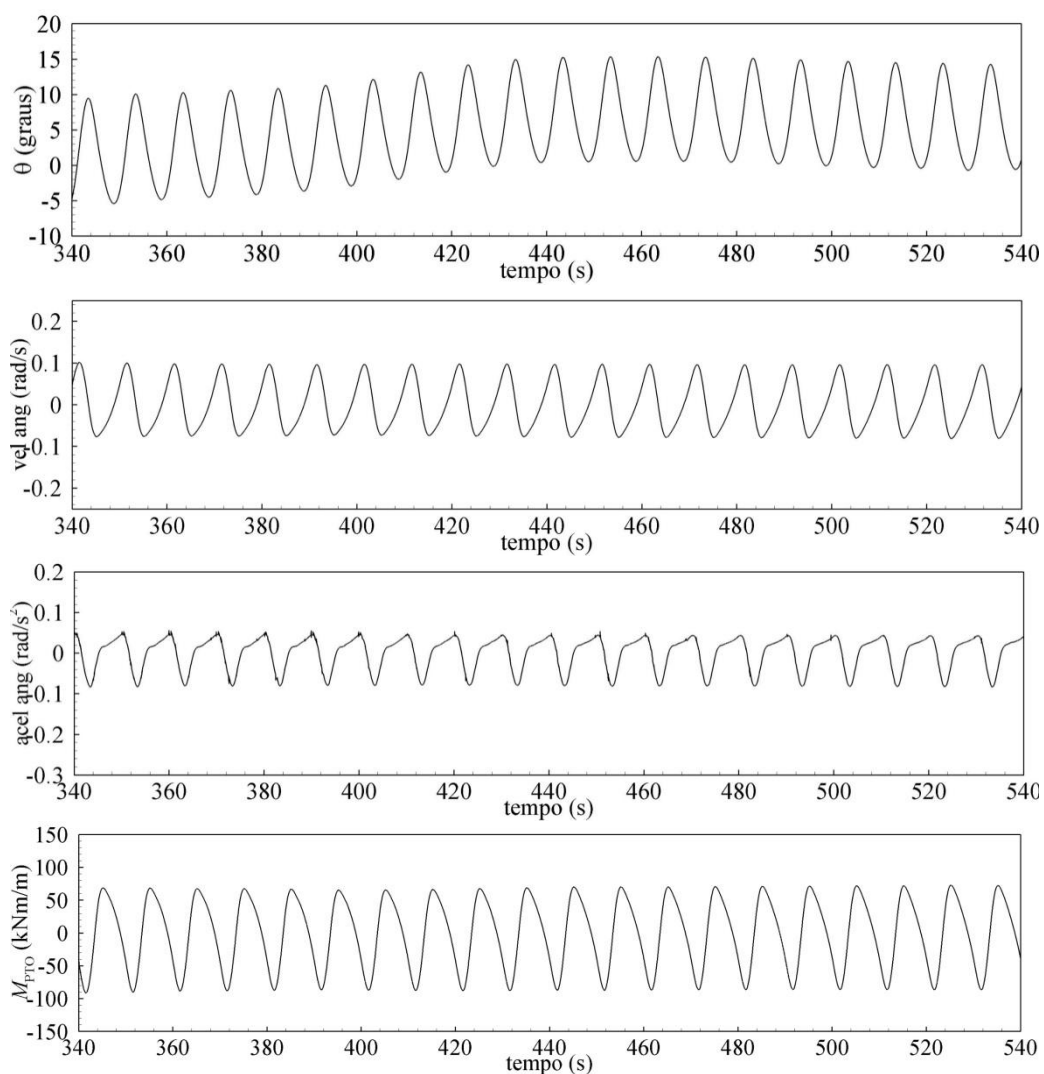
Apêndice D: Séries temporais dos parâmetros da placa para diferentes períodos de onda





f)

Figura 5.10: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; c) da aceleração angular; d) do momento de amortecimento; e) da potência absorvida; f) do momento hidrodinâmico para $T = 6$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.



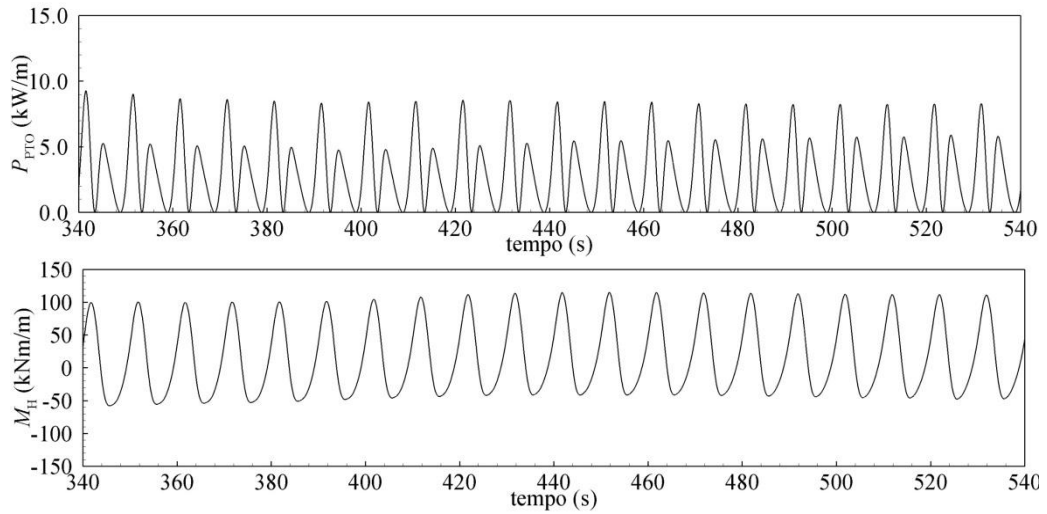
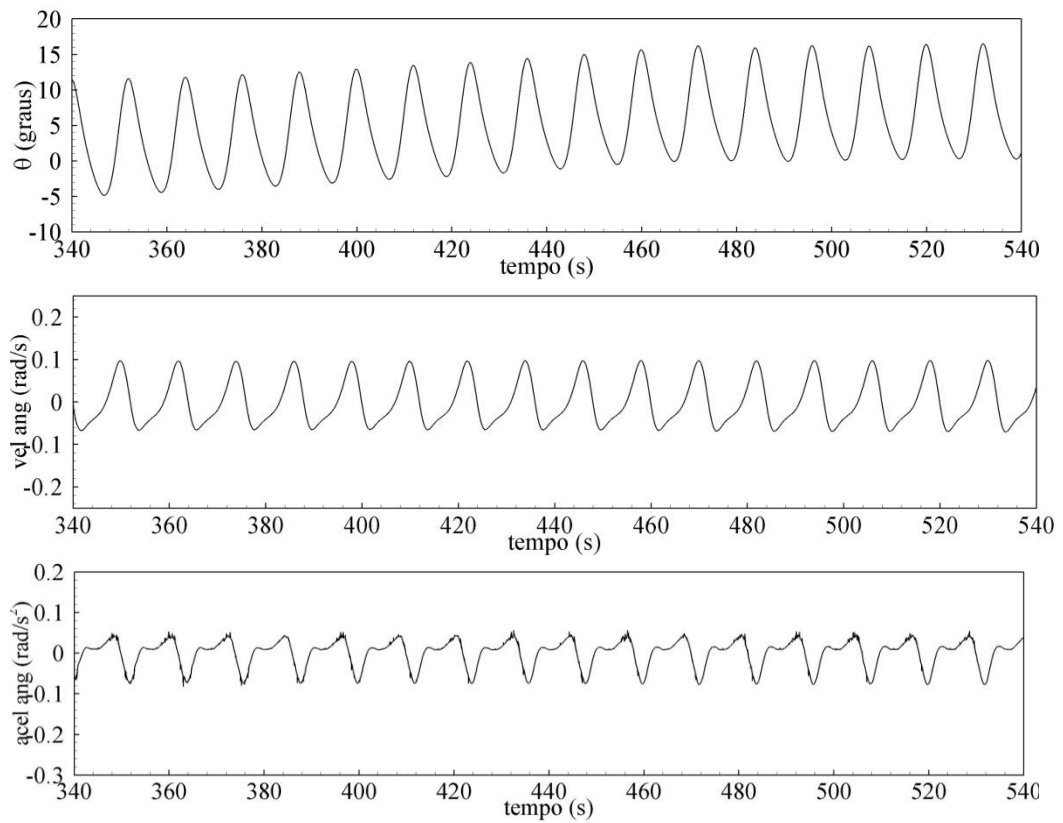


Figura 5.11: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; c) da aceleração angular; d) do momento de amortecimento; e) da potência absorvida; f) do momento hidrodinâmico para $T = 10$ s, $C_{PTO} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.



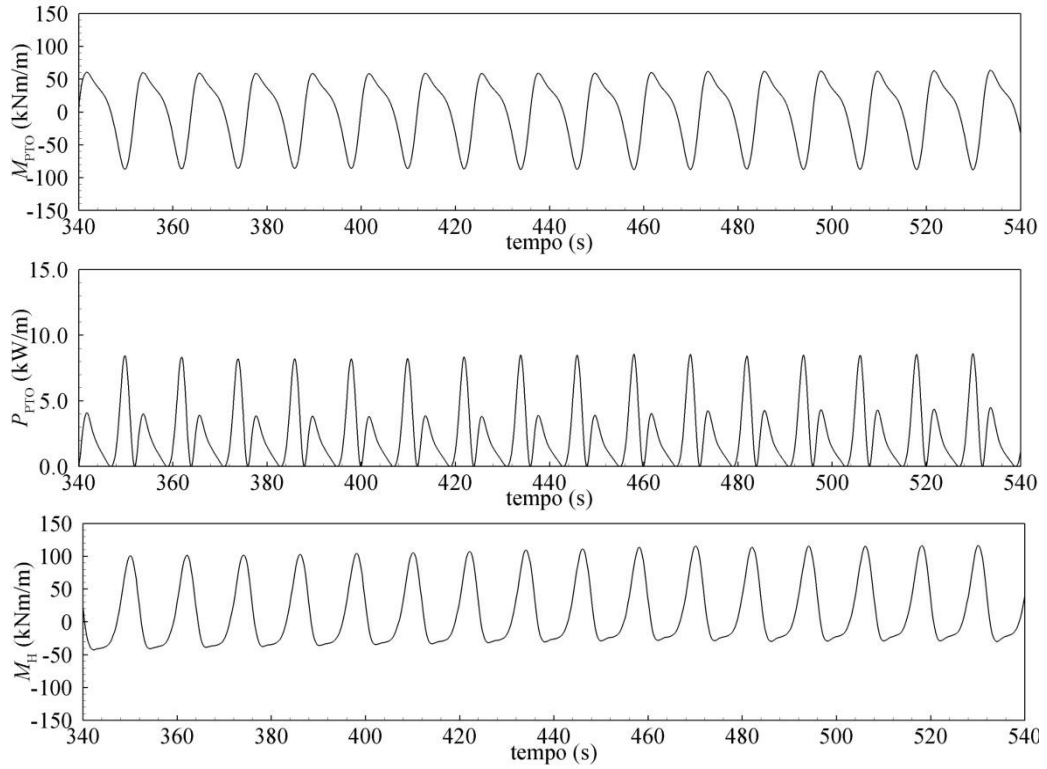


Figura 5.12: Séries temporais a) do ângulo de rotação; b) da velocidade angular; c) da aceleração angular; d) do momento de amortecimento; e) da potência absorvida; f) do momento hidrodinâmico para $T = 12$ s, $C_{PT0} = 900$ kNms/rad e $\rho_p = 1400$ kg/m³.