

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO DE PLACA HORIZONTAL SUBMERSA  
PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA  
APLICANDO DESIGN CONSTRUTAL

por

Flavio Medeiros Seibt

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2019

ESTUDO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO DE PLACA HORIZONTAL SUBMERSA  
PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA  
APLICANDO DESIGN CONSTRUTAL

por

Flavio Medeiros Seibt  
Mestre em Engenharia Oceânica

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovada por:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Liércio André Isoldi, EE / FURG

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres, IPH / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de Junho de 2019

*A minha família e a minha amada Tais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, pelos importantes ensinamentos, pela amizade, pelo incentivo e toda confiança depositada na realização desta tese. Agradeço, também, por orientar a todos os seus alunos com mais do que ensinamentos, com seu exemplo profissional.

Aos membros da banca, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Adriane Prisco Petry, Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres e Prof. Dr. Liércio André Isoldi, pelo tempo dispensado, por todas as críticas e sugestões apresentadas a esta tese, as quais foram de grande contribuição para o texto final.

Aos professores Dr. Liércio Isoldi, Dr. Elizaldo dos Santos e Dr. Mateus Gomes pela amizade, ensinamentos e pela parceria profissional.

Aos professores Dr. Jeferson Souza, Dr. Eduardo Couto e Dr. Daniel Helbig pela amizade e contribuições em diferentes momentos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), com os quais convivi durante as disciplinas, por seus importantes ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado, a qual foi essencial para a realização das atividades de pesquisa que resultaram nesta tese.

A todos os colegas e amigos, do grupo de pesquisa em Teoria Construtal e do PROMEC, pelas parcerias e apoio em diversos momentos.

A minha psicóloga Marisol Prado por sua competência profissional, sua amizade e todo apoio para manter o foco durante essa jornada acadêmica.

Aos meus pais, meus irmãos e a minha noiva, Taís, por todo carinho, incentivo e compreensão dos momentos de ausência. Agradeço também por serem minha base ao longo da caminhada.

A Deus, fonte da vida e da sabedoria, pela inspiração e capacidades que me movem.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e conclusão deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico de um dispositivo de placa horizontal submersa para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica com a aplicação do método Design Construtal. O dispositivo do tipo placa horizontal submersa permite captar a energia de um escoamento horizontal alternante, decorrente da passagem das ondas, que atua como propulsão para uma turbina hidráulica colocada sob sua estrutura. O objetivo deste estudo é a obtenção de uma geometria deste conversor que proporcione a máxima eficiência energética teórica ao dispositivo. Para isso, foram realizadas simulações numéricas com modelos em escala de laboratório e escala real, utilizando um domínio bidimensional sem a presença da turbina hidráulica sob o conversor. A solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com o *software* Ansys Fluent®, com base no Método de Volumes Finitos associado ao modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) para modelagem da interface água-ar. No canal de ondas numérico foram propagadas ondas monocromáticas de 2ª ordem, cuja altura e profundidade da água foram mantidas constantes. Foram avaliadas diversas configurações geométricas submetidas a ondas de diferentes períodos incidindo no dispositivo. Duas formulações distintas do método Design Construtal foram desenvolvidas, ambas tomando a altura da placa como grau de liberdade a ser otimizado, por meio do método de Busca Exaustiva. A primeira formulação foi aplicada tanto ao modelo em escala de laboratório quanto ao modelo em escala real, a fim de verificar a similaridade entre os modelos, considerando apenas um período de onda e uma razão de área do dispositivo. Com essa análise verificou-se a semelhança entre os resultados e obteve-se uma recomendação de geometria ótima para o conjunto de constantes e restrições analisado. Já a segunda formulação foi aplicada somente ao modelo em escala real, considerando quatro ondas distintas, para geometrias com diferentes valores da razão de área do dispositivo. A análise dos resultados permitiu obter recomendações teóricas para a geometria do conversor aplicáveis a diferentes características de ondas. Ambas as formulações indicaram o mesmo valor ótimo para o grau de liberdade analisado e demonstraram uma melhora de até 64,00 % no desempenho do equipamento entre as geometrias analisadas. Os resultados mostraram que dependendo da geometria do dispositivo é possível atingir uma eficiência de até 69,80 %.

Palavras-chave: Conversor de Energia das Ondas; Design Construtal; Dinâmica dos Fluidos Computacional; Placa Horizontal Submersa; *Volume of Fluid* (VOF).

## **ABSTRACT**

This work presents a numerical study of a submerged horizontal plate device for wave energy conversion into electrical energy applying the Constructal Design method. The submerged horizontal plate device allows to exploit the energy from an alternating horizontal flow, that arises due to the waves propagation, which could drive a hydraulic turbine placed beneath its structure. The aim of this study is to obtain such geometry of the converter that provides maximum theoretical energy efficiency to the device. Therefore, several numerical simulations were performed with laboratory-scale and real-scale models, using a two-dimensional domain where the effect of the hydraulic turbine beneath the converter was disregarded. The conservation equations of mass and momentum was solved with Ansys Fluent® software, based on the Finite Volume Method associated to the multiphasic method Volume of Fluid (VOF) for water-air interface modeling. In the numeric wave channel some monochromatic second order waves were propagated, whose height and water depth were kept constant. Several geometric configurations of the device were evaluated and subjected to incident waves of different wave periods. Two distinct Constructal Design formulations were developed, where both taking the plate height as the degree of freedom to be optimized by means of the Exhaustive Search method. The first formulation was applied to both the laboratory-scale and the real-scale models in order to verify the similitude between the models, regarding only one wave period and one device area ratio. From this analysis, the similarity between the results was achieved and an optimal geometry recommendation, regarding the set of constants and restrictions analyzed, was obtained. The second formulation was applied only to the real-scale model, regarding four different waves, with several geometries and different values of the device area ratio. The analysis of the results allowed to obtain theoretical recommendations for the converter geometry applicable to different wave characteristics. Both formulations pointed the same optimum value for the degree of freedom analyzed and showed an improvement up to 64.00 % in the device performance among the analyzed geometries. The results showed that according to the device geometry it is possible to achieve efficiency up to 69.80 %.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics; Constructal Design; Submerged Horizontal Plate; Volume of Fluid (VOF); Wave Energy Converter.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	2
1.2	Objeto de Estudo.....	4
1.3	Estado da Arte.....	4
1.4	Proposta e Objetivos .....	12
1.4.1	Objetivo Geral .....	12
1.4.2	Objetivos Específicos .....	12
1.5	Estrutura do Trabalho .....	13
<b>2</b>	<b>ENERGIA DAS ONDAS DO MAR.....</b>	<b>14</b>
2.1	Potencial Energético dos Oceanos.....	14
2.2	Tecnologias de Conversão .....	16
2.3	Sistema de Placa Horizontal Submersa .....	19
2.3.1	Princípio de Funcionamento .....	19
2.3.2	Características da Placa Horizontal Submersa como Conversor.....	21
2.3.3	Características da Placa Horizontal Submersa como Quebra-Mar.....	21
2.3.4	Revisão Bibliográfica: Quebra-mar Tipo Placa Horizontal Submersa.....	22
<b>3</b>	<b>DESIGN CONSTRUTAL .....</b>	<b>23</b>
3.1	Teoria Construtal .....	23
3.2	Design Construtal .....	29
3.2.1	Conceitos Fundamentais .....	30
3.2.2	Método Design Construtal.....	32
3.3	Design Construtal Aplicado à Conversores de Energia das Ondas .....	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
4.1	Modelagem Matemática .....	35
4.1.1	Teoria de Ondas .....	35
4.1.2	Critério de Similaridade.....	40
4.1.3	Modelo do Escoamento .....	42
4.1.4	Parâmetros de Interesse .....	43
4.2	Design Construtal Aplicado à Placa Horizontal Submersa .....	46
4.2.1	Design Construtal 1ª Formulação .....	47
4.2.2	Design Construtal 2ª Formulação .....	51
4.3	Modelagem Numérica .....	57
4.3.1	Método de Volumes Finitos.....	58
4.3.2	Modelo Multifásico <i>Volume of Fluid</i> (VOF).....	58
4.3.3	Canal de Ondas Numérico .....	60
4.3.4	Discretização do Domínio .....	62
4.3.5	Parâmetros de Solução.....	66

4.4	Verificação e Validação do Modelo .....	68
4.4.1	Verificação do Modelo .....	69
4.4.2	Validação do Modelo.....	71
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>73</b>
5.1	Ensaio Paramétrico: Efeito do Comprimento e da Altura Relativa com Modelo em Escala de Laboratório .....	73
5.1.1	Parâmetros Considerados.....	74
5.1.2	Análise dos Resultados .....	75
5.2	Design Construtal 1ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $h$ para $\phi_A = 0,05$ com Modelo em Escala de Laboratório .....	77
5.2.1	Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas .....	77
5.2.2	Análise dos Resultados .....	79
5.3	Design Construtal 1ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $h$ para $\phi_A = 0,05$ e Análise de Similaridade com Modelo em Escala Real .....	81
5.3.1	Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas .....	82
5.3.2	Análise dos Resultados .....	84
5.4	Design Construtal 2ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $X$ com Modelo em Escala Real.....	88
5.4.1	Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas .....	88
5.4.2	Análise dos Resultados: $T = 6,00$ s.....	92
5.4.3	Análise dos Resultados: $T = 8,00$ s.....	99
5.4.4	Análise dos Resultados: $T = 10,00$ s.....	105
5.4.5	Análise dos Resultados: $T = 12,00$ s.....	111
5.4.6	Análise dos Resultados: Efeito das Ondas e Geometrias Ótimas.....	118
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>122</b>
6.1	Conclusões: Ensaio Paramétrico.....	122
6.2	Conclusões: Design Construtal 1ª Formulação.....	123
6.3	Conclusões: Design Construtal 2ª Formulação.....	124
6.4	Geometria Ótima e Considerações Finais.....	125
6.5	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	126
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>Desambiguação: Placa Submersa.....</b>	<b>145</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>Revisão Bibliográfica: Quebra-Mar Tipo PHS.....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE C</b>	<b>Códigos de Pós-Processamento.....</b>	<b>156</b>
<b>APÊNDICE D</b>	<b>Design Construtal: Rol de Geometrias Analisadas.....</b>	<b>172</b>
<b>APÊNDICE E</b>	<b>Design Construtal: Gráficos Complementares.....</b>	<b>190</b>
<b>APÊNDICE F</b>	<b>Produção Acadêmica .....</b>	<b>195</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>Código para Geração de Ondas de 2ª Ordem (UDF).....</b>	<b>197</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Demanda energética mundial por fontes primárias [adaptado de IEA, 2014].	2
Figura 1.2	Demanda energética mundial por fontes de consumo [adaptado de IEA, 2014].	2
Figura 1.3	Representação do dispositivo de PHS [adaptado de Graw, 1994].	5
Figura 2.1	Espectro qualitativo de energia das ondas [adaptado de Kinsman, 1965].	15
Figura 2.2	Distribuição global da potência média anual das ondas (valores em kW/m) [adaptado de Thorpe, 1999; 2004].	15
Figura 2.3	Classificação dos conversores quanto à localização em relação à costa e distribuição qualitativa da potência das ondas em cada local [adaptado de AW-Energy, 2017].	17
Figura 2.4	Classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao princípio de funcionamento [adaptado de Falcão, 2010].	18
Figura 2.5	Ilustração do princípio de funcionamento de alguns conversores de energia das ondas [adaptado de Callaway, 2007].	19
Figura 2.6	Representação do sistema de PHS [adaptado de Graw, 1994].	20
Figura 3.1	Evolução do design dos principais modelos de aeronaves [adaptado de Bejan et al., 2014].	25
Figura 3.2	Velocidade teórica de voo de alguns insetos e pássaros e velocidade nominal de voo de algumas aeronaves [adaptado de Bejan e Lorente, 2010].	25
Figura 3.3	Relação entre velocidade e massa de atletas recordistas mundiais nas modalidades: (a) natação, 100 m estilo-livre; (b) atletismo, 100 m rasos [adaptado de Charles e Bejan, 2009].	26
Figura 3.4	Relação velocidade-tempo e massa-tempo de atletas recordistas mundiais nas modalidades: (a) natação, 100 m estilo-livre; (b) atletismo, 100 m rasos [adaptado de Charles e Bejan, 2009].	27
Figura 3.5	Semelhança entre o design de sistemas de escoamento: (a) animados, molde da estrutura interna do pulmão humano; e (b) inanimados, imagem de satélite do delta do rio Lena no norte da Sibéria [adaptado de Bejan e Lorente, 2013].	28
Figura 3.6	Sequência de aplicação do método Design Construtal.	33
Figura 4.1	Principais características de uma onda [adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].	36
Figura 4.2	Diferença entre o perfil de onda de Stokes de 2ª ordem e o perfil de onda linear [adaptado de USACE, 1984].	37
Figura 4.3	Aplicabilidade das teorias de ondas [adaptado de USACE, 2002].	37
Figura 4.4	Distribuição dos monitores, sob a PHS, de: (a) velocidade $u$ ; (b) vazão $m$ .	44
Figura 4.5	Representação da geometria do modelo e variáveis da 1ª Formulação DC.	47
Figura 4.6	Aplicação do Design Construtal de acordo com a 1ª Formulação DC.	48
Figura 4.7	Processo de Busca Exaustiva aplicado com a 1ª Formulação DC.	50
Figura 4.8	Representação da geometria do modelo e variáveis da 2ª Formulação DC.	52
Figura 4.9	Aplicação do Design Construtal de acordo com a 2ª Formulação DC.	54
Figura 4.10	Processo de Busca Exaustiva aplicado com a 2ª Formulação DC.	56

Figura 4.11	Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume [adaptado de De Brito, 2010].	60
Figura 4.12	Representação da geometria do domínio.	60
Figura 4.13	Condições de contorno do canal de ondas numérico.	61
Figura 4.14	Visualização ampliada da malha em torno da PHS.	63
Figura 4.15	Dimensões adotadas para a malha empregada no domínio computacional.	64
Figura 4.16	Representação da interface: (a) posição original; (b) reconstrução geométrica [adaptado de Gomes, 2010].	67
Figura 4.17	Comparação entre os perfis de elevação da onda analítico e numérico [Fonte: Seibt, 2014].	69
Figura 4.18	Comparação entre os perfis de velocidades analítico e numérico para $u$ e $w$ sob a superfície da onda [Fonte: Seibt, 2014].	70
Figura 5.1	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p6$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	75
Figura 5.2	Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em $l$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	76
Figura 5.3	Eficiência teórica $\phi$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	77
Figura 5.4	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p6$ para os casos com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	79
Figura 5.5	Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em $l$ para os casos com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	80
Figura 5.6	Eficiência teórica $\phi$ para os casos com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	81
Figura 5.7	Geometrias analisadas: (a) escala de laboratório; (b) escala real.	83
Figura 5.8	Variação dos parâmetros geométricos não dimensionais para ambas as escalas.	83
Figura 5.9	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p6$ , para ambas as escalas, com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	84
Figura 5.10	Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em $l$ , para ambas as escalas, com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	86
Figura 5.11	Eficiência teórica $\phi$ , para ambas as escalas, com $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à $X$ ; (b) em relação à ( $L/\lambda$ ).	87
Figura 5.12	Dimensões das geometrias analisadas para cada onda: (a) W1, $T = 6,00$ s; (b) W2, $T = 8,00$ s; (c) W3, $T = 10,00$ s; (d) W4, $T = 12,00$ s.	89
Figura 5.13	Intervalo de parâmetros geométricos não dimensionais analisados com as ondas estudadas.	90
Figura 5.14	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p6$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 6,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	92
Figura 5.15	Vazão $\dot{m}_{RMS}$ em $l$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 6,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	95
Figura 5.16	Eficiência teórica $\phi$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 6,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).	96

Figura 5.17	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p_6$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 8,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	99
Figura 5.18	Vaz\~ao $\dot{m}_{RMS}$ em $l$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 8,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	101
Figura 5.19	Efici\~encia te\~orica $\varphi$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 8,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	103
Figura 5.20	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p_6$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 10,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	105
Figura 5.21	Vaz\~ao $\dot{m}_{RMS}$ em $l$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 10,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	107
Figura 5.22	Efici\~encia te\~orica $\varphi$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 10,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	109
Figura 5.23	Velocidade $ -u_{m\acute{a}x} $ em $p_6$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 12,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	112
Figura 5.24	Vaz\~ao $\dot{m}_{RMS}$ em $l$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 12,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	114
Figura 5.25	Efici\~encia te\~orica $\varphi$ , para cada $\phi_B$ com a onda de $T = 12,00$ s, relativa ao: (a) GDL $X$ ; (b) comprimento relativo $(L/\lambda)$ .....	116
Figura 5.26	Distribui\~cao das ondas simuladas na regi\~ao corresponde a Stokes de 2 <sup>a</sup> ordem do diagrama de classifica\~ao de ondas [adaptado de USACE, 2002].....	118
Figura 5.27	Pot\~encia m\~edia $P_W$ das ondas simuladas.....	119
Figura 5.28	Efici\~encia te\~orica m\~axima $\varphi_{m\acute{a}x}$ obtida com as ondas estudadas em rela\~ao \~as raz\~oes de \~area $\phi_B$ avaliadas.....	121
Figura E.1	Resultados de $\phi_B = 0,01$ para cada onda, quanto ao: (a) GDL $X$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (b) $(L/\lambda)$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (c) GDL $X$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (d) $(L/\lambda)$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL $X$ vs. $\varphi$ ; (f) $(L/\lambda)$ vs. $\varphi$ .....	190
Figura E.2	Resultados de $\phi_B = 0,03$ para cada onda, quanto ao: (a) GDL $X$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (b) $(L/\lambda)$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (c) GDL $X$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (d) $(L/\lambda)$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL $X$ vs. $\varphi$ ; (f) $(L/\lambda)$ vs. $\varphi$ .....	191
Figura E.3	Resultados de $\phi_B = 0,05$ para cada onda, quanto ao: (a) GDL $X$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (b) $(L/\lambda)$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (c) GDL $X$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (d) $(L/\lambda)$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL $X$ vs. $\varphi$ ; (f) $(L/\lambda)$ vs. $\varphi$ .....	192
Figura E.4	Resultados de $\phi_B = 0,08$ para cada onda, quanto ao: (a) GDL $X$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (b) $(L/\lambda)$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (c) GDL $X$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (d) $(L/\lambda)$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL $X$ vs. $\varphi$ ; (f) $(L/\lambda)$ vs. $\varphi$ .....	193
Figura E.5	Resultados de $\phi_B = 0,10$ para cada onda, quanto ao: (a) GDL $X$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (b) $(L/\lambda)$ vs. $ -u_{m\acute{a}x} $ ; (c) GDL $X$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (d) $(L/\lambda)$ vs. $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL $X$ vs. $\varphi$ ; (f) $(L/\lambda)$ vs. $\varphi$ .....	194

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Classificação das ondas quanto à profundidade [Fonte: USACE, 1984].....	38
Tabela 4.2	Parâmetros de solução adotados.....	68
Tabela 4.3	Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade $u$ (m/s) [Fonte: Seibt, 2014].....	71
Tabela 5.1	Comprimentos da PHS e do canal simulados ( $\lambda = 6,95$ m).....	74
Tabela 5.2	Alturas relativas da PHS simuladas ( $d = 0,60$ m). ....	74
Tabela 5.3	Lista de casos simulados na otimização do GDL $h$ para $\phi_A = 0,05$ ( $A_T = 1,00$ m <sup>2</sup> ). .....	78
Tabela 5.4	Características da onda incidente em cada escala. ....	82
Tabela 5.5	Relação parcial das geometrias analisadas em cada escala com $\phi_A = 0,05$ . ....	82
Tabela 5.6	Número de casos simulados com cada razão de área $\phi_B$ . ....	88
Tabela 5.7	Características das ondas incidentes e respectivo comprimento mínimo do canal. .....	89
Tabela 5.8	Pontos característicos das curvas de velocidade $  -u_{m\acute{a}x}  $ com a onda de $T = 6,00$ s. .....	93
Tabela 5.9	Pontos característicos das curvas de vazão $\dot{m}_{RMS}$ com a onda de $T = 6,00$ s. ....	95
Tabela 5.10	Pontos característicos das curvas de eficiência teórica $\varphi$ com a onda de $T = 6,00$ s. ....	98
Tabela 5.11	Pontos característicos das curvas de velocidade $  -u_{m\acute{a}x}  $ com a onda de $T = 8,00$ s. .....	100
Tabela 5.12	Pontos característicos das curvas de vazão $\dot{m}_{RMS}$ com a onda de $T = 8,00$ s. ....	102
Tabela 5.13	Pontos característicos das curvas de eficiência teórica $\varphi$ com a onda de $T = 8,00$ s. ....	104
Tabela 5.14	Pontos característicos das curvas de velocidade $  -u_{m\acute{a}x}  $ com a onda de $T = 10,00$ s. ....	106
Tabela 5.15	Pontos característicos das curvas de vazão $\dot{m}_{RMS}$ com a onda de $T = 10,00$ s. ....	108
Tabela 5.16	Pontos característicos das curvas de eficiência teórica $\varphi$ com a onda de $T = 10,00$ s. ....	110
Tabela 5.17	Pontos característicos das curvas de velocidade $  -u_{m\acute{a}x}  $ com a onda de $T = 12,00$ s. ....	113
Tabela 5.18	Pontos característicos das curvas de vazão $\dot{m}_{RMS}$ com a onda de $T = 12,00$ s. ....	115
Tabela 5.19	Pontos característicos das curvas de eficiência teórica $\varphi$ com a onda de $T = 12,00$ s. ....	117
Tabela 5.20	Geometria ótima para cada onda e razão de área $\phi_B$ analisadas ( $(e/\varepsilon) = 1/3$ ). ....	120
Tabela A.1	Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal submersa. ....	145
Tabela A.2	Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa submersa. ....	146
Tabela A.3	Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal (simples). ....	146
Tabela A.4	Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal composta. ....	147
Tabela B.1	Relação de trabalhos experimentais da PHS como quebra-mar. ....	155



Tabela B.2	Relação de trabalhos numérico-experimentais da PHS como quebra-mar. ....	155
Tabela B.3	Relação de trabalhos numéricos da PHS como quebra-mar. ....	155
Tabela D.1	Lista de casos simulados na otimização do GDL $h$ para $\phi_A = 0,05$ e onda $T = 12,00$ s ( $A_T = 256,00$ m <sup>2</sup> ). ....	172
Tabela D.2	Lista de casos simulados para onda $T = 6,00$ s e $\phi_B = 0,01$ ( $A_R = 2755,93$ m <sup>2</sup> ). ....	174
Tabela D.3	Lista de casos simulados para onda $T = 6,00$ s e $\phi_B = 0,03$ ( $A_R = 2755,93$ m <sup>2</sup> ). ....	175
Tabela D.4	Lista de casos simulados para onda $T = 6,00$ s e $\phi_B = 0,05$ ( $A_R = 2755,93$ m <sup>2</sup> ). ....	176
Tabela D.5	Lista de casos simulados para onda $T = 6,00$ s e $\phi_B = 0,08$ ( $A_R = 2755,93$ m <sup>2</sup> ). ....	176
Tabela D.6	Lista de casos simulados para onda $T = 6,00$ s e $\phi_B = 0,10$ ( $A_R = 2755,93$ m <sup>2</sup> ). ....	177
Tabela D.7	Lista de casos simulados para onda $T = 8,00$ s e $\phi_B = 0,01$ ( $A_R = 4020,02$ m <sup>2</sup> ). ....	178
Tabela D.8	Lista de casos simulados para onda $T = 8,00$ s e $\phi_B = 0,03$ ( $A_R = 4020,02$ m <sup>2</sup> ). ....	179
Tabela D.9	Lista de casos simulados para onda $T = 8,00$ s e $\phi_B = 0,05$ ( $A_R = 4020,02$ m <sup>2</sup> ). ....	180
Tabela D.10	Lista de casos simulados para onda $T = 8,00$ s e $\phi_B = 0,08$ ( $A_R = 4020,02$ m <sup>2</sup> ). ....	180
Tabela D.11	Lista de casos simulados para onda $T = 8,00$ s e $\phi_B = 0,10$ ( $A_R = 4020,02$ m <sup>2</sup> ). ....	181
Tabela D.12	Lista de casos simulados para onda $T = 10,00$ s e $\phi_B = 0,01$ ( $A_R = 5228,29$ m <sup>2</sup> ). .....	182
Tabela D.13	Lista de casos simulados para onda $T = 10,00$ s e $\phi_B = 0,03$ ( $A_R = 5228,29$ m <sup>2</sup> ). .....	183
Tabela D.14	Lista de casos simulados para onda $T = 10,00$ s e $\phi_B = 0,05$ ( $A_R = 5228,29$ m <sup>2</sup> ). .....	184
Tabela D.15	Lista de casos simulados para onda $T = 10,00$ s e $\phi_B = 0,08$ ( $A_R = 5228,29$ m <sup>2</sup> ). .....	184
Tabela D.16	Lista de casos simulados para onda $T = 10,00$ s e $\phi_B = 0,10$ ( $A_R = 5228,29$ m <sup>2</sup> ). .....	185
Tabela D.17	Lista de casos simulados para onda $T = 12,00$ s e $\phi_B = 0,01$ ( $A_R = 6406,73$ m <sup>2</sup> ). .....	186
Tabela D.18	Lista de casos simulados para onda $T = 12,00$ s e $\phi_B = 0,03$ ( $A_R = 6406,73$ m <sup>2</sup> ). .....	187
Tabela D.19	Lista de casos simulados para onda $T = 12,00$ s e $\phi_B = 0,05$ ( $A_R = 6406,73$ m <sup>2</sup> ). .....	188
Tabela D.20	Lista de casos simulados para onda $T = 12,00$ s e $\phi_B = 0,08$ ( $A_R = 6406,73$ m <sup>2</sup> ). .....	188
Tabela D.21	Lista de casos simulados para onda $T = 12,00$ s e $\phi_B = 0,10$ ( $A_R = 6406,73$ m <sup>2</sup> ). .....	189
Tabela F.1	Relação de artigos publicados em anais de congressos. ....	195
Tabela F.2	Relação de artigos publicados em periódicos científicos. ....	196
Tabela F.3	Relação de artigos publicados em colaboração (coautoria). ....	196

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Método de Elementos de Contorno ( <i>Boundary Elements Method</i> )
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COPPE	Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro
DC	Design Construtal
EDP	Equação Diferencial Parcial
EDPs	Equações Diferenciais Parciais
EE	Escola de Engenharia
FDM	Método de Diferenças Finitas ( <i>Finite Difference Method</i> )
FEM	Método de Elementos Finitos ( <i>Finite Elements Method</i> )
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
FVM	Método de Volumes Finitos ( <i>Finite Volumes Method</i> )
GDL	Grau de Liberdade
GDLs	Graus de Liberdade
IEA	Agência Internacional de Energia ( <i>International Energy Agency</i> )
IFPR	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LC	Lei Construtal do Design e Evolução
Mtoe	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo ( <i>Million tonnes of oil equivalent</i> )
NITA	<i>Non-Iterative Time-Advancement</i>
OWC	Coluna de Água Oscilante ( <i>Oscillating Water Column</i> )
PHS	Placa Horizontal Submersa
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

RANS	<i>Reynolds-Average Navier-Stokes</i>
RMS	Média quadrática ( <i>Root Mean Square</i> )
TC	Teoria Construtal
UDF	Função Definida pelo Usuário ( <i>User Defined Function</i> )
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UN	Organização das Nações Unidas ( <i>United Nations</i> )
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WCSPH	<i>Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
WEC	Conversor de Energia das Ondas ( <i>Wave Energy Converter</i> )
WECs	Conversores de Energia das Ondas ( <i>Wave Energy Converters</i> )
W1	Onda de período 6,00 s
W2	Onda de período 8,00 s
W3	Onda de período 10,00 s
W4	Onda de período 12,00 s

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$a$	Dimensão horizontal da célula computacional, m
$A_F$	Área livre sob a PHS, m <sup>2</sup>
$A_P$	Área da PHS, m <sup>2</sup>
$A_R$	Área de referência, m <sup>2</sup>
$A_T$	Área total do conversor PHS, m <sup>2</sup>
$B$	Variável de comprimento, m
$b$	Dimensão vertical da célula computacional, m
$b_P$	Largura da PHS (unitária), m
$d$	Profundidade da água, m
$e$	Espessura da PHS, m
$Fr$	Número de Froude
$g$	Aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
$H$	Altura total da PHS, m
$h$	Altura da PHS, m
$H_C$	Altura do canal de ondas, m
$H_{C0}$	Altura do trecho central do canal, m
$H_{C1}$	Altura dos trechos abaixo da PHS, m
$H_{C2}$	Altura do trecho superior do canal, m
$H_{INF}$	Altura da linha inferior, m
$H_{SUP}$	Altura da linha superior, m
$k$	Número de onda, m <sup>-1</sup>
$L$	Comprimento da PHS, m
$l$	Linha de monitoramento de dados numéricos
$L_C$	Comprimento do canal de ondas, m
$L_{C0}$	Comprimento do trecho em torno da PHS, m
$L_{C1}$	Comprimento dos trechos a montante e a jusante da PHS, m
$L_{C2}$	Comprimento do trecho final do canal, m
$L_{ESP}$	Comprimento do espaçamento em torno da PHS, m

$L_R$	Comprimento de referência, m
$m$	Massa, kg
$\dot{m}$	Vazão mássica, kg/s
$\dot{m}_{RMS}$	Média quadrática da vazão mássica; vazão mássica RMS, kg/s
$N_B$	Fator de escala da grandeza de comprimento
$N_g$	Fator de escala da grandeza de aceleração da gravidade
$N_t$	Fator de escala da grandeza de tempo
$N_V$	Fator de escala da grandeza de velocidade
$p$	Pressão estática, Pa
$P_P$	Potência média disponível no escoamento sob a PHS, W
$P_W$	Potência média da onda, W
$p_{atm}$	Pressão atmosférica, Pa
$p6$	Ponto de monitoramento de dados numérico
$S$	Esbelteza ( <i>Svelteness</i> )
$T$	Período de onda, s
$t$	Tempo, s
$u$	Componente de velocidade na direção horizontal; velocidade axial, m/s
$u_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima na direção horizontal, m/s
$ u_{m\acute{a}x} $	Módulo da velocidade máxima na direção horizontal, m/s
$U_R$	Número de Ursell
$V$	Variável de velocidade, m/s
$w$	Componente de velocidade na direção vertical, m/s
$X$	Altura relativa da PHS, %
$x$	Eixo na direção horizontal; coordenada na direção horizontal, m
$z$	Eixo na direção vertical; coordenada na direção vertical, m

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Fração de volume da célula computacional
$\delta$	Amplitude de onda, m
$\varepsilon$	Altura de onda, m
$\eta$	Elevação da superfície livre da onda, m
$\theta$	Ângulo de fase, rad

$\lambda$	Comprimento de onda, m
$\lambda_3$	Comprimento de onda da 3 <sup>a</sup> harmônica, m
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmico, kg/m·s
$\rho$	Massa específica, kg/m <sup>3</sup>
$\varphi$	Eficiência teórica do conversor tipo PHS, %
$\varphi_{máx}$	Eficiência teórica máxima do conversor tipo PHS, %
$\phi_A$	Razão de área definida na 1 <sup>a</sup> formulação do método DC
$\phi_B$	Razão de área definida na 2 <sup>a</sup> formulação do método DC
$\omega$	Frequência angular de onda, s <sup>-1</sup>

### Subscritos

$()_m$	variável em escala de laboratório
$()_o$	parâmetro geométrico ótimo (otimizado)
$()_r$	variável em escala real

### Sobrescritos

$()^*$	grandeza não dimensional (adimensionalizada)
--------	--

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos alcançados ao longo do último século se pautaram quase que inteiramente na energia proveniente de combustíveis fósseis. Entretanto, as implicações decorrentes do uso desses recursos em larga escala tornaram-se conhecidas, particularmente, a partir da crise do petróleo ocorrida na década de 1970, que evidenciou as limitações da sua exploração. Desde então, a energia deixou de ser vista como um recurso farto e inesgotável, passando a ser tratada sob a ótica da eficiência [Bulkin, 2003; Falnes, 2007; Falcão, 2010].

Nas últimas décadas, diversos estudos científicos passaram a alertar a respeito das consequências ao meio ambiente, relacionadas às emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), decorrentes, dentre outros, do uso de combustíveis fósseis [IEA, 2016]. Tais considerações culminaram na criação do Protocolo de Kyoto em 1997 [UNDP, 2015; UNFCCC, 2017].

Por outro lado, atualmente, o consumo de energia está diretamente vinculado ao desenvolvimento econômico e à qualidade de vida de uma nação, pois reflete tanto o nível do setor industrial quanto o poder aquisitivo da população [ANEEL, 2008; UNDP, 2015]. Tal relação aponta para um crescimento da demanda por energia nas próximas décadas, impulsionado não somente pelo desenvolvimento econômico de algumas nações, mas também pelo crescimento populacional. Sobre esse aspecto, a Organização das Nações Unidas (UN – *United Nations*) estima que a população mundial, que em 2015 era de cerca de 7 bilhões de pessoas, poderá chegar, até 2050, a aproximadamente 9 bilhões [UN, 2015].

Nesse ínterim, a Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) projeta um crescimento na demanda energética mundial em torno de 37 % (em termos de fontes primárias – combustíveis: carvão, petróleo, gás, nuclear, renováveis), a qual em 2012 foi de aproximadamente 13.300 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe – *million tonnes of oil equivalent*) e poderá chegar em 2040 a aproximadamente 18.300 Mtoe (conforme Figura 1.1). Desse total de energia, o maior aumento se refere ao consumo de eletricidade, que praticamente dobra no período de 2012 a 2040, com um crescimento em torno de 5 % na participação do consumo total de energia mundial, conforme Figura 1.2 [IEA, 2014].

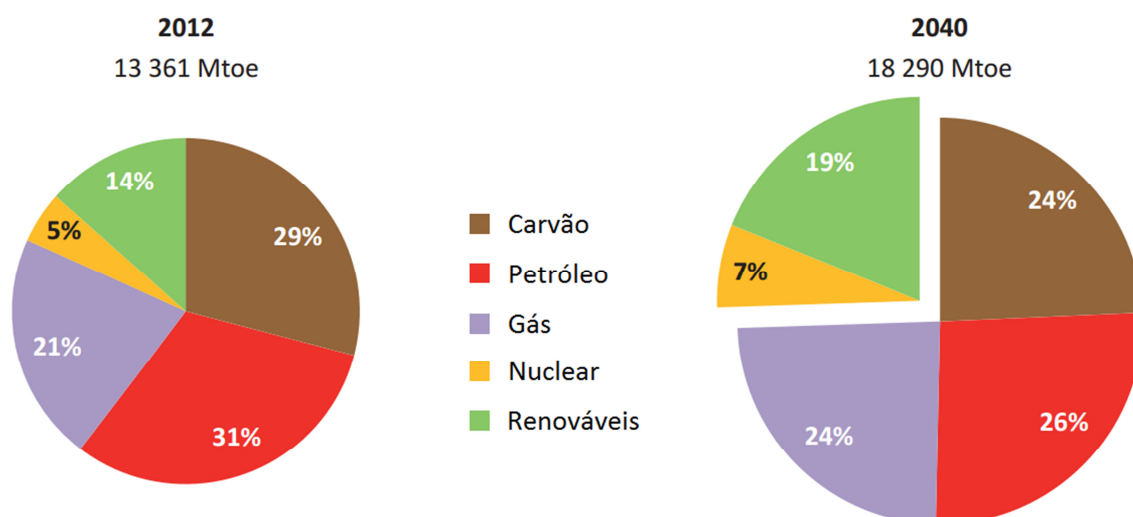


Figura 1.1 – Demanda energética mundial por fontes primárias [adaptado de IEA, 2014].

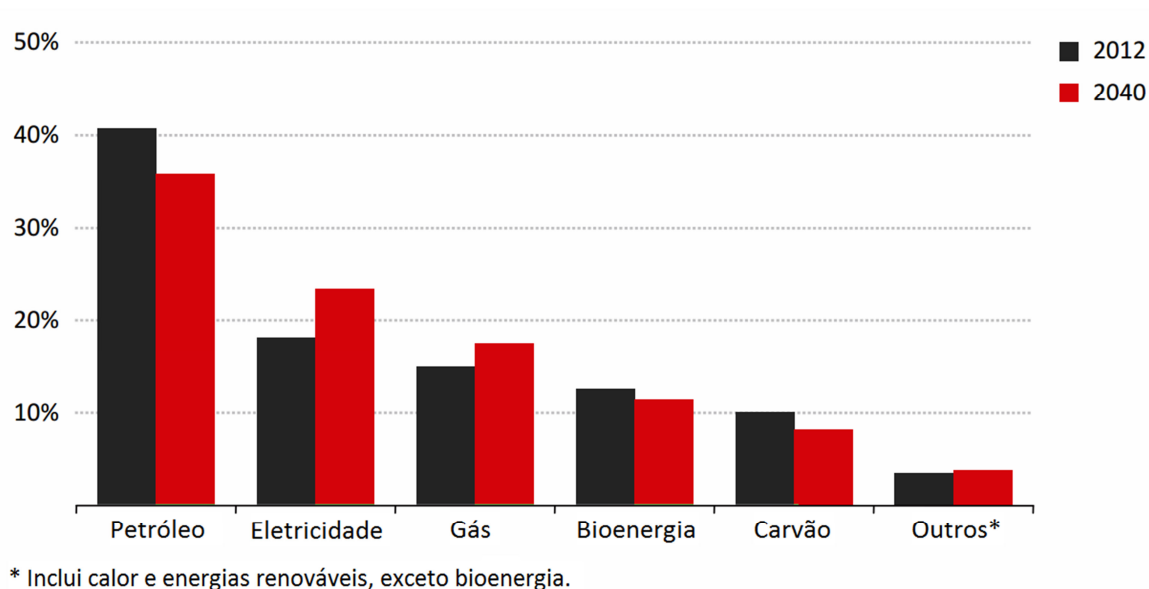


Figura 1.2 – Demanda energética mundial por fontes de consumo [adaptado de IEA, 2014].

## 1.1 Motivação

Diante desse cenário, diversas iniciativas têm sido realizadas a fim de pesquisar, desenvolver e viabilizar novas tecnologias, bem como implantar e melhorar tecnologias existentes, que permitam a obtenção de energia, principalmente eletricidade, com a menor quantidade de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) possível [Pelc e Fujita, 2002; Falnes, 2007]. Em outras palavras, tem ocorrido um processo de diversificação das matrizes energéticas em diversos países, com foco em fontes de energia renováveis e de menor impacto



ambiental como, por exemplo, energia eólica, solar, geotérmica e dos oceanos [ANEEL, 2008; Margheritini et al., 2012; IEA, 2016].

Nesse processo, os oceanos têm se destacado como uma alternativa promissora devido ao seu elevado potencial de energia, o qual está disponível em diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia das ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos [Uihlein e Magagna, 2016]. No entanto, as ondas de superfície concentram a maior parte deste recurso, com uma potência disponível global estimada em  $2,11 \pm 0,05$  TW, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo [Gunn e Stock-Williams, 2012].

Apesar de ainda não ser considerada uma alternativa viável, devido ao alto custo das tecnologias atuais e a pouca disponibilidade de dados das ondas na costa brasileira, estudos recentes indicam uma disponibilidade que pode variar de 6,00 a 22,30 kW/m (quilowatt por metro de frente de onda) ao longo da plataforma continental sul-sudeste do Brasil [Contestabile et al., 2015; Oleinik et al., 2016; Lisboa et al., 2017].

Outro aspecto importante é a densidade energética das ondas. Estima-se que a energia das ondas proporcione de 15 a 20 vezes mais energia, por metro quadrado, que a energia eólica ou solar [Vining e Muetze, 2009; Yuce e Muratoglu, 2015]. Portanto, mesmo com estimativas conservadoras quanto à eficiência dos conversores de energia das ondas (WECs – *Wave Energy Converters*) em energia elétrica, as boas perspectivas têm estimulado pesquisas científicas e tecnológicas para o aproveitamento desta fonte de energia [Astariz et al., 2015].

Entre as diferentes soluções que têm sido pesquisadas e desenvolvidas para o aproveitamento da energia das ondas, nenhuma delas encontra-se consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores [Chozas e Soerensen, 2009; Son et al., 2016].

Além disso, estruturas de conversão de energia que aproveitam diferentes recursos renováveis do oceano numa mesma instalação, tem se mostrado uma importante alternativa como forma de tornar esta uma opção competitiva em termos de custos [Lund, 2006; Astariz e Iglesias, 2016]. De modo semelhante, estruturas que desempenham mais de uma função também possibilitam uma redução nos custos de instalação, como é o caso dos conversores de energia das ondas associados a quebra-mares [Ning et al., 2017], como, por exemplo, os sistemas de coluna de água oscilante (OWC – *Oscillating Water Column*) *onshore* [Falcão e

Henriques, 2016], de galgamento *onshore* [Contestabile et al., 2017] e de placa horizontal submersa (PHS) *near-shore* [Graw, 1993a; Seibt et al., 2012a].

## 1.2 Objeto de Estudo

O sistema de placa horizontal submersa (PHS) é um tipo de estrutura utilizada em engenharia costeira, como quebra-mar submerso, para fins de proteção costeira, que pode ser utilizada, também, como conversor de energia das ondas (WEC – *Wave Energy Converter*) [Graw, 1993a; Carter, 2005; Seibt et al., 2014a]. A utilização dessa estrutura como WEC tem como principal característica a dupla funcionalidade da estrutura, uma vez que o mesmo dispositivo utilizado para conversão de energia das ondas não deixa de atuar como quebra-mar submerso [Graw, 1994; Ning et al., 2015].

No presente trabalho o foco se volta para o estudo de uma placa submersa, cuja estrutura básica apresenta as seguintes características: plana, retangular, horizontal, impermeável (sólida e não porosa), rígida e estática (fixada ao fundo por uma estrutura rígida). Portanto, essa estrutura e formato serão tomados como base para a proposta de variações geométricas da placa e da área livre abaixo da mesma.

Assim, o termo “placa horizontal submersa” (PHS) será adotado, ao longo do texto, em referência a uma estrutura com as características previamente mencionadas, sendo que quaisquer variações propostas serão devidamente indicadas no texto quando consideradas.

Tendo em vista que diversas propostas de sistemas baseados em placa submersa são encontradas na literatura, com diferentes formas e estruturas, e que muitos trabalhos, por simplicidade, referem-se a esses sistemas por termos semelhantes, propõe-se uma desambiguação para o termo adotado a fim de distinguir as características assumidas no presente estudo de outras encontradas na literatura. Com esta finalidade, foi organizada uma breve pesquisa bibliográfica relacionando alguns trabalhos sobre estas estruturas, cujos termos empregados e suas referências encontram-se organizados no Apêndice A – Desambiguação: Placa Submersa.

## 1.3 Estado da Arte

O sistema de PHS foi estudado inicialmente como um quebra-mar submerso para proteção costeira. Dick e Brebner, 1968, observaram, em experimentos realizados com blocos

submersos sólidos e permeáveis, a ocorrência de um padrão de circulação do escoamento ao redor dos blocos permeáveis, dando origem aos estudos de uma placa submersa horizontal.

Mais tarde, experimentos de Graw, 1992, apresentaram este equipamento como um eficiente filtro de ondas, sendo vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos especialmente pelo escoamento que ocorre sob a PHS. O autor descreveu que este escoamento inicialmente alterna de sentido, porém, devido à sucessão de ondas passando sobre a PHS, o escoamento se desenvolve e passa a apresentar um comportamento pulsante, cujos pulsos ocorrem apenas no sentido contrário ao da propagação das ondas. Nesse mesmo trabalho, afirma-se que este escoamento é bastante estável, não sofrendo alterações significativas mesmo quando a região abaixo da PHS é parcialmente obstruída.

A partir desta observação, Graw, 1993a, concluiu que o dispositivo de PHS poderia ser usado como WEC, bastando instalar uma turbina hidráulica, abaixo da placa (Figura 1.3), para captar a energia do escoamento induzido pela passagem da onda. Esta é a primeira referência à PHS como um dispositivo que pode atuar como quebra-mar e como WEC.

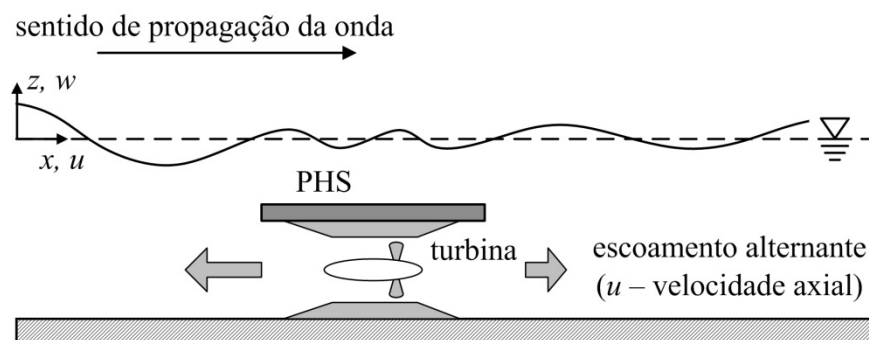


Figura 1.3 – Representação do dispositivo de PHS [adaptado de Graw, 1994].

Em estudo subsequente, Graw, 1993b, compilou os resultados de investigações teóricas e experimentais, acerca do funcionamento da PHS como quebra-mar, com o objetivo de determinar os principais parâmetros a serem investigados na abordagem da PHS como conversor. Com isso, foram evidenciadas as relações entre: o comprimento de onda e o comprimento da PHS; a profundidade de submersão da PHS e a profundidade da água em repouso. Esse estudo apresentou, ainda, avaliações da eficiência da PHS, revelando um melhor desempenho da mesma quando a área livre sob a placa é reduzida para 12 %, porém os resultados apontaram valores máximos em torno de 4 % (de eficiência).

Em Graw, 1994, são apresentadas uma série de vantagens desse conversor que o diferenciam dos demais WECs. Dentre estas, é destacada a menor incidência de corrosão devido ao fato deste conversor funcionar totalmente submerso, uma vez que muitos WECs são instalados na superfície, isto é, na região de interface da água com o ar, facilitando a ocorrência desta reação e aumentando os custos de manutenção.

Com o avanço dos seus estudos a respeito do dispositivo de PHS como WEC, o engenheiro e professor alemão Kai-Uwe Graw, da Universidade de Wuppertal (Wuppertal, Alemanha), obteve o reconhecimento de sua patente em 1995 [Graw, 1995a]. Em Graw, 1995b, são apresentadas as equações consideradas pelo autor para a avaliação de desempenho do conversor [Orer e Ozdamar, 2007].

Graw, 1996, apresentou um estudo sistemático a respeito da viabilidade de WECs associados a quebra-mares incluindo o dispositivo de PHS nesse contexto. Em um folheto informativo, do mesmo autor [Graw, 1998], é apresentada uma proposta para a concepção de um protótipo do equipamento através de uma representação esquemática tridimensional (3D).

No estudo de Carter, 2005, o dispositivo de PHS é abordado como WEC e estudado a partir de um modelo numérico bidimensional (2D), empregando o Método de Elementos de Contorno (BEM – *Boundary Element Method*) e a teoria linear de ondas para um escoamento potencial. Ao apresentar o campo de velocidades sob a PHS, obtido por este modelo, contribuiu para o entendimento do escoamento alternante que se desenvolve sob a mesma em decorrência da passagem das ondas. Os resultados evidenciaram, contudo, que este escoamento alterna constantemente de sentido, contrariando afirmações de Graw, 1992, e, assim, indicando a necessidade de uma turbina hidráulica que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento.

Carter et al., 2006, apresentaram um estudo numérico 2D sobre o escoamento abaixo da PHS (ao qual denominaram “escoamento reverso”) e compararam dois modelos numéricos: um modelo linear, utilizando o método BEM com fluido não-viscoso, e um modelo de turbulência *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS), associado ao método *Fractional-Step Method* com fluido viscoso. Os autores examinaram a diferença de fase entre a elevação da onda no início da placa (borda de incidência da onda) e no final da placa (borda de galgamento da onda), bem como a diferença entre a magnitude das velocidades horizontal e vertical abaixo da PHS. Os autores observaram a ocorrência de quebra da onda sobre a PHS em alguns casos analisados. Ao comparar os dois modelos numéricos os autores concluíram que tanto a viscosidade como a turbulência não foram determinantes para a ocorrência do

“escoamento reverso” abaixo da PHS, e que, além disso, ambos os modelos considerados captaram o efeito “pulsante” (alternante) do escoamento sob a PHS.

Orer e Ozdamar, 2007, apresentaram um estudo experimental de avaliação da eficiência do dispositivo como WEC. Nesse estudo os autores analisaram o comportamento da velocidade do escoamento sob a PHS quando o dispositivo, em uma altura fixada, é sujeito a diferentes características de ondas incidindo sobre o mesmo. Os autores consideraram tanto casos com a área abaixo da PHS totalmente livre, como casos com diferentes níveis de restrição abaixo da PHS, onde incluíram estruturas retangulares e triangulares. Em seus resultados, comprovaram o melhor desempenho da PHS quando a área sob a placa é reduzida (conforme Graw, 1993b), porém, indicaram a possibilidade de uma eficiência de até 60 % para o dispositivo, contrapondo-se às conclusões de Graw, 1993b, que havia predito uma eficiência de apenas 4 %. Além disso, propuseram a necessidade de uma turbina hidráulica que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento sob a PHS, uma vez que, mesmo ocorrendo pulsos de maior magnitude no sentido contrário ao de propagação das ondas, o escoamento apresenta alternância de sentido.

Em Seibt et al., 2012b, é apresentado um modelo numérico 2D do dispositivo de PHS baseado no Método de Volumes Finitos (FVM – *Finite Volumes Method*), para solução das equações governantes, e no modelo *Volume of Fluid* (VOF), para descrição da interface água-ar. Esse modelo foi validado com base nos resultados experimentais de Orer e Ozdamar, 2007, a partir da reprodução de um caso em que não houve restrições ao escoamento abaixo da PHS. Nesse estudo foi realizada uma avaliação da influência do comprimento da PHS em relação à eficiência teórica do dispositivo, para uma onda regular de 2ª ordem, com características fixas, incidindo em cinco diferentes comprimentos da PHS. A eficiência teórica do conversor, dada pela razão entre a potência média disponível no escoamento sob a PHS e a potência média da onda incidente, foi utilizada para avaliar sua capacidade de conversão. Nesse modelo não foi considerada qualquer perda de carga sob a PHS que representasse a presença de uma turbina hidráulica. Os resultados indicaram que o desempenho do dispositivo não foi afetado significativamente pela variação do comprimento da PHS, para a maior parte dos casos estudados, apresentando uma eficiência em torno de 20 % para quatro casos em que o comprimento da PHS era inferior ao comprimento da onda incidente, havendo uma redução de 4 % na eficiência para o caso em que o comprimento da PHS foi igual ao da onda incidente.

Seibt et al., 2012c, realizaram uma avaliação numérica da eficiência teórica da PHS como WEC considerando a incidência de uma onda regular de 2ª ordem, com características fixas, em seis diferentes alturas da PHS em relação ao fundo. Os resultados apresentados mostraram que a redução da altura da PHS acarretou no aumento da magnitude da velocidade do escoamento sob a mesma, para a maior parte dos casos estudados. A análise da eficiência da PHS mostrou que este parâmetro é sensível à variação da altura da PHS, de modo que a maior eficiência obtida foi de 27 %, para o caso em que a PHS foi posicionada mais próxima à superfície. Observou-se, ainda, a ocorrência de um mínimo de 14 % de eficiência quando a altura foi reduzida em 8 % e uma redução de 10 % na eficiência quando a altura foi reduzida em 16 %.

Em Seibt et al., 2013, foi apresentada uma análise numérica da influência das características da onda incidente em relação à eficiência teórica do dispositivo. Foram analisados seis diferentes períodos de onda, do tipo regular de 2ª ordem, incidindo em uma PHS com uma altura fixa e próxima à superfície, sem considerar qualquer perda de carga sob a PHS. Os resultados mostraram que a potência da onda incidente apresentou uma relação direta com a eficiência, de forma que ondas de maior período e comprimento (mais energéticas) acarretaram uma maior eficiência, chegando a um máximo em torno de 32 %. Foi observado, também, que o melhor desempenho do dispositivo ocorreu nos casos em que a onda apresentava comprimento aproximadamente três vezes superior ao comprimento da PHS, enquanto o pior desempenho, em torno de 12 %, ocorreu nos casos em que a onda apresentava comprimento próximo ao comprimento da PHS.

Seibt et al., 2014a, apresentaram um estudo numérico da eficiência teórica do dispositivo de PHS em seis diferentes alturas da PHS em relação ao fundo. Entre os resultados, são apresentados os perfis de velocidade do escoamento sob a PHS para cada caso estudado, bem como, o comportamento do campo vetorial de velocidades do escoamento, ao longo de um período de onda, para o caso de maior eficiência. Os resultados apresentaram uma eficiência de até 64 % para o caso em que a PHS foi posicionada mais próxima à superfície, sendo esta 17 % superior ao caso de maior submersão da PHS.

Em outro estudo, Seibt et al., 2014b, apresentaram uma avaliação numérica da influência da redução área sob a PHS na eficiência teórica do dispositivo. Foram analisadas configurações com a inserção de estruturas triangulares sob a PHS, a fim de reduzir a área sem alterar a altura de submersão, e comparadas com o caso sem restrição. Os resultados mostraram que a redução da área ocasionou um crescimento de até 300 % na magnitude da

velocidade do escoamento e um decréscimo em torno de 5 % na eficiência do dispositivo, entre os casos analisados.

Seibt, 2014, apresentou um estudo sobre o funcionamento do dispositivo de PHS como WEC onde foi avaliada a influência de diferentes alturas da PHS, com comprimento fixo e sujeitas a diferentes períodos de ondas regulares de 2ª ordem, sobre a eficiência teórica do equipamento. Neste trabalho o modelo que foi empregado corresponde aos procedimentos de validação e verificação publicados por Seibt et al., 2012b e 2014a. A análise dos resultados contemplou perfis de velocidade abaixo da PHS e considerações sobre o comprimento relativo da PHS em relação às ondas consideradas. Não foram considerados efeitos de perda de carga abaixo da PHS referentes à posição da turbina hidráulica. Os resultados confirmaram a influência direta da potência da onda incidente sobre a magnitude das velocidades do escoamento abaixo da PHS como observado por Seibt et al., 2013. Foi observado que, nos casos em que a onda incidente apresentava comprimento igual ou três vezes superior ao comprimento da PHS, a profundidade de submersão não afetou significativamente o desempenho do dispositivo. Os resultados mostraram que ondas mais longas podem levar a uma eficiência de até 35 % entre os casos analisados.

Por sua vez, Seibt et al., 2015, apresentaram uma avaliação numérica do efeito da altura relativa da PHS (dada pela razão entre a altura da PHS e a profundidade da água) em relação a eficiência do conversor. Neste trabalho foram consideradas seis ondas regulares, com diferentes períodos, incidindo em uma PHS de comprimento fixo em três alturas relativas diferentes. Tendo por base parte dos resultados de Seibt, 2014, nesta avaliação os autores identificaram um melhor desempenho da PHS com a maior altura relativa considerada, além disso indicaram um acréscimo de até 27 % na eficiência dependendo das características da onda incidente.

Em Windt et al., 2016, foi apresentado um estudo numérico, utilizando o método *Direct Numerical Simulation* e o *software* Ansys Fluent®, sobre a influência de efeitos 3D do escoamento nos esforços sobre uma PHS. Os autores construíram um modelo numérico 3D, empregando o modelo multifásico VOF, em semelhança com um modelo experimental, para validação dos resultados deste modelo, e compararam estes resultados com os resultados de um modelo 2D, baseado no Método de Elementos Finitos (FEM – *Finite Elements Method*) e previamente validado. Foram feitas verificações com casos 2D da literatura e do modelo em FEM. Para tanto, os autores testaram diferentes distâncias do equipamento em relação às paredes do tanque de ondas numérico, além do efeito de diferentes condições de contorno

aplicadas às paredes laterais do tanque numérico. Ao analisar os esforços sobre a PHS, os autores concluíram que: i) simplificações quanto à viscosidade e à condição de contorno de simetria não afetaram significativamente os resultados para os casos considerados; ii) modelos 2D devem ser revisados com cautela no que se refere a decisões de engenharia a respeito dos esforços sobre a estrutura; iii) modelos 3D de tanques de ondas numéricos devem ter largura três vezes maior que a largura da PHS analisada.

Em estudo recente, Kharati-Koopae e Kiali-Kooshkghazi, 2019, apresentam uma avaliação numérica do efeito da variação do comprimento de uma PHS sobre sua eficiência quando a área livre abaixo da PHS é obstruída. Empregando um domínio 2D, simulado com o método FVM e o modelo VOF, os autores validaram seu modelo a partir dos resultados experimentais de Orer e Ozdamar, 2007, e verificaram seus resultados de duas formas: por meio da elevação de superfície livre e dos perfis de velocidades da dispersão de ondas; em ambos os casos seus resultados foram comparados com resultados analíticos e com resultados de Seibt et al., 2014a. Os autores consideraram quatro ondas regulares de 2ª ordem diferentes (dois períodos e duas alturas) incidindo em uma PHS de espessura fixa, com geometrias obtidas por combinações entre: três alturas da PHS diferentes, três diferentes níveis de obstrução da área abaixo da PHS e cinco diferentes comprimentos da PHS. Para a restrição da área abaixo da PHS foi utilizado um obstáculo com forma triangular, cuja base foi posicionada no fundo do canal, com largura igual ao comprimento da PHS. Os autores observaram a ocorrência de uma relação inversa e não linear entre a abertura abaixo da PHS e a magnitude da velocidade do escoamento, ou seja, a velocidade do escoamento aumentou com a redução da área abaixo da PHS, semelhante ao observado por Seibt et al., 2014b. Em seus resultados, mostraram que a eficiência da PHS aumentou conforme o comprimento da PHS diminuiu, bem como, quando a altura da PHS aumentou. A partir dos parâmetros considerados no estudo, os autores encontraram uma eficiência de até 52 %, dependendo das características da onda incidente e da geometria do dispositivo.

Já Carmigniani et al., 2019, apresentam um estudo com modelo 2D, empregando o método *Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics* (WCSPH), cujo domínio computacional possui zonas de absorção das ondas, tanto a montante (absorção ativa), quanto a jusante da PHS (praia numérica). Neste trabalho os autores consideram diferentes ondas lineares incidindo em uma PHS com geometria invariável (altura, comprimento e espessura fixas) e validam seu modelo com resultados experimentais da literatura. A fim de avaliar a relação entre o transporte de massa em torno da PHS e a eficiência do dispositivo como WEC,



quanto ao que nomearam de “bombeamento reverso”, o modelo considera diferentes razões de abertura da área sob a PHS. Ao analisarem a vazão mássica em torno da PHS, os autores propõe uma explicação para o “bombeamento reverso” baseada na teoria linear de ondas. Quanto a eficiência, entre os casos analisados, os autores encontraram uma eficiência de 25 % para o caso sem obstrução abaixo da PHS, enquanto para o caso com a área 90 % obstruída encontram uma eficiência máxima de 10 %.

Recentemente, Seibt et al., 2019, apresentaram uma análise mais ampla sobre parte dos resultados de Seibt, 2014. Neste trabalho são analisados casos em que a PHS, com comprimento e espessura fixa, disposta em seis alturas relativas distintas, é submetida à incidência de ondas regulares com seis diferentes períodos entre 1,25 e 3,50 s. Nesta análise é evidenciada não somente a preponderância das características da onda incidente, mas também o efeito significativo do comprimento relativo e da altura relativa da PHS sobre o desempenho do dispositivo como WEC. Os resultados demonstraram uma diferença de até 24 % na eficiência do conversor, dependendo das características da onda e da geometria da PHS, e o resultado máximo encontrado foi uma eficiência de 31,9 % entre os casos analisados.

Em outro estudo recente, He et al., 2019, apresentam, segundo os autores, a primeira análise ampla da PHS aliando sua função como WEC e como quebra-mar. O autores utilizaram um modelo 2D, empregando o método WCSPH para simular a interação de diferentes ondas regulares com a PHS, onde avaliaram diversos parâmetros geométricos do dispositivo. Neste trabalho os autores visaram a otimização da geometria da PHS, tomando como função objetivo dois parâmetros de desempenho: o coeficiente de transmissão, enquanto quebra-mar, e a eficiência energética, enquanto WEC. Através da regressão dos resultados foram obtidas fórmulas polinomiais e exponenciais para os parâmetros de desempenho da PHS. Entre os casos analisados, os autores recomendaram duas geometrias ótimas: uma para a função de quebra-mar, com um comprimento relativo (dado pela razão entre o comprimento da PHS e o comprimento de onda) entre 0,38 e 0,85; e outra para a função de WEC, com um comprimento relativo entre 0,24 e 0,25. Com estas configurações os autores obtiveram eficiências entre 2,3 e 7,8 %. Em suas conclusões os autores sugerem que, mesmo com uma eficiência de valores modestos, se considerada uma PHS de 1 km de largura, haveria a possibilidade de suprir a demanda de eletricidade de um grupo de até 500 pessoas em países moderadamente desenvolvidos.

## 1.4 Proposta e Objetivos

Diante desta revisão sobre o dispositivo de PHS como WEC, percebe-se que o tema abordado nesta tese representa uma contribuição ao estado da arte, tendo em vista a ausência de estudos com aplicação do método Design Construtal a este conversor.

Sendo assim, o presente trabalho apresenta um estudo numérico do dispositivo de PHS como conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica aplicando Design Construtal. O uso de ferramentas computacionais para simulação de escoamentos, chamadas Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), tem permitido, dentre outros, o estudo numérico de WECs. Os recursos de CFD constituem uma importante ferramenta para um melhor conhecimento dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos nesses equipamentos, bem como, para a investigação de parâmetros operacionais e construtivos desses dispositivos, permitindo a obtenção de recomendações teóricas e estudos que visem sua otimização geométrica [Seibt et al., 2014c].

Por sua vez, o Design Construtal é um método empregado em engenharia para a melhoria do desempenho de sistemas que contenham alguma espécie de escoamento (sistemas de escoamento). Esse método, associado a um método de otimização, permite a avaliação geométrica desses sistemas a partir de um princípio físico que conduz a uma maximização do seu desempenho global [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008]. Esse princípio é a Lei Construtal do Design e Evolução, a qual indica o sentido em que ocorre a evolução dos sistemas de escoamento [Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012].

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho de tese é a caracterização do funcionamento e melhoria do desempenho de um dispositivo de PHS a partir do estudo numérico de sua geometria com o uso do método Design Construtal.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Desenvolver a metodologia de aplicação do Design Construtal para o dispositivo de PHS;

- Aplicar o método Design Construtal para maximizar o desempenho do conversor tipo PHS em escala de laboratório, por meio de simulações numéricas;
- Analisar dados das simulações para caracterização do funcionamento do conversor e do escoamento sob a PHS;
- Aplicar o método Design Construtal para maximizar o desempenho do conversor tipo PHS em escala real, por meio de simulações numéricas;
- Analisar a similaridade entre os modelos em escala real e de laboratório do conversor tipo PHS;
- Analisar e maximizar o desempenho do conversor tipo PHS em escala real para uma faixa de períodos de onda regular incidente;
- Propor recomendações teóricas para o dimensionamento do conversor tipo PHS.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

Para a realização do estudo proposto, este trabalho foi estruturado em seis capítulos, dos quais os quatro primeiros estão relacionados à fundamentação teórica e à formulação do problema e os dois últimos ao desenvolvimento das simulações numéricas e considerações acerca dos resultados.

No Capítulo 1 é apresentado o tema, o estado da arte a respeito do sistema de PHS, a proposta de estudo e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2, tem-se uma breve revisão a respeito de energia das ondas, seu potencial energético e as principais tecnologias de WECs, com destaque ao conversor tipo PHS.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos do método Design Construtal e uma breve revisão de sua aplicação ao estudo de WECs. Em seguida, no Capítulo 4, é apresentada a descrição do problema estudado, sua modelagem matemática e numérica, a metodologia adotada para a análise de desempenho do conversor tipo PHS e o Design Construtal aplicado ao dispositivo.

No Capítulo 5, encontram-se os resultados e a discussão dos mesmos. Por fim, no Capítulo 6, têm-se as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros. Após o capítulo final são apresentadas as referências bibliográficas do trabalho seguidas de seis apêndices e um anexo, que fornecem informações complementares do trabalho.

## 2 ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição do recurso energético das ondas do mar, juntamente com as principais tecnologias de aproveitamento dessa fonte. Na última parte, destaca-se o sistema de PHS com a descrição do seu princípio de funcionamento, tanto como WEC quanto como quebra-mar.

### 2.1 Potencial Energético dos Oceanos

O recurso energético dos oceanos encontra-se distribuído sob diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos [Uihlein e Magagna, 2016]. Destas, a energia das ondas é a que mais se destaca, devido a sua grande concentração de energia [Cruz e Sarmento, 2004]. Também por esta razão, tem conquistado grande importância, nas últimas décadas, em todo o mundo; sendo considerada um dos recursos renováveis mais promissores [Falcão, 2010].

A energia das ondas do mar pode ser considerada uma forma concentrada de energia solar, uma vez que as ondas são geradas pela ação dos ventos sobre a superfície dos oceanos e estes decorrem do aquecimento desigual das massas de ar em contato com a terra e o mar. Quando se aborda o tema energia das ondas, os interesses concentram-se nas ondas de superfície ou ondas de gravidade, que são geradas pela interação entre o vento e a superfície do mar, porque estas apresentam maior nível energético conforme pode ser observado na Figura 2.1 [McCormick, 1981].

A quantidade de energia transportada pelas ondas depende essencialmente de sua altura e período, os quais são determinados pelas características dos ventos na região de geração (*fetch* – McCormick, 1981). Uma vez geradas, estas podem se deslocar em alto mar por milhares de quilômetros quase sem perdas de energia [Cruz e Sarmento, 2004]. Em termos globais, estima-se uma disponibilidade de potência, nas ondas de superfície, em torno de  $2,11 \pm 0,05$  TW, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo [Gunn e Stock-Williams, 2012].

Uma vez que a potência das ondas é influenciada pela incidência dos ventos, faz-se necessário o conhecimento prévio das características das ondas que ocorrem na região onde se pretende a instalação de um desses equipamentos conversores. A energia das ondas é expressa, geralmente, em potência por metro de frente de onda; sendo assim, regiões com

boas médias anuais, como a costa sul da América do Sul, apresentam valores de potência entre 20 e 70 kW/m (Figura 2.2) [Falcão, 2010]. Estudos recentes indicam que a disponibilidade de energia, ao longo da plataforma continental sul-sudeste do Brasil, pode variar de 6,00 a 22,30 kW/m [Contestabile et al., 2015; Oleinik et al., 2016; Lisboa et al., 2017].

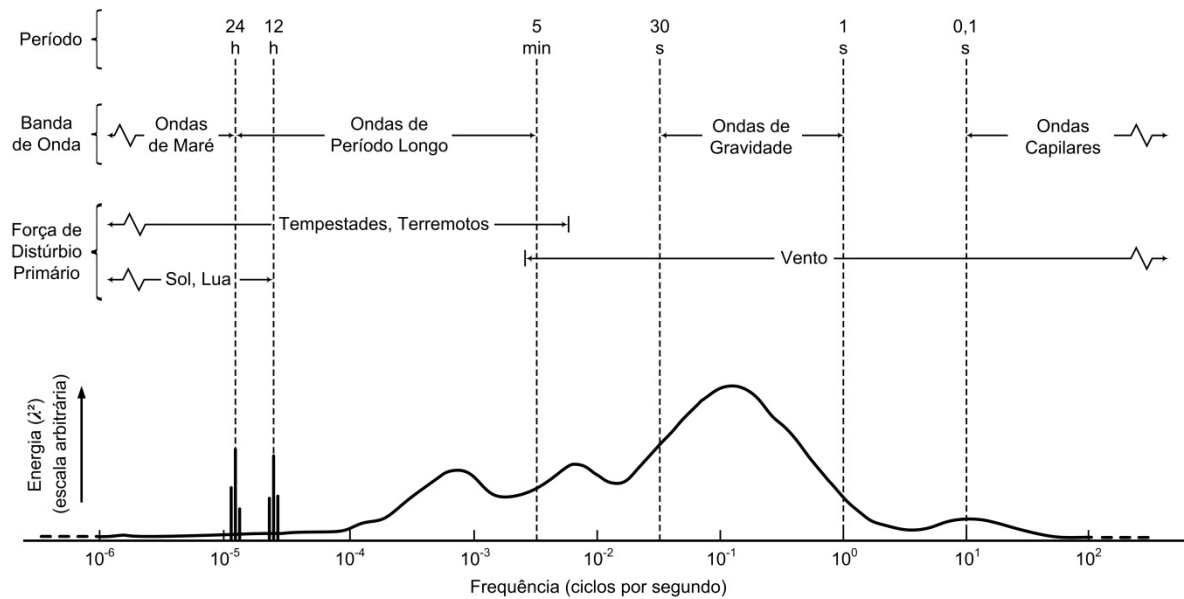


Figura 2.1 – Espectro qualitativo de energia das ondas [adaptado de Kinsman, 1965].

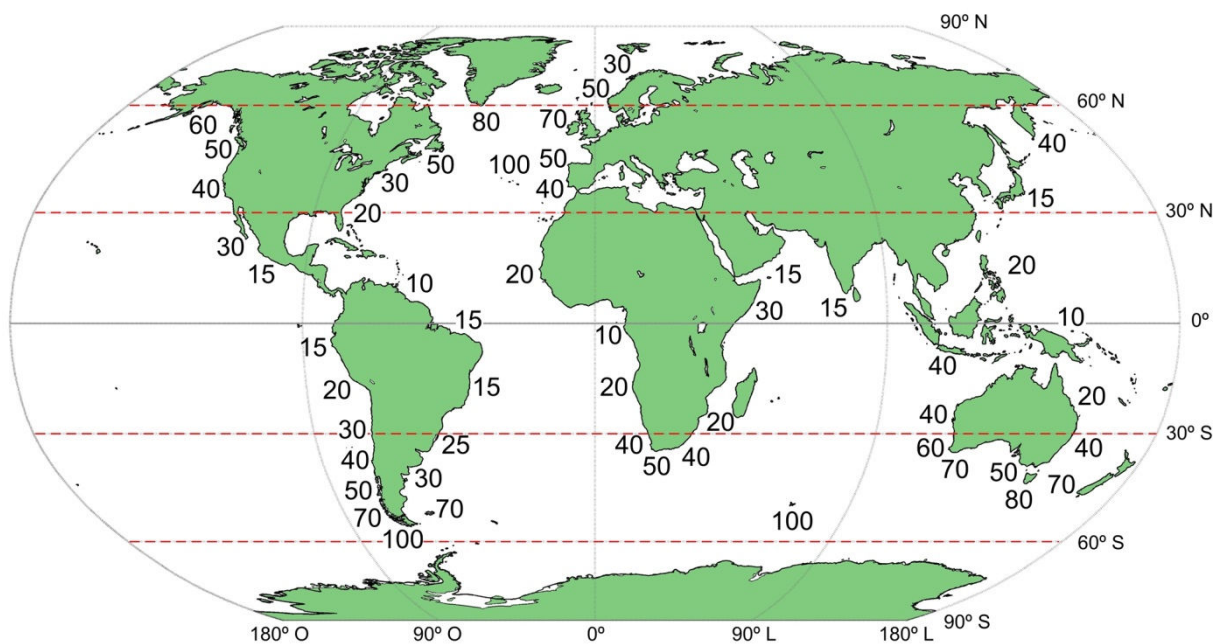


Figura 2.2 – Distribuição global da potência média anual das ondas (valores em kW/m) [adaptado de Thorpe, 1999; 2004].

Apesar do seu potencial, esse recurso ainda tem sido pouco explorado, a principal razão se deve ao alto custo de implantação das tecnologias atuais. Nesse sentido, estruturas de conversão de energia que aproveitam diferentes recursos renováveis do oceano numa mesma instalação, tem se mostrado uma importante alternativa como forma de tornar esta uma opção competitiva em termos de custos, principalmente no que diz respeito à possível complementariedade entre a energia das ondas e eólica *offshore* [Lund, 2006; Fusco et al., 2010; Caballero et al., 2013; Astariz e Iglesias, 2016, Singh et al., 2016].

De modo semelhante, estruturas que desempenham mais de uma função também tem sido abordadas pela possibilidade de redução nos custos de instalação, como é o caso dos WECs associados a quebra-mares [Ning et al., 2017]. Por exemplo, os sistemas: coluna de água oscilante (OWC – *Oscillating Water Column*) *onshore* [Falcão e Henriques, 2016]; galgamento *onshore* [Margheritini et al., 2009; Contestabile et al., 2017]; e PHS *near-shore* [Graw, 1993a; Seibt et al., 2012a]. Outra combinação analisada, ainda, é a associação de um OWC à estrutura de um píer [Dalla Vecchia et al., 2015].

No Brasil, a primeira geração de energia a partir das ondas do mar foi obtida num protótipo desenvolvido dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A geração aconteceu durante 10 min, no dia 24/06/2012, e alimentou os sistemas auxiliares de iluminação e ar-condicionado da Usina de Ondas localizada no Porto do Pecém, município de São Gonçalo do Amarante no estado do Ceará [ANEEL, 2013].

O projeto da usina, iniciado em 2009, se deu através de uma parceria entre a empresa Tractebel Energia S/A e a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE). O protótipo, que funcionou apenas de forma experimental, tem capacidade para geração de 50 kW de eletricidade. A geração, mesmo que incipiente, representou um avanço no panorama elétrico nacional, já que a costa brasileira apresenta boas condições para aproveitamento energético futuro [ANEEL, 2013].

## **2.2 Tecnologias de Conversão**

O aproveitamento da energia das ondas envolve processos hidrodinâmicos consideravelmente complexos do ponto de vista da sua formulação teórica, tanto pelos

fenômenos decorrentes da interação entre a água e o equipamento, como difração e radiação de ondas, como pela própria natureza aleatória do fenômeno de geração das ondas. Por esta razão, a concepção e o desenvolvimento de equipamentos capazes de converter essa energia é uma tarefa bastante complexa [Falcão, 2010].

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas, porém, atualmente, nenhuma delas ocupa uma posição consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores [Chozas e Soerensen, 2009; Son et al., 2016].

Diferentes critérios são utilizados para classificar os WECs, os mais usuais são: a localização com relação à costa e o princípio de funcionamento do conversor [Cruz, 2008].

O primeiro critério pode ser ilustrado conforme a Figura 2.3.

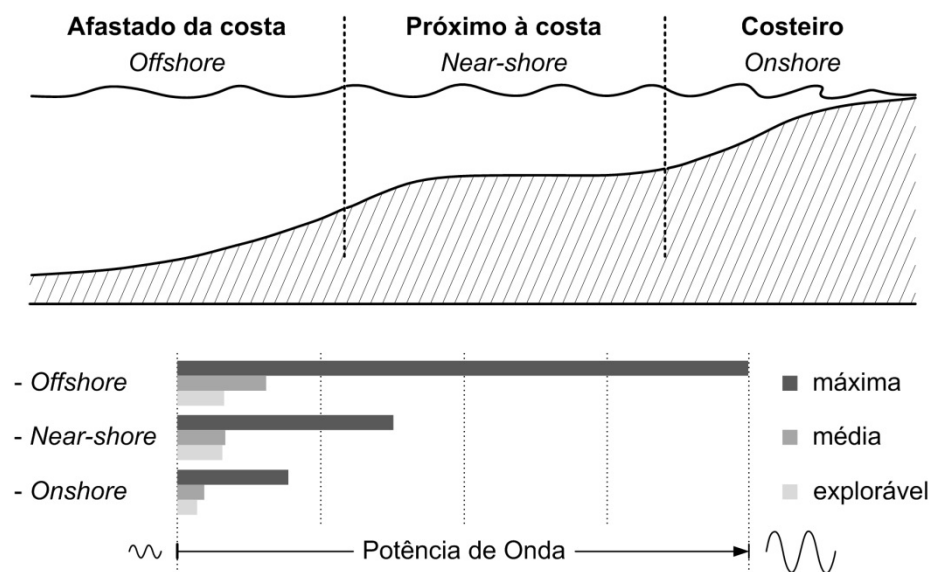


Figura 2.3 – Classificação dos conversores quanto à localização em relação à costa e distribuição qualitativa da potência das ondas em cada local [adaptado de AW-Energy, 2017].

Esse critério (Figura 2.3) permite classificar os equipamentos como [Cruz, 2008]:

- costeiro (*onshore*) – situados em região com profundidades de até 20 m, são geralmente presos ao fundo;
- próximo à costa (*near-shore*) – situados em região com profundidades entre 20 e 50 m, podem ser presos ao fundo ou flutuantes;

- afastado da costa (*offshore*) – situados em região com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes.

Já o segundo critério agrupa os WECs pelo seu princípio de funcionamento, conforme a Figura 2.4 [Falcão, 2010].

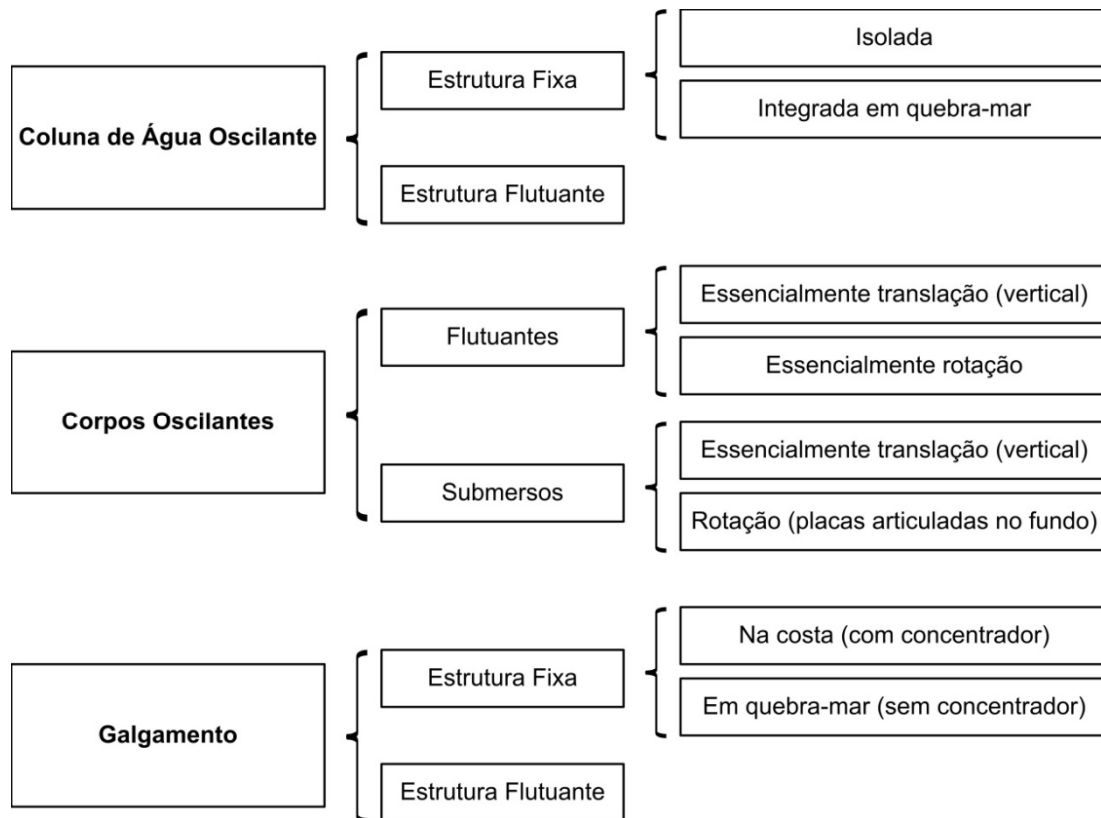


Figura 2.4 – Classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao princípio de funcionamento [adaptado de Falcão, 2010].

A Figura 2.5, apresenta a ilustração de alguns tipos de dispositivos conversores destacados a partir do critério de classificação do princípio de funcionamento.

Entretanto, estas classificações não contemplam todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em energia elétrica. Outros princípios de funcionamento podem ser usados, como é o caso do conversor do tipo PHS. Além disso, outras formas de classificação dos dispositivos WEC ainda tem sido discutidas na literatura [Margheritini et al., 2012].



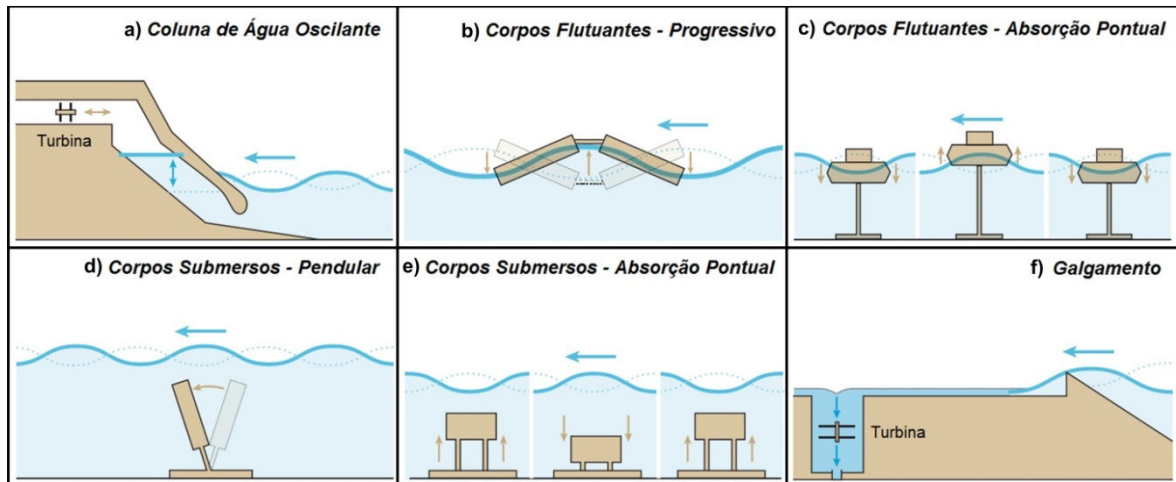


Figura 2.5 – Ilustração do princípio de funcionamento de alguns conversores de energia das ondas [adaptado de Callaway, 2007].

## 2.3 Sistema de Placa Horizontal Submersa

A fim de fornecer uma caracterização completa do sistema de PHS, esta seção apresenta uma descrição detalhada do seu princípio de funcionamento e, também, das suas principais características como WEC e como quebra-mar.

### 2.3.1 Princípio de Funcionamento

O sistema de PHS é um tipo de estrutura utilizada em engenharia costeira como quebra-mar, para fins de proteção costeira, e pode ser utilizado, também, como WEC [Graw, 1993a; Carter, 2005]. Enquanto quebra-mar, este sistema se destaca como um eficiente filtro de ondas, sendo vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos especialmente pelo escoamento característico que ocorre sob a placa (Figura 2.6).

O princípio físico do sistema de PHS é descrito por Graw, 1993a, como:

- ao atingir a placa, a onda que está se propagando é dividida em duas partes: uma onda de gravidade, acima da placa, e uma perturbação de pressão, abaixo da placa. O fluxo de energia, próximo à superfície, passa sobre a placa com a velocidade da onda, determinada pela redução da profundidade da água nessa região; já a outra parte, abaixo da placa, se propaga mais devagar, com a velocidade da distorção de pressão;

- assim que a onda de gravidade (menor) passa a placa e atinge a região após a mesma, uma nova onda é formada, a qual segue com mesmo sentido de deslocamento e mesmo comprimento de onda da onda original, porém com menos energia. Além disso, uma parte da energia, devido ao galgamento da onda sobre a placa, também se propaga na região abaixo da placa (para trás);
- origina-se assim, um forte escoamento pulsante no sentido contrário ao de propagação da onda, dependendo do comprimento da placa e da distribuição original do fluxo de energia na região próxima à superfície;
- a energia transferida por este escoamento, de volta para a região antes da placa, torna impossível, devido às distorções de pressão causadas, que as ondas seguintes se propaguem na região abaixo da placa e o escoamento torna-se intenso. Este escoamento é a razão pela qual a energia é refletida por esta estrutura. Como ele depende do equilíbrio de energia entre a região à frente da placa e a região posterior à placa, abaixo dela, a placa funciona como um filtro de ondas.

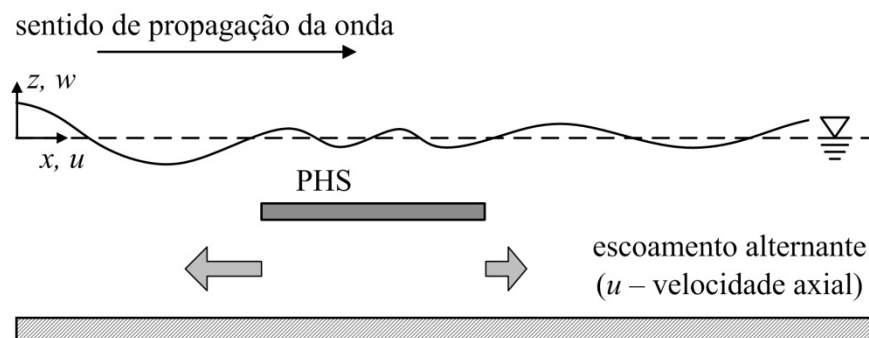


Figura 2.6 – Representação do sistema de PHS [adaptado de Graw, 1994].

Segundo Yu, 2002, outra forma possível para explicar o conceito físico de funcionamento da estrutura é compreender a função da PHS a partir do conceito de um atenuador de ondas ativo. Sabe-se que o movimento oscilatório da massa ativa pode ser controlado, de modo que a onda de dispersão gerada seja desfasada da onda progressiva na região de transmissão. A onda progressiva pode então ser parcialmente cancelada. Assim, a massa ativa desempenha o papel de um atenuador de ondas. As duas descrições permitem uma analogia funcional, entre o escoamento oscilatório (alternante) sob a PHS, descrito por Graw, 1993a, e a massa ativa, descrita por Yu, 2002.

### 2.3.2 Características da Placa Horizontal Submersa como Conversor

O conversor tipo PHS consiste no aproveitamento do escoamento que ocorre sob uma placa horizontal, imersa abaixo da superfície da água, como propulsão para uma turbina hidráulica (conforme Figura 1.3) instalada sob a mesma [Graw, 1993a; 1993b; 1995a].

Devido às características do seu princípio de funcionamento e à sua dupla funcionalidade (WEC e quebra-mar), o dispositivo de PHS se mostra adequado a locais próximos à costa, em condições de águas intermediárias, logo, podendo ser classificado como conversor *near-shore*.

Este conversor apresenta algumas vantagens em relação a outros WECs [Graw, 1994]:

- (i) como é totalmente submerso, o impacto de ondas grandes e da quebra de ondas sobre a estrutura é reduzido;
- (ii) pela mesma razão, problemas de corrosão na turbina também são reduzidos;
- (iii) seu duplo propósito, proteção costeira e conversor, também contribui para esta redução de custos: se a turbina está captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, caso contrário, mesmo que o escoamento abaixo da placa diminua, o sistema continua atuando como um quebra-mar submerso convencional;
- (iv) como o dispositivo é totalmente submerso, a influência sobre o meio ambiente é reduzida.

As descrições do sistema de PHS apresentadas em diversos artigos, conforme citadas anteriormente [Graw, 1992; 1993a; 1993b; 1994; 1996; 1998], são essenciais para o entendimento do princípio físico do equipamento. Entretanto, outros autores, ao descreverem o escoamento sob a PHS, esclarecem que, apesar de sua maior intensidade no sentido contrário ao de propagação das ondas, o mesmo apresenta uma natureza oscilatória; tendo em vista que a magnitude das velocidades do escoamento, no sentido de propagação da onda, nem sempre é desprezível relativamente às velocidades no sentido contrário [Carter, 2005; Orer e Ozdamar, 2007; Seibt et al., 2013].

### 2.3.3 Características da Placa Horizontal Submersa como Quebra-Mar

Diferente de um quebra-mar convencional, a PHS depende da interação fluido-fluido para bloquear ondas. A estrutura em si atua principalmente para alterar o curso de escoamento, em vez de passivamente resistir às ações das ondas como um quebra-mar convencional. Por outro lado, seu desempenho é bastante sensível às condições das ondas incidentes, de forma que o projeto desse tipo de estrutura deve assegurar vários requisitos de engenharia quanto ao conhecimento do estado de mar do local [Yu, 2002].

Quando comparado com outros tipos de estruturas para o controle de ondas, a PHS é vantajosa em vários aspectos: é menos dependente das condições geotécnicas do fundo do mar, onde a estrutura deve ser instalada; seu custo de instalação em águas relativamente profundas é inferior ao de quebra-mares convencionais; ela não tem efeitos negativos sobre o cenário marinho; nunca irá criar uma zona de água parada, o que geralmente demanda grandes esforços para manter a qualidade da água [Yu, 2002].

#### **2.3.4 Revisão Bibliográfica: Quebra-mar Tipo Placa Horizontal Submersa**

Mesmo tendo-se no trabalho de Graw, 1994, a apresentação da PHS como um dispositivo de dupla função, onde se enfatiza seu potencial como WEC, a maior parte dos estudos, a respeito desse equipamento, são voltados para seu uso como quebra-mar. No entanto, estes estudos são importantes para a melhor compreensão do funcionamento do dispositivo e dos fenômenos relacionados ao escoamento em torno da PHS, bem como, para a concepção de novas propostas de estudo do dispositivo de PHS.

Sendo assim, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito da PHS como quebra-mar, conforme a seguinte organização: i) trabalhos com abordagem experimental; ii) trabalhos com abordagem numérica e experimental; iii) trabalhos com abordagem numérica. Tendo em vista que esta revisão é unicamente complementar ao escopo deste trabalho, seu conteúdo encontra-se no Apêndice B – Revisão Bibliográfica: Quebra-mar Tipo PHS.

### 3 DESIGN CONSTRUTAL

A melhoria do desempenho de sistemas é uma busca constante em projetos de engenharia, o que levou ao desenvolvimento de diferentes métodos para obtê-la. Entre esses métodos, o Design Construtal tem se mostrado adequado às mais diversas aplicações de engenharia [Rocha et al., 2009; Isoldi et al., 2013; Goulart et al., 2015; Lorenzini et al., 2015; Brum et al., 2016; Biserni et al., 2017]. Esse método fundamenta-se na Teoria Construtal [Bejan, 2000; 2016; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012] que explica, deterministicamente, como a origem de formas e estruturas (designs) de sistemas submetidos a alguma espécie de escoamento, pode ser explicada por um princípio físico: a Lei Construtal do Design e Evolução [Bejan, 1997; 2017; Bejan e Lorente, 2008; 2013].

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos de Teoria Construtal, os principais conceitos do método Design Construtal, bem como, a sua aplicação ao estudo de WECs.

#### 3.1 Teoria Construtal

A Teoria Construtal (TC) teve origem com a ideia de que a configuração (forma e estrutura ou design) de sistemas naturais, em diferentes escalas, que contenham alguma espécie de escoamento, advém de um princípio físico. Tal teoria tem como princípio fundamental a Lei Construtal do Design e Evolução (LC) [Bejan, 1997; 2017; Bejan e Lorente, 2008; 2013], a qual explica como os sistemas de escoamento (sistemas que possuem um escoamento) evoluem ao longo do tempo, sejam eles biológicos (animados) ou não biológicos (inanimados) [Bejan e Lorente, 2008; 2013; Bejan e Zane, 2012].

Formalmente, a LC é enunciada como:

“Para um sistema de escoamento de tamanho finito persistir ao longo do tempo (viver), ele deve evoluir livremente de forma a proporcionar maior acesso às suas correntes”<sup>1</sup> [Bejan, 2017].

Outra maneira de apresentar a LC, menos formal, é:

“Tudo que se move, animado ou inanimado, é um sistema de escoamento; todo sistema que escoar gera formas e estruturas (designs), ao longo do tempo, com o propósito de

---

<sup>1</sup> Texto original: “*For a finite-size flow system to persist in time (to live), it must ‘evolve’ freely such that it provides greater access to its currents*”.

facilitar esse movimento através de um espaço finito com resistências (por exemplo, atrito)”<sup>2</sup> [Bejan e Zane, 2012].

A partir desse enunciado a TC afirma que os designs vistos na natureza não são resultado do acaso, mas surgem propositadamente para facilitar o acesso dos seus escoamentos ao longo do tempo. Sendo assim, formas e estruturas naturais não concorrem entre si, mas diferentes configurações desempenham funções específicas e cooperam mutuamente. Dessa forma, a LC enquanto lei da física, oriunda de contribuições da engenharia, pode ser percebida em diversos fenômenos do cotidiano [Bejan e Zane, 2012].

A TC propõe três definições a serem consideradas para a percepção desse princípio no cotidiano: i) sistemas de escoamento estão em constante movimento, sendo considerados ‘vivos’, assim como sistemas biológicos, de acordo com a LC; ii) todo sistema de escoamento tende a apresentar características semelhantes as quais são evidenciadas pela LC; iii) as imagens do mundo devem ser percebidas como cenas congeladas de um filme, já que o design evolui (se modifica ao longo do tempo) [Bejan e Zane, 2012]. Essas definições, apesar de não contemplarem todos os conceitos presentes na LC, resumem a maneira como a TC se desenvolve a partir da LC.

Para exemplificar como a LC possibilita que a evolução seja percebida contemporaneamente, Bejan et al., 2014, realizaram um estudo sobre a evolução da tecnologia na aviação (ver Figura 3.1) onde demonstraram como a LC aponta a direção da modificação do design ao longo do tempo (evolução) para diferentes projetos de aeronaves. A Figura 3.1 apresenta diferentes modelos de aviões ordenados de acordo com o ano em que foram colocados em serviço. De acordo com os autores, cada novo modelo era, presumivelmente, mais econômico (eficiente) do que seus antecessores do mesmo tamanho, caso contrário não teriam sido adotados. Esta tendência (de maior eficiência) não é visível na Figura 3.1, porém, outra tendência pode ser observada: embora tenham surgido novos modelos de todos os tamanhos, os maiores aviões de uma década foram sucedidos por modelos ainda maiores na década seguinte [Bejan et al., 2014].

De acordo com Bejan e Zane, 2012, o senso comum de que sistemas (objetos ou equipamentos) projetados pelo homem são artificiais estabelece um contraste entre estes objetos e os sistemas biológicos. Entretanto, no contexto da TC, esse conceito se torna incoerente, uma vez que ambos fazem parte da natureza e, portanto, são regidos pelo mesmo

---

<sup>2</sup> Texto original: “*Everything that moves, whether animate or inanimate, is a flow system. All flow systems generate shape and structure in time in order to facilitate this movement across a landscape filled with resistance (for example, friction)*”.

princípio físico natural da LC [Bejan e Zane, 2012]. A fim de avaliar a universalidade do princípio dado pela LC, tomando por base as três definições que formam a perspectiva da TC mencionadas anteriormente, pode-se observar na Figura 3.2 outro aspecto importante: a manifestação do design nos sistemas de escoamento em diferentes escalas.

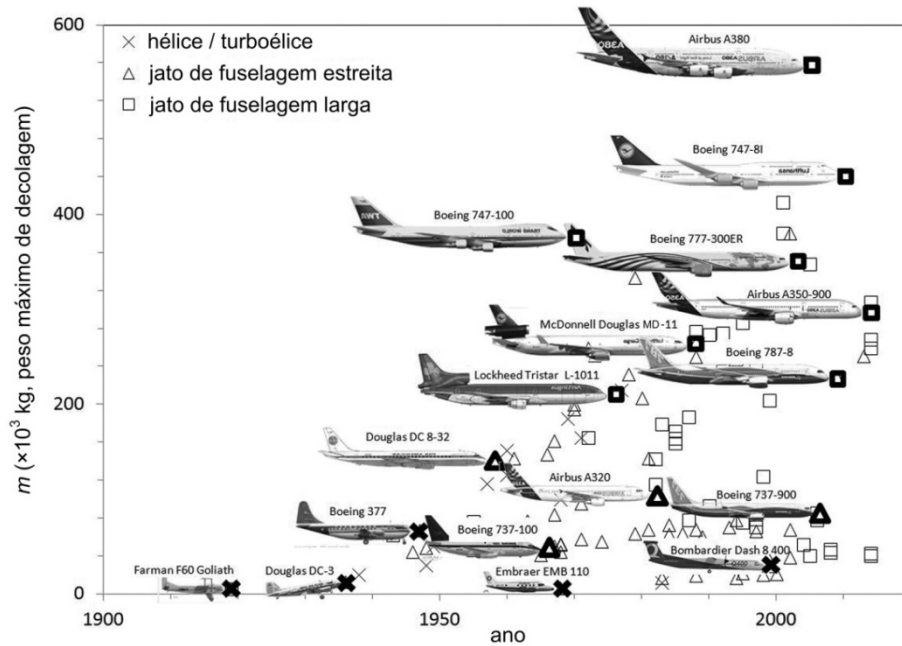


Figura 3.1 – Evolução do design dos principais modelos de aeronaves [adaptado de Bejan et al., 2014].

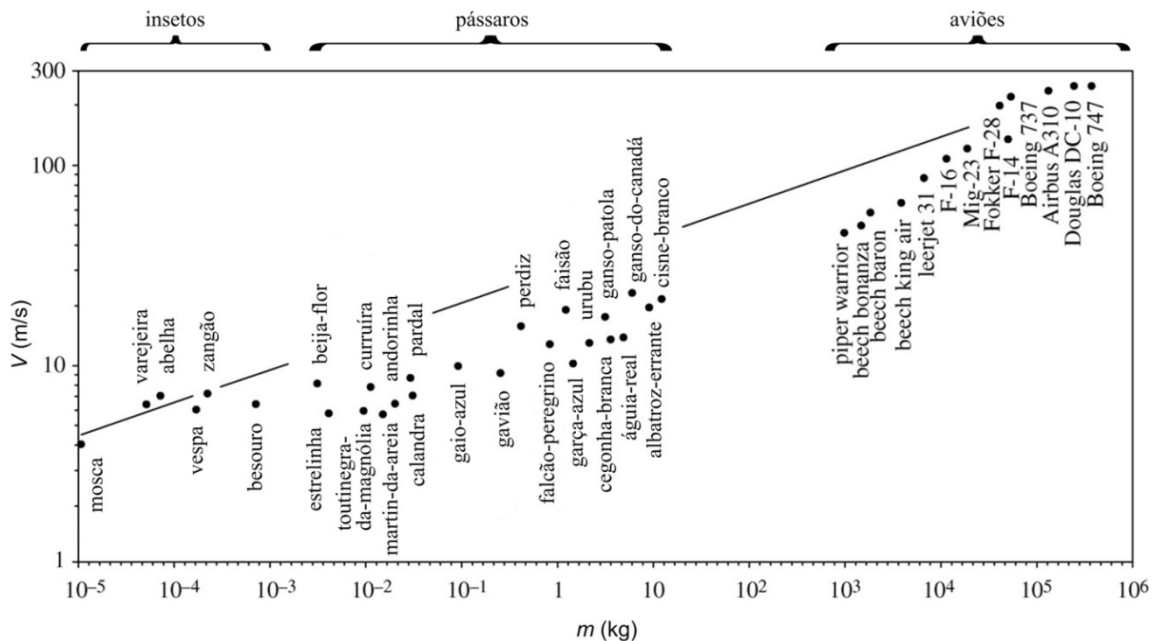


Figura 3.2 – Velocidade teórica de voo de alguns insetos e pássaros e velocidade nominal de voo de algumas aeronaves [adaptado de Bejan e Lorente, 2010].

A Figura 3.2 ilustra a semelhança do dimensionamento (design) apresentado por diferentes sistemas animados (insetos e pássaros) e inanimados (aviões), onde a linha contínua representa a velocidade de voo predita pela TC (formulação e outras informações em Bejan e Marden, 2006a; 2006b; Charles e Bejan, 2009; Bejan e Lorente, 2010). A partir da observação deste gráfico (Figura 3.2), Bejan e Lorente, 2010, apontam duas conclusões: todo sistema de escoamento construído para voar evoluiu de forma semelhante, a fim de percorrer distâncias mais longas com maior eficiência (menor consumo de alimento ou combustível); não há diferença de design entre sistemas biológicos (massa de animais voadores) e sistemas de engenharia (massa de seres humanos em aviões) [Bejan e Lorente, 2010].

Essa adequação de diferentes sistemas segundo o mesmo princípio, em diferentes escalas, permite considerar que tanto os sistemas animados quanto os sistemas inanimados evoluem sob o mesmo princípio, guardadas as diferenças de mecanismos evolutivos. Portanto, segundo a TC, o surgimento de designs e a evolução são fenômenos universais, no que diz respeito aos sistemas de escoamento [Bejan e Zane, 2012].

Outro estudo, que ilustra a relação entre design e evolução em sistemas de escoamento, abordou o desempenho de atletas recordistas mundiais, nas modalidades de atletismo e natação, ao longo do último século. A Figura 3.3 apresenta a relação entre massa e velocidade (semelhante à da Figura 3.2) que expressa o design dos atletas (sistemas de escoamento) [Charles e Bejan, 2009].

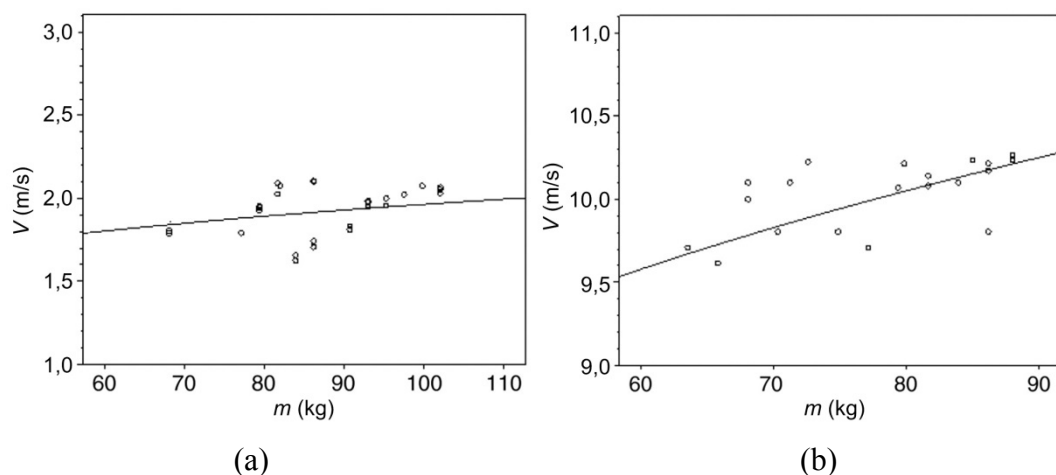


Figura 3.3 – Relação entre velocidade e massa de atletas recordistas mundiais nas modalidades: (a) natação, 100 m estilo-livre; (b) atletismo, 100 m rasos [adaptado de Charles e Bejan, 2009].



Nos gráficos (Figura 3.3) é possível perceber a diferença de design entre os atletas que se deslocam na água (nadadores) e os que se deslocam sobre a terra (corredores), onde a linha contínua representa a velocidade predita pela TC para cada tipo de sistema [Bejan e Marden, 2006a; 2006b; Charles e Bejan, 2009; Bejan et al., 2010].

Já a Figura 3.4 apresenta as relações velocidade-tempo e massa-tempo dos atletas em cada modalidade, onde linhas tracejadas, com a mesma inclinação das linhas contínuas mostradas na Figura 3.3, foram posicionadas próximas à mediana entre os pontos do gráfico. Nesta figura (Figura 3.4) é possível observar a evolução do porte físico e do desempenho dos atletas ao longo do último século, onde as linhas tracejadas permitem visualizar uma tendência evolutiva destes sistemas (direção da evolução), demonstrando a evolução do design humano [Charles e Bejan, 2009; Bejan et al., 2010].

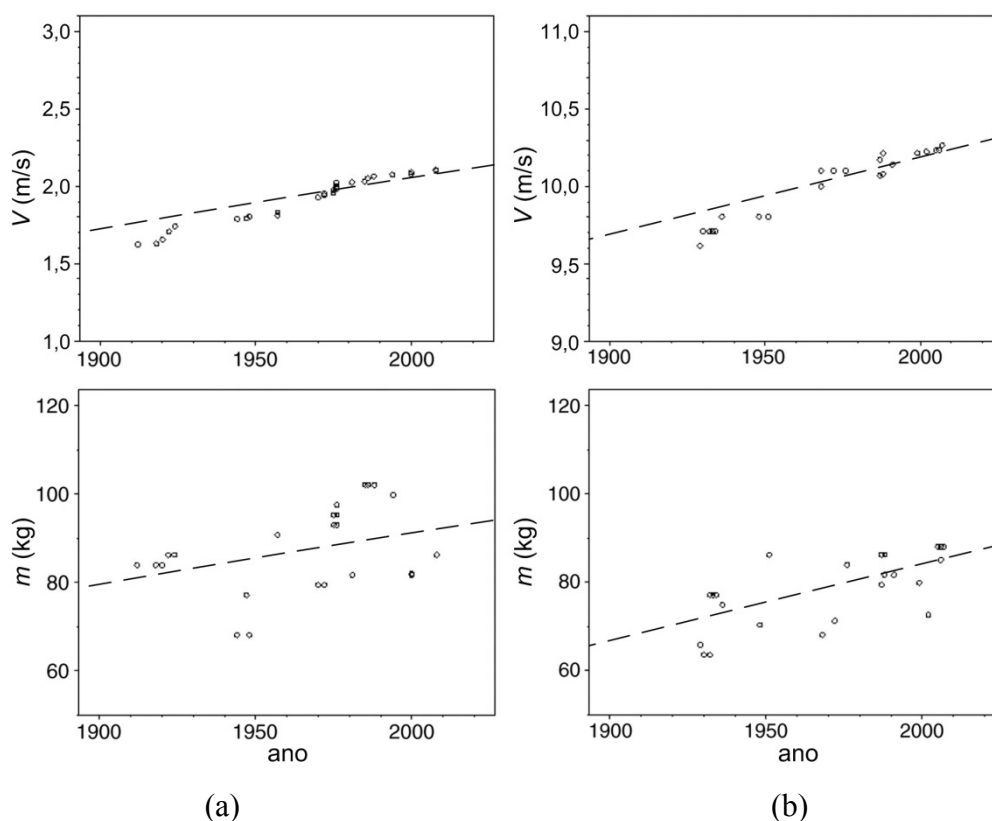


Figura 3.4 – Relação velocidade-tempo e massa-tempo de atletas recordistas mundiais nas modalidades: (a) natação, 100 m estilo-livre; (b) atletismo, 100 m rasos [adaptado de Charles e Bejan, 2009].

Assim, de acordo com Bejan e Zane, 2012, a LC captura uma tendência central da natureza: todo sistema de escoamento direciona esforços, através da evolução, para gerar

formas e estruturas (designs) que possibilitem a ele mover-se mais facilmente. Portanto, essa tendência natural dos sistemas de escoamento tem um propósito: facilitar o movimento. Dessa forma, no contexto da TC, a evolução dos designs se dá em uma mesma direção ao longo do tempo, sendo um fenômeno comum a sistemas animados e inanimados.

A Figura 3.5 serve como exemplo para ilustrar a manifestação desse fenômeno, onde se percebe a semelhança entre o design de sistemas de escoamento complexos que resultam de diferentes mecanismos evolutivos. De acordo com a TC, as semelhanças ocorrem porque o caminho evolutivo (direção) é o mesmo para todos os sistemas de escoamento (animados e inanimados), fazendo com que os designs surjam em sistemas distintos, mas que possuem o mesmo objetivo: mover-se ('viver' ou, ainda, sobreviver, conservar) [Bejan e Zane, 2012].

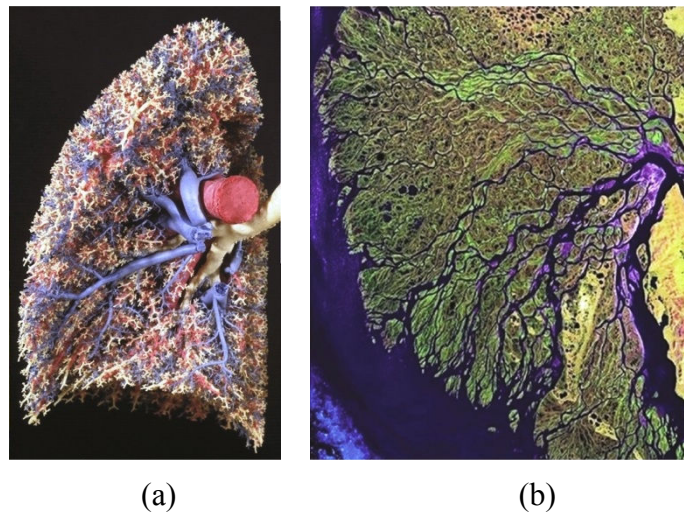


Figura 3.5 – Semelhança entre o design de sistemas de escoamento: (a) animados, molde da estrutura interna do pulmão humano; e (b) inanimados, imagem de satélite do delta do rio Lena no norte da Sibéria [adaptado de Bejan e Lorente, 2013].

Assim, a LC apresenta o design como um conceito da ciência, pois surge propositadamente e evolui livremente na natureza, ocorrendo em toda parte e o tempo todo, não somente como resultado de um mecanismo evolutivo, mas como expressão de uma lei da física. Apesar de não explicar como essas estruturas se formam, ainda assim, o conhecimento dado pela LC torna-se um instrumento importante tanto para explicar os designs vistos na natureza, permitindo que se entenda a razão de sua ocorrência, quanto para prever como irão evoluir [Bejan e Zane, 2012].

Neste contexto, a TC afirma que o design como desenho fornece uma visão de um objeto (sistema), mas enquanto ciência permite compreender como o objeto funciona, isto é, o desenho apresenta as partes e a ciência mostra seu movimento. Com isso, a evolução da forma e estrutura dos sistemas de escoamento torna-se previsível, ou seja, conhecendo-se o que se move (escoa), através de um sistema de escoamento, é possível prever a sequência de designs que irão surgir e evoluir para facilitar o escoamento através dele. Entretanto, a LC não fornece um design absoluto, já que a evolução ocorre constantemente e livremente para sistemas que continuam em movimento (vivos) [Bejan e Zane, 2012].

Dessa forma, de acordo com Bejan e Zane, 2012, a LC tem confirmado e comprovado uma relação existente entre sistemas de escoamento naturais (animados e inanimados) que anteriormente era apenas especulada, o que se torna importante por diversos aspectos: i) permite representar uma grande diversidade de sistemas vivos encontrados na natureza, onde tudo que se move é um sistema de escoamento; ii) permite prever que, dada liberdade, todos os sistemas de escoamento evoluem ao longo do tempo para se moverem ou escoarem mais facilmente; iii) mostra como essa tendência universal representa os padrões chamados designs da natureza; iv) esclarece que todos os sistemas de escoamento são conectados e formados por outros sistemas, numa rede global de escoamento (movimento) [Bejan e Zane, 2012].

Sendo assim, o conhecimento suportado pela LC para o surgimento dos designs se distingue do conceito de mimetismo, pois demonstra que os designs não são meras imitações de designs naturais preexistentes, mas designs apropriados de acordo com as restrições presentes [Bejan e Zane, 2012].

### **3.2 Design Construtal**

Dada à abrangência ampla da LC e sua universalidade, cabe destacar que o método Design Construtal (DC), aliado a um método de otimização, permite obter um sistema de ótimo desempenho, porém não resume o propósito da LC. Visto que a LC trata, não só de desempenho dos sistemas, mas principalmente da direção de evolução dos sistemas ao longo do tempo a fim de se manterem vivos (escoando, movendo-se). Assim, no contexto da TC, sistemas otimizados são manifestações do fenômeno físico da evolução [Bejan, 2017; Rocha et al., 2017].

Dessa forma, o método DC guia o projetista (no tempo) em direção a uma arquitetura de escoamento que proporcione cada vez maior performance global para condições

específicas de um escoamento (fluido, calor, eletricidade). Entretanto, a configuração desenvolvida para um determinado conjunto de condições consideradas (restrições), não é necessariamente a configuração recomendada para outro conjunto de condições. Sendo assim, cabe destacar que o princípio da LC é universal, mas não o design [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

### 3.2.1 Conceitos Fundamentais

Na busca por obter sistemas com configurações (designs) de máxima performance, o método DC trata as resistências inerentes dos sistemas (por exemplo: atrito, perda de carga, etc.) como imperfeições. Nesse sentido, o desenvolvimento de sistemas com máxima performance global implica que seu design deve apresentar uma ótima distribuição das imperfeições [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

A partir da concepção da LC, a TC tem desenvolvido e aprimorado alguns conceitos fundamentais para o desenvolvimento de projetos cada vez mais alinhados com o design natural. Assim, três conceitos são essenciais para atingir esse objetivo: vascularização, esbelteza e imperfeições [Bejan e Lorente, 2008].

#### *i) Vascularização*

Entende-se por vascularização o design ramificado semelhante ao de árvores (*tree-like shape*), seja observando seus galhos, ramos e folhas ou a distribuição de suas raízes a partir do tronco. A partir da idealização do design dos animais (*animal design*) como ícone do design na natureza, observa-se que o melhor design ao longo do tempo (evolução) para conduzir um escoamento de um ponto para uma área/volume (ou área/volume para um ponto) tende a gerar sistemas vascularizados. O que significa que cada detalhe geométrico de um sistema terá um tamanho e posição bem definidos no espaço disponível do sistema em que estiverem inseridos [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

Portanto, a correta configuração do sistema (arquitetura do design), por meio da vascularização, leva a uma melhor distribuição das resistências, corroborando com a premissa da ótima distribuição das imperfeições da qual trata o DC [Rocha et al., 2017].

#### *ii) Esbelteza*

Uma vez voltada ao estudo de sistemas de escoamento, a TC propõe novas propriedades para esses sistemas, baseadas na LC, para permitir o estudo científico dos mesmos. Nesse contexto, surge uma propriedade dos sistemas de escoamento: esbelteza.

A esbelteza (*svelteness*,  $S$ ) é uma propriedade global da arquitetura do sistema, sendo definida como [Bejan e Lorente, 2008]:

$$S = \frac{\text{escala de comprimento externa}}{\text{escala de comprimento interna}} \quad (3.1)$$

onde escala de comprimento externa é a escala de comprimento do volume total do sistema e escala de comprimento interna é a escala de comprimento do volume ocupado por um componente do sistema.

Nos escoamentos em dutos, por exemplo, esta propriedade descreve a importância relativa das perdas de pressão por atrito, distribuídas ao longo dos dutos, e as perdas de pressão concentradas, devido às conexões, contrações ou expansões [Bejan e Lorente, 2008].

Essa propriedade permite avaliar a evolução de desempenho em designs de diferentes sistemas, como aqueles observados nas Figuras 3.2 e 3.3.

### *iii) Imperfeição*

Imperfeição e perfeição (ou idealização) são conceitos centrais da Termodinâmica e dizem respeito às irreversibilidades presentes nos sistemas [Bejan e Lorente, 2013]. Sadi Carnot, o engenheiro que deu início à Termodinâmica, viu a direção para melhorar as configurações do motor térmico. De acordo com ele, projetos futuros tinham que evitar obstáculos durante o escoamento de fluidos (atrito, colisões) da mesma forma que o fluxo de calor tinha que evitar grandes diferenças finitas de temperatura [Bejan e Lorente, 2008].

Na TC essa tendência é um comportamento natural dos sistemas de escoamento sendo visto como um fenômeno de geração da configuração com o tempo. Voltando ao exemplo do escoamento em dutos, a configuração é o desenho de como e onde canais podem ser distribuídos em uma área (ou volume) disponível. A área é o plano de trabalho e os canais são usados para distribuir água ao longo desse plano. Ao longo do tempo, a imperfeição é reduzida distribuindo os canais para elementos de área de modo que o sistema escoar mais facilmente. Essa tendência natural de escoar com melhores configurações é o princípio da

ótima distribuição das imperfeições, que é a essência da LC [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

#### *iv) Propriedades dos Sistemas de Escoamento*

Um sistema de escoamento apresenta algumas propriedades que o distinguem de um sistema estático (sem escoamento). As propriedades de um sistema de escoamento são [Bejan e Lorente, 2008]:

- (a) dimensão externa global;
- (b) dimensão interna global;
- (c) função objetivo (pelo menos uma);
- (d) configuração, forma, arquitetura;
- (e) liberdade para mudar sua configuração.

### **3.2.2 Método Design Construtal**

O escopo do método DC é a configuração do sistema de escoamento obtida a partir de um princípio científico, uma lei da física: a LC. Nesse sentido, o DC direciona o pesquisador quanto à abordagem e formulação do problema (fornece uma estratégia de estudo), de forma que o sistema, seu escoamento e suas propriedades sejam claramente definidos. Assim, o método DC se caracteriza pela aplicação dos conceitos da TC na abordagem de problemas de engenharia [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

Esse processo de abordagem do problema pode ser descrito por uma sequência de passos apresentada na Figura 3.6 [Bejan e Lorente, 2008, Rocha et al., 2017; Razera et al., 2018; Fagundes et al., 2019].

Cabe destacar que o DC não define completamente a sequência de estudo a ser adotada pelo pesquisador, como a forma de exploração do espaço de solução na busca por uma geometria de configuração ótima. Entretanto, o DC proporciona a certeza de obter, para um conjunto de condições específicas (restrições, número de graus de liberdade (GDLs), função(ões) objetivo), impostas ou assumidas pelo pesquisador, uma configuração (design) de máximo desempenho global [Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2017].

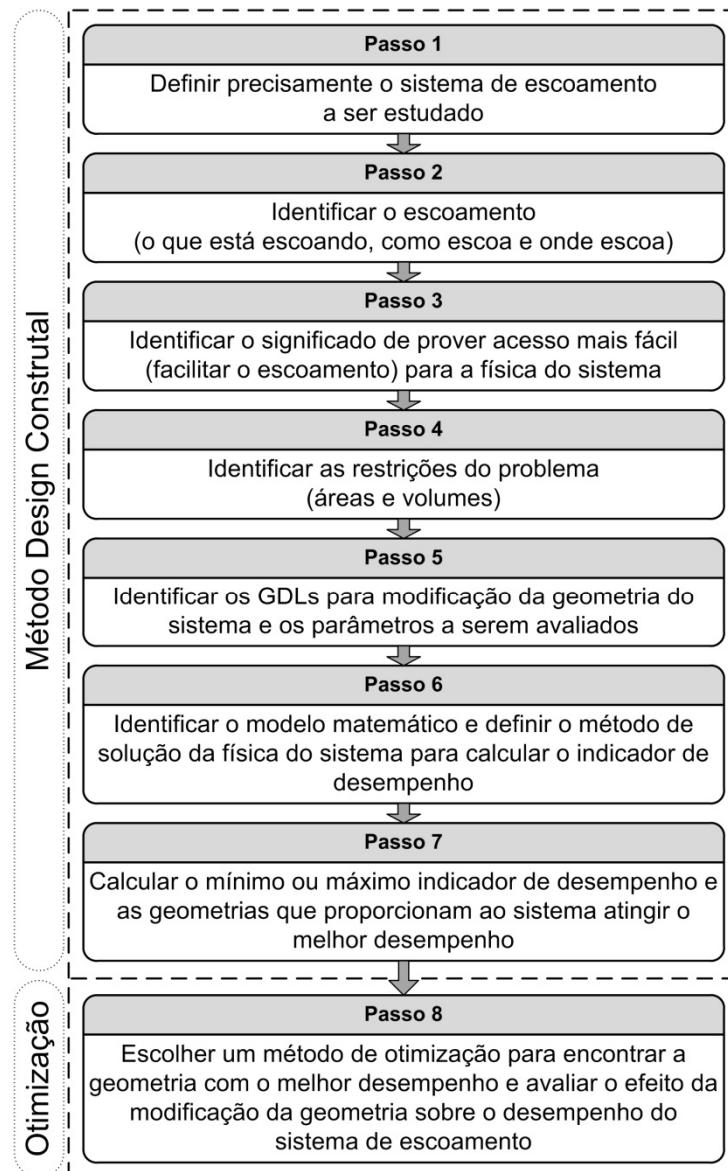


Figura 3.6 – Sequência de aplicação do método Design Construtal.

Portanto, após estruturar o problema o pesquisador é livre para adotar a técnica de otimização que lhe convier, por exemplo: Busca Exaustiva [Burke e Kendall, 2005; Estrada, 2016], Minimização da Geração de Entropia [Bejan et al., 1996], *Simulated Annealing* [Metropolis et al., 1953; Gonzales, 2015], Algoritmo Genético [Holland, 1992, Estrada, 2016], *Design of Experiments* [Montgomery, 2005; Farias, 2017].

### 3.3 Design Construtal Aplicado à Conversores de Energia das Ondas

Estudos de otimização geométrica empregando DC, têm sido realizados para diferentes aplicações de engenharia, como, por exemplo, na otimização de dissipadores de calor [Rocha et al., 2009; Lorenzini et al., 2011; Fagundes, 2016], na otimização de estruturas metálicas [Isoldi et al., 2013; Helbig, 2016], na otimização de trocadores de calor [Dos Santos et al., 2013; Razera, 2016; Brum, 2016].

Quanto à aplicação do DC ao estudo de WECs, o número de trabalhos é bastante restrito e se concentra, basicamente, no grupo de pesquisa que congrega professores da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (IFPR). Os trabalhos publicados, em sua maioria, compõem trabalhos de conclusão de curso em diferentes níveis de formação (graduação, mestrado e doutorado).

Sendo assim, apenas os trabalhos finais de mestrado (dissertações) e de doutorado (teses) serão destacados a seguir:

- (i) OWC: Lopes, 2012; Grimmmler, 2013; Gomes, 2014; Letzow, 2014; Lara, 2015; Plamer, 2016; De Lima, 2016;
- (ii) galgamento: Machado, 2012; Goulart, 2014; Martins, 2016; Machado, 2016.

Portanto, o uso do método DC no estudo do dispositivo tipo PHS ainda é inédito.



## 4 METODOLOGIA

Nesse capítulo é feita uma breve apresentação de conceitos relacionados à teoria de ondas e à modelagem computacional, bem como, das equações matemáticas que compõe o modelo e das técnicas numéricas empregadas.

### 4.1 Modelagem Matemática

#### 4.1.1 Teoria de Ondas

As ondas do mar são influenciadas por diversos fatores que resultam em diferentes formas e tamanhos de ondas, dependendo da intensidade de atuação dos mesmos sobre a água [Dean e Dalrymple, 1991]. Dentre estes, enumera-se quatro principais: o movimento de corpos na superfície, a ação dos ventos, abalos sísmicos, e as forças gravitacionais exercidas pelo sol e pela lua, cada um ocasionando diferentes movimentações da superfície marítima [McCormick, 1981].

A sobreposição do efeito de diferentes fenômenos, que geram ondas na superfície do mar, torna a descrição matemática das ondas bastante complexa, especialmente, devido às não linearidades envolvidas, às características tridimensionais e à aleatoriedade das interações. Entretanto, a teoria de Airy (1845 – também chamada de teoria linear ou de pequena amplitude) permite representar as ondas como oscilações regulares assumindo algumas simplificações: fluido homogêneo e incompressível; tensão superficial nula; efeito de coriolis desprezível; pressão sobre a superfície livre constante e uniforme; fluido não viscoso; escoamento irrotacional; fundo horizontal, fixo e impermeável; amplitude da onda pequena e com forma invariável no tempo e no espaço; ondas bidimensionais [USACE, 1984].

Dessa forma, a partir da teoria linear, as ondas do mar podem ser vistas como um perfil senoidal que se propaga ao longo da superfície do mar. Assim, as principais características das ondas, como ilustrado na Figura 4.1, são: a distância horizontal entre duas cristas sucessivas (comprimento de onda,  $\lambda$ ), a distância vertical entre a crista e a cava (altura de onda,  $\varepsilon$ ) e a distância entre o nível da superfície da água em repouso até o fundo do mar (profundidade da água,  $d$ ) [USACE, 1984].

Outra característica importante é o tempo decorrido entre o surgimento de duas cristas sucessivas (período de onda,  $T$ ); bem como, a distância instantânea da superfície livre ao

plano médio do nível da água em repouso (elevação da superfície livre,  $\eta$ ) e a amplitude de onda ( $\delta = \varepsilon/2$ ), indicados na Figura 4.1.

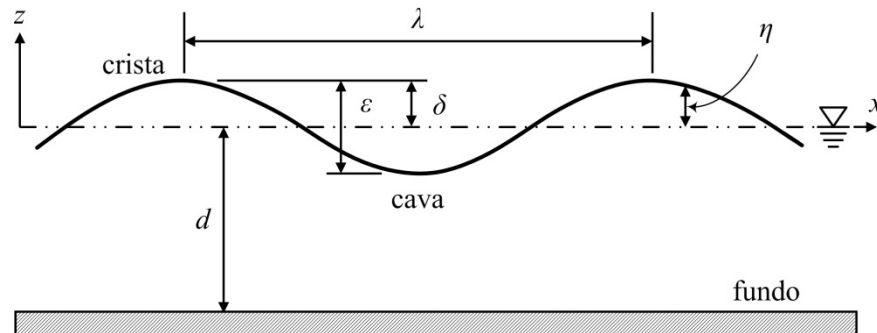


Figura 4.1 – Principais características de uma onda [adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].

Algumas dessas características devem ser levadas em conta na determinação da teoria de ondas a ser aplicada, sendo as principais: a altura de onda ( $\varepsilon$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a profundidade da água ( $d$ ). Essas características, por sua vez, compõem alguns parâmetros adicionais, o principal deles é o número de Ursell ( $U_R$ ) [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$U_R = \frac{\lambda^2 \varepsilon}{d^3} \quad (4.1)$$

A teoria de Airy, em vista de sua simplicidade, é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura relativa da onda são pequenas, ou seja, ondas com pequena amplitude e comprimento, em grandes profundidades. Outras teorias não lineares permitem uma melhor representação das ondas em situações não previstas pela teoria linear, especialmente quando há interação da onda com o fundo (águas rasas) e quando as ondas são mais altas [Carneiro, 2007].

Já a teoria de Stokes, por sua vez, se aplica a ondas mais altas em águas relativamente profundas [Dean e Dalrymple, 1991; Gomes, 2014]. A partir da teoria de 2ª ordem de Stokes podem ser representadas ondas regulares com cristas mais altas e cavas achatadas (conforme Figura 4.2), além disso, é possível representar o fenômeno de transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que o caminho das partículas não se apresenta como uma órbita fechada [Le Méhauté, 1976; Gomes, 2014].

A solução de Stokes é formalmente válida para número de Ursell  $U_R < 26$  [Dean e Dalrymple, 1991]. Um recurso usual para a definição da teoria de ondas a ser aplicada é o gráfico apresentado na Figura 4.3, desde que as características da onda sejam conhecidas.

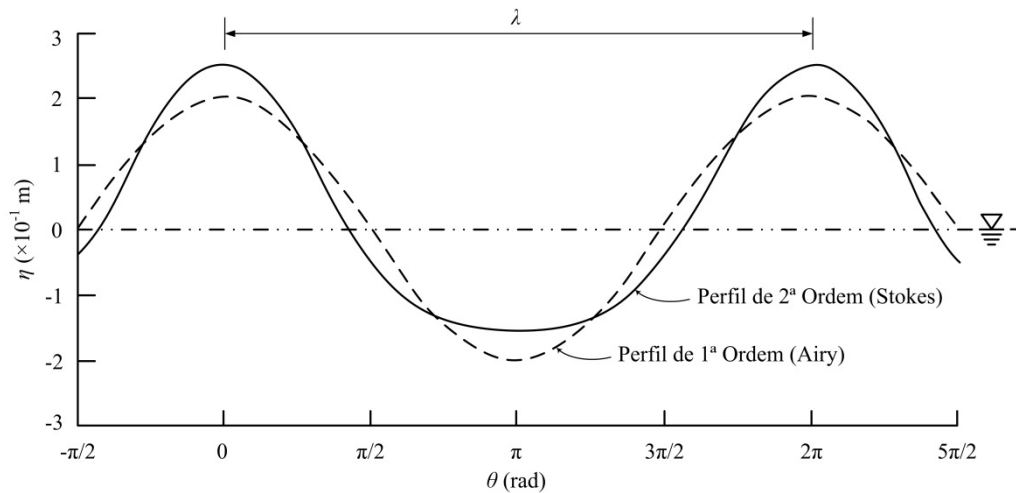


Figura 4.2 – Diferença entre o perfil de onda de Stokes de 2ª ordem e o perfil de onda linear [adaptado de USACE, 1984].

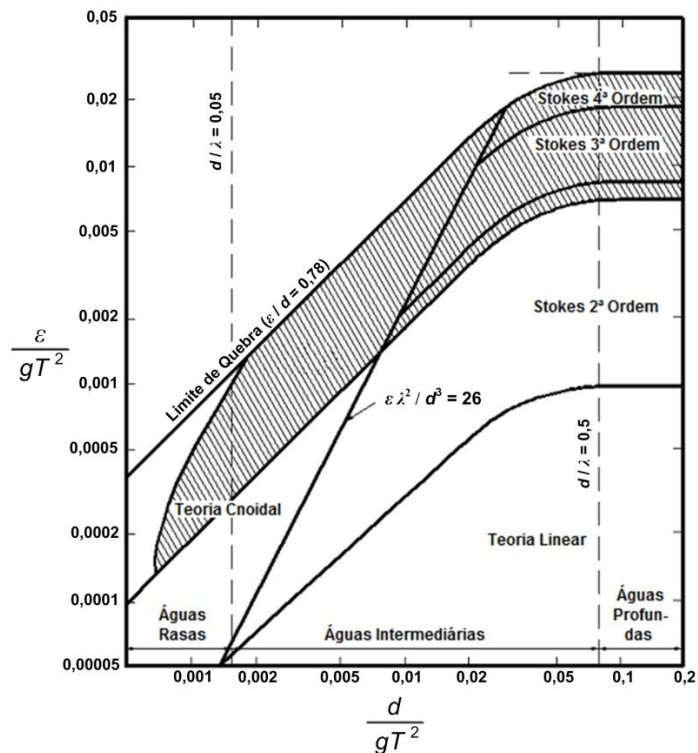


Figura 4.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas [adaptado de USACE, 2002].

Cabe destacar que a escala do gráfico da Figura 4.3 permite uma indicação da teoria apropriada para a representação de uma onda com base nas características da onda, desde que estas sejam tomadas todas no mesmo sistema de unidades.

A Equação 4.2 é denominada Equação de Dispersão, dada por [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (4.2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $k$  é o número de onda ( $m^{-1}$ ) e  $\omega$  é a frequência angular de onda ( $s^{-1}$ ). O número de onda ( $k$ ) e a frequência angular ( $\omega$ ) são dados por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.4)$$

Substituindo as Equações 4.3 e 4.4 na Equação 4.2 e isolando  $\lambda$ , obtém-se:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad (4.5)$$

Por se tratar de uma equação transcendental, a Equação 4.5 requer um processo iterativo para obtenção da solução. Entretanto, a teoria linear provê uma classificação das ondas de acordo com a profundidade relativa da onda ( $d/\lambda$ ), permitindo, assim, que se obtenha uma simplificação da Equação 4.5 dependendo das características da onda. Essa classificação é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classificação das ondas quanto à profundidade [Fonte: USACE, 1984].

Classificação	Critério	$\tanh(kd)$
Águas profundas	$0,50 \leq d/\lambda$	$\approx 1$
Águas intermediárias	$0,05 < d/\lambda < 0,50$	$\tanh(kd)$
Águas rasas	$d/\lambda \leq 0,05$	$\approx kd$

Stokes desenvolveu um método de alta ordem para a análise de ondas de gravidade de alturas finitas. Basicamente a teoria de Stokes consiste em assumir que as propriedades do movimento da onda, tais como o potencial de velocidade, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto mais alto o número de termos incluídos na série melhor é a aproximação das propriedades atuais da onda [Dean e Dalrymple, 1991].

A equação para a elevação da superfície livre, considerando o termo de 2ª ordem, é descrita como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi \varepsilon^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} [2 + \cosh(2kd)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (4.6)$$

onde  $x$  é a coordenada na direção horizontal (m) e  $t$  é o tempo (s).

As componentes de velocidade horizontal e vertical, de propagação da onda, são descritas, respectivamente, como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$u = \frac{\varepsilon}{2} gk \frac{\cosh(kd + kz)}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^4(kd)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.7)$$

$$w = \frac{\varepsilon}{2} gk \frac{\sinh(kd + kz)}{\omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(d+z)}{\sinh^4(kd)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (4.8)$$

onde  $z$  é a coordenada na direção vertical (m),  $u$  é a componente de velocidade na direção horizontal (m/s) e  $w$  é a componente de velocidade na direção vertical (m/s).

Já a potência média da onda  $P_W$  (W), para a onda de 2ª ordem, é definida como [McCormick, 1981]:

$$P_W = \left(\frac{1}{16} \rho g \varepsilon^2\right) \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd}\right) \left[1 + \frac{9}{64} \frac{\varepsilon^2}{k^4 d^6}\right] \quad (4.9)$$

onde  $\rho$  é a massa específica (kg/m<sup>3</sup>).

No presente trabalho é adotada a teoria de Stokes de 2ª ordem, tendo em vista que as ondas regulares utilizadas apresentam características que se enquadram nesta teoria de acordo com o parâmetro de Ursell. Para a determinação dos comprimentos de onda utilizou-se a Equação 4.5, uma vez que esta é válida para ambas as teorias [Le Méhauté, 1976].

Cabe destacar que as características das ondas empregadas neste trabalho, bem como a faixa de períodos de onda utilizada, foram utilizadas anteriormente em Seibt, 2014 com um modelo em escala de laboratório. Porém, tal faixa de períodos de ondas regulares, quando considerada em dimensões na escala real (com uma escala 1:16), compreende características semelhantes às ondas que ocorrem na costa do estado do Rio Grande do Sul (Seibt, 2014).

Outras informações e detalhes das teorias de ondas, bem como sua formulação, podem ser encontrados em Le Méhauté, 1976; McCormick, 1981; Dean e Dalrymple, 1991.

#### 4.1.2 Critério de Similaridade

A definição de escala, no caso de modelos para estudo de escoamento de fluidos, é determinada por um critério de similaridade, que consiste em um fator de escala que permite estabelecer uma relação entre aspectos fluidodinâmicos do modelo reduzido com aspectos reais do escoamento. Este recurso é usualmente empregado na análise de modelos experimentais em escala de laboratório para estimar o comportamento de modelos experimentais em escala real (protótipos) [Hughes, 1993].

No caso de estudos experimentais, a utilidade desse recurso é evidenciada pela larga diferença dos custos envolvidos na construção de um modelo reduzido e na construção de um protótipo. Já no caso de estudos numéricos, pode ser uma ferramenta para auxiliar na definição do uso de uma ou de outra escala, tendo em vista o custo computacional e a precisão dos resultados.

O número de Froude, bastante utilizado em estudos de engenharia costeira, estabelece uma relação entre forças de inércia e forças de gravidade para um escoamento e é definido pela Equação 4.10, como [Hughes, 1993]:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gB}} \quad (4.10)$$

onde  $V$  é uma variável de velocidade (m/s),  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $B$  é uma variável de comprimento (m) e  $Fr$  é o número de Froude (adimensional).

A partir dessa relação, a escala pode ser criada estabelecendo-se um paralelo entre as dimensões do modelo de laboratório (índice  $m$ ) e do caso real (índice  $r$ ), conforme a Equação 4.11 [Hughes, 1993]:

$$\left(\frac{V^2}{gB}\right)_r = \left(\frac{V^2}{gB}\right)_m \quad (4.11)$$

rearranjando os termos, obtém-se a Equação 4.12:

$$\left(\frac{V_r^2}{V_m^2}\right) = \left(\frac{g_r}{g_m}\right) \cdot \left(\frac{B_r}{B_m}\right) \quad (4.12)$$

Logo, cada grandeza pode ser substituída por um fator de escala  $N$  próprio, como na Equação 4.13:

$$(N_V)^2 = N_g \cdot N_B \quad (4.13)$$

Com isso, assumindo ação gravitacional idêntica para ambos os modelos ( $N_g = 1$ ) e decompondo a escala de velocidade ( $N_V = N_B/N_t$ ), obtém-se uma relação entre as escalas das grandezas básicas, dada pela Equação 4.14, como:

$$N_t = \sqrt{N_B} \quad (4.14)$$

onde  $N_t$  representa o fator de escala de tempo e  $N_B$  o fator de escala de comprimento.

No presente trabalho adotou-se uma escala de comprimento 1:16, ou seja, um fator de escala  $N_B = 16,00$ , conforme proposto por Seibt, 2014. Portanto, de acordo com a relação dada pela Equação 4.14, tem-se que o fator de escala de tempo correspondente é  $N_t = 4,00$ .

Assim, a partir de modelo, inicialmente em escala de laboratório, o fator de escala  $N_B$  foi utilizado para ajustar tanto as dimensões do modelo (domínio computacional), quanto da malha utilizada. Da mesma forma, as características das ondas simuladas foram ajustadas,

utilizando ambos os fatores de escala  $N_B$  e  $N_t$ . Cabe destacar que o comprimento de onda ( $\lambda$ ), mesmo no caso em escala real, não foi determinado pela simples aplicação do fator de escala  $N_B$ , mas calculado com a Equação 4.5 após o ajuste das demais características da onda com os respectivos fatores de escala (período  $T$ , altura  $\varepsilon$  e profundidade da água  $d$ ).

Outras informações a respeito de modelagem física e detalhes sobre critérios de similaridade podem ser encontrados em Le Méhauté, 1976; Hughes, 1993; Kamphuis, 2010.

### 4.1.3 Modelo do escoamento

O escoamento de um fluido viscoso é descrito pelas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento. Estas equações diferenciais são fortemente não lineares e estabelecem relações entre as taxas de variação do campo de velocidades, pressão, tensões e massa específica [Schlichting e Gersten, 2000].

No presente estudo, porém, as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento assumem como hipóteses simplificativas a resolução de um escoamento isotérmico, laminar, incompressível e bidimensional, podendo ser escritas respectivamente como [Schlichting e Gersten, 2000]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.15)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (4.16)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left[ u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g \quad (4.17)$$

onde  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  e  $w$  são as componentes horizontal e vertical, respectivamente, da velocidade do escoamento ( $\text{m/s}$ ),  $p$  é a pressão ( $\text{Pa}$ ) e  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmico ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ).

Uma vez que o escoamento em questão não envolve transferência de calor, a equação da energia não é resolvida. Como o escoamento é considerado incompressível e envolve baixas velocidades, a equação de estado, para determinação da pressão em qualquer ponto do



domínio, torna-se dependente apenas da coluna de fluido, não existindo variação de massa específica [Versteeg e Malalasekera, 2007].

#### 4.1.4 Parâmetros de Interesse

Cada uma das análises realizadas se desenvolveu com base em um comparativo estabelecido entre os casos estudados, no qual o principal parâmetro analisado foi a eficiência teórica do conversor. Entretanto, tendo em vista a caracterização do funcionamento do mesmo, foram analisados mais dois parâmetros: velocidade axial máxima,  $u_{máx}$ , e a vazão mássica RMS (*Root Mean Square*),  $\dot{m}_{RMS}$ .

A seguir tem-se a descrição de cada um destes parâmetros quanto à forma de obtenção dos dados e ao pós-processamento realizado. Cabe destacar que, dada a significativa quantidade de dados coletados, todo o procedimento descrito a seguir foi realizado com o *software* MatLab® e os códigos que foram implementados encontram-se no Apêndice C – Códigos de Pós-Processamento.

##### *i) Velocidade Axial Máxima*

Em cada um dos casos foram coletados dados de velocidade axial ( $u$ ) por meio de 11 pontos de monitoramento centralizados abaixo do dispositivo de PHS (i.e., situados na metade do comprimento da PHS,  $L$ ) e distribuídos ao longo da altura da PHS ( $h$  – ver Figura 4.4). Estes pontos funcionam como sondas numéricas e podem ser configurados, no *software* Ansys Fluent®, para armazenar diferentes tipos de dados. Nesse caso, foram monitorados dados da componente de velocidade horizontal  $u$ .

Cabe destacar que a distribuição dos pontos seguiu o seguinte esquema: os pontos  $p1$  e  $p11$  foram colocados junto ao fundo do canal e à superfície inferior da PHS, respectivamente, e, portanto, retornam sempre valores nulos (conforme a condição de contorno aplicada, ver Subseção 4.3.3); a soma das distâncias entre os pontos  $p1$  e  $p2$  e entre  $p10$  e  $p11$  corresponde a 8 % da altura  $h$  da placa; a soma das distâncias entre os pontos  $p2$  e  $p4$  e entre  $p8$  e  $p10$  corresponde a 32 % de  $h$ ; já a distância entre os pontos  $p4$  e  $p8$  corresponde a 60 % de  $h$  (ver Figura 4.4).

A partir dos dados obtidos destes monitores, adotou-se como critério de comparação a velocidade axial máxima  $u_{máx}$  registrada no ponto central  $p6$ , situado na metade da altura da

PHS ( $h$ ). Sendo assim, o procedimento para análise destes dados consistiu nos seguintes passos: (i) excluir os dados fora do intervalo de tempo compreendido entre  $3T$  e  $11T$  (onde  $T$  é o período de onda); (ii) localizar o maior valor de “ $+u$ ” e de “ $-u$ ”; (iii) determinar o instante de tempo em que estes valores ocorreram; (iv) determinar a maior magnitude da velocidade axial encontrada, ou seja, o maior valor de velocidade em módulo:  $|+u_{m\acute{a}x}|$  e  $|-u_{m\acute{a}x}|$ .

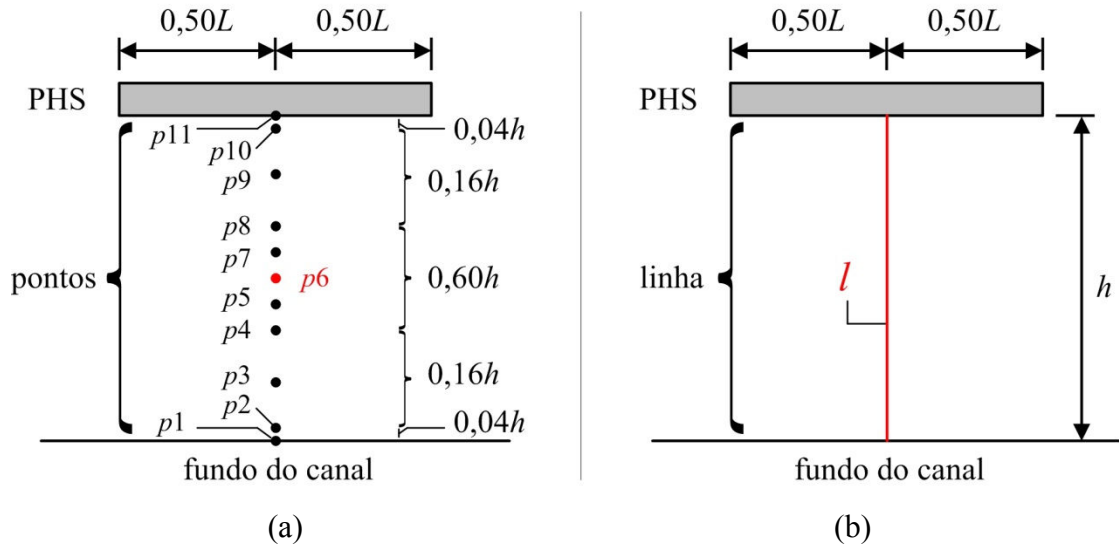


Figura 4.4 – Distribuição dos monitores, sob a PHS, de: (a) velocidade  $u$ ; (b) vazão  $\dot{m}$ .

Devido às características de funcionamento do dispositivo de PHS a maior magnitude de velocidade axial ocorre no sentido oposto ao de propagação da onda, portanto, ( $-u$ ), o que é verificado no passo (iv). Dessa forma, os resultados de todos os casos analisados no presente estudo são apresentados como  $|-u_{m\acute{a}x}|$ .

A exclusão dos dados anteriores a  $3T$  se deve ao transiente de formação da onda no trecho inicial do canal, a partir do gerador de ondas (conforme Gomes, 2010 e Seibt, 2014). Já em relação aos dados posteriores a  $11T$ , sua exclusão se deve ao fenômeno de reflexão da onda no trecho final do canal (a jusante da PHS). Estes valores foram definidos com base nas características do modelo de canal de ondas numérico adotado, o qual apresenta um comprimento a montante da PHS igual a  $2\lambda$  (onde  $\lambda$  é o comprimento de onda) e um comprimento a jusante da PHS igual a  $4\lambda$ , conforme será apresentado na Subseções 4.3.3 deste capítulo. Este procedimento é semelhante ao utilizado em Seibt, 2014.

#### ii) Vazão Mássica RMS

Além dos pontos de monitoramento, a Figura 4.4 apresenta, também, uma linha ( $l$ ), situada na metade do comprimento da PHS ( $L$ ), que se estende ao longo da altura  $h$  (linha tracejada vermelha). Uma vez que o modelo adotado é 2D, as larguras do canal e da PHS são consideradas unitárias. Dessa forma, a linha  $l$  foi utilizada para obtenção de valores de vazão mássica ( $\dot{m}$ , kg/s) a cada instante de tempo. Como alternativa para obter um valor representativo da quantidade de massa que é deslocada ao longo do tempo, conforme o escoamento abaixo da PHS muda de sentido, adotou-se o cálculo da média quadrática RMS.

O cálculo da média quadrática RMS foi aplicado ao conjunto de dados obtidos desse monitor, contidos no intervalo de tempo de  $3T$  a  $11T$ , para todos os casos analisados no presente estudo. Este procedimento é semelhante ao utilizado em Seibt, 2014. Os resultados dessa média proporcionam outro parâmetro comparativo para a análise do escoamento sob a PHS, sendo apresentados como  $\dot{m}_{RMS}$  (kg/s).

### iii) Eficiência Teórica do Dispositivo

A eficiência teórica ( $\varphi$ ) do conversor tipo PHS é definida, pela Equação 4.18, como [Graw, 1995b; Orer e Ozdamar, 2007]:

$$\varphi = \frac{P_P}{P_W} \quad (4.18)$$

onde  $P_P$  é a potência média disponível no escoamento sob a PHS (W) e  $P_W$  é a potência média da onda (W) que incide no equipamento, a qual é definida, na teoria de Stokes de 2ª ordem, pela Equação 4.9 [McCormick, 1981].

Já a potência média disponível sob a PHS ( $P_P$ ) é calculada segundo a Equação 4.19 [Carter, 2005; Dizadji e Sajadian, 2011]:

$$P_P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{-(d-h)} \left( p + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) \cdot u \cdot b_P \cdot dz \cdot dt \quad (4.19)$$

onde  $p$  é a pressão estática (Pa) sob a PHS, o termo  $(\rho u^2/2)$  representa a pressão dinâmica (Pa) e  $b_P$  é largura da PHS (m).

Para o cálculo da eficiência teórica da PHS (Equação 4.18) é necessário determinar a potência média disponível no escoamento sob a PHS (Equação 4.19). Sendo assim, além dos dados de velocidade axial  $u$ , são necessários, ainda, dados de pressão do escoamento ( $p$ ).

Com isso, os mesmos pontos de monitoramento da velocidade  $u$ , apresentados na Figura 4.4, foram utilizados para monitorar, também, a pressão estática. Do total de dados de pressão estática e velocidade  $u$  obtidos, foram utilizados no cálculo da eficiência teórica  $\varphi$  somente os valores contidos no intervalo de tempo entre  $5,2T$  e  $7,2T$  (Seibt, 2014). A definição deste intervalo se deu com base em observações dos dados de elevação da superfície da onda na região a montante da PHS, que permitiram identificar que neste intervalo de tempo o escoamento abaixo da PHS apresenta pouca ou nenhuma influência dos efeitos de reflexão da onda tanto no dispositivo, com subsequente retorno da mesma à região de geração da onda, quanto no final do canal. Este procedimento é semelhante ao utilizado em Seibt, 2014.

Dessa forma, os resultados de todos os casos analisados, no presente estudo, correspondem a eficiência teórica  $\varphi$ , obtida pela média ao longo de dois períodos de onda ( $2T$ ), no referido intervalo de tempo.

## 4.2 Design Construtal Aplicado à Placa Horizontal Submersa

A seguir são apresentadas duas formulações para a aplicação do método DC ao estudo da geometria do conversor tipo PHS. Em ambas as formulações o grau de liberdade otimizado é o mesmo: a altura da PHS ( $h$ ); porém, abordado de maneiras diferentes em cada formulação.

A principal diferença entre as formulações utilizadas neste trabalho está relacionada ao equacionamento da espessura da PHS. Enquanto na 1ª Formulação DC a espessura varia juntamente com a altura e o comprimento da PHS, na 2ª Formulação DC a espessura é uma variável independente, podendo ser tomada como constante ou grau de liberdade do problema. No presente trabalho a espessura da PHS foi mantida constante, conforme será apresentado na Subseção 4.2.2.

Esta diferença permite que a 2ª Formulação DC seja utilizada para modificar a geometria do dispositivo de PHS mantendo-o com uma forma retangular alongada, ao mesmo tempo em que permite controlar sua espessura. Tal característica não é atendida com a 1ª Formulação DC, a qual foi elaborada originalmente para o estudo em escala de laboratório. Dessa forma, a 2ª Formulação DC foi elaborada com a finalidade de permitir que um espaço de solução mais amplo seja investigado, para a obtenção de uma geometria ótima.

#### 4.2.1 Design Construtal 1ª Formulação

A Figura 4.5 apresenta a representação esquemática do modelo 2D utilizado neste estudo e as variáveis geométricas referentes a esta 1ª Formulação aplicada ao problema. Nesta figura, a PHS é representada por um retângulo horizontal alongado abaixo da superfície da água (retângulo de cor cinza), inserido no retângulo maior que representa o canal de ondas. A linha tracejada representa a superfície da água, enquanto a linha traço-ponto a superfície aberta do canal.

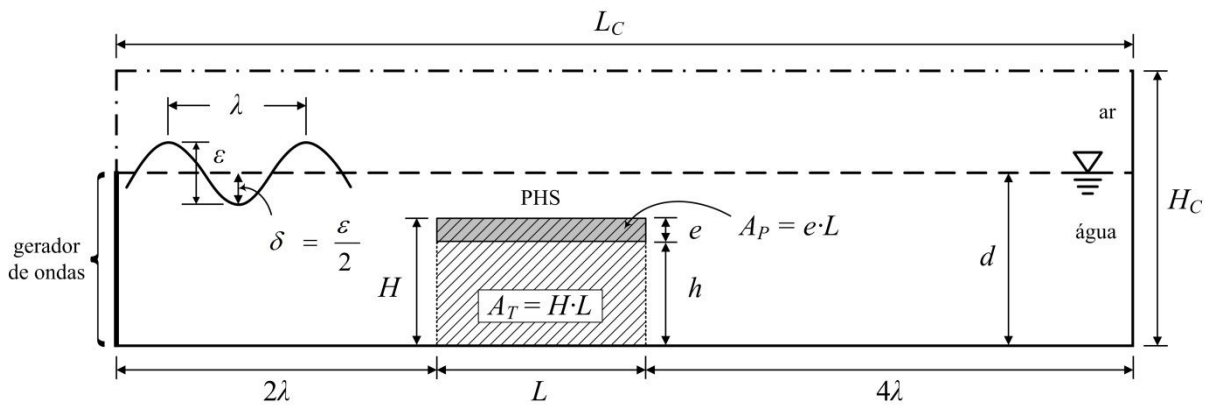


Figura 4.5 – Representação da geometria do modelo e variáveis da 1ª Formulação DC.

A aplicação do método DC ao sistema de escoamento representado na Figura 4.5, pode ser descrita de acordo com a sequência de passos apresentada na Figura 4.6. Com base nesta abordagem (Figura 4.6), foram definidas as restrições, constantes e o grau de liberdade (GDL) a ser otimizado com esta 1ª Formulação. A seguir é apresentado o equacionamento desta formulação, a fim de determinar-se cada uma das dimensões do modelo e realizar a devida avaliação de sua geometria. Sendo escrito da seguinte forma:

$$H = h + e \quad (4.20)$$

$$A_T = H \cdot L \quad (4.21)$$

$$A_P = e \cdot L \quad (4.22)$$

$$X = \left( \frac{h}{d} \right) \cdot 100 \quad (4.23)$$

onde  $h$  é a altura da PHS (m),  $H$  é a altura total da PHS (m),  $e$  é a espessura da PHS (m),  $L$  é o comprimento da PHS (m),  $A_P$  é a área da PHS (m<sup>2</sup>),  $A_T$  é a área total do conversor PHS (m<sup>2</sup>) e  $X$  é a altura relativa da PHS (%). Deve-se observar que  $A_T$  corresponde a área hachurada (ver Figura 4.5), envolvendo tanto  $A_P$  quanto a área livre abaixo da PHS.

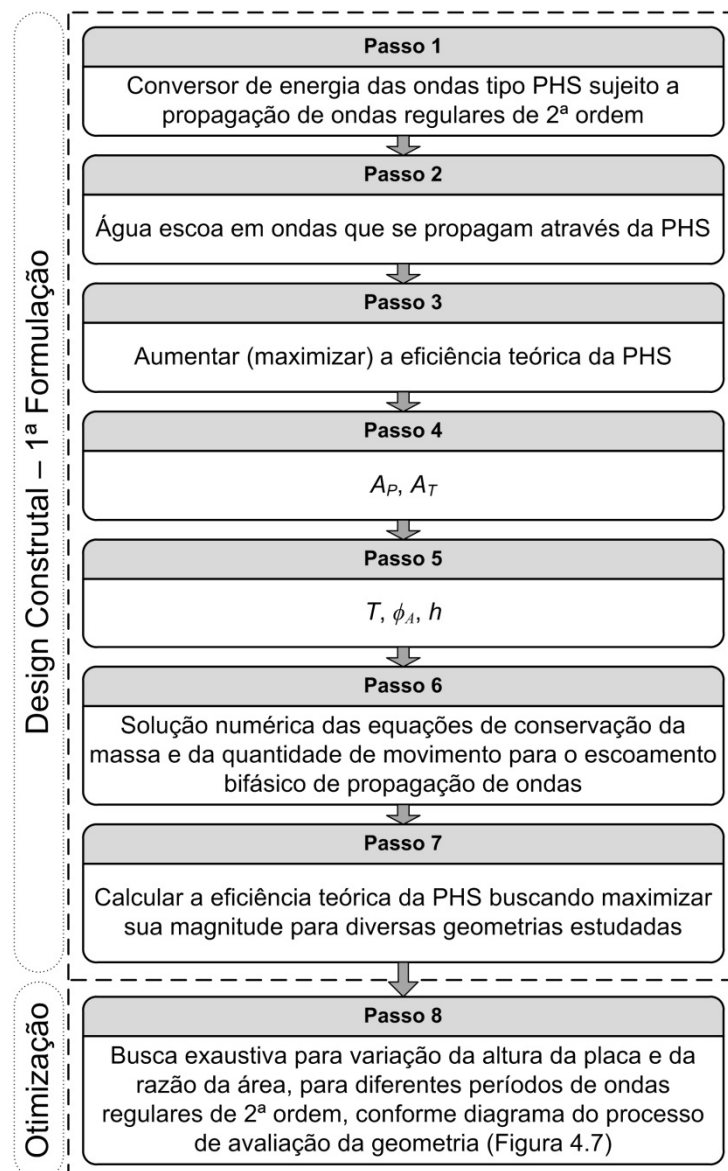


Figura 4.6 – Aplicação do Design Construtual de acordo com a 1ª Formulação DC.

Cabe destacar que  $A_P$  e  $A_T$  constituem restrições do problema, de modo que a variação da geometria do modelo está condicionada aos valores atribuídos a esses dois parâmetros. Já o GDL escolhido é a altura da PHS  $h$ , a partir do qual serão feitas as variações de todos os demais parâmetros da geometria da PHS.

Além das restrições estabelecidas na abordagem do sistema, foram adotadas algumas restrições físicas ao estudo, dadas pelas seguintes relações:

$$H < d - \delta \quad (4.24)$$

$$X \geq 20,00 \% \quad (4.25)$$

$$e \geq \left(\frac{1}{10}\right) \cdot \varepsilon \quad (4.26)$$

A primeira restrição física adotada (Equação 4.24) limita a altura total da PHS ( $H$ ), a fim de assegurar que a geometria resultante corresponda a uma PHS totalmente submersa, i.e., abaixo da região de propagação da cava da onda na superfície da água. A segunda (Equação 4.25), diz respeito à altura relativa da PHS ( $X$ ) e visa assegurar um espaço mínimo para instalação da turbina hidráulica sob a PHS, para a qual adotou-se 20,00 % como valor mínimo. Já a terceira restrição (Equação 4.26), estabelece um valor mínimo para a espessura da PHS ( $e$ ), em termos de uma fração da altura de onda ( $\varepsilon$ ), e tem o objetivo de evitar geometrias que possam ser impraticáveis construtivamente.

A relação entre as áreas é dada por:

$$\phi_A = \frac{A_P}{A_T} \quad (4.27)$$

onde  $\phi_A$  é a razão entre as áreas  $A_P$  e  $A_T$  e possibilita a determinação do valor de uma das áreas a partir do conhecimento da outra, facilitando a tarefa de explorar o espaço de solução. A variável  $\phi_A$  consiste, portanto, em uma forma indireta de abordagem dessas duas restrições do problema; por simplicidade, será chamada de razão de área (no singular).

Por fim, as dimensões do canal de ondas são dadas por:

$$L_C = (6 \cdot \lambda) + L \quad (4.28)$$

$$H_C = \left(\frac{5}{3}\right) \cdot d \quad (4.29)$$

onde  $L_C$  é o comprimento do canal (m) e  $H_C$  é a altura do canal (m).

Conforme descrito na Figura 4.6 o método de otimização escolhido para determinação de uma geometria ótima do conversor de PHS foi a Busca Exaustiva, cuja sequência de avaliação da geometria é apresentada no diagrama da Figura 4.7.

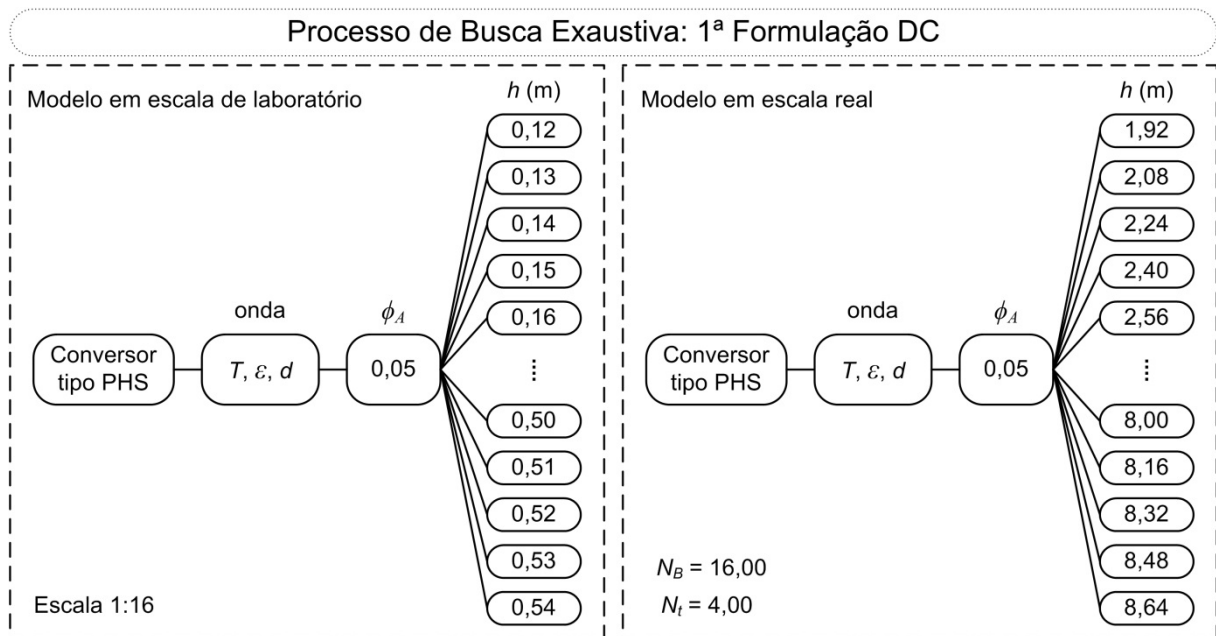


Figura 4.7 – Processo de Busca Exaustiva aplicado com a 1ª Formulação DC.

Considerando-se  $A_T = 1 \text{ m}^2$  (unitária) é possível reescrever as equações em termos de variáveis não dimensionais (adimensionalizadas), dadas por:

$$H^*, L^*, e^*, h^*, d^*, \varepsilon^* = \frac{H, L, e, h, d, \varepsilon}{A_T^{1/2}} \quad (4.30)$$

Reescrevendo as Equações 4.20, 4.21 e 4.27, têm-se:

$$H^* = h^* + e^* \quad (4.31)$$



$$1 = H^* \cdot L^* \quad (4.32)$$

$$\phi_A = \frac{e^* \cdot L^*}{H^* \cdot L^*} = \frac{e^*}{H^*} \therefore e^* = \phi_A \cdot H^* \quad (4.33)$$

Substituindo a Equação 4.33 na Equação 4.31, obtém-se:

$$H^* = h^* + (\phi_A \cdot H^*) \quad (4.34)$$

$$h^* = H^* - (\phi_A \cdot H^*) \quad (4.35)$$

$$h^* = H^*(1 - \phi_A) \quad (4.36)$$

Portanto, conhecendo-se  $\phi_A$  e  $h^*$  é possível determinar as demais dimensões do problema, como:

$$H^* = \frac{h^*}{(1 - \phi_A)} \quad (4.37)$$

$$L^* = \frac{1}{H^*} \quad (4.38)$$

$$e^* = \phi_A \cdot H^* \quad (4.39)$$

Já os valores de  $d^*$  e  $\varepsilon^*$  são definidos pelas características da onda escolhida para o estudo.

#### 4.2.2 Design Construtal 2ª Formulação

A Figura 4.8 apresenta a representação esquemática do modelo 2D utilizado neste estudo e as variáveis geométricas referentes a esta 2ª Formulação aplicada ao problema. Nesta

figura, a PHS é representada por um retângulo horizontal alongado abaixo da superfície da água (retângulo de cor cinza), inserido no retângulo maior que representa o canal de ondas. A linha tracejada representa a superfície da água, enquanto a linha traço-ponto a superfície aberta do canal.

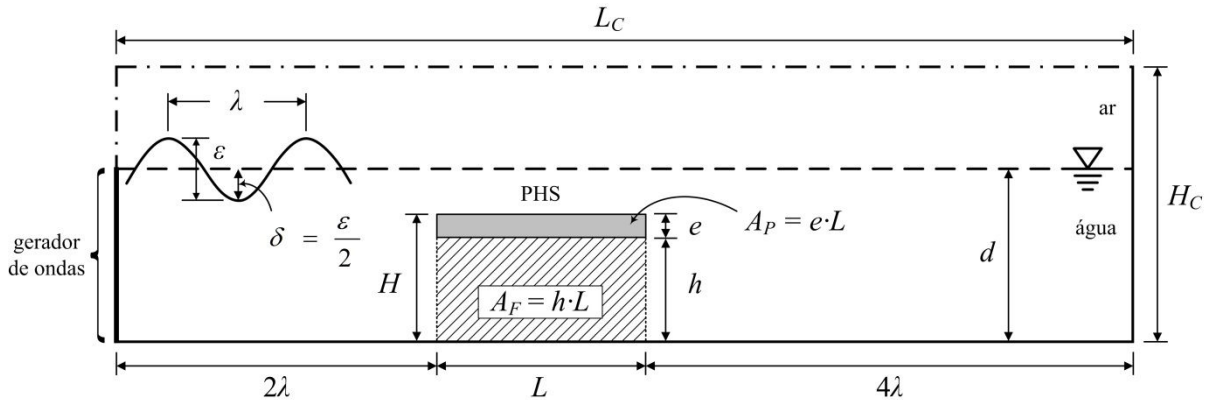


Figura 4.8 – Representação da geometria do modelo e variáveis da 2ª Formulação DC.

A aplicação do método DC ao sistema de escoamento representado na Figura 4.8, pode ser descrita de acordo com a sequência de passos apresentada na Figura 4.9.

Deve-se observar que, nesta 2ª Formulação do método DC, a área hachurada compreende apenas a área livre sob a PHS ( $A_F$ , m<sup>2</sup>). Portanto, a área da PHS ( $A_P$ , m<sup>2</sup>) é um parâmetro independente de acordo com esta 2ª Formulação, sendo esta a principal diferença entre as duas formulações empregadas neste trabalho.

Com base nesta abordagem (Figura 4.9), foram definidas as restrições, constantes e o grau de liberdade (GDL) a ser otimizado com esta 2ª Formulação. A seguir é apresentado o equacionamento desta 2ª Formulação, a fim de determinar-se cada uma das dimensões do modelo e realizar a devida avaliação de sua geometria. Sendo escrito da seguinte forma:

$$e = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot \varepsilon \quad (4.40)$$

$$H = h + e \quad (4.41)$$

$$A_F = h \cdot L \quad (4.42)$$

$$A_R = d \cdot L_R \quad (4.43)$$

$$L_R = 6 \cdot \lambda \quad (4.44)$$

$$A_P = e \cdot L \quad (4.45)$$

$$X = \left( \frac{h}{d} \right) \cdot 100 \quad (4.46)$$

onde  $e$  é a espessura da PHS (m),  $h$  é a altura da PHS (m),  $H$  é a altura total da PHS (m),  $L$  é o comprimento da PHS (m),  $L_R$  é o comprimento de referência (m) e  $A_R$  é a área de referência (m<sup>2</sup>). Cabe destacar que, o comprimento de referência  $L_R$  corresponde a soma dos comprimentos, do canal de ondas, a montante e a jusante da PHS. Dessa forma,  $L_R$  depende, apenas, das características da onda simulada. Por sua vez, a área de referência  $A_R$  corresponde a soma das áreas do canal de ondas ocupadas pela água (visto que  $d$  é a profundidade da água no canal), tanto a montante quanto a jusante da PHS.

Além das restrições estabelecidas nesta 2ª Formulação aplicada ao sistema, foram adotadas as seguintes restrições físicas ao estudo, dadas por:

$$H < d - \delta \quad (4.47)$$

$$X \geq 20,00 \% \quad (4.48)$$

$$0 < L \leq \lambda \quad (4.49)$$

A primeira e a segunda restrições são idênticas às adotadas na 1ª Formulação, de modo que: a primeira (Equação 4.47) visa assegurar que serão avaliadas, somente, geometrias em que a PHS esteja completamente submersa, i.e., abaixo da amplitude da cava da onda na superfície da água; e a segunda (Equação 4.48) visa assegurar a disponibilidade de um espaço livre para instalação da turbina hidráulica sob a PHS, equivalente a 20,00 % de profundidade da água. Já a terceira restrição (Equação 4.49), estabelece o valor máximo do comprimento da PHS ( $L$ ) como sendo igual ao comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ) e tem como objetivo

principal evitar uma característica geométrica desaconselhada pela literatura, tal que  $(L/\lambda) > 1,00$  [conforme Graw, 1994; 1996]. Além disso, do ponto de vista construtivo, possibilita evitar o emprego de estruturas excessivamente longas, bem como, obviamente, garantir um valor não nulo para essa dimensão do equipamento, ao limitar seu valor mínimo.

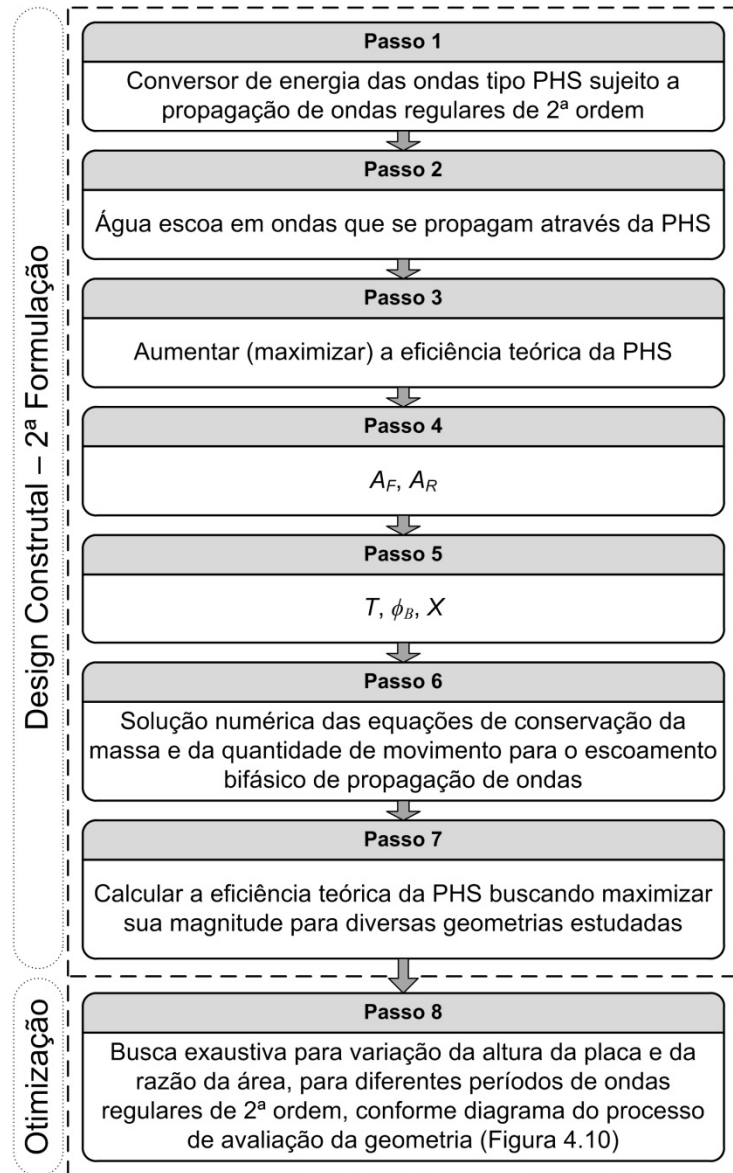


Figura 4.9 – Aplicação do Design Construtual de acordo com a 2ª Formulação DC.

Conforme o diagrama da Figura 4.9,  $A_F$  e  $A_R$  são restrições do problema, de modo que todos os demais parâmetros geométricos do modelo dependem dos valores atribuídos a esses dois parâmetros. Já o GDL selecionado é a altura relativa da PHS  $X$ , a partir do qual serão feitas as variações de todos os demais parâmetros da geometria da PHS. Em relação a

geometria da PHS, este parâmetro equivale a avaliar (otimizar) a altura da PHS  $h$  (assim como na 1ª Formulação), entretanto, sua escolha visa tanto simplificar a forma de explorar o espaço de solução, quanto facilitar a correspondência entre o parâmetro otimizado e o parâmetro utilizado na apresentação e discussão dos resultados.

A relação entre as áreas é dada por:

$$\phi_B = \frac{A_F}{A_R} \quad (4.50)$$

onde  $\phi_B$  é a razão entre as áreas  $A_F$  e  $A_R$ , a qual simplifica a tarefa de explorar o espaço de solução ao possibilitar uma forma indireta de abordagem dessas duas restrições do problema. Por simplicidade, esta variável será chamada de razão de área (no singular).

Rearranjando a Equação 4.46 e substituindo os termos nas Equações 4.41 e 4.50, as demais dimensões do modelo são obtidas por:

$$X = \left(\frac{h}{d}\right) \cdot 100 \therefore h = \frac{X \cdot d}{100} \quad (4.51)$$

$$H = h + e \therefore H = \left(\frac{X \cdot d}{100}\right) + e \quad (4.52)$$

$$\phi_B = \frac{A_F}{A_R} = \frac{h \cdot L}{d \cdot L_R} = \frac{\left(\frac{X \cdot d}{100}\right) \cdot L}{d \cdot (6 \cdot \lambda)} \therefore L = \frac{\phi_B \cdot 6 \cdot \lambda \cdot 100}{X} \quad (4.53)$$

E, ainda, as dimensões do canal de ondas são dadas por:

$$L_C = (6 \cdot \lambda) + L \quad (4.54)$$

$$H_C = \left(\frac{5}{3}\right) \cdot d \quad (4.55)$$

onde  $L_C$  é o comprimento do canal (m) e  $H_C$  é a altura do canal (m).

Conforme descrito na Figura 4.9 o método de otimização escolhido para determinação de uma geometria ótima do conversor de PHS foi a Busca Exaustiva, cuja seqüência de avaliação da geometria é apresentada no diagrama da Figura 4.10.

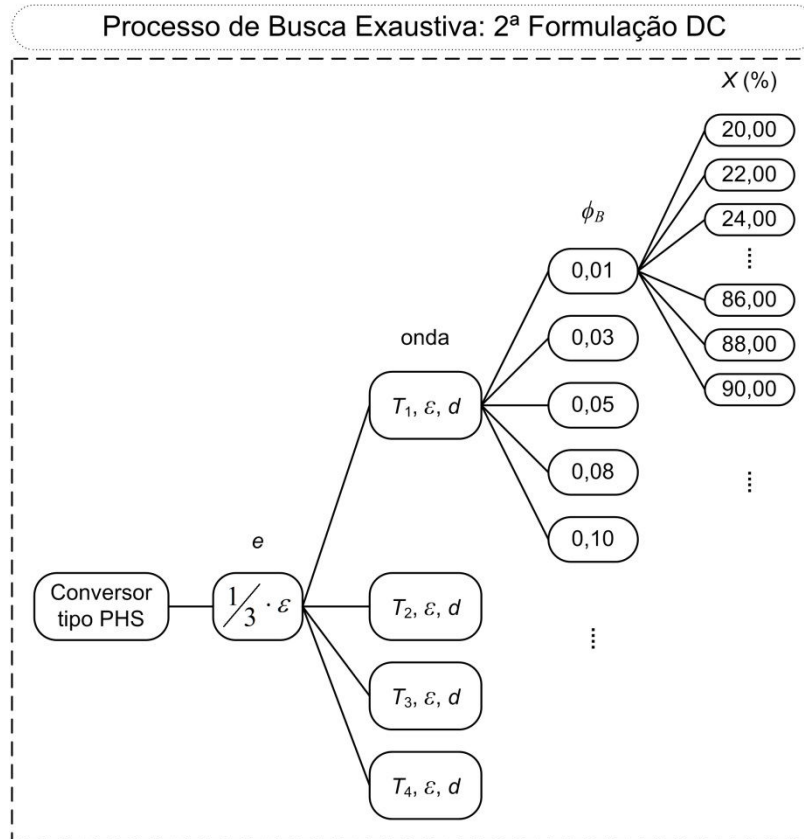


Figura 4.10 – Processo de Busca Exaustiva aplicado com a 2ª Formulação DC.

Considerando-se  $A_R = 1 \text{ m}^2$  (unitária) é possível reescrever as equações em termos das variáveis adimensionalizadas, dadas por:

$$H^*, L^*, e^*, h^*, d^*, \lambda^*, \varepsilon^* = \frac{H, L, e, h, d, \lambda, \varepsilon}{A_R^{1/2}} \quad (4.56)$$

Portanto, reescrevendo as Equações 4.43, 4.51 e 4.52, têm-se:

$$1 = d^* \cdot L_R^* \quad (4.57)$$

$$h^* = \frac{X \cdot d^*}{100} \quad (4.58)$$

$$H^* = \left( \frac{X \cdot d^*}{100} \right) + e^* \quad (4.59)$$

Substituindo as Equações 4.57 e 4.58 na Equação 4.50 e reescrevendo:

$$\phi_B = h^* \cdot L^* \therefore L^* = \frac{\phi_B \cdot 100}{X \cdot d^*} \quad (4.60)$$

Alternativamente, é possível reescrever a Equação 4.53 como:

$$L^* = \frac{\phi_B \cdot 6 \cdot \lambda^* \cdot 100}{X} \quad (4.61)$$

Dessa forma, conhecendo-se as características da onda ( $d^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $\varepsilon^*$ ), a razão de área  $\phi_B$  e a altura relativa  $X$ , é possível determinar todas as dimensões do modelo.

### 4.3 Modelagem Numérica

Para a realização das simulações numéricas foi utilizado o programa computacional Ansys Fluent®, que é um *software* baseado no Método de Volumes Finitos (FVM – *Finite Volume Method*) [Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007], que permite a modelagem de escoamentos de fluidos e de transferência de calor com as mais variadas geometrias. Já para a geração do domínio computacional, foi utilizado o *software* GAMBIT® que permite a construção e discretização de modelos computacionais para diversas aplicações científicas.

O modelo computacional empregado neste estudo é análogo ao modelo utilizado por Seibt, 2014, e consistiu em um domínio bidimensional, representando um canal de ondas com a presença de uma PHS. Para representar a interação entre água e ar utilizou-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) [Hirt e Nichols, 1981; Srinivasan et al., 2011], que permite representar de forma realística a interação entre fluidos imiscíveis.

### 4.3.1 Método de Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (FVM) é uma maneira de se obter a forma discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira [De Bortoli, 2000; Fortuna, 2000; Gomes, 2014].

A quantidade líquida que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma geral pela integração das EDPs [Maliska, 2004].

O FVM é considerado adequado para a solução de problemas físicos de dinâmica dos fluidos por garantir a conservação local das propriedades do fluido para cada célula do volume de controle. Quando os esquemas numéricos empregam a forma conservativa é assegurada também a conservação global das propriedades do fluido para todo o domínio computacional, sendo um método amplamente utilizado em aplicações de engenharia que envolvam dinâmica de fluidos; como, por exemplo: aerodinâmica, hidrodinâmica, interação fluido-estrutura e moldagem de polímeros [Versteeg e Malalasekera, 2007].

Um sistema na forma conservativa (ou divergente) é aquele em que, na equação diferencial, os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, após a primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar (ou volume finito), equivalente, dessa forma, ao balanço. Existem duas maneiras de encontrar as equações aproximadas de um problema através do FVM: (i) a primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares; (ii) a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações diferenciais na forma conservativa [Maliska, 2004; Gomes, 2014].

Outras informações e detalhes do método, bem como sua formulação, podem ser encontrados em Patankar, 1980, Maliska, 2004, Versteeg e Malalasekera, 2007.

### 4.3.2 Modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF)



Para a simulação de escoamentos de superfície livre, como um canal de ondas numérico, onde há interação água-ar, é necessário o uso de alguma técnica de identificação da posição da superfície livre.

A partir do conceito de fração volumétrica [Hirt e Nickols, 1981], o modelo VOF permite a representação de dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de transporte. A identificação da interface dos fluidos é feita considerando que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outras fases [Hirt e Nickols, 1981; Srinivasan et al., 2011].

Define-se a fração de volume ( $\alpha$ ) como sendo uma variável, contínua no espaço e no tempo, que representa a presença de um fluido no interior do volume de controle. Assim, em cada volume de controle a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária, de forma que se têm três possíveis situações:

- $\alpha = 1$ : indica um volume que contém somente água;
- $\alpha = 0$ : indica um volume que contém apenas ar;
- $0 < \alpha < 1$ : identifica a posição da superfície livre.

A equação de transporte da fração volumétrica, usada para determinar a fração do volume relativa às duas fases em cada elemento de malha do domínio computacional, é dada por [Srinivasan et al., 2011]:

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha w)}{\partial z} = 0 \quad (4.62)$$

O modelo VOF não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre os fluidos, esta é determinada pela discretização da fração volumétrica na região de interface entre os dois fluidos onde há valores de  $\alpha$  entre 0 e 1 (Figura 4.11).

As propriedades físicas na zona de transição entre os dois fluidos são calculadas como médias ponderadas com base na fração volumétrica. Dessa forma, a massa específica e o coeficiente de viscosidade dinâmico, são escritos como [Srinivasan et al., 2011]:

$$\rho = \alpha \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ar}} \quad (4.63)$$

$$\mu = \alpha \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \quad (4.64)$$

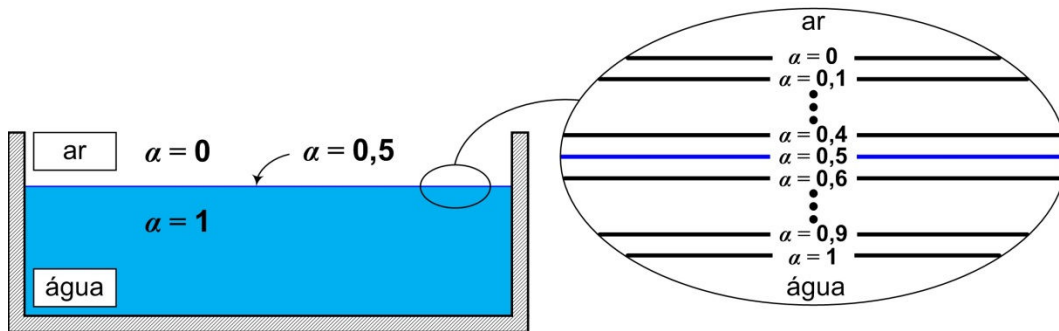


Figura 4.11 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume [adaptado de De Brito, 2010].

### 4.3.3 Canal de Ondas Numérico

No presente estudo, o domínio computacional foi construído a partir da representação 2D de um canal de ondas, típico de modelos de laboratório, com a presença da PHS abaixo da superfície da água. A Figura 4.12 apresenta a representação esquemática da geometria do domínio, onde se percebe que algumas das dimensões foram definidas com base nas características da onda simulada.

Uma vez que este trabalho utiliza o modelo desenvolvido por Seibt, 2014, foram mantidas as seguintes características: distância de dois comprimentos de onda ( $2\lambda$ ), entre o gerador de ondas e a aresta frontal da PHS (trecho a montante da PHS), e quatro comprimentos de onda ( $4\lambda$ ) a partir da aresta posterior da PHS até a parede final do canal de ondas (trecho a jusante da PHS; ver Figura 4.12).

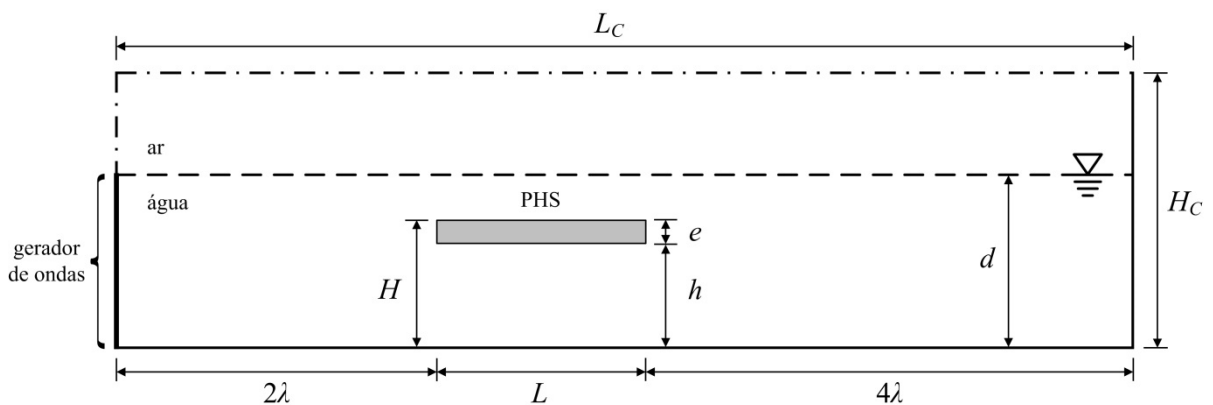


Figura 4.12 – Representação da geometria do domínio.

Estas dimensões foram fixadas como forma de garantir condições mínimas para a formação das ondas antes de chegarem à placa e, também, garantindo um número mínimo de ondas incidentes sobre a PHS antes da ocorrência de reflexão das ondas na parede final do canal (trecho a jusante da PHS). Assim, permitindo a obtenção de uma quantidade suficiente de dados para análise, ao longo do tempo de escoamento simulado (conforme Seibt, 2014).

Na Figura 4.13 é apresentada a representação do canal de ondas com a indicação das condições de contorno do domínio. Para definir onde se encontram os limites sólidos do canal (linha contínua) e diferenciá-los das regiões de líquido, onde ocorre o escoamento de propagação das ondas, são atribuídas condições de contorno de não deslizamento ( $u(x, z, t) = w(x, z, t) = 0$ ); respectivamente, nas arestas representativas do fundo do canal (aresta inferior) e da extremidade final do canal (aresta direita), bem como nas quatro arestas que delimitam a posição da PHS. Esta condição de contorno indica que nestas arestas a componente de velocidade normal é nula e que não há transporte de massa através das mesmas (impermeabilidade).

Como um canal de ondas é uma estrutura aberta deve-se representar essa condição no domínio computacional, o que é feito com a condição de contorno de pressão atmosférica ( $p_{atm}$ ). Esta condição foi aplicada à aresta superior do canal e à parte da aresta lateral esquerda do canal situada acima do nível da água em repouso (acima do gerador de ondas), representadas por uma linha traço-ponto na Figura 4.13.

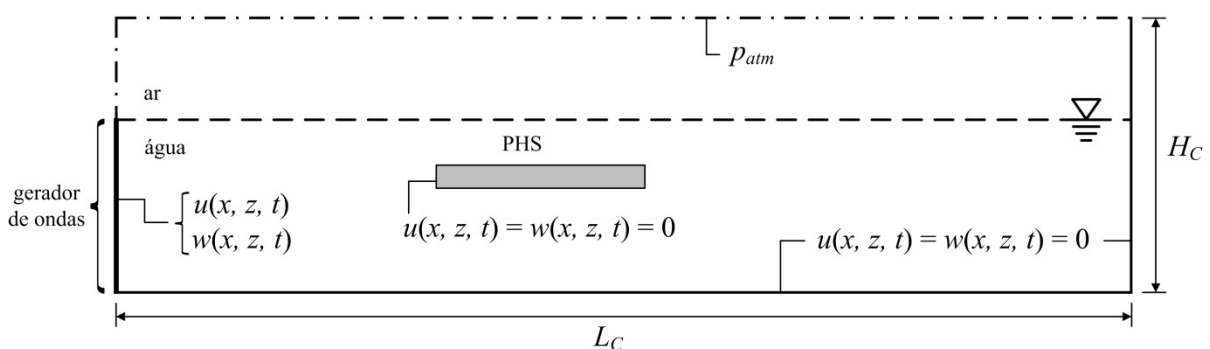


Figura 4.13 – Condições de contorno do canal de ondas numérico.

No *software* Ansys Fluent®, estas condições de contorno são nomeadas como parede (*wall*), para a condição de não deslizamento e impermeabilidade, e pressão de saída (*pressure outlet*), para a condição de pressão atmosférica.

Para a simulação do movimento de propagação da onda aplicou-se, na aresta correspondente ao gerador de ondas (linha contínua espessa; Figura 4.13), a condição de contorno de velocidade dependente do tempo ( $u(x,z,t)$  e  $w(x,z,t)$  – *velocity inlet*). Neste recurso é possível utilizar uma função definida pelo usuário (UDF – *User Defined Function*), escrita em linguagem C, para impor a variação das componentes de velocidade horizontal (Equação 4.7) e vertical (Equação 4.8) ao fluido (código da UDF disponível no Anexo I) [Horko, 2007; Barreiro, 2009; Ramalhais, 2011; Seibt, 2014]. Sendo assim, o controle desse movimento é feito de acordo com as características da onda que se deseja simular, resultando em um perfil de elevação da superfície equivalente ao descrito pela Equação 4.6.

Um procedimento complementar à definição das condições de contorno é a delimitação das regiões que estarão preenchidas por cada uma das fases. Essa região corresponde à profundidade da água ( $d$ ) no canal, assim a condição de contorno de velocidade dependente do tempo, que simula o gerador de ondas, foi aplicada, na respectiva aresta, apenas até esta altura, impondo as componentes de velocidade da onda somente à fase de líquido (água).

#### 4.3.4 Discretização do Domínio

Apesar da robustez dos códigos de CFD, como o *software* Ansys Fluent®, a correta definição do número de elementos e de suas dimensões, proporciona que se obtenham resultados adequados e com eficiência no uso dos recursos computacionais.

O domínio computacional deste estudo foi criado no *software* GAMBIT® que permite tanto a construção da geometria do domínio quanto a geração da malha de discretização do mesmo. Após a construção da geometria e geração da malha é possível exportar o domínio em formato compatível com o *software* Ansys Fluent®.

No presente estudo, dada à simplicidade geométrica do domínio, utilizou-se malha do tipo estruturada, a qual permite um melhor controle das dimensões de seus elementos ao longo do domínio. Este recurso é especialmente útil para a discretização da região de superfície livre, onde há interface entre água e ar, uma vez que esta requer maior cuidado para evitar-se difusão numérica da fração de volume [Ramalhais, 2011].

Alguns critérios foram adotados para definição das dimensões dos elementos de malha que permitissem a construção de domínios computacionais, cujo número total de elementos, em domínios de dimensões reais, não representasse um acréscimo desnecessário de esforço

computacional, como seria esperado no caso de utilizar-se uma malha completamente regular. Esse procedimento é adotado em estudos de outros autores devido a esta característica [Horko, 2007; Barreiro, 2009; Barreiro et al., 2009; Ramalhais, 2011].

Com isso, para a discretização da região de interface entre as fases utilizou-se 20 elementos (pelo menos) entre a crista e a cava da onda e, para garantir a propagação da onda sem perdas de amplitude ou alteração de período, 60 elementos (pelo menos) ao longo de um comprimento de onda [Barreiro, 2009; Ramalhais, 2011]. Levando em conta os efeitos hidrodinâmicos característicos do dispositivo de PHS, causados pela dissipação de energia das ondas em torno da PHS, foram incorporados, também, alguns critérios para o refinamento da malha na região em torno do dispositivo, conforme utilizado em Seibt, 2014.

A Figura 4.14 apresenta uma ampliação parcial da malha em torno da PHS de um dos casos simulados em escala de laboratório. Nesta figura é possível visualizar as zonas com refinamento da malha em torno da PHS e a transição com as zonas de estiramento.

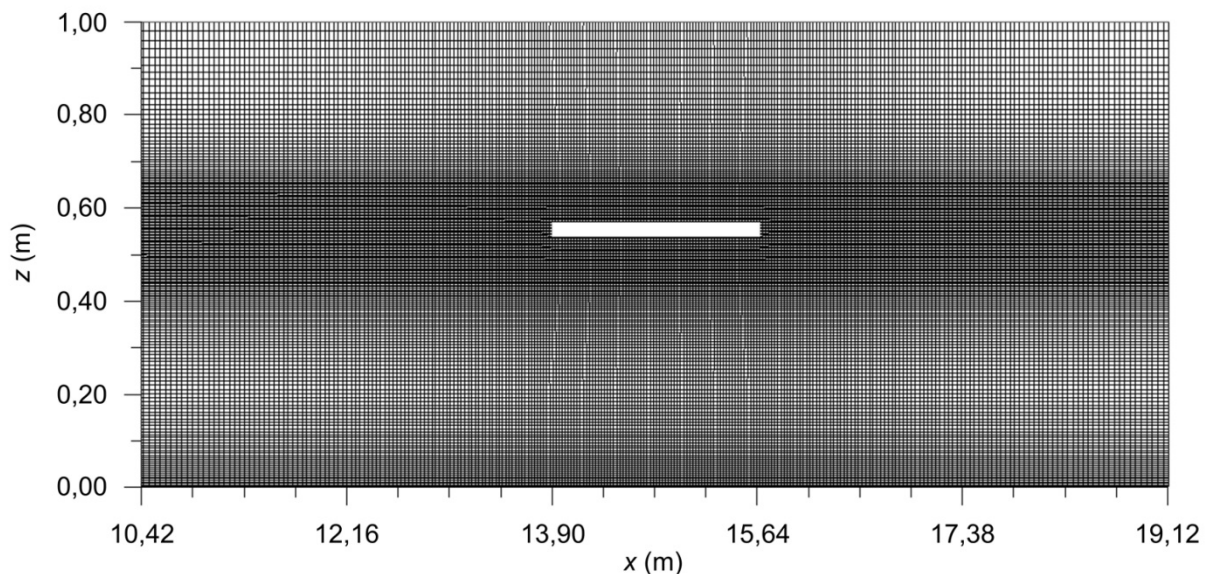


Figura 4.14 – Visualização ampliada da malha em torno da PHS.

Portanto, para as análises apresentadas no presente estudo, o domínio foi dividido em diversas regiões, onde as dimensões de malha foram adequadas de acordo com diferentes critérios para cada região, conforme a Figura 4.15. O uso destes critérios resultou em uma malha com 200.000 volumes, em média, entre os casos simulados neste trabalho.

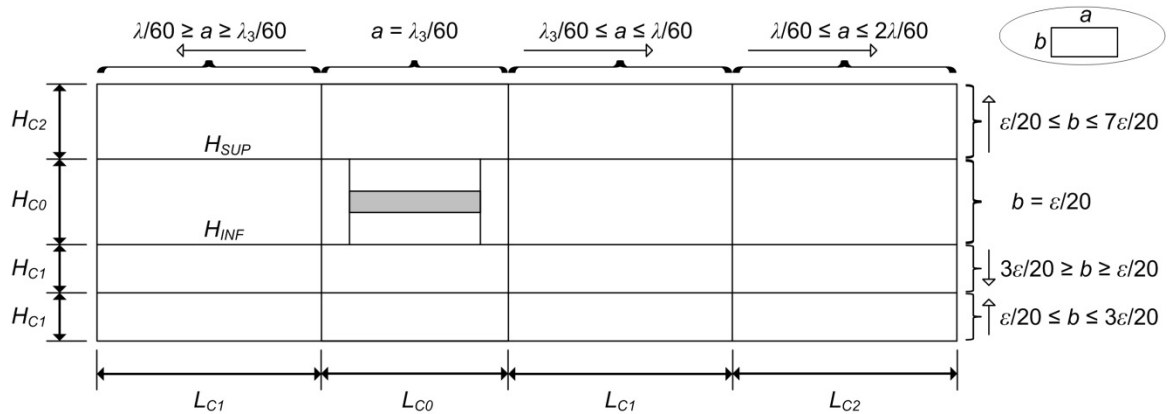


Figura 4.15 – Dimensões adotadas para a malha empregada no domínio computacional.

Sendo assim, a discretização do domínio computacional, que representa o canal de ondas numérico contendo o conversor de PHS, obedeceu aos critérios descritos a seguir.

Na direção horizontal (dimensão  $a$ ):

- (i) o trecho  $L_{C0}$  (em torno da PHS) foi dividido com base no comprimento de onda equivalente à terceira harmônica ( $\lambda_3$ )<sup>1</sup> da onda incidente, segundo a razão  $\lambda_3/60$ ;
- (ii) os trechos  $L_{C1}$  (a montante e a jusante da PHS) foram divididos com base em um estiramento da malha desde  $\lambda_3/60$  até  $\lambda/60$ , em ambos os casos a partir da região em torno da PHS;
- (iii) o trecho  $L_{C2}$  (final do canal, a jusante da PHS) foi dividido com base em um estiramento da malha desde  $\lambda/60$  até  $2\lambda/60$ , tendo em vista que este trecho atua como zona de dissipação da onda após a passagem pela PHS.

Na direção vertical (dimensão  $b$ ):

- (i) o trecho  $H_{C0}$  (zona de propagação da onda e em torno da PHS) foi dividido com base na altura da onda incidente, segundo a razão  $\epsilon/20$ ;
- (ii) os trechos  $H_{C1}$  (abaixo da PHS) foram divididos com base em um estiramento da malha desde  $\epsilon/20$  até  $3\epsilon/20$ , de modo que a malha apresente maior refinamento tanto próximo a PHS quanto próximo ao fundo do canal;
- (iii) o trecho  $H_{C2}$  (parte superior, acima da zona de propagação e da interface água-ar) foi dividido com base em um estiramento da malha desde  $\epsilon/20$  até  $7\epsilon/20$ , tendo em vista que esta região contém somente a fase de ar, resultando em, pelo menos, 35 elementos (conforme Barreiro, 2009).

<sup>1</sup> O valor de  $\lambda_3$  foi calculado, através da Equação 4.5, com base na terça parte do período de onda ( $T/3$ ) e considerando mesma profundidade de água ( $d$ ) da onda original.

As dimensões que delimitam cada trecho do domínio na direção horizontal, apresentadas na Figura 4.15, são dadas por:

$$L_{C0} = L + 2L_{ESP} \quad (4.65)$$

$$L_{C1} = 2\lambda - L_{ESP} \quad (4.66)$$

$$L_{C2} = 2\lambda \quad (4.67)$$

onde  $L_{C0}$  é comprimento do trecho em torno da PHS,  $L_{C1}$  é o comprimento dos trechos a montante e a jusante da PHS,  $L_{C2}$  é comprimento do trecho final do canal, a jusante da PHS, e  $L_{ESP}$  é o comprimento do espaçamento em torno da PHS, definido como:

$$L_{ESP} = \left(\frac{5}{3}\right) \cdot \varepsilon \quad (4.68)$$

Já as dimensões dos trechos na direção vertical (Figura 4.15), são dadas por:

$$H_{C0} = H_{SUP} - H_{INF} \quad (4.69)$$

$$H_{C1} = \frac{H_{INF}}{2} \quad (4.70)$$

$$H_{C2} = H_C - H_{SUP} \quad (4.71)$$

onde  $H_{C0}$  é a altura do trecho central do canal, que se estende desde acima da zona de propagação da onda até logo abaixo da PHS,  $H_{C1}$  é a altura dos trechos abaixo da PHS, que dividem o estiramento da malha nessa região,  $H_{C2}$  é a altura do trecho superior do canal,  $H_{SUP}$  é a altura da linha superior, que limita  $H_{C0}$  acima da interface água-ar, e  $H_{INF}$  é a altura da linha inferior, que limita  $H_{C0}$  logo abaixo da PHS. Por sua vez,  $H_{SUP}$  e  $H_{INF}$  são definidos como:

$$H_{SUP} = d + \left(\frac{5}{6}\right) \cdot \varepsilon \quad (4.72)$$

$$H_{INF} = h - L_{ESP} \quad (4.73)$$

Cabe destacar que o fato de  $L_{CO}$  se estender além das arestas da PHS, tanto frontal quanto posterior, bem como  $H_{CO}$  se estender acima da zona de propagação da onda (altura de onda) e abaixo da aresta inferior da PHS, permite que o estiramento da malha, tanto na direção horizontal quanto vertical, se dê afastado dos bordos da PHS, evitando problemas de difusão numérica e distorções causadas pela malha sobre o escoamento em torno da PHS.

#### 4.3.5 Parâmetros de Solução

Para a solução das equações de transporte utilizou-se a formulação transiente segundo o esquema Upwind de primeira ordem. Com isso, as quantidades em todas as faces dos volumes são calculadas supondo que o centro do volume de controle, para um campo variável, representa um valor médio ao longo de todo o volume, assim mantendo todas as características ao longo deste [Maliska, 2004; Gomes, 2014]. Em relação à solução das equações da conservação da massa e quantidade de movimento, foram adotados os fatores de sub-relaxação da solução de 0,3 e 0,7, respectivamente.

No modelo VOF foi adotada a formulação explícita, dessa forma os fluxos nas faces são interpolados na interface de acordo com o esquema de reconstrução geométrica (*Geo-reconstruct*). O esquema de reconstrução geométrica, cuja forma da interface é apresentada na Figura 4.16, representa a interface entre os fluidos através de uma abordagem linear por partes (*piecewise-linear*). No *software* Ansys Fluent®, este regime é o mais preciso, sendo aplicável tanto para malhas estruturadas quanto não estruturadas [Iahnke, 2010; Gomes, 2014].

O primeiro passo no esquema da reconstrução geométrica é o cálculo da posição da interface linear em relação ao centro de cada volume parcialmente cheio, com base em informações sobre a fração de volume e suas derivadas na célula. O segundo passo é calcular o montante de advecção de cada uma das fases, através da representação de cada interface computadorizada linearmente e das informações sobre a distribuição de velocidades normal e tangencial na face. O terceiro passo é calcular a fração de volume em cada célula, utilizando o balanço dos fluxos calculados durante a etapa anterior [Iahnke, 2010; Gomes, 2014].



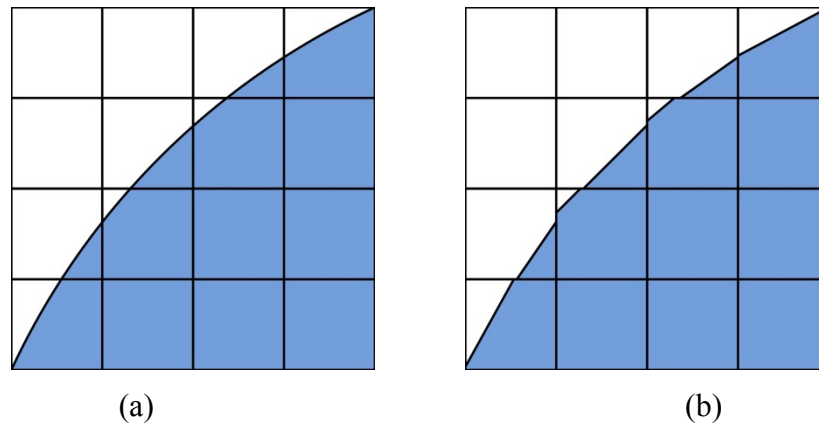


Figura 4.16 – Representação da interface: (a) posição original; (b) reconstrução geométrica [adaptado de Gomes, 2010].

A pressão e a velocidade são determinadas no centro dos volumes, porém é necessário interpolar os valores de pressão para as suas faces. Para tal, utilizou-se o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*) que emprega um balanço discreto da continuidade para o escalonamento do volume de controle, na face em que a pressão é computada, e é adequado para modelagem de escoamentos com superfície livre [Ramalhais, 2011; Gomes, 2014].

Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), cuja relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade possui um grau mais elevado que os métodos SIMPLE (*Semi IMPLICIT Linked Equations*) e SIMPLER (*Semi IMPLICIT Linked Equations Consistent*), pois emprega duas correções a mais do que estes: a correção da vizinhança e a correção da assimetria [Patankar, 1980; Gomes, 2014].

Quanto à discretização temporal, duas formas de aproximação para o avanço do tempo são possíveis: iterativo e não iterativo. No presente trabalho foi utilizado o esquema de avanço não iterativo (NITA – *Non-Iterative Time-Advancement*), que visa preservar a precisão total no tempo, assim, ao invés de reduzir o erro à zero, limita este à mesma ordem do erro de truncamento. Diferentemente do método iterativo, que requer um grande número de iterações externas a cada passo de tempo, o esquema NITA realiza uma única iteração externa por passo de tempo, o que reduz significativamente o tempo computacional de simulações transientes [Gomes, 2014].

Na Tabela 4.2 tem-se um resumo de todos os parâmetros e esquemas numéricos empregados nas simulações deste estudo.

Tabela 4.2 – Parâmetros de solução adotados.

Formulação	Parâmetro adotado
	Transiente
Solução no tempo	Formulação implícita de 1ª ordem Baseado na pressão Avanço não iterativo no tempo (NITA)
Modelo VOF	Formulação explícita
Controle da solução	Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO Método de discretização da pressão: PRESTO Formulação da quantidade de movimento: Upwind de 1ª ordem Esquema de discretização da fração geométrica: Geo-reconstruct

Um parâmetro importante para a precisão dos resultados de uma simulação numérica é a definição do passo de tempo. O uso de valores inadequados pode provocar a perda de informação e a não convergência das soluções [Barreiro, 2009]. O passo de tempo utilizado em todas as simulações deste estudo foi de 0,001 s, para o modelo em escala de laboratório, e 0,01 s, para o modelo em escala real, sendo um valor adequado para independência de discretização temporal dos resultados [Ramalhais, 2009; Gomes, 2010; 2014]. O tempo computacional médio foi de 3 h, para a simulação de um tempo de escoamento de  $13T$  (onde  $T$  é o período de onda), em um computador com processador Intel™Xeon® de 3,4 GHz, com 6 núcleos de processamento e 32 GB de memória de trabalho.

#### 4.4 Verificação e Validação do Modelo

Semelhante ao que ocorre com modelos físicos, que em geral são uma representação em escala de um protótipo, os modelos computacionais, muitas vezes, são construídos em escala reduzida, também chamada de escala de laboratório.

Esse é um recurso bastante usado para pesquisa e desenvolvimento de projetos de engenharia, pois os modelos físicos de laboratório fornecem dados que são essenciais para validação de estudos por métodos computacionais. Por outro lado, as equações do modelo matemático, em sua forma analítica, proporcionam a verificação de modelos computacionais em relação à base teórica do estudo.

O modelo numérico empregado no presente trabalho foi desenvolvido por Seibt, 2014, sendo assim, os procedimentos de verificação e validação do modelo apresentados a seguir, reproduzem o conteúdo do referido trabalho.

#### 4.4.1 Verificação do Modelo

No processo de verificação do modelo, a simulação numérica foi realizada sem a presença da placa no domínio do canal e empregando uma onda com altura  $\varepsilon = 0,06$  m, período  $T = 1,50$  s e profundidade  $d = 0,60$  m. Uma vez que esta se enquadra na teoria de Stokes de 2ª ordem é possível utilizar a Equação 4.6 para comparar os resultados numéricos obtidos pela simulação com os analíticos resultantes da série temporal.

Na Figura 4.17 são apresentados os resultados numéricos obtidos em  $x = 5,00$  m juntamente com os resultados da série temporal com ajuste de fase para que se possa avaliar a concordância entre os dois perfis. Os dados apresentados correspondem a um intervalo de tempo no qual a onda encontra-se estabilizada, ou seja, são omitidos os instantes iniciais, quando existe a influência de efeitos de inércia no processo de formação da onda; e os instantes finais, quando a onda passa a sofrer os efeitos de sua propagação refletida no fim do canal. A diferença média entre os dois perfis foi de 2,50 % no intervalo de sete períodos de onda, verificando o modelo computacional adotado.

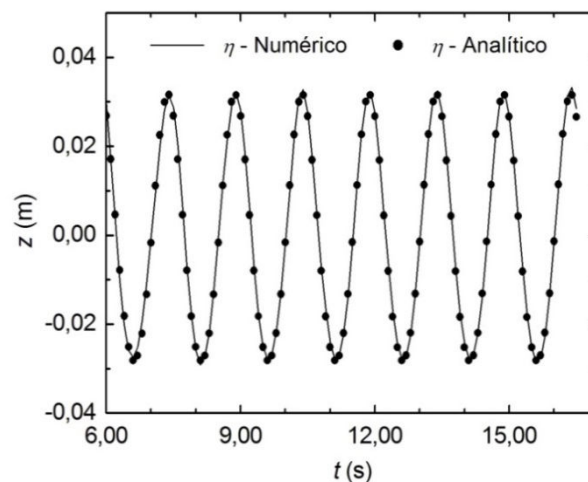


Figura 4.17 – Comparação entre os perfis de elevação da onda analítico e numérico

[Fonte: Seibt, 2014].

Outra forma de verificar o modelo numérico é através da comparação dos perfis de velocidade sob a superfície livre, assim obtém-se uma investigação completa do comportamento hidrodinâmico do modelo. Para isso são comparados os perfis de velocidade numérico e analítico em quatro diferentes instantes de tempo da propagação da onda: i)  $t = T$ , para velocidades sob a crista ( $\eta = d + \varepsilon/2$ ); ii)  $t = T/4$ , para velocidades de zero descendente ( $\eta = d$ ); iii)  $t = T/2$ , para velocidades sob a cava ( $\eta = d - \varepsilon/2$ ); iv)  $t = 3T/4$ , para velocidades de zero ascendente ( $\eta = d$ ). Estes perfis são dados nas direções horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) pelas Equações 4.7 e 4.8.

As Figuras 4.18a e 4.18b mostram os perfis de velocidades, numérico e analítico, de  $u$  e  $w$ , respectivamente, em função da profundidade da água, para os quatro instantes de tempo mencionados.

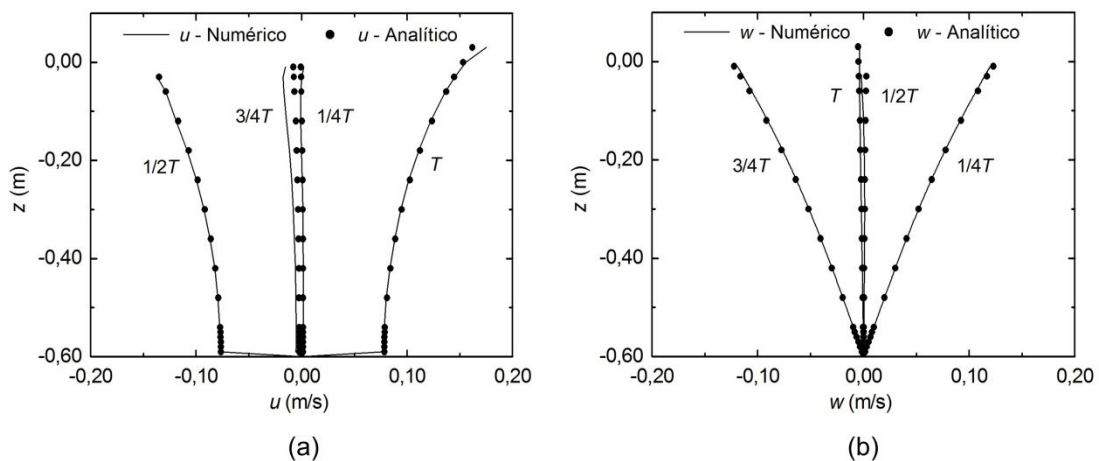


Figura 4.18 – Comparação entre os perfis de velocidades analítico e numérico para  $u$  e  $w$  sob a superfície da onda [Fonte: Seibt, 2014].

Percebe-se uma boa concordância dos resultados, especialmente para os instantes de tempo  $t = T$  e  $T/2$  (crista e cava), onde as diferenças encontradas para perfis de velocidade na direção  $x$  foram menores do que 1,00 % (Figura 4.18a). A única exceção observada foi para o perfil de velocidade na direção  $x$  em  $t = 3T/4$  (Figura 4.18a), onde o resultado numérico superestima a magnitude da velocidade. No entanto, neste instante de tempo específico, a magnitude da velocidade é quase nula e, certamente, as diferenças encontradas entre as soluções numérica e analítica não afetam significativamente o comportamento global do escoamento.

Sendo assim, é possível considerar que a verificação do modelo numérico foi bem sucedida para a simulação da propagação da onda no canal. Outra observação importante, diz respeito às diferenças de velocidade percebidas próximo ao fundo (Figura 4.18a), pois estas demonstram a imposição da condição de contorno de não deslizamento aplicada na parte inferior do canal em que a velocidade para  $z = -0,60$  m deve ser nula.

#### 4.4.2 Validação do Modelo

Para realizar a validação do modelo numérico foi simulado um caso com as mesmas características geométricas de um dos modelos de laboratório apresentados no trabalho de Orer e Ozdamar, 2007, que desenvolveram um estudo experimental sobre a eficiência do conversor tipo PHS. Neste estudo, os autores abordaram diversos arranjos geométricos da PHS sujeita a uma ampla faixa de períodos e alturas de onda.

Dentre os casos investigados por Orer e Ozdamar, 2007, foi escolhido o modelo cuja altura relativa da placa ( $X$ ) era  $X = 86,7\%$ , submetido a duas ondas de períodos diferentes  $T = 1,50$  s e  $T = 1,87$  s e mesma altura  $\varepsilon = 0,06$  m. O canal de ondas reproduzido possuía 40,00 m de comprimento e 1,00 m de altura, com a placa centralizada no canal e profundidade da água  $d = 0,60$  m. Os resultados observados nos experimentos e utilizados para comparação foram as medidas da velocidade máxima do escoamento abaixo da PHS em sentido contrário ao de propagação da onda ( $-x$ ) em um ponto situado à metade da distância entre a PHS e o fundo do canal. Os resultados dos experimentos nesse estudo foram obtidos com incerteza de  $\pm 2,00\%$  [Orer e Ozdamar, 2007].

A Tabela 4.3 apresenta a comparação entre os resultados de velocidade máxima do escoamento abaixo da placa na direção  $-x$  obtidos nos modelos numérico e experimental.

Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade  $u$  (m/s)

[Fonte: Seibt, 2014].

Caso	$T$ (s)	$\varepsilon$ (m)	$u$ ( $\times 10^2$ m/s) <sup>[a]</sup>	$u$ ( $\times 10^2$ m/s) <sup>[b]</sup>	Erro Relativo (%)
1	1,50	0,06	- 9,44	- 8,34	- 11,67
2	1,87	0,06	- 11,39	- 12,72	11,74

[a] Orer e Ozdamar, 2007.

[b] Seibt, 2014.

Na Tabela 4.3, é possível observar que no caso de  $T = 1,50$  s, o modelo numérico apresentou uma magnitude de velocidade 11,67 % menor que o experimento, enquanto no caso de  $T = 1,87$  s a magnitude da velocidade foi superestimada na mesma ordem de magnitude, em 11,74 %.

Uma possível explicação para as diferenças encontradas pode estar relacionada às dificuldades de reproduzir o experimento exatamente como descrito no artigo, haja vista que as ondas simuladas numericamente são geradas a partir das equações de Stokes de 2ª ordem e cujas características são, portanto, previamente determinadas para serem inseridas no modelo. Por sua vez, os resultados experimentais descrevem as ondas a partir de características ajustadas no gerador de ondas ( $T$  e  $\varepsilon$ ) e apresentam o comprimento de onda ( $\lambda$ ) como uma medida efetuada durante o experimento, entretanto com valores discordantes dos previstos pela teoria de ondas (tanto linear, quanto Stokes de 2ª ou 3ª ordem).

Contudo, a magnitude das velocidades numérica e experimental apresentou uma concordância razoável e, também, o procedimento de verificação da geração de ondas demonstrou a concordância do modelo com a teoria de ondas adotada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo do dispositivo de PHS contempla quatro avaliações distintas acerca da sua eficiência teórica como WEC. Cada uma destas avaliações consistiu de um conjunto de simulações numéricas realizadas com o modelo computacional descrito anteriormente.

A primeira avaliação (Seção 5.1) consiste em um ensaio paramétrico onde as mudanças na geometria do dispositivo de PHS foram realizadas com a definição prévia dos valores de alguns parâmetros sem o uso do método DC. Já as demais avaliações (Seções 5.2 a 5.4) apresentam análises da geometria do conversor tipo PHS onde se fez uso do método DC. Nas Seções 5.2 e 5.3 utilizou-se a 1ª Formulação DC aplicada primeiramente ao modelo em escala de laboratório e, em seguida, ao modelo em escala real, conforme descrito na Subseção 4.2.1; enquanto na Seção 5.4 a 2ª Formulação DC, descrita na Subseção 4.2.2, foi aplicada ao modelo em escala real, onde se analisou diferentes períodos de ondas regulares incidindo na PHS.

Vale destacar que a proposta de análise da eficiência teórica do conversor, diz respeito a razão entre potência média disponível no escoamento abaixo da PHS e a potência média da onda incidente, ou seja, não estão sendo consideradas perdas de carga representativas de uma turbina hidráulica. Dessa forma, os resultados apresentados fornecem uma quantificação do desempenho baseado somente no princípio de funcionamento do conversor.

A fim de permitir a generalização dos resultados e o estabelecimento de comparativos entre as diferentes geometrias avaliadas no presente estudo, foram adotados dois parâmetros geométricos para apresentação dos resultados: a altura relativa da PHS ( $X$ ), dada pela razão entre a altura da PHS ( $h$ ) e a profundidade da água ( $d$ ); e o comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ), dado pela razão entre o comprimento da PHS ( $L$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), referente a onda incidente considerada.

### 5.1 Ensaio Paramétrico: Efeito do Comprimento e da Altura Relativa com Modelo em Escala de Laboratório

Nesta seção é apresentada uma avaliação paramétrica 2D da geometria da PHS, com o mesmo modelo computacional utilizado por Seibt et al., 2014a, e Gomes, M. et al., 2015, a fim de avaliar a influência da variação do comprimento ( $L$ ) e da altura relativa ( $X$ ) da PHS,

concomitantemente, em relação à eficiência teórica do dispositivo e ao comportamento do escoamento sob a PHS.

Este ensaio paramétrico, portanto, não emprega o método DC, mas visa obter uma compreensão prévia do comportamento dos parâmetros de interesse do escoamento, tendo em vista que as Formulações DC propostas produzem uma variação da geometria da PHS de forma semelhante, i.e., modificam conjuntamente a altura ( $h$ ) e o comprimento ( $L$ ) da PHS.

### 5.1.1 Parâmetros Considerados

Com base na representação do modelo do canal de ondas, apresentada na Figura 4.12 (Subseção 4.3.3), nesta análise considerou-se um domínio com as seguintes dimensões: altura do canal  $H_C = 1,00$  m, profundidade da água  $d = 0,60$  m e espessura da PHS  $e = 0,02$  m. A onda regular, incidente no dispositivo, teve características fixadas como: período de onda  $T = 3,00$  s, comprimento de onda  $\lambda = 6,95$  m e altura de onda  $\varepsilon = 0,06$  m.

Foram avaliados quatro comprimentos da PHS ( $L$ ) diferentes, definidos com base em frações do comprimento de onda ( $\lambda$ ) incidente simulada, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comprimentos da PHS e do canal simulados ( $\lambda = 6,95$  m).

Placa	$L$ (m)	$(L/\lambda)$	$L_C$ (m)
1	7,00	1,00	48,70
2	5,20	0,75	46,90
3	3,50	0,50	45,20
4	1,70	0,25	43,40

Cada um dos diferentes comprimentos da PHS selecionados foi avaliado em três diferentes alturas relativas ( $X$ ) da PHS, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Alturas relativas da PHS simuladas ( $d = 0,60$  m).

Posição	$h$ (m)	$X$ (%)
1	0,53	88,33
2	0,50	83,33
3	0,46	76,67



Cabe destacar que o comprimento do canal ( $L_C$ ), uma vez vinculado às dimensões da onda e da PHS, também teve dimensões diferentes para cada caso simulado, como mostrado na Tabela 5.1. Além disso, uma vez que o modelo é 2D, as larguras do canal e da PHS são consideradas unitárias. Foram simulados, portanto, 12 casos para a realização desta análise, combinando os 4 diferentes comprimentos ( $L$ ) e as 3 alturas relativas ( $X$ ) da PHS.

### 5.1.2 Análise dos Resultados

O primeiro parâmetro analisado nas simulações foi a velocidade axial máxima  $|-u_{máx}|$  do escoamento sob a PHS (obtida no ponto  $p6$ , conforme Figura 4.4; Subseção 4.1.4), cujo comportamento é apresentado na Figura 5.1.

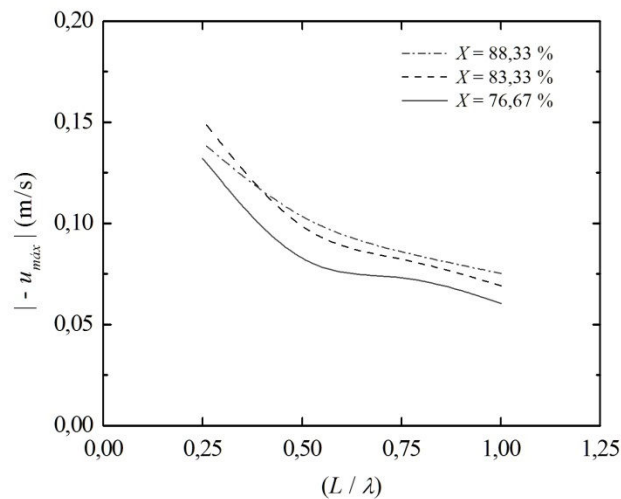


Figura 5.1 – Velocidade  $|-u_{máx}|$  em  $p6$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

Na Figura 5.1, pode-se observar um incremento significativo na magnitude das velocidades do escoamento sob a PHS, em torno de duas vezes, para o menor comprimento da PHS ( $L/\lambda = 0,25$ ) em relação aos demais comprimentos simulados. É possível perceber, também, que para os maiores comprimentos da PHS ( $L/\lambda \geq 0,50$ ) as maiores velocidades ocorrem quando a placa está mais próxima à superfície da água ( $X = 88,33\%$ ), o que não ocorre para o menor comprimento da PHS simulado ( $L/\lambda = 0,25$ ) quando a maior velocidade ocorre para  $X = 83,33\%$ . Essa informação é importante do ponto de vista de conversão de energia, pois fornece um indicativo da velocidade de rotação da turbina hidráulica.

Em sequência, com a análise da média quadrática da vazão mássica (Figura 5.2), observa-se que a mesma apresenta um comportamento análogo ao da velocidade  $|u_{máx}|$ , ou seja, há também um acréscimo na magnitude da vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) de, aproximadamente, duas vezes para o menor comprimento da PHS simulado ( $L/\lambda = 0,25$ ) em relação aos maiores comprimentos ( $L/\lambda \geq 0,50$ ). Na Figura 5.2 percebe-se, também, que os maiores valores da vazão  $\dot{m}_{RMS}$  ocorrem para a maior altura relativa simulada ( $X = 88,33\%$ ).

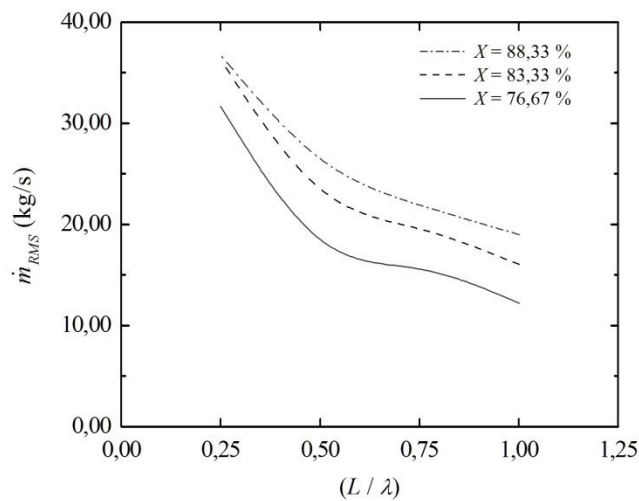


Figura 5.2 – Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em  $l$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

Por fim, na Figura 5.3 tem-se o comportamento da eficiência teórica da PHS  $\varphi$ , para cada altura relativa  $X$  simulada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ) da PHS.

Percebe-se, neste gráfico (Figura 5.3), um claro crescimento na eficiência teórica  $\varphi$  do dispositivo, aproximadamente 2 vezes maior, com a redução do comprimento da PHS, se comparados o maior e o menor comprimento simulados. Outra observação importante é o aumento da eficiência  $\varphi$  para a maior altura relativa estudada ( $X = 88,33\%$ ), evidenciando a relevância deste parâmetro.

A observação de todos esses parâmetros permite confirmar que a maior altura relativa  $X$  da PHS resulta em uma maior eficiência  $\varphi$  do conversor tipo PHS quando não há restrição ao escoamento sob a PHS, comportamento que era esperado com base em Seibt et al., 2014a. Entretanto, percebe-se também a importância do comprimento da PHS, visto que os maiores comprimentos ( $L/\lambda \geq 0,50$ ) avaliados apresentaram menor ganho de eficiência  $\varphi$  com a variação da altura relativa  $X$ , quando comparados com o menor comprimento avaliado

( $L/\lambda = 0,25$ ), o que não havia sido observado nos casos analisados em Gomes, M. et al., 2015. Por sua vez, a redução da altura relativa  $X$  da PHS acarretou em uma redução nos valores da eficiência teórica  $\varphi$  para todos os casos desta análise.

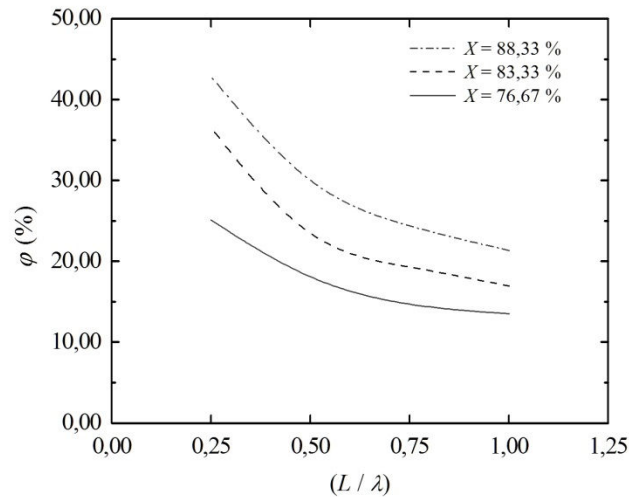


Figura 5.3 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para cada altura relativa ( $X$ ) estudada, em relação ao comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

## 5.2 Design Construtal 1ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $h$ para $\phi_A = 0,05$ com Modelo em Escala de Laboratório

Nesta seção é apresentado o primeiro estudo aplicando Design Construtal ao dispositivo conversor tipo PHS em escala de laboratório. Nesta análise utilizou-se a 1ª Formulação DC, apresentada na Subseção 4.2.1, a fim de otimizar o GDL  $h$  para uma razão de área  $\phi_A = 0,05$ .

### 5.2.1 Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas

Com base na representação geométrica do modelo, apresentada na Subseção 4.2.1 (ver Figura 4.5), este primeiro estudo considerou a incidência de uma onda regular com as seguintes características:  $T = 3,00$  s,  $\lambda = 6,95$  m,  $d = 0,60$  m e  $\varepsilon = 0,06$  m.

Com isso, foram realizadas 43 simulações, cujas dimensões tiveram seus valores definidos conforme a Tabela 5.3. Vale destacar que, nesta análise, a faixa de valores do

GDL  $h$  foi percorrida em intervalos de 0,01 m, dentro dos limites estabelecidos pelas restrições (Equações 4.24 a 4.26).

Tabela 5.3 – Lista de casos simulados na otimização do GDL  $h$  para  $\phi_A = 0,05$  ( $A_T = 1,00 \text{ m}^2$ ).

Caso	$h$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$e$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
1	0,12	0,126	7,917	0,006	0,05	20,00	1,139
2	0,13	0,137	7,308	0,007	0,05	21,67	1,051
3	0,14	0,147	6,786	0,007	0,05	23,33	0,976
4	0,15	0,158	6,333	0,008	0,05	25,00	0,911
5	0,16	0,168	5,938	0,008	0,05	26,67	0,854
6	0,17	0,179	5,588	0,009	0,05	28,33	0,804
7	0,18	0,190	5,278	0,010	0,05	30,00	0,759
8	0,19	0,200	5,000	0,010	0,05	31,67	0,719
9	0,20	0,211	4,750	0,011	0,05	33,33	0,683
10	0,21	0,221	4,524	0,011	0,05	35,00	0,651
11	0,22	0,232	4,318	0,012	0,05	36,67	0,621
12	0,23	0,242	4,130	0,012	0,05	38,33	0,594
13	0,24	0,253	3,958	0,017	0,05	40,00	0,569
14	0,25	0,263	3,800	0,013	0,05	41,67	0,547
15	0,26	0,274	3,654	0,014	0,05	43,33	0,526
16	0,27	0,284	3,519	0,014	0,05	45,00	0,506
17	0,28	0,295	3,393	0,015	0,05	46,67	0,488
18	0,29	0,305	3,276	0,015	0,05	48,33	0,471
19	0,30	0,316	3,167	0,016	0,05	50,00	0,456
20	0,31	0,326	3,065	0,016	0,05	51,67	0,441
21	0,32	0,337	2,969	0,017	0,05	53,33	0,427
22	0,33	0,347	2,879	0,017	0,05	55,00	0,414
23	0,34	0,358	2,794	0,018	0,05	56,67	0,402
24	0,35	0,368	2,714	0,018	0,05	58,33	0,390
25	0,36	0,379	2,639	0,019	0,05	60,00	0,380
26	0,37	0,390	2,568	0,020	0,05	61,67	0,369
27	0,38	0,400	2,500	0,020	0,05	63,33	0,360
28	0,39	0,411	2,436	0,021	0,05	65,00	0,350
29	0,40	0,421	2,375	0,021	0,05	66,67	0,342
30	0,41	0,432	2,317	0,022	0,05	68,33	0,333
31	0,42	0,442	2,262	0,022	0,05	70,00	0,325
32	0,43	0,453	2,209	0,023	0,05	71,67	0,318
33	0,44	0,463	2,159	0,023	0,05	73,33	0,311
34	0,45	0,474	2,111	0,024	0,05	75,00	0,304
35	0,46	0,484	2,065	0,024	0,05	76,67	0,297
36	0,47	0,495	2,021	0,025	0,05	78,33	0,291
37	0,48	0,505	1,979	0,025	0,05	80,00	0,285

Tabela 5.3 – Lista de casos simulados na otimização do GDL  $h$  para  $\phi_A = 0,05$  ( $A_T = 1,00 \text{ m}^2$ , continuação).

Caso	$h$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$e$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
38	0,49	0,516	1,939	0,026	0,05	81,67	0,279
39	0,50	0,526	1,900	0,026	0,05	83,33	0,273
40	0,51	0,537	1,863	0,027	0,05	85,00	0,268
41	0,52	0,547	1,827	0,027	0,05	86,67	0,263
42	0,53	0,558	1,793	0,028	0,05	88,33	0,258
43	0,54	0,568	1,759	0,028	0,05	90,00	0,253

### 5.2.2 Análise dos Resultados

A Figura 5.4 apresenta o comportamento da velocidade axial  $|-u_{m\acute{a}x}|$  sob a PHS para todos os casos simulados, onde o GDL  $h$  avaliado está representado pela altura relativa  $X$  (Figura 5.4a); já o comprimento da PHS  $L$ , que varia juntamente com  $h$ , está representado pelo comprimento relativo  $(L/\lambda)$  (Figura 5.4b).

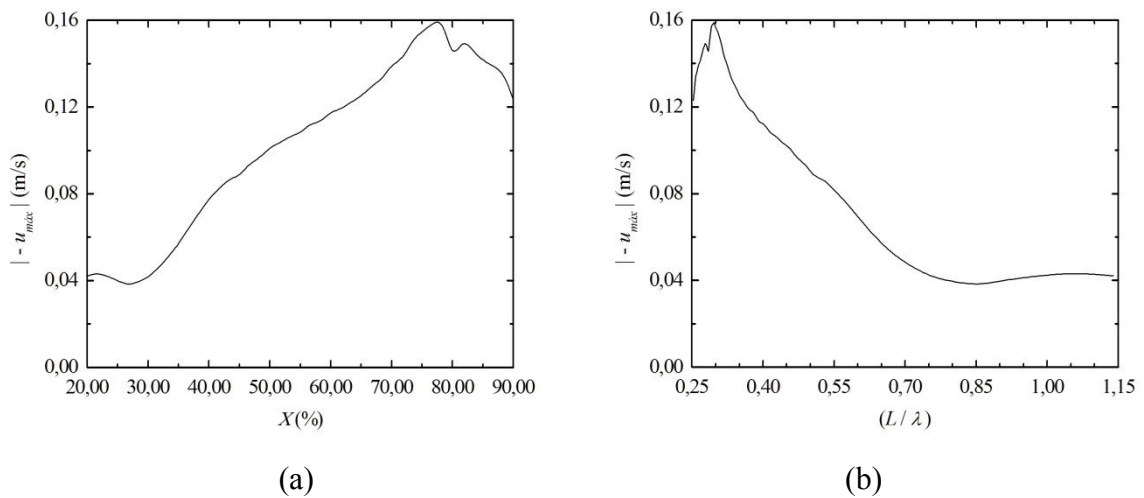


Figura 5.4 – Velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  em  $p6$  para os casos com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relaao a  $X$ ; (b) em relaao a  $(L/\lambda)$ .

Na Figura 5.4a é possível observar a tendência de crescimento da velocidade do escoamento abaixo da PHS, conforme a PHS fica mais próxima à superfície da água. Esse comportamento é observado a partir de  $X = 26,67 \%$  até  $X = 76,67 \%$ , respectivamente, mínimo global e máximo global do parâmetro  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . Já entre  $X = 76,67 \%$  e  $X = 90,00 \%$  é possível observar um mínimo local, que ocorre em  $X = 80,00 \%$ .

Ao observar a Figura 5.4b os máximos e mínimos ocorrem nas mesmas regiões, apenas com espelhamento da curva, de forma que, em relação à  $(L/\lambda)$ , a tendência geral se inverte e a velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  passa a diminuir à medida que o comprimento da PHS aumenta. Essa tendência geral é a mesma observada anteriormente na Figura 5.1.

Comparando-se as Figuras 5.1 e 5.4b, é possível observar, também, a ocorrência de uma região de transição na tendência geral das curvas, correspondente ao intervalo de configuração  $0,25 < (L/\lambda) < 0,50$  (ou  $70,00 \% < X < 90,00 \%$ , na Figura 5.4a) em ambos os gráficos. Em outras palavras, assim como na Figura 5.1 a maior altura relativa analisada ( $X = 88,33 \%$ ) apresentou uma velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  menor do que a altura relativa  $X = 83,33 \%$ , quando seu comprimento relativo foi  $(L/\lambda) < 0,50$ , percebe-se essa transição na Figura 5.4b, onde a curva passa a ser descendente na região após o máximo global.

A Figura 5.5 apresenta o comportamento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS, onde observa-se a tendência de aumento da vazão conforme a PHS se aproxima da superfície.

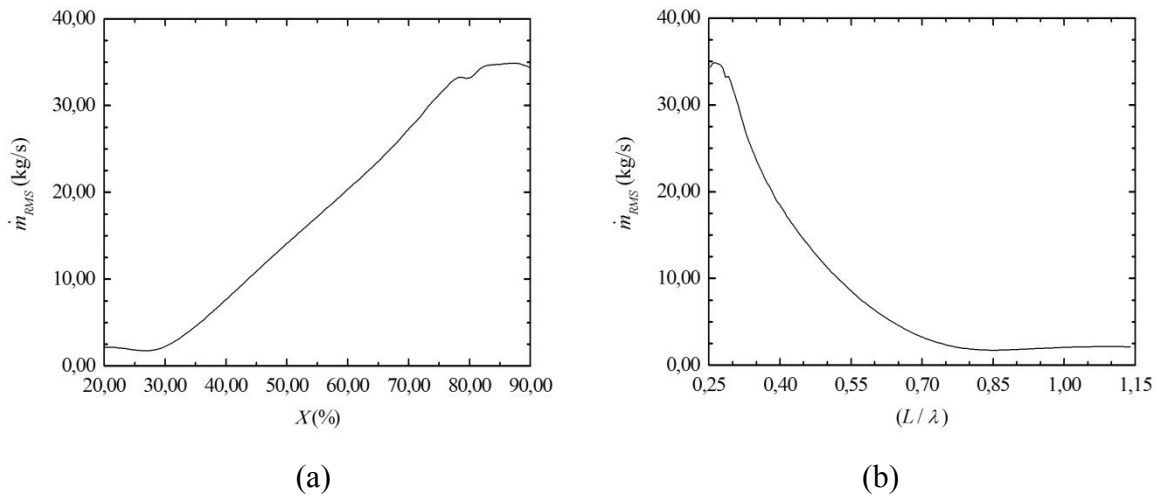


Figura 5.5 – Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em  $l$  para os casos com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à  $X$ ; (b) em relação à  $(L/\lambda)$ .

Essa tendência, observada na Figura 5.5a, era esperada à medida que, conforme o GDL  $h$  aumenta, a área sob a PHS aumenta, possibilitando a passagem de maior quantidade de fluido. Nesta curva percebe-se a ocorrência de um máximo global em  $X = 86,67 \%$  e um mínimo global em  $X = 26,67 \%$ . Semelhante ao observado na Figura 5.4, ocorre um mínimo local dentro do intervalo de  $70,00 \% < X < 90,00 \%$ , também na altura relativa  $X = 80,00 \%$ .

Novamente é possível comparar a tendência geral da vazão  $\dot{m}_{RMS}$ , observada na Figura 5.5b, com o comportamento observado na Figura 5.2, ou seja, o decréscimo da vazão mássica com o aumento do comprimento da PHS.

Na Figura 5.6 são apresentados os resultados da eficiência teórica  $\varphi$  em relação à variação do GDL  $h$ . Semelhante ao observado nas Figuras 5.4 e 5.5, a eficiência  $\varphi$  do dispositivo também apresenta uma tendência geral de aumento conforme a PHS fica mais próxima à superfície.

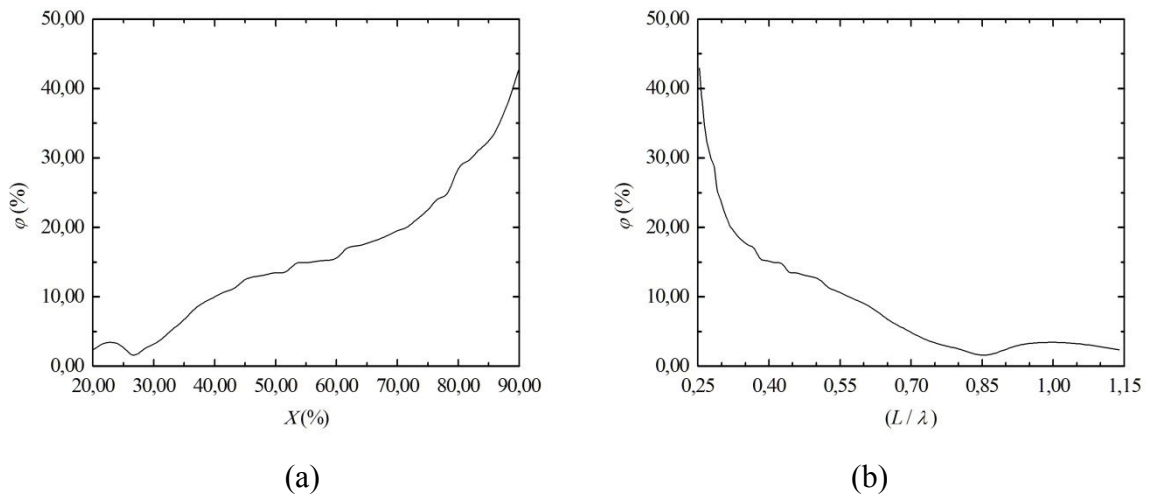


Figura 5.6 – Eficiência teórica  $\varphi$  para os casos com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à  $X$ ; (b) em relação à  $(L/\lambda)$ .

Entretanto, na Figura 5.6, o máximo global é observado no limite da faixa de valores do GDL  $h$  considerada, em  $X = 90,00\%$ . Já o valor mínimo global ocorre em  $X = 26,67\%$ , como esperado, considerando os mínimos globais encontrados nas Figuras 5.4 e 5.5.

### 5.3 Design Construtal 1ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $h$ para $\phi_A = 0,05$ e Análise de Similaridade com Modelo em Escala Real

Nesta seção é apresentado o primeiro estudo aplicando Design Construtal ao dispositivo conversor tipo PHS em escala real. Assim como na Seção 5.2, esta análise utilizou a 1ª Formulação DC, apresentada na Subseção 4.2.1, buscando a otimização do GDL  $h$  para uma razão de área  $\phi_A = 0,05$ . Para tanto, adotou-se uma escala 1:16 em relação as geometrias avaliadas na Seção 5.2.

### 5.3.1 Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas

O modelo em escala real foi construído segundo uma escala 1:16, a partir do modelo em escala de laboratório (ver Subseção 4.2.1 e Seção 5.2), portanto, com fator de escala  $N_B = 16,00$ . Porém, a fim de atender ao critério de similaridade de Froude, tanto a geometria do modelo, quanto as características da onda incidente, devem ser ajustadas de acordo com a relação dada pela Equação 4.14 (Subseção 4.1.2).

Sendo assim, a mudança de escala das características da onda requer o fator de escala de tempo correspondente, para a correta mudança do período da onda; neste caso, portanto,  $N_T = 4,00$ . Dessa foram, assim como na Seção 5.2, diversas configurações geométricas da PHS foram submetidas à incidência de uma onda regular de 2ª ordem, cujas características são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Características da onda incidente em cada escala.

Característica	Escala de laboratório	Escala real
$T$ (s)	3,00	12,00
$\varepsilon$ (m)	0,06	0,96
$\lambda$ (m)	6,95	111,23
$d$ (m)	0,60	9,60

Considerando a razão de área  $\phi_A = 0,05$  e todas as constantes e restrições, apresentados anteriormente, 43 casos foram realizados. A Tabela 5.5 apresenta uma relação parcial dos valores do GDL  $h$  analisados. A relação completa das geometrias em escala real encontra-se disponível no Apêndice D – Design Construtal: Rol de Geometrias Analisadas.

Tabela 5.5 – Relação parcial das geometrias analisadas em cada escala com  $\phi_A = 0,05$ .

Caso	Escala de laboratório	Escala real	$X$ (%)	Caso	Escala de laboratório	Escala real	$X$ (%)
	$h$ (m)	$h$ (m)			$h$ (m)	$h$ (m)	
1	0,12	1,92	20,00	⋮	⋮	⋮	⋮
2	0,13	2,08	21,67	40	0,51	8,16	85,00
3	0,14	2,24	23,33	41	0,52	8,32	86,67
4	0,15	2,40	25,00	42	0,53	8,48	88,33
⋮	⋮	⋮	⋮	43	0,54	8,64	90,00



Cabe destacar que os valores do GDL  $h$ , na coluna identificada como “Escala de laboratório” (Tabela 5.5), são os mesmos apresentados na Tabela 5.3 (ver Seção 5.2). Assim, o conjunto completo de configurações geométricas simuladas pode ser visto na Figura 5.7.

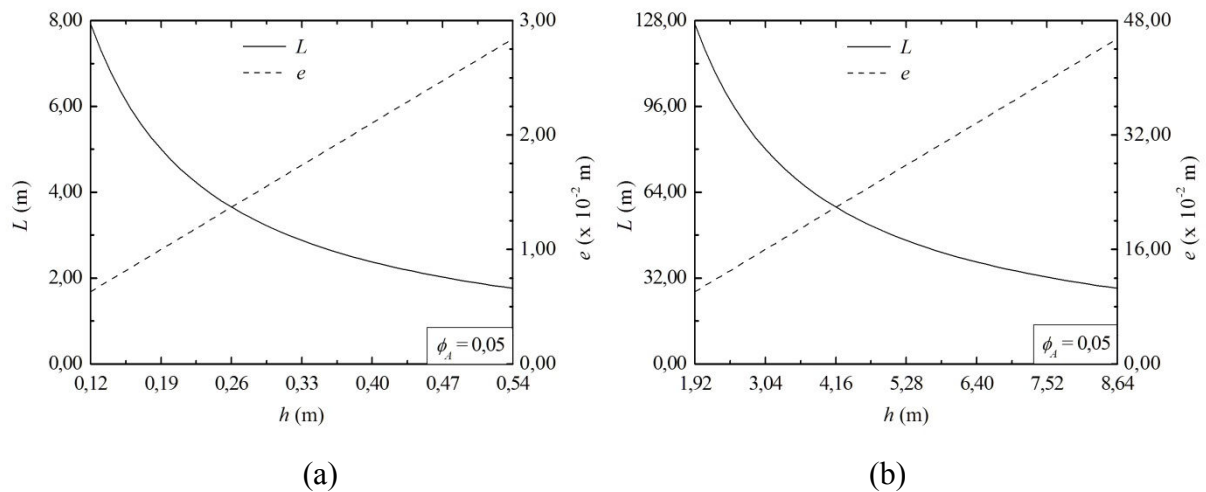


Figura 5.7 – Geometrias analisadas: (a) escala de laboratório; (b) escala real.

A Figura 5.7 possibilita observar como cada uma das dimensões da PHS varia de acordo com o GDL  $h$  em cada escala. Deve-se notar que os valores do eixo vertical direito foram ajustados para permitir a visualização das curvas no mesmo quadro.

Outra forma de visualizar a gama de geometrias simuladas é através de parâmetros geométricos não dimensionais, como apresentado na Figura 5.8.

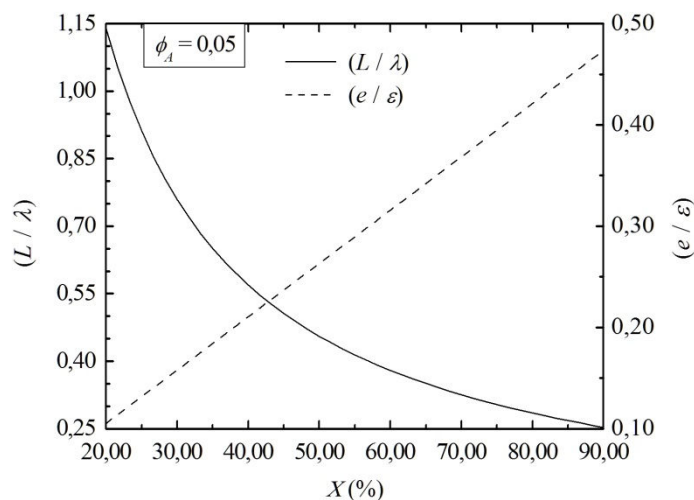


Figura 5.8 – Variação dos parâmetros geométricos não dimensionais para ambas as escalas.

A definição destes parâmetros geométricos não dimensionais, como visto na Figura 5.8, resulta da associação das dimensões da PHS com as características da onda incidente. O GDL  $h$  foi previamente associado à profundidade da água  $d$ , sendo a altura relativa da PHS  $X$ ; assim como o comprimento da PHS  $L$  foi associado ao comprimento de onda  $\lambda$ , sendo o comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ). De forma semelhante, outro parâmetro não dimensional é apresentado nesta figura, associando a espessura da PHS  $e$  e a altura de onda  $\varepsilon$ , sendo este a espessura relativa da PHS ( $e/\varepsilon$ ).

Este recurso contribui para a análise dos resultados, podendo facilitar a percepção sobre as tendências dos resultados, uma vez que as características das ondas foram mantidas fixas e as geometrias simuladas foram variadas, tanto na escala de laboratório quanto na escala real, de acordo com os mesmos parâmetros não dimensionais.

### 5.3.2 Análise dos Resultados

A Figura 5.9 mostra os resultados da magnitude da velocidade axial máxima  $|u_{máx}|$  sob a PHS para ambas as escalas, obtidos a partir dos dados coletados no ponto  $p6$  (ver Figura 4.4). Deve-se notar que o GDL  $h$  (apresentado como  $X$ ) e o comprimento relativo ( $L/\lambda$ ) variam inversamente (conforme Figura 5.8).

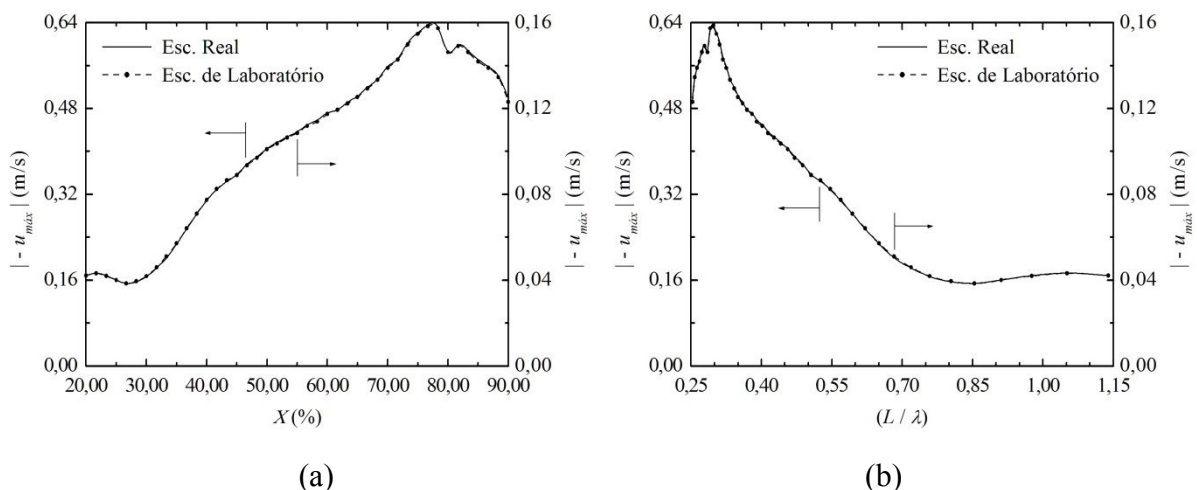


Figura 5.9 – Velocidade  $|u_{máx}|$  em  $p6$ , para ambas as escalas, com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à  $X$ ; (b) em relação à  $(L/\lambda)$ .

Na Figura 5.9a, pode-se observar uma tendência de crescimento da magnitude da velocidade axial sob a PHS à medida que a PHS fica mais próxima da superfície da água. Esta tendência é observada a partir de  $X = 26,67\%$  ( $L/\lambda = 0,854$ ) até  $X = 76,67\%$  ( $L/\lambda = 0,297$ ), respectivamente, o mínimo global e o máximo global da velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$ . Além disso, entre  $X = 76,67\%$  ( $L/\lambda = 0,297$ ) até  $X = 90,00\%$  ( $L/\lambda = 0,253$ ) esta tendência de crescimento sofreu alterações e é possível observar um mínimo local em  $X = 80,00\%$  ( $L/\lambda = 0,285$ ) ao lado de um máximo local em  $X = 81,67\%$  ( $L/\lambda = 0,279$ ). Também pode ser visto a ocorrência de um máximo local em  $X = 21,67\%$  ( $L/\lambda = 1,051$ ).

Como esperado, a Figura 5.9b mostra uma tendência inversa, uma vez que, à medida que o GDL  $h$  ( $X$ ) aumenta, o comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ) diminui. Assim, é possível observar que as menores magnitudes da velocidade axial  $|u_{m\acute{a}x}|$  ocorrem para os maiores comprimentos relativos da PHS ( $0,719 \leq (L/\lambda) \leq 1,139$ ). O aumento observado na velocidade axial  $|u_{m\acute{a}x}|$  a partir do mínimo global até o máximo global foi de cerca de 4 vezes. Nesse sentido, percebe-se uma tendência de que placas mais altas (próximas à superfície; altura relativa  $X > 40,00\%$ ) e mais curtas (comprimento relativo  $(L/\lambda) < 0,55$ ), proporcionem velocidades axiais mais elevadas para o escoamento.

Além disso, as velocidades axiais  $|u_{m\acute{a}x}|$  estão em estrita semelhança, uma vez que os resultados da escala real são 4 vezes maiores que os da escala de laboratório. O que está de acordo com o fator de escala empregado, uma vez que  $N_V = N_B/N_t$  (ver Subseção 4.1.2). Da mesma forma, os máximos e os mínimos, globais e locais, ocorreram nas mesmas geometrias tanto para o modelo em escala de laboratório como para a escala real.

A Figura 5.10 apresenta os resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS para ambas as escalas, a partir dos dados monitorados na linha  $l$  (ver Figura 4.4). Deve-se notar que os valores do eixo vertical à esquerda foram ajustados para permitir a visualização das curvas no mesmo quadro.

Na Figura 5.10a, pode ser observada uma tendência de crescimento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS quando a placa é aproximada da superfície da água. Este comportamento era esperado quando  $X$  aumenta, uma vez que a altura sob a PHS (ou área de seção transversal; considerando-se a largura unitária) aumenta, permitindo que mais fluido escoe sob a PHS. Este aumento é observado desde o mínimo global, em  $X = 26,67\%$  ( $L/\lambda = 0,854$ ), até o máximo global, em  $X = 86,67\%$  ( $L/\lambda = 0,263$ ). Também pode ser observada a ocorrência de dois máximos locais: em  $X = 21,67\%$  ( $L/\lambda = 1,051$ ) e em  $X = 78,33\%$  ( $L/\lambda = 0,291$ ); e um mínimo local em  $X = 80,00\%$  ( $L/\lambda = 0,285$ ).

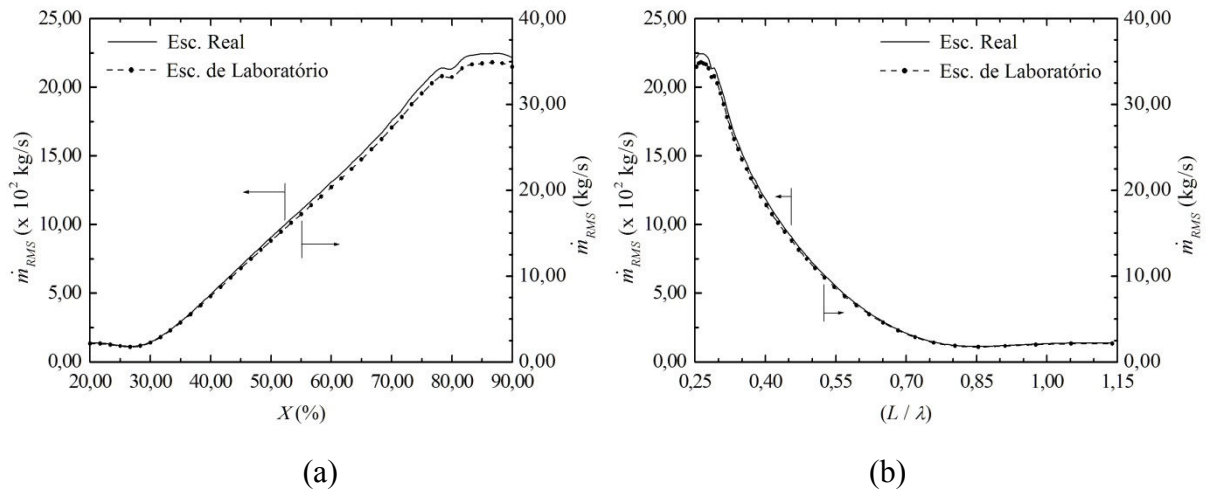


Figura 5.10 – Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) em  $l$ , para ambas as escalas, com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à  $X$ ; (b) em relação à  $(L/\lambda)$ .

Por outro lado, na Figura 5.10b é possível observar uma tendência de decréscimo para vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  com o aumento do comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ). Assim como ocorreu na Figura 5.9b, para a velocidade axial  $|-u_{máx}|$ , os menores valores de  $\dot{m}_{RMS}$  foram encontrados para placas mais longas ( $0,719 \leq (L/\lambda) \leq 1,139$ ). O aumento observado na vazão  $\dot{m}_{RMS}$ , a partir do mínimo global até o máximo global, foi de cerca de 20 vezes, tanto para os resultados na escala de laboratório quanto para os resultados da escala real.

Além disso, os resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  da escala real apresentam semelhança com os resultados da escala de laboratório. Embora não tenha sido estabelecido um fator de escala específico para essa grandeza, os resultados em escala real são cerca de 60 vezes maiores que os obtidos em escala de laboratório. Novamente, os valores máximos e os mínimos, globais e locais, ocorreram nas mesmas geometrias em ambas as escalas.

As curvas dos resultados da eficiência teórica da PHS são mostradas na Figura 5.11. Analogamente ao que foi observado nas Figuras 5.9a e 5.10a, a eficiência da PHS  $\varphi$  também exhibe uma tendência ascendente quando a PHS está mais próxima da superfície da água, isto é, à medida que o GDL  $h$  ( $X$ ) aumenta (Figura 5.11a).

Na Figura 5.11a observa-se uma tendência de crescimento da eficiência da PHS a partir do mínimo global, que ocorre em  $X = 26,67\%$  ( $L/\lambda = 0,854$ ), até o máximo global, que ocorre no limite da faixa de valores considerada para o GDL  $h$  ( $X$ ), em  $X = 90,00\%$  ( $L/\lambda = 0,253$ ). Também pode ser vista a ocorrência de um máximo local em  $X = 23,33\%$  ( $L/\lambda = 0,976$ ), que ocorreu para uma geometria diferente daquela encontrada nas Figuras 5.9

e 5.10. Deve-se notar que a ocorrência do mínimo global em  $X = 26,67\%$  concorda com o mínimo global encontrado nas Figuras 5.9 e 5.10.

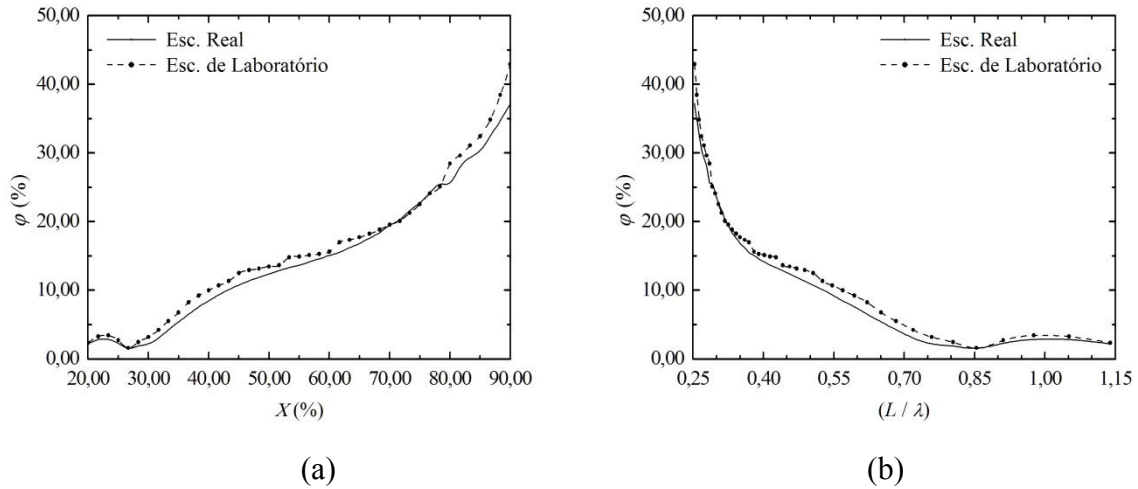


Figura 5.11 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para ambas as escalas, com  $\phi_A = 0,05$ : (a) em relação à  $X$ ; (b) em relação à  $(L/\lambda)$ .

Como esperado, a Figura 5.11b mostra que a menor eficiência da PHS  $\varphi$  é encontrada com as placas mais longas ( $0,719 \leq (L/\lambda) \leq 1,139$ ), assim como observado nas Figuras 5.9b e 5.10b. Este fato indica o efeito do comprimento da PHS em relação ao comprimento de onda  $(L/\lambda)$ , ou seja, placas mais longas que as ondas, ou em torno da razão  $(L/\lambda) = 1,00$ , são capazes de dissipar uma maior quantidade de energia das ondas, o que está de acordo com Graw, 1994.

O aumento observado na eficiência  $\varphi$ , do mínimo global ao máximo global, foi de 41,32 % para a escala de laboratório e 35,61 % para a escala real. A diferença média entre os resultados da eficiência  $\varphi$  na escala de laboratório e na escala real foi de 1,15 %, entre os casos simulados; e a maior diferença encontrada foi de 5,76 %, a qual ocorreu no valor máximo global. Apesar dessa diferença, os valores mínimos e máximos globais ocorreram para as mesmas geometrias e, com isso, os resultados apresentam semelhança entre as escalas.

A eficiência máxima da PHS foi  $\varphi_{m\acute{a}x} = 42,91\%$  na escala de laboratório e  $\varphi_{m\acute{a}x} = 37,15\%$  na escala real, ambas obtidas em  $X = 90,00\%$  ( $L/\lambda = 0,253$ ). Assim, a geometria ótima ( $o$ ) do conversor tipo PHS para o GDL  $h$  ( $X$ ), com uma razão de área  $\phi_A = 0,05$ , foi  $(X)_o = 90,00\%$ ,  $(L/\lambda)_o = 0,253$  e  $(e/\varepsilon)_o = 0,47$ , quando sujeito a uma onda incidente com as características consideradas nesta análise.

## 5.4 Design Construtal 2ª Formulação: Otimização do Grau de Liberdade $X$ com Modelo em Escala Real

Nesta seção é apresentado o segundo estudo aplicando Design Construtal ao dispositivo conversor tipo PHS em escala real. Entretanto, diferente do estudo apresentado na Seção 5.3, neste estudo uma segunda formulação (ver Subseção 4.2.2) foi utilizada. Além disso, diversos valores para a razão de área  $\phi_B$  foram analisados e as diferentes geometrias da PHS foram simuladas sob diferentes características de onda incidente.

A apresentação dos resultados, nesta seção, segue a estrutura do processo de Busca Exaustiva apresentado na Figura 4.10 (ver Subseção 4.2.2), ou seja, a partir das características da onda incidente simulada.

Entretanto, a fim de permitir uma maior compreensão tanto dos resultados apresentados, quanto de alguns aspectos comparativos apontados ao longo desta análise, estes resultados são reapresentados no Apêndice E – Design Construtal: Gráficos Complementares. No Apêndice E os resultados foram organizados de acordo com cada razão de área  $\phi_B$  avaliada, o que possibilita a observação de mudanças no comportamento do escoamento sob a PHS relacionadas às características das diferentes ondas regulares consideradas neste estudo.

### 5.4.1 Constantes, Restrições e Geometrias Analisadas

Com base na representação geométrica do modelo, apresentada na Subseção 4.2.2 (ver Figura 4.8), nesta análise, cinco diferentes valores da razão de área  $\phi_B$  foram considerados. Portanto, levando em conta as restrições aplicadas (Equações 4.47 à 4.49), o número de casos simulados com cada razão de área  $\phi_B$  é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Número de casos simulados com cada razão de área  $\phi_B$ .

$\phi_B$	Faixa do GDL $X$ (%)		Nº de casos
	inicial	final	
0,01	20,00	90,00	36
0,03	20,00	90,00	36
0,05	30,00	90,00	31
0,08	48,00	90,00	22
0,10	60,00	90,00	16

Um aspecto importante, na abordagem desta análise, é que todas as geometrias foram submetidas à incidência de diferentes ondas regulares de 2ª ordem, cujas características são apresentadas na Tabela 5.7. Outro aspecto é que, do ponto de vista dimensional, cada conjunto de geometrias, definido a partir de uma razão  $\phi_B$ , apresenta dimensões distintas de acordo com a onda incidente considerada, conforme pode ser visto na Figura 5.12.

Tabela 5.7 – Características das ondas incidentes e respectivo comprimento mínimo do canal.

Onda	$T$ (s)	$\lambda$ (m)	$\varepsilon$ (m)	$d$ (m)	$L_C (6\lambda + L)$
W1	6,00	47,85	0,96	9,60	$287,07 + L$
W2	8,00	69,79	0,96	9,60	$418,75 + L$
W3	10,00	90,77	0,96	9,60	$544,61 + L$
W4	12,00	111,23	0,96	9,60	$667,37 + L$

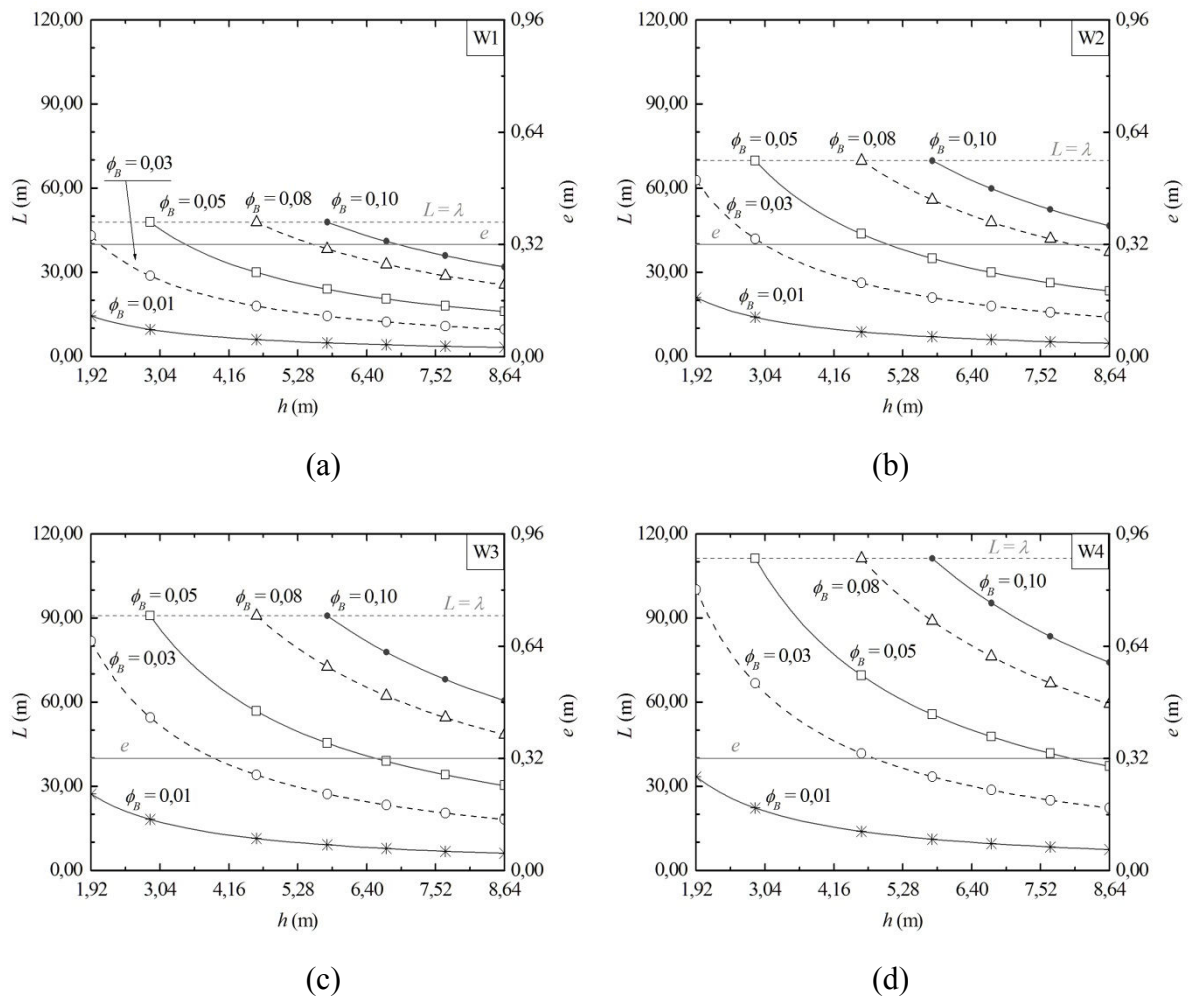


Figura 5.12 – Dimensões das geometrias analisadas para cada onda: (a) W1,  $T = 6,00$  s; (b) W2,  $T = 8,00$  s; (c) W3,  $T = 10,00$  s; (d) W4,  $T = 12,00$  s.

Sendo assim, um número muito maior de configurações geométricas da PHS foram avaliadas com esta 2ª Formulação DC, se comparada com a 1ª Formulação DC (Seções 5.2 e 5.3). Deve-se notar que, uma vez que a geometria do modelo depende das características da onda considerada, apenas o comprimento mínimo do canal ( $L_C$ ) é apresentado na Tabela 5.7, i.e., sem o acréscimo do comprimento da PHS ( $L$ ).

Já do ponto de vista não dimensional, uma vez que os parâmetros são relacionados às características da onda, cada conjunto de geometrias definido por uma razão  $\phi_B$ , compreende a simulação de uma faixa de valores destes parâmetros (altura relativa  $X$ , comprimento relativo ( $L/\lambda$ ), espessura relativa ( $e/\varepsilon$ )), que é a mesma para todas as ondas estudadas, conforme pode ser visto na Figura 5.13.

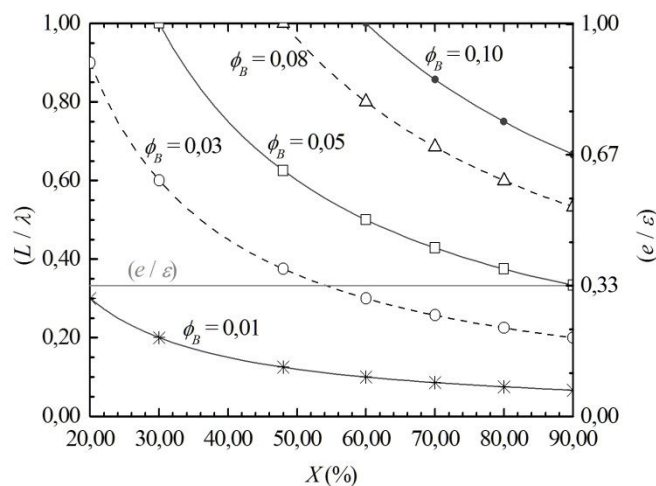


Figura 5.13 – Intervalo de parâmetros geométricos não dimensionais analisados com as ondas estudadas.

Dessa forma, a Figura 5.13 condensa, através de parâmetros geométricos não dimensionais, a gama de geometrias simuladas apresentadas na Figura 5.12, proporcionando uma percepção do espaço de geometrias analisado com a 2ª Formulação DC. As dimensões de cada geometria analisada, conforme apresentadas na Figura 5.12, encontram-se discriminadas em tabelas no Apêndice D – Design Construtal: Rol de Geometrias Analisadas.

Vale destacar que, nesta análise, a faixa de valores do GDL  $X$  foi percorrida em intervalos de 2,00 %, de acordo com os limites estabelecidos pelas restrições, portanto, os marcadores apresentados nos gráficos não representam o total de pontos em cada curva.



A partir das informações previamente apresentadas (Tabelas 5.6 e 5.7; Figuras 5.12 e 5.13), cabem algumas considerações a respeito das constantes e restrições adotadas:

- i) a profundidade da água no canal foi fixada em  $d = 9,60$  m, valor que, juntamente com as demais características das ondas simuladas, caracterizou a condição de águas intermediárias;
- ii) a altura do canal foi fixada em  $H_C = 16,00$  m, valor mantido das análises previamente apresentadas neste trabalho, e que foi relacionado à profundidade da água como  $H_C = [(5/3) \cdot d]$ , a fim de constituir uma recomendação para modelos numéricos em estudos futuros;
- iii) a espessura da PHS  $e$  foi fixada como  $e = 0,32$  m, valor definido com base em estruturas costeiras similares [Didier et al., 2017] e sob a hipótese de ser equivalente a uma fração da altura da onda incidente, ou seja, a espessura da PHS foi fixada em  $e = (\varepsilon/3)$ . Sendo assim, uma vez que as ondas utilizadas neste estudo tiveram sua altura  $\varepsilon$  mantida fixa ( $\varepsilon = 0,96$  m), a espessura relativa da PHS manteve-se constante nesta análise como  $(e/\varepsilon) = (1/3)$ ;
- iv) o GDL  $X$  teve seu valor máximo definido por uma restrição física imposta ao problema, tal que  $H < (d - \delta)$  (Equação 4.47). Portanto, sendo  $\delta = (\varepsilon/2)$  e sendo  $\varepsilon = 0,96$  m, logo  $\delta = 0,48$  m. Uma vez que  $d = 9,60$  m, logo a altura total da PHS deve ser  $H < 9,12$  m. Por sua vez  $H = (h + e)$ , sendo  $e = 0,32$  m, logo  $h < 8,80$  m, ou seja,  $X < 91,66$  %. Porém, o GDL  $X$  foi percorrido em intervalos pares de 2,00 %, logo o estudo abrange no máximo o valor de  $X = 90,00$  % ( $h = 8,64$  m);
- v) já o valor mínimo do GDL  $X$  foi definido por outra restrição física imposta ao problema, tal que  $X \geq 20,00$  % (Equação 4.48). Dessa forma, sendo  $d = 9,60$  m, logo  $h \geq 1,92$  m.

Com isso, as subseções a seguir (Subseções 5.4.2 a 5.4.5) apresentam os resultados obtidos de acordo com cada onda incidente considerada, começando pela onda de período  $T = 6,00$  s, em seguida os resultados da onda de  $T = 8,00$  s, seguindo com os da onda de  $T = 10,00$  s e, por fim, os resultados da onda de  $T = 12,00$  s. Considerando-se os diferentes valores da razão de área  $\phi_B$  ( $\phi_B = 0,01; 0,03; 0,05; 0,08; 0,10$ ) analisados, foi simulado um total de 141 casos para cada onda incidente considerada.

Fechando esta análise, na Subseção 5.4.6 são discutidos aspectos referentes ao efeito das diferentes ondas analisadas em relação ao desempenho do conversor tipo PHS, bem como sua relação com as geometrias ótimas encontradas.

### 5.4.2 Análise dos Resultados: $T = 6,00$ s

A Figura 5.14 apresenta os resultados de velocidade  $|-u_{máx}|$  (magnitude da velocidade axial máxima), observados no ponto  $p6$  sob a PHS (ver Figura 4.4), quando incide no equipamento uma onda de período  $T = 6,00$  s (W1) com as características descritas na Tabela 5.7. Deve-se notar que a altura relativa  $X$  (GDL analisado) e o comprimento relativo  $(L/\lambda)$  variam inversamente (conforme Figura 5.13).

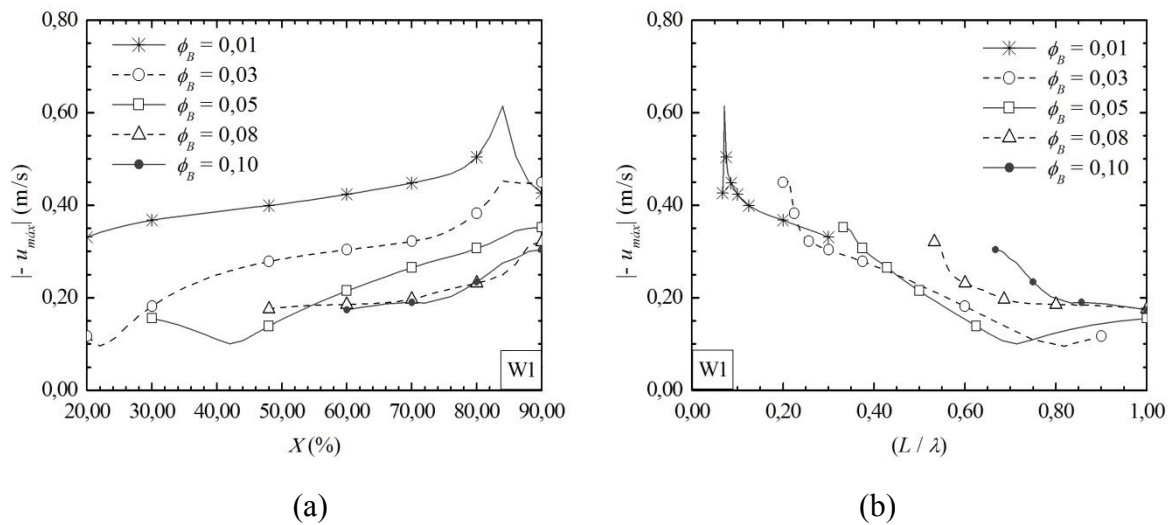


Figura 5.14 – Velocidade  $|-u_{máx}|$  em  $p6$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 6,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Na Figura 5.14a, pode-se observar uma tendência de crescimento da magnitude da velocidade axial ( $|-u_{máx}|$ ), à medida que a PHS fica mais próxima da superfície da água. Esta tendência geral pode ser percebida em todas as curvas independentemente da razão  $\phi_B$  observada. Na curva referente à razão  $\phi_B = 0,01$ , observa-se que a mesma é ascendente a partir de  $X = 20,00\%$  até  $X = 84,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global da velocidade  $|-u_{máx}|$ . Porém a partir de  $X = 84,00\%$  até  $X = 90,00\%$  ocorre um decréscimo da velocidade  $|-u_{máx}|$  sendo este último um ponto de mínimo local desta curva.

Na curva de  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.14a), observa-se que a mesma é ascendente a partir de  $X = 22,00\%$  até  $X = 84,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global de  $|-u_{máx}|$ . Porém em  $X = 20,00\%$  ocorre uma velocidade pouco maior que a registrada em  $X = 22,00\%$ , configurando um máximo local neste ponto. A partir de  $X = 84,00\%$  até  $X = 90,00\%$  a curva apresenta comportamento parabólico, de modo que ocorre um decréscimo de  $|-u_{máx}|$  até

$X = 88,00\%$  seguido de um aumento de magnitude em  $X = 90,00\%$ , sendo estes, respectivamente, pontos de mínimo e de máximo locais nesta curva. Já na curva de  $\phi_B = 0,05$ , observa-se que a mesma é ascendente a partir de  $X = 42,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global de  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . Porém entre  $X = 30,00\%$  e  $X = 42,00\%$  a curva apresenta um comportamento decrescente, onde a maior velocidade ocorre em  $X = 30,00\%$ , portanto, um ponto de máximo local desta curva.

Na curva de  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.14a), diferente do observado nas curvas anteriores ( $\phi_B = 0,01; 0,03; 0,05$ ), percebe-se que a mesma é inteiramente ascendente desde  $X = 48,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global da curva de  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . É possível observar, ainda, que a maior variação na magnitude de  $|-u_{m\acute{a}x}|$  ocorre a partir de  $X = 78,00\%$  até  $X = 90,00\%$ . Semelhante ao observado na curva  $\phi_B = 0,08$ , a curva de  $\phi_B = 0,10$  também apresenta comportamento ascendente entre seus extremos, no caso desta, de  $X = 60,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo e o máximo global da curva. Porém em  $X = 70,00\%$  há a ocorrência de um máximo local na curva, seguido de um mínimo local em  $X = 72,00\%$ , a partir de onde a curva passa a apresentar uma variação maior entre as velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  até o valor máximo em  $X = 90,00\%$ .

A Tabela 5.8 apresenta o conjunto de pontos que caracterizam cada uma das curvas dos resultados de velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  representadas na Figura 5.14, permitindo a descrição da geometria correspondente de cada ponto, ou seja, o GDL  $X$  (Figura 5.14a) juntamente com o respectivo comprimento relativo ( $L/\lambda$ ) (Figura 5.14b).

Tabela 5.8 – Pontos característicos das curvas de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda de  $T = 6,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	( $L/\lambda$ )	$X$ (%)	( $L/\lambda$ )
0,01	máximo	–	–	84,00	0,071
	mínimo	90,00	0,067	20,00	0,300
0,03	máximo	20,00	0,900	84,00	0,214
	mínimo	90,00	0,200	–	–
0,05	máximo	88,00	0,205	22,00	0,818
	mínimo	30,00	1,000	90,00	0,333
0,08	máximo	–	–	42,00	0,714
	mínimo	–	–	90,00	0,533
0,10	máximo	–	–	48,00	1,000
	mínimo	70,00	0,857	90,00	0,667
	mínimo	72,00	0,833	60,00	1,000

Por sua vez, a Figura 5.14b ratifica os aspectos observados na Figura 5.14a e permite observar, ainda, que a tendência de incremento na velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  é bastante influenciada, também, pelo comprimento da PHS ( $L$ ) e não somente pela sua altura ( $h$ ). Esse aspecto, observado de forma parcial nos estudos previamente apresentados, fica bem caracterizado neste gráfico à medida que as curvas de cada  $\phi_B$  apresentam alguma sobreposição em alguns pontos e uma inclinação semelhante no intervalo entre  $0,100 < (L/\lambda) < 0,700$ .

Comparando-se as Figuras 5.14a e 5.14b, percebe-se uma diferença entre o efeito da altura e do comprimento da PHS sobre a velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . Na Figura 5.14a, é possível observar que o aumento da altura (GDL  $X$ ) conduziu a diferentes curvaturas, para a mesma faixa de valores analisados, dependendo do valor de  $\phi_B$  observado, enquanto que, na Figura 5.14b, a redução do comprimento ( $L/\lambda$ ) conduziu a uma mesma inclinação das curvas, dentro das faixas de valores analisados, independentemente do valor de  $\phi_B$  observado. De outro modo, cada valor de  $\phi_B$  definiu diferentes faixas de valores das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , com magnitudes gradativamente menores à medida que o valor de  $\phi_B$  aumentou. Entretanto, para as razões  $\phi_B = 0,05, 0,08$  e  $0,10$  ocorreram, pontualmente, casos de geometrias em que o maior valor de  $\phi_B$  resultou em velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  maiores que as obtidas com a razão de área ( $\phi_B$ ) imediatamente inferior.

A Figura 5.15 apresenta os resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS, a partir dos dados monitorados na linha  $l$  (ver Figura 4.4), para as diferentes razões de área  $\phi_B$  quando a onda W1 (ver Tabela 5.7) incide no equipamento.

Na Figura 5.15a, pode ser observada uma tendência de crescimento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS, conforme a PHS é aproximada da superfície da água. Esse comportamento era esperado, pois quando o GDL  $X$  aumenta, aumenta a altura da PHS  $h$  (ou a área livre sob a placa, considerando-se a largura unitária), o que possibilita que mais fluido escoe por essa região. Este aumento é observado desde o mínimo global, que é diferente para cada curva de  $\phi_B$ , até o máximo global, em  $X = 90,00\%$  para todas as curvas.

Na curva referente à razão  $\phi_B = 0,01$  (Figura 5.15a), o mínimo global ocorre em  $X = 20,00\%$ , a mesma altura relativa em que ocorre o mínimo global da curva  $\phi_B = 0,03$ , porém, nesta curva, quando  $X = 20,00\%$  o comprimento relativo é  $(L/\lambda) = 0,900$ , enquanto, na primeira, é  $(L/\lambda) = 0,300$ . Já na curva de razão  $\phi_B = 0,08$ , o mínimo global ocorre em  $X = 48,00\%$ , enquanto na curva  $\phi_B = 0,10$  ocorre em  $X = 60,00\%$ .

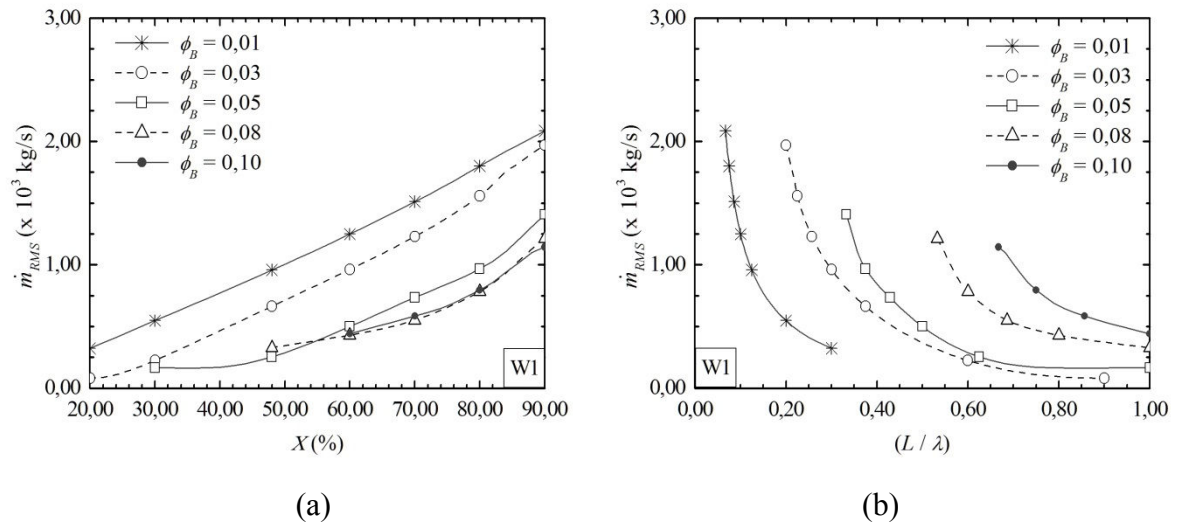


Figura 5.15 – Vazão  $\dot{m}_{RMS}$  em  $l$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 6,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

A Tabela 5.9 contém o conjunto de pontos que caracterizam cada uma das curvas dos resultados de vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) representadas na Figura 5.15, apresentando, assim, a descrição da geometria correspondente de cada ponto.

Tabela 5.9 – Pontos característicos das curvas de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  com a onda de  $T = 6,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	90,00	0,067
	mínimo	–	–	20,00	0,300
0,03	máximo	–	–	90,00	0,200
	mínimo	–	–	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	36,00	0,833
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

A curva referente à razão  $\phi_B = 0,05$  (Figura 5.15a), diferentemente das demais, teve o mínimo global em  $X = 36,00$  %. Outra particularidade desta é a ocorrência de um máximo local em  $X = 32,00$  %, bem como, de um mínimo local em  $X = 30,00$  %. Além disso, ao observar a Figura 5.15b, a ocorrência do mínimo global e de um máximo local na curva de

$\phi_B = 0,05$ , para valores na faixa de  $0,800 < (L/\lambda) < 1,000$ , reporta ao que foi observado na curva de  $\phi_A = 0,05$  (Figura 5.10, Seção 5.3) para um intervalo de comprimento relativo semelhante, i.e., em ambas as curvas quando  $(L/\lambda) > 0,800$ .

Na Figura 5.15b é possível observar que, diferentemente do que ocorre com a velocidade (ver Figura 5.14b), a redução do comprimento da PHS não conduziu a valores de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  gradualmente maiores, mas o contrário, independentemente do comprimento  $(L/\lambda)$ , as maiores vazões  $\dot{m}_{RMS}$  resultaram do aumento da altura da PHS (GDL  $X$ ). Dessa forma, percebe-se um efeito menos significativo do comprimento  $(L/\lambda)$  sobre a vazão ( $\dot{m}_{RMS}$ ) do que sobre a velocidade do escoamento ( $|-u_{m\acute{a}x}|$ ), e, conseqüentemente, um efeito mais significativo da altura ( $X$ ) sobre a vazão ( $\dot{m}_{RMS}$ ) do que sobre a velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$ .

As curvas de eficiência teórica  $\varphi$  da PHS são apresentadas na Figura 5.16, para diferentes razões  $\phi_B$ , considerando a incidência da onda W1 (ver Tabela 5.7) no conversor. Analogamente ao que foi observado nas Figuras 5.14a e 5.15a, as curvas de eficiência  $\varphi$  também exibem uma tendência ascendente à medida que a PHS fica mais próxima da superfície da água, isto é, à medida que o GDL  $X$  aumenta, conforme Figura 5.16a. Além disso, em todas as curvas a maior eficiência é atingida com o maior valor do GDL  $X$  ( $X = 90,00\%$ ), indicando este como parâmetro preponderante sobre a eficiência da PHS.

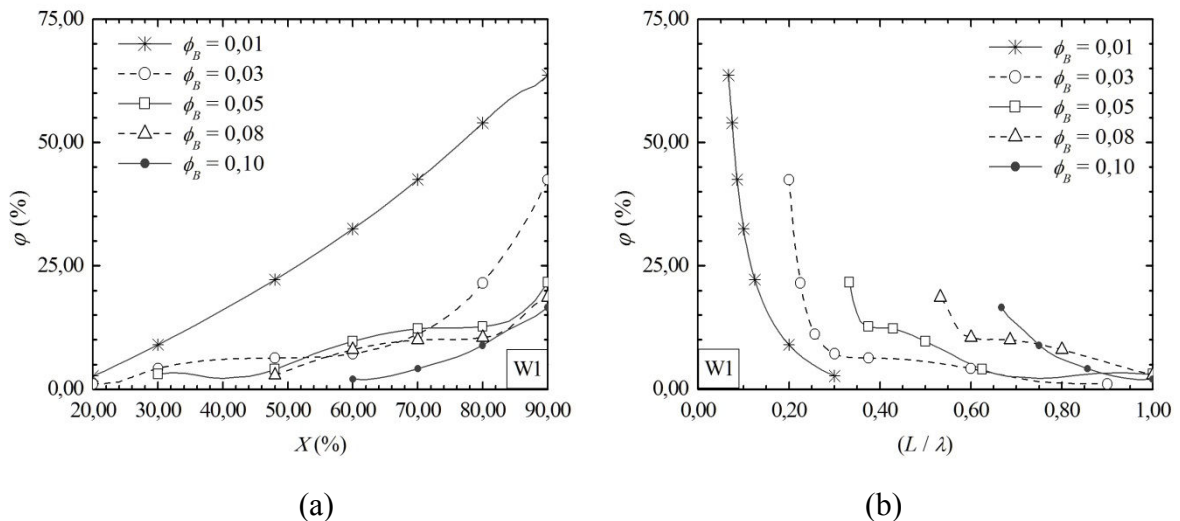


Figura 5.16 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 6,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Na curva referente à razão  $\phi_B = 0,01$  (Figura 5.16a), diferentemente das demais, observa-se um incremento quase linear da eficiência  $\varphi$  a partir de  $X = 20,00\%$  até

$X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global da eficiência  $\varphi$ . Em  $X = 20,00\%$  o menor resultado de eficiência é de  $\varphi = 2,70\%$ , enquanto que em  $X = 90,00\%$ , onde ocorre o máximo global, a eficiência atinge o valor de  $\varphi_{máx} = 63,61\%$ . Percebe-se, ao longo da curva, que ocorre uma redução sutil no incremento da eficiência  $\varphi$  no trecho da curva entre  $X = 84,00\%$  e  $X = 90,00\%$ , mesmo trecho em que se observa um decréscimo da velocidade  $| -u_{máx} |$  na Figura 5.14a, indicando que a relação entre as variações destes dois parâmetros do escoamento não é proporcional.

Na curva de  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.16a), observa-se que somente a partir de  $X = 70,00\%$  passam a ocorrerem resultados de  $\varphi > 10,00\%$ , os quais aumentam até  $X = 90,00\%$ , onde ocorre o máximo global, atingindo  $\varphi_{máx} = 42,45\%$ . Já o mínimo global ocorre em  $X = 20,00\%$  com uma eficiência de  $\varphi = 1,05\%$ . Por sua vez, na curva de  $\phi_B = 0,05$ , observa-se a ocorrência de dois pontos de máximo locais, um deles em  $X = 32,00\%$  e o outro em  $X = 72,00\%$ , bem como, de dois mínimos locais, um em  $X = 30,00\%$  e outro em  $X = 76,00\%$ . Nessa curva, o mínimo global ocorre quando  $X = 40,00\%$ , com uma eficiência de  $\varphi = 2,20\%$ , enquanto o máximo global ocorre quando  $X = 90,00\%$ , atingindo uma eficiência de  $\varphi_{máx} = 21,63\%$ .

Na curva de  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.16a), observa-se a ocorrência de um máximo local em  $X = 74,00\%$  seguido de um mínimo local em  $X = 76,00\%$ . Já o mínimo global ocorre quando  $X = 48,00\%$ , onde  $\varphi = 2,83\%$ , e o máximo global quando  $X = 90,00\%$ , onde atinge  $\varphi_{máx} = 18,63\%$ . Assim como na curva  $\phi_B = 0,05$ , o incremento da eficiência nesta curva passa a ser mais significativo a partir de  $X = 80,00\%$ , onde o comprimento relativo vale  $(L/\lambda) = 0,600$ , enquanto na curva  $\phi_B = 0,05$  vale  $(L/\lambda) = 0,375$ . Já no caso da curva de  $\phi_B = 0,10$ , esta apresenta um máximo local em  $X = 60,00\%$ , enquanto que o mínimo global ocorre em  $X = 62,00\%$ , quando  $\varphi = 1,93\%$ , a partir de onde a curva torna-se ascendente até o máximo global que ocorre em  $X = 90,00\%$ , quando atinge  $\varphi_{máx} = 16,56\%$ .

Observa-se que, de forma geral, os resultados da Figura 5.16a mostram que as maiores eficiências foram atingidas com as menores razões  $\phi_B$ . Entretanto, comparando-se as curvas  $\phi_B = 0,03$ ,  $0,05$  e  $0,08$ , percebe-se que ocorrem dois intervalos do GDL  $X$  em que as curvas de maior razão  $\phi_B$  apresentam eficiências superiores as de menor razão de área  $\phi_B$ . Assim, destaca-se na curva de  $\phi_B = 0,05$ , o intervalo de  $52,00\% < X < 72,00\%$  onde os resultados desta curva são superiores aos da curva  $\phi_B = 0,03$ ; bem como, na curva de  $\phi_B = 0,08$ , o intervalo de  $56,00\% < X < 66,00\%$  onde os resultados desta também são superiores aos

encontrados na curva  $\phi_B = 0,03$ . Porém, em ambos os intervalos os resultados de  $\phi_B = 0,08$ , apresentam-se inferiores aos encontrados na curva de  $\phi_B = 0,05$ , seguindo a tendência geral.

A Tabela 5.10 reúne o conjunto de pontos que caracterizam cada uma das curvas dos resultados de eficiência teórica  $\varphi$  com a onda W1 (Figura 5.16), de forma a permitir a descrição das geometrias correspondentes.

Tabela 5.10 – Pontos característicos das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  com a onda de  $T = 6,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	90,00	0,067
	mínimo	–	–	20,00	0,300
0,03	máximo	–	–	90,00	0,200
	mínimo	–	–	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
		72,00	0,417		
	mínimo	30,00	1,000	40,00	0,750
		76,00	0,395		
0,08	máximo	74,00	0,649	90,00	0,533
	mínimo	76,00	0,632	48,00	1,000
0,10	máximo	60,00	1,000	90,00	0,667
	mínimo	–	–	62,00	0,968

A partir da Figura 5.16b, é possível observar, especialmente no intervalo de  $0,200 < (L/\lambda) < 0,900$  onde diversas curvas se sobrepõem em diferentes pontos, que as maiores razões de área  $\phi_B$  levaram a maiores eficiências para mesmos comprimentos da PHS. Muito embora, no caso dessas curvas, mesmos comprimentos relativos  $(L/\lambda)$  correspondam a diferentes alturas relativas  $X$ , a observação dessa disposição dos resultados demonstra a preponderância da altura da PHS ( $h$ ) sobre sua eficiência  $\varphi$ , visto que, conforme  $\phi_B$  aumenta, maiores são as alturas relativas  $X$ , para mesmos comprimentos relativos  $(L/\lambda)$ , e maiores eficiências  $\varphi$  são atingidas, ratificando a Figura 5.16a. Por exemplo, três curvas cobrem o comprimento relativo  $(L/\lambda) = 0,600$ , nesse ponto a eficiência resultante é maior conforme  $\phi_B$  aumenta:  $\varphi(\phi_B = 0,03, X = 30,00\%) < \varphi(\phi_B = 0,05, X = 50,00\%) < \varphi(\phi_B = 0,08, X = 80,00\%)$ . Por outro lado, percebe-se que somente quando se tem comprimentos  $(L/\lambda) < 0,400$  é atingida uma eficiência  $\varphi > 20,00\%$ , indicando que maiores comprimentos da PHS conduzem a menores resultados de eficiência teórica  $\varphi$ .



### 5.4.3 Análise dos Resultados: $T = 8,00$ s

A Figura 5.17 apresenta os resultados de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  obtidos no ponto  $p6$  sob a PHS (ver Figura 4.4), quando incide no equipamento uma onda de período  $T = 8,00$  s (W2) com as características descritas na Tabela 5.7. Deve-se observar que a altura relativa  $X$  (GDL analisado) e o comprimento relativo ( $L/\lambda$ ) variam inversamente (Figura 5.13).

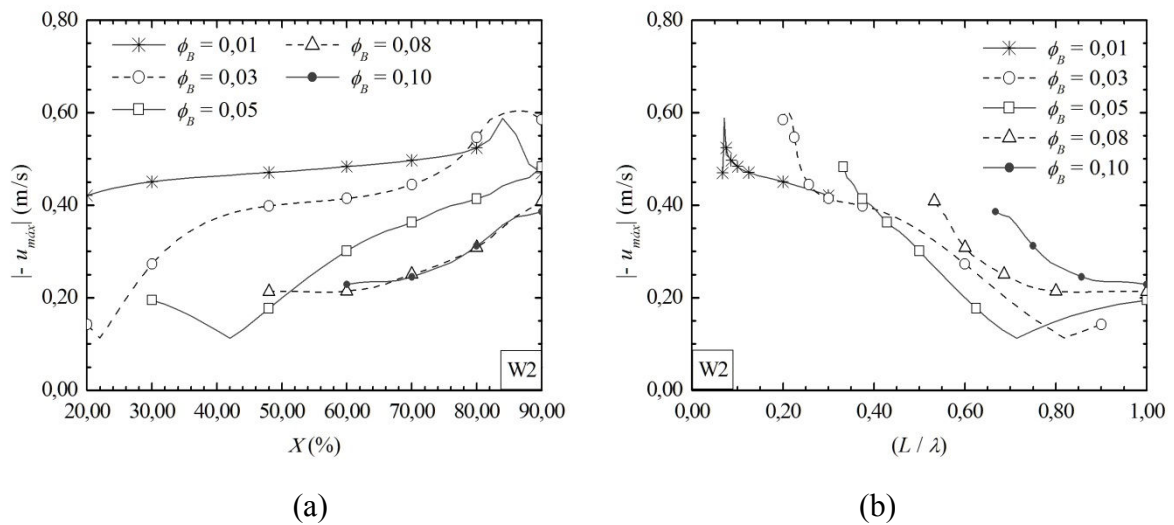


Figura 5.17 – Velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  em  $p6$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 8,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

Na Figura 5.17a, observa-se uma tendência de crescimento da magnitude da velocidade axial ( $|-u_{m\acute{a}x}|$ ), à medida que a PHS é aproximada da superfície da água. Esta tendência geral, percebida em todas as curvas, se mostra menos significativa na curva referente à razão  $\phi_B = 0,01$ , onde o aumento das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  desde  $X = 20,00\%$  até  $X = 76,00\%$  é pequeno. Já a partir de  $X = 76,00\%$ , a curva apresenta um crescimento mais expressivo da velocidade até  $X = 84,00\%$ , sendo este o ponto de máximo global da curva. Assim como na curva  $\phi_B = 0,01$  da onda W1 (Figura 5.14a), nesta também ocorre um decréscimo da velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  no intervalo de  $84,00\% \leq X \leq 90,00\%$ .

Na curva de  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.17a), observa-se que a mesma é ascendente a partir de  $X = 22,00\%$  até  $X = 86,00\%$ , respectivamente, o mínimo e o máximo global desta curva. Diferente do observado na curva  $\phi_B = 0,03$  da onda W1 (Figura 5.14a), a partir do máximo global até  $X = 90,00\%$  a curva apresenta um decréscimo contínuo de  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . Já na curva de

$\phi_B = 0,05$ , percebe-se um aumento da velocidade a partir de  $X = 42,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo global e o máximo global de  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , que correspondem aos mesmos pontos da curva  $\phi_B = 0,05$  da onda W1 (Figura 5.14a). Outra correspondência desta curva com a curva de W1 é que, entre  $X = 30,00\%$  e  $X = 42,00\%$ , a curva apresenta um comportamento decrescente, com a ocorrência de um máximo local em  $X = 30,00\%$ .

Por sua vez, a curva  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.17a), mesmo apresentando uma variação menor das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  que as demais curvas já mencionadas, apresentou um comportamento análogo ao da curva  $\phi_B = 0,05$ , com a ocorrência do mínimo global em um valor intermediário do GDL  $X$ , nesta curva em  $X = 56,00\%$ . Quanto às características dos resultados de W1 (Figura 5.14a), diferentemente das curvas  $\phi_B = 0,01$ ,  $0,03$  e  $0,05$ , que apresentaram algumas características correspondentes, nesta curva somente o ponto de máximo global, ocorrido em  $X = 90,00\%$ , coincide com a curva de W1. Quanto à curva de  $\phi_B = 0,10$ , esta apresenta comportamento ascendente entre seus extremos, a partir de  $X = 60,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , respectivamente, o mínimo e o máximo global da curva. Semelhante ao observado com a onda W1, além da correspondência entre os pontos de máximo e mínimo globais, a curva também apresenta um máximo e um mínimo local em valores intermediários do GDL  $X$ .

A Tabela 5.11 apresenta o conjunto de pontos, máximos e mínimos, globais e locais, que caracterizam as curvas dos resultados de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda W2 (Figura 5.17).

Tabela 5.11 – Pontos característicos das curvas de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda de  $T = 8,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	84,00	0,071
	mínimo	90,00	0,067	20,00	0,300
0,03	máximo	20,00	0,900	86,00	0,209
	mínimo	90,00	0,200	22,00	0,818
0,05	máximo	30,00	1,000	90,00	0,333
	mínimo	–	–	42,00	0,714
0,08	máximo	50,00	0,960	90,00	0,533
	mínimo	48,00	1,000	56,00	0,857
0,10	máximo	64,00	0,938	90,00	0,667
	mínimo	66,00	0,909	60,00	1,000

A Figura 5.17b, além de ratificar os aspectos observados na Figura 5.17a, permite observar aspectos semelhantes aos percebidos na Figura 5.14b, como a preponderância do comprimento da PHS sobre o incremento na velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$ . Esse aspecto, novamente pode ser visto a partir da relação  $(L/\lambda) < 0,700$  à medida que diferentes curvas de  $\phi_B$  apresentam alguma sobreposição e inclinação semelhante. Outro fator que corrobora essa observação é a análise da curva  $\phi_B = 0,01$ , onde o intervalo de comprimentos relativos  $(L/\lambda)$ , correspondente à variação do GDL  $X$ , é bem menor que nas demais curvas, compreendendo  $0,067 \leq (L/\lambda) \leq 0,300$ . Assim, uma vez que o maior comprimento relativo  $(L/\lambda)$  testado nessa curva é menor que os comprimentos relativos  $(L/\lambda)$  testados em outras curvas, observa-se que a menor velocidade axial  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , registrada nessa curva, é superior a maior parte das velocidades axiais  $|-u_{m\acute{a}x}|$  registradas ao longo das demais curvas de  $\phi_B$ . Além disso, a pequena variação da velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  ao longo desta curva (conforme Figura 5.17, de  $X = 20,00\%$ , onde  $(L/\lambda) = 0,300$ , até  $X = 76,00\%$ , onde  $(L/\lambda) = 0,079$ ), remete ao fato de o comprimento variar pouco entre os casos da razão  $\phi_B = 0,01$ .

A Figura 5.18 apresenta os resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS, para as diferentes razões de área  $\phi_B$ , referente à incidência da onda W2 (Tabela 5.7) no equipamento.

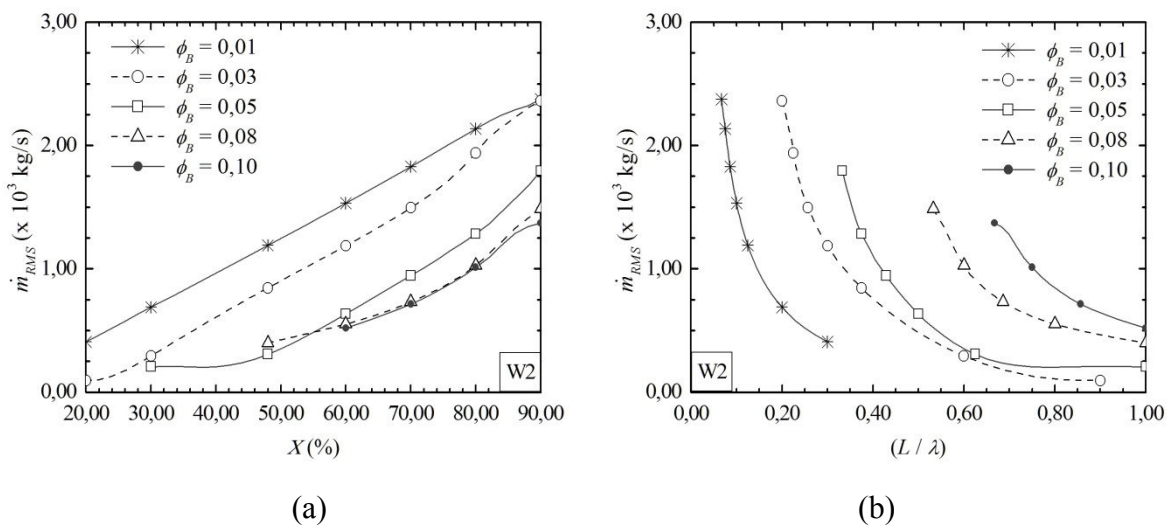


Figura 5.18 – Vazão  $\dot{m}_{RMS}$  em  $l$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 8,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

É possível observar na Figura 5.18a que ocorre uma tendência de crescimento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  sob a PHS, conforme a placa é afastada do fundo do canal. Semelhante ao observado na Figura 5.15a, para a onda W1, este aumento é observado desde o mínimo

global, em diferentes alturas relativas  $X$  para cada curva de  $\phi_B$ , até o máximo global, quando  $X = 90,00\%$  em todas as curvas.

Nas curvas referentes às razões  $\phi_B = 0,01, 0,03, 0,08$  e  $0,10$  (Figura 5.18a), o mínimo global ocorre sempre para o menor valor do GDL  $X$  analisado. Já a curva referente à razão  $\phi_B = 0,05$ , diferente das demais, teve o mínimo global em um ponto intermediário da curva, em  $X = 38,00\%$ . Ao comparar os resultados da onda W2 com os da onda W1 (Figura 5.15a), o comportamento das curvas é o mesmo, diferenciando-se apenas pelas magnitudes das vazões  $\dot{m}_{RMS}$  que são maiores para a onda W2.

Assim como na Figura 5.15b, os resultados da Figura 5.18b demonstram que o incremento da vazão  $\dot{m}_{RMS}$  é proporcional ao aumento da altura da PHS (GDL  $X$ ). De forma que a variação do comprimento ( $L/\lambda$ ) apresenta um efeito menos significativo sobre a vazão ( $\dot{m}_{RMS}$ ) do que sobre a velocidade do escoamento ( $|u_{máx}|$ ). A Tabela 5.12 reúne o conjunto de pontos que caracterizam as curvas dos resultados de vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) da Figura 5.18.

Tabela 5.12 – Pontos característicos das curvas de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  com a onda de  $T = 8,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	90,00	0,067
	mínimo	–	–	20,00	0,300
0,03	máximo	–	–	90,00	0,200
	mínimo	–	–	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	38,00	0,789
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

As curvas dos resultados de eficiência teórica  $\varphi$  são apresentadas na Figura 5.19, para as diferentes razões de área  $\phi_B$ , considerando a onda incidente W2 (Tabela 5.7). Assim como nas Figuras 5.17a e 5.18a, as curvas de eficiência  $\varphi$  também são ascendentes, crescendo à medida que o GDL  $X$  aumenta, conforme Figura 5.19a. Novamente, observa-se que a maior eficiência é atingida com o maior valor do GDL  $X$  ( $X = 90,00\%$ ) em todas as curvas.

Mesmo as curvas da Figura 5.19a indicando a altura da PHS (GDL  $X$ ) como parâmetro determinante para o conversor atingir os maiores valores de eficiência, percebe-se que o

comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ) também tem um efeito importante, que pode ser visto na curva  $\phi_B = 0,01$ . Nesta curva, partindo de  $X = 20,00\%$ , a PHS tem um comprimento menor que nas demais curvas, mas logo atinge uma eficiência  $\varphi$  acima de  $15,00\%$  (a partir de  $X = 34,00\%$ ), resultado que as demais curvas atingem apenas quando  $X > 74,00\%$  (Figura 5.19a) e  $(L/\lambda) < 0,700$  (Figura 5.19b). Além disso, percebe-se que a partir de  $X = 84,00\%$  há uma redução no incremento da eficiência mais acentuada que a observada com a onda W1 (Figura 5.16a), inclusive ocasionando pontos de máximo e mínimo locais. No ponto de mínimo global ( $X = 20,00\%$ ) a eficiência é de  $\varphi = 4,20\%$ , enquanto no ponto de máximo global ( $X = 90,00\%$ ) a eficiência atinge o valor de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 69,28\%$ .

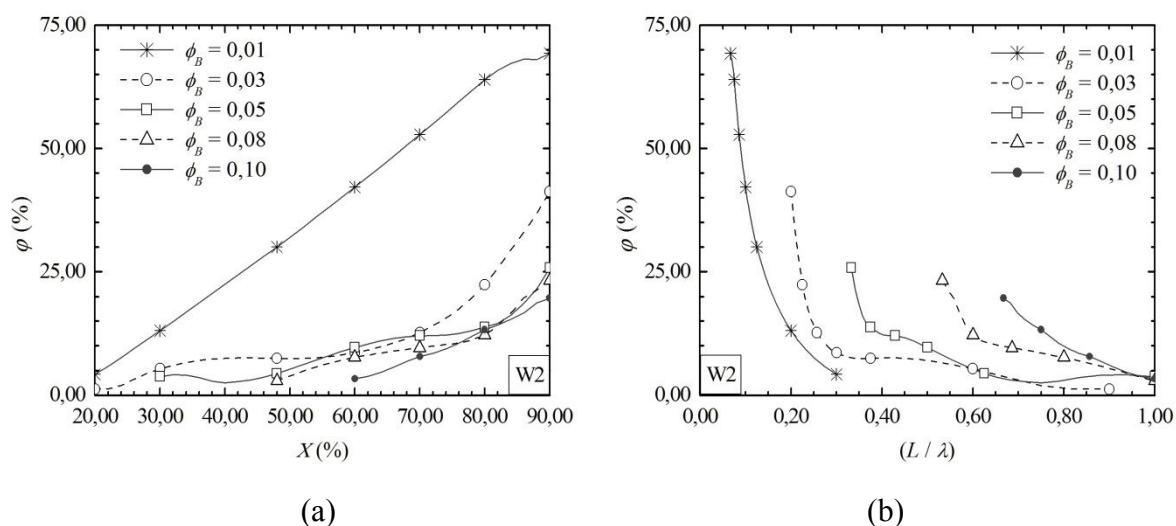


Figura 5.19 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 8,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

Já a curva de  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.19a) atinge uma eficiência maior que  $10,00\%$  somente a partir de  $X = 66,00\%$ , quando a curva passa a apresentar um incremento maior nos resultados até atingir uma eficiência máxima de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 41,27\%$ , valor  $40,05\%$  superior ao mínimo desta curva. Diferente do que se observou com a onda W1 (Figura 5.16a), ocorrem pontos de máximo e mínimo locais para valores intermediários do GDL  $X$  nesta curva (ver Tabela 5.13). Por sua vez, na curva de  $\phi_B = 0,05$  também ocorrem pontos de máximo e mínimo locais, porém, diferente do que foi observado com a onda W1 (Figura 5.16), observa-se apenas um par destes pontos (Tabela 5.13). Já o mínimo global ocorre quando  $X = 40,00\%$ , assim como para a onda W1, e resulta em  $\varphi = 2,53\%$ , enquanto que a eficiência no ponto de máximo global chega a  $\varphi_{m\acute{a}x} = 25,78\%$ .

Na curva de  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.19a), observa-se que a eficiência aumenta continuamente desde o ponto de mínimo global, onde a eficiência é de  $\varphi = 2,90\%$ , até o ponto de máximo global, quando a eficiência é de  $\varphi_{máx} = 23,28\%$ . Entretanto, percebe-se que o incremento na eficiência torna-se mais significativo somente a partir de  $X > 76,00\%$ , quando  $(L/\lambda) < 0,630$ , atingindo uma eficiência superior a  $11,00\%$ . Além disso, não ocorrem pontos de máximo e mínimo locais, como observado para a onda W1 (Figura 5.16). Também no caso da curva de  $\phi_B = 0,10$ , esta deixa de apresentar pontos de máximo e mínimo locais, relativamente ao observado para a onda W1 (Figura 5.16), sendo inteiramente ascendente. Nesta curva o menor resultado de eficiência é de  $\varphi = 3,32\%$  e o maior atinge  $\varphi_{máx} = 19,66\%$ .

Na Tabela 5.13 são apresentados os pontos característicos das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  referentes à onda W2 (Figura 5.19), a fim de descrever as geometrias correspondentes.

Tabela 5.13 – Pontos característicos das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  com a onda de  $T = 8,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	86,00	0,070	90,00	0,067
	mínimo	88,00	0,068	20,00	0,300
0,03	máximo	44,00	0,409	90,00	0,200
	mínimo	50,00	0,360	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	40,00	0,750
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

De forma geral, os resultados da Figura 5.19a apresentam as maiores eficiências nas curvas de menores razões  $\phi_B$ . Entretanto, semelhante ao que ocorreu para a onda W1 (Figura 5.16), destaca-se um trecho da curva  $\phi_B = 0,05$ , compreendendo o intervalo de  $56,00\% < X < 68,00\%$ , onde os resultados desta curva são superiores aos encontrados na curva  $\phi_B = 0,03$ , apesar de os comprimentos relativos  $(L/\lambda)$  serem menores nessa última curva.

Na Figura 5.19b, é possível observar que ocorrem resultados de eficiência  $\varphi > 20,00\%$  a partir de comprimentos relativos  $(L/\lambda) < 0,600$ , enquanto que resultados superiores a

25,00 % são atingidos somente a partir de  $(L/\lambda) < 0,400$ ; o que reforça a importância do comprimento da PHS na condução de melhores resultados de eficiência teórica  $\phi$ . Em relação aos resultados encontrados com a onda W1, os melhores resultados de eficiência ( $\phi_{m\acute{a}x}$ ) com a onda W2 são, em média, 5,00 % superiores, com exceção da curva  $\phi_B = 0,03$ , onde houve uma redução no desempenho e o melhor resultado obtido é 1,18% inferior ao valor máximo obtido com a onda W1 (Figura 5.16).

#### 5.4.4 Análise dos Resultados: $T = 10,00$ s

Na Figura 5.20 são apresentados os resultados de velocidade axial  $|u_{m\acute{a}x}|$  sob a PHS (conforme Figura 4.4), considerando a incidência de uma onda de período  $T = 10,00$  s (W3, ver Tabela 5.7).

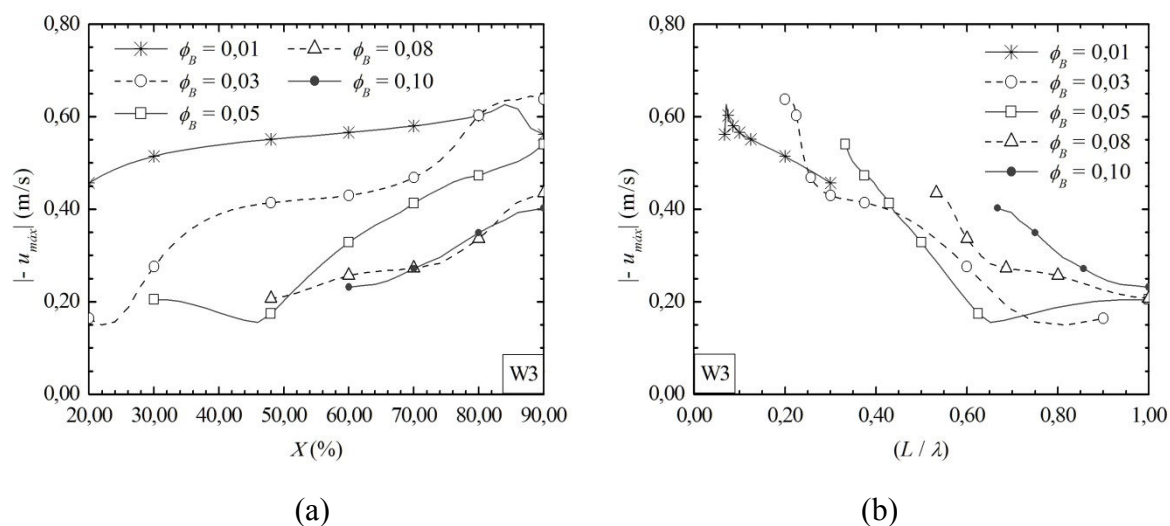


Figura 5.20 – Velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  em  $p_6$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 10,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

As curvas de velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$ , na Figura 5.20a, apresentam um comportamento semelhante ao observado nas Figuras 5.14a e 5.17a, respectivamente para as ondas W1 e W2, onde há uma tendência geral ascendente das curvas com o aumento do GDL  $X$ . Assim como observado naquelas figuras, a variação entre as velocidades  $|u_{m\acute{a}x}|$  na curva  $\phi_B = 0,01$  é menor que nas demais curvas. Isto se deve ao fato de que, ao longo da faixa de valores analisada para o GDL  $X$ , esta razão de área contempla um intervalo bem menor de comprimentos relativos  $(L/\lambda)$  que as demais curvas e, além disso, com valores, de comprimento relativo, menores que

os valores das demais razões  $\phi_B$  avaliadas. Novamente, registra-se o valor máximo global em  $X = 84,00\%$  e, a partir deste ponto, um decréscimo da velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  até um mínimo local em  $X = 90,00\%$ .

Na curva  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.20a), semelhante ao observado com a onda W2 (Figura 5.17a), os pontos de mínimo e máximo globais ocorrem em valores próximos aos limites da faixa do GDL  $X$ , respectivamente em  $X = 22,00\%$  e  $X = 88,00\%$ , e há uma leve redução da velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  após o ponto de máximo global. Por outro lado, a curva de  $\phi_B = 0,05$  se distingue, apesar de muito semelhante, das curvas  $\phi_B = 0,05$  para as ondas W1 e W2 (Figuras 5.14a e 5.17a), uma vez que, neste caso, registra-se um ponto de mínimo local, em  $X = 30,00\%$ , e há uma mudança no ponto de mínimo global, de  $X = 42,00\%$  anteriormente, para  $X = 46,00\%$  nesta curva. Entretanto, se repete a ocorrência de um trecho descendente entre o ponto de máximo local, nesta curva em  $X = 32,00\%$ , e o de mínimo global desta curva.

Na Tabela 5.14 podem ser vistos os pontos de máximo e mínimo, globais e locais, que caracterizam as curvas dos resultados de velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  com a onda W3 (Figura 5.20).

Tabela 5.14 – Pontos característicos das curvas de velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  com a onda de  $T = 10,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	84,00	0,071
	mínimo	90,00	0,067	20,00	0,300
0,03	máximo	20,00	0,900	88,00	0,205
	mínimo	90,00	0,200	22,00	0,818
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	46,00	0,652
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

Já a curva de  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.20a) se comportou de modo bastante semelhante à curva com a onda W1 (Figura 5.14a), registrando seus valores mínimo e máximo globais nos pontos extremos da curva (em  $X = 48,00\%$  e  $X = 90,00\%$ , respectivamente), entretanto, neste caso, com uma inclinação maior, i.e., com maior variação de velocidade  $|u_{m\acute{a}x}|$  entre estes



pontos. Por sua vez, a curva de  $\phi_B = 0,10$  também apresentou uma característica ascendente entre seus extremos, de  $X = 60,00\%$  até  $X = 90,00\%$ , e registrou nesses pontos, respectivamente, os resultados mínimo e máximo global da velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$ ; semelhante ao observado com as ondas W1 e W2 (Figuras 5.14a e 5.17a). Porém, nesta curva, não há ocorrência de pontos de mínimo e máximo locais.

A Figura 5.20b, além de ratificar as características observadas a partir da Figura 5.20a, permite corroborar os aspectos percebidos nas curvas das ondas W1 e W2 (Figuras 5.14 e 5.17), como o significativo incremento nas velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  que pode ser visto, a partir da relação  $(L/\lambda) < 0,700$ , nas diferentes curvas de  $\phi_B$ .

A Figura 5.21 apresenta as curvas com os resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  abaixo da PHS, para as diferentes razões de área  $\phi_B$  analisadas, devido à incidência da onda W3 (Tabela 5.7) no dispositivo.

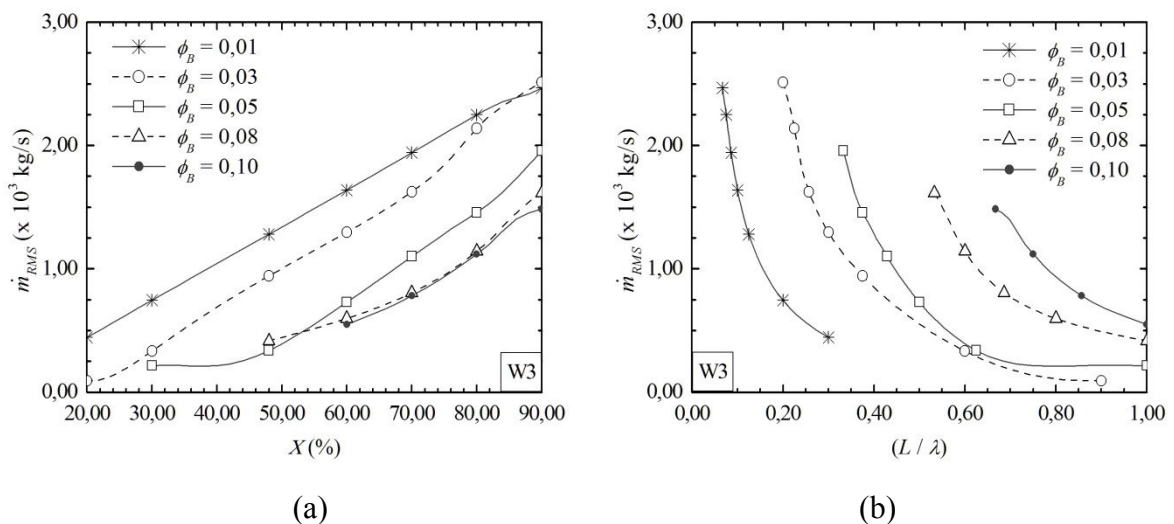


Figura 5.21 – Vazão  $\dot{m}_{RMS}$  em  $l$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 10,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Na Figura 5.21a percebe-se, novamente, a tendência de crescimento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  à medida que a PHS é aproximada da superfície da água, conforme esperado. Assim como foi observado nas Figuras 5.15a e 5.18a, para as ondas W1 e W2 respectivamente, este incremento da vazão  $\dot{m}_{RMS}$  se dá desde o mínimo global, em diferentes valores do GDL  $X$  a cada curva de  $\phi_B$ , até o ponto de máximo global, que ocorre para o GDL  $X = 90,00\%$  em todas as curvas.

As curvas das razões de área  $\phi_B = 0,01, 0,03, 0,08$  e  $0,10$  (Figura 5.21a) apresentam o mínimo global no ponto de menor altura relativa  $X$ , conforme a faixa de valores (do GDL  $X$ ) analisada em cada curva. Esse fato também foi observado com as ondas W1 e W2 (Figuras 5.15 e 5.18, respectivamente), o que reforça a perspectiva de que a altura da PHS é determinante para os resultados desse parâmetro do escoamento ( $\dot{m}_{RMS}$ ). Entretanto, na curva referente à razão  $\phi_B = 0,05$ , diferente das demais, o mínimo global ocorre em um ponto intermediário da curva, na altura relativa  $X = 38,00\%$ .

Ao comparar os resultados da onda W3 com os das ondas W1 e W2, percebe-se que o comportamento das curvas se repete, inclusive com a coincidência do ponto de mínimo global, em  $X = 38,00\%$ , para as ondas W2 e W3; entretanto, para a onda W1 este mínimo ocorre em um ponto diferente, em  $X = 36,00\%$  (Figura 5.15a). Já os resultados de máximo e mínimo locais ocorrem nos mesmos pontos intermediários da curva para as três ondas analisadas.

A apresentação dos resultados na Figura 5.21b ratifica as observações feitas a partir da Figura 5.21a e corrobora os aspectos observados nas Figuras 5.15b e 5.18b, para as ondas W1 e W2, respectivamente. Cabe destacar que as magnitudes das vazões mássicas  $\dot{m}_{RMS}$  são maiores quanto maior o período da onda ( $W3 > W2 > W1$ ; ver Apêndice E). Na Tabela 5.15 é apresentado o conjunto de pontos que caracterizam as curvas de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  da Figura 5.21.

Tabela 5.15 – Pontos característicos das curvas de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  com a onda de  $T = 10,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	90,00	0,067
	mínimo	–	–	20,00	0,300
0,03	máximo	–	–	90,00	0,200
	mínimo	–	–	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	38,00	0,789
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

Na Figura 5.22 são apresentadas as curvas dos resultados de eficiência teórica  $\varphi$  da PHS, para as diferentes razões de área  $\phi_B$ , devido à onda incidência da onda W3 (Tabela 5.7).

As curvas de eficiência  $\varphi$  mantêm a característica ascendente, observada anteriormente, à medida que se aumenta a altura relativa (GDL  $X$ ), conforme Figura 5.22a. Assim como ocorreu no caso das ondas W1 e W2 (Figuras 5.16 e 5.19, respectivamente), percebe-se que, independentemente do valor da razão  $\phi_B$  observada, a maior eficiência registrada corresponde ao maior valor do GDL  $X$  ( $X = 90,00\%$ ).

Apesar da altura da PHS (GDL  $X$ ) exercer um papel determinante para que o conversor atinja os maiores resultados de eficiência  $\varphi$ , novamente percebe-se, na curva  $\phi_B = 0,01$  (Figura 5.22a), uma evolução importante no incremento da eficiência associada ao comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ). Nesta curva a eficiência  $\varphi$  atinge valores acima de  $20,00\%$  a partir de  $X = 36,00\%$ , enquanto que, entre as demais curvas de  $\phi_B$ , esse patamar é atingido apenas quando  $X > 78,00\%$  ou  $(L/\lambda) < 0,700$ . Assim como ocorreu para a onda W2 (Figura 5.19a), no intervalo entre  $X = 84,00\%$  e  $X = 90,00\%$  percebe-se uma redução no incremento da eficiência  $\varphi$  associada à redução da velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , vista na curva da Figura 5.20, e a ocorrência de pontos de máximo e mínimo locais. Nesta curva  $\phi_B = 0,01$  a eficiência no ponto de mínimo global, em  $X = 20,00\%$ , é de  $\varphi = 5,02\%$ , enquanto no ponto de máximo global ( $X = 90,00\%$ ) chega ao valor de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 69,80\%$ .

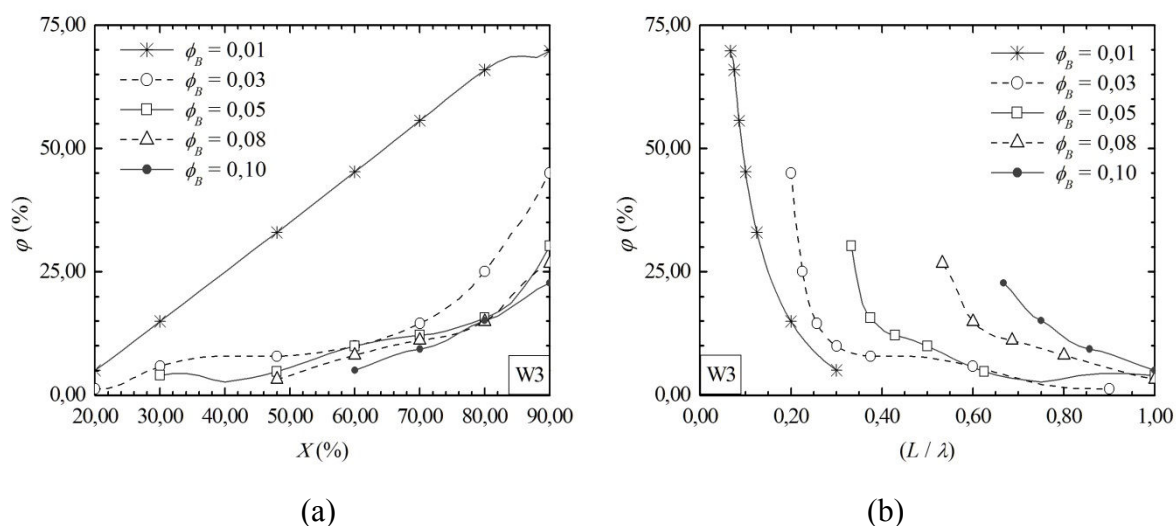


Figura 5.22 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 10,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Quando  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.22a) a curva atinge eficiências superiores a  $10,00\%$  a partir de  $X = 62,00\%$ , entretanto, resultados superiores a  $15,00\%$  são obtidos apenas a partir de  $X = 72,00\%$ . Nesta curva o menor resultado obtido é de  $\varphi = 1,22\%$  e a eficiência máxima

é de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 45,05\%$ , uma diferença de 43,83 % entre os resultados de eficiência da curva. Semelhante ao que ocorreu para a onda W2 (Figura 5.19a), ocorre pontos de máximo e mínimo locais em valores intermediários do GDL  $X$ , nesta curva (ver Tabela 5.16). Já a curva  $\phi_B = 0,05$  apresentou um comportamento bastante semelhante ao observado com a onda W2 (Figura 5.19a), de forma que os pontos de máximo e mínimo, tanto locais quanto globais, ocorreram para os mesmos valores do GDL  $X$  (Tabela 5.16). No ponto de mínimo global a eficiência resulta em  $\varphi = 2,71\%$ , enquanto no ponto de máximo global a eficiência atinge  $\varphi_{m\acute{a}x} = 30,26\%$ .

As curvas  $\phi_B = 0,08$  e  $\phi_B = 0,10$  (Figura 5.22a) também apresentam comportamento semelhante ao observado nas respectivas curvas da onda W2 (Figura 5.19a), de modo que em ambas as curvas, de ambas as ondas, não ocorrem pontos de máximo e mínimo locais; diferentemente do observado com a onda W1 (Figura 5.16a) para ambas as razões  $\phi_B$ . Observa-se, na Figura 5.22a, que as curvas passam a apresentar resultados de eficiência superiores a 15,00 % somente a partir de  $X = 80,00\%$ . Na curva de  $\phi_B = 0,08$  o menor resultado de eficiência é de  $\varphi = 3,22\%$  e o maior atinge até  $\varphi_{m\acute{a}x} = 26,73\%$ . Já na curva de  $\phi_B = 0,10$  a eficiência aumenta desde  $\varphi = 5,04\%$  até o máximo de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 22,76\%$ .

Na Tabela 5.16 são apresentados os pontos, máximos e mínimos, que caracterizam as curvas dos resultados de eficiência teórica  $\varphi$ , referentes à onda W3 (Figura 5.22), com as respectivas geometrias.

Tabela 5.16 – Pontos característicos das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  com a onda de  $T = 10,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	86,00	0,070	90,00	0,067
	mínimo	88,00	0,068	20,00	0,300
0,03	máximo	40,00	0,450	90,00	0,200
	mínimo	46,00	0,391	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,938	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	40,00	0,750
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

Novamente, a tendência geral dos resultados de eficiência teórica  $\varphi$  é de diminuir à medida que a razão de área  $\phi_B$  aumenta. Entretanto, destaca-se um trecho da curva de  $\phi_B = 0,08$  (Figura 5.22a), no intervalo de  $82,00\% < X < 88,00\%$ , onde os resultados desta curva são superiores aos registrados na curva  $\phi_B = 0,05$ . Diferentemente do que foi observado com as ondas W1 e W2 (Figuras 5.16a e 5.19a), nesta curva de  $\phi_B = 0,05$  (Figura 5.22a) não ocorrem resultados superiores aos da curva  $\phi_B = 0,03$ , apenas a sobreposição das curvas em dois pontos,  $X = 60,00\%$  e  $X = 62,00\%$ .

Na Figura 5.22b percebe-se que resultados de eficiência  $\varphi > 25,00\%$  são registrados somente quando  $(L/\lambda) < 0,600$ ; já resultados de  $\varphi > 30,00\%$  passam a ocorrer a partir de  $(L/\lambda) < 0,400$ . Outro aspecto relacionado ao comprimento relativo da PHS, que pode ser observado nos resultados de eficiência  $\varphi$ , é a diferença entre as curvas de  $\phi_B = 0,03, 0,05, 0,08$  e  $0,10$  relativamente à curva de  $\phi_B = 0,01$ . Por exemplo, quando  $X = 62,00\%$  o maior resultado de eficiência  $\varphi$ , entre as quatro curvas de maior razão  $\phi_B$ , é de aproximadamente  $\varphi = 11,00\%$ , enquanto na curva  $\phi_B = 0,01$  tem-se  $\varphi = 47,32\%$ , i.e., uma diferença maior que  $36,00\%$  em relação aos resultados das demais razões de área. Os melhores resultados de eficiência  $\varphi_{máx}$  com a onda W3 são, em média,  $4,00\%$  superiores aos encontrados com a onda W2, de acordo com cada razão de área  $\phi_B$  avaliada, exceto a curva  $\phi_B = 0,01$ , onde o melhor resultado é apenas  $0,52\%$  superior ao obtido com a onda W2 (Figura 5.19).

#### 5.4.5 Análise dos Resultados: $T = 12,00$ s

A Figura 5.23 apresenta os resultados de velocidade axial  $|-u_{máx}|$  sob a PHS (conforme Figura 4.4), devido a incidência de uma onda de período  $T = 12,00$  s (W4, ver Tabela 5.7). Na Figura 5.23a percebe-se que as curvas apresentam um comportamento semelhante ao observado com as ondas W1, W2 e W3 (Figuras 5.14a, 5.17a e 5.20a, respectivamente), onde ocorre uma tendência de aumento da velocidade  $|-u_{máx}|$  conforme o GDL  $X$  aumenta. A curva de  $\phi_B = 0,01$ , assim como observado com as demais ondas, apresenta pouca variação entre as velocidades  $|-u_{máx}|$  ao longo da faixa de valores do GDL  $X$  analisada. Observa-se que as velocidades  $|-u_{máx}|$  registradas nos intervalos em que  $X \leq 58,00\%$  e  $X \geq 80,00\%$ , nesta curva, são inferiores as registradas para  $\phi_B = 0,01$  com a onda W3 (Figura 5.20a; ou, ver Figura E.1a, Apêndice E). Porém, os pontos de máximo e mínimo global, bem como o ponto de mínimo local da curva, ocorrem, novamente, nos mesmos valores do GDL  $X$  registrados com as demais ondas, conforme Tabela 5.17 (ver Tabelas 5.8, 5.11 e 5.14).

Para a razão  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.23a), apesar de a curva ter comportamento semelhante ao observado com as ondas W1, W2 e W3 (Figuras 5.14a, 5.17a e 5.20a, respectivamente), quando comparadas a magnitude das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  registradas nesta, com a das registradas para as demais ondas, percebe-se que, apenas no intervalo  $22,00\% \leq X \leq 34,00\%$ , seus resultados são superiores aos das curvas  $\phi_B = 0,03$  das demais ondas. Além disso, nesta curva, no intervalo  $50,00\% \leq X \leq 74,00\%$  e quando  $X \geq 82,00\%$  os resultados de velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  são inferiores aos registrados tanto com a onda W3 quanto com a onda W2 (Figuras 5.20a e 5.17a, respectivamente; ou, ver Figura E.2a, Apêndice E). Diferentemente do que ocorre para as demais ondas (W1, W2 e W3; Tabelas 5.8, 5.11 e 5.14), o ponto de mínimo global da curva se dá em  $X = 20,00\%$  (Tabela 5.17).

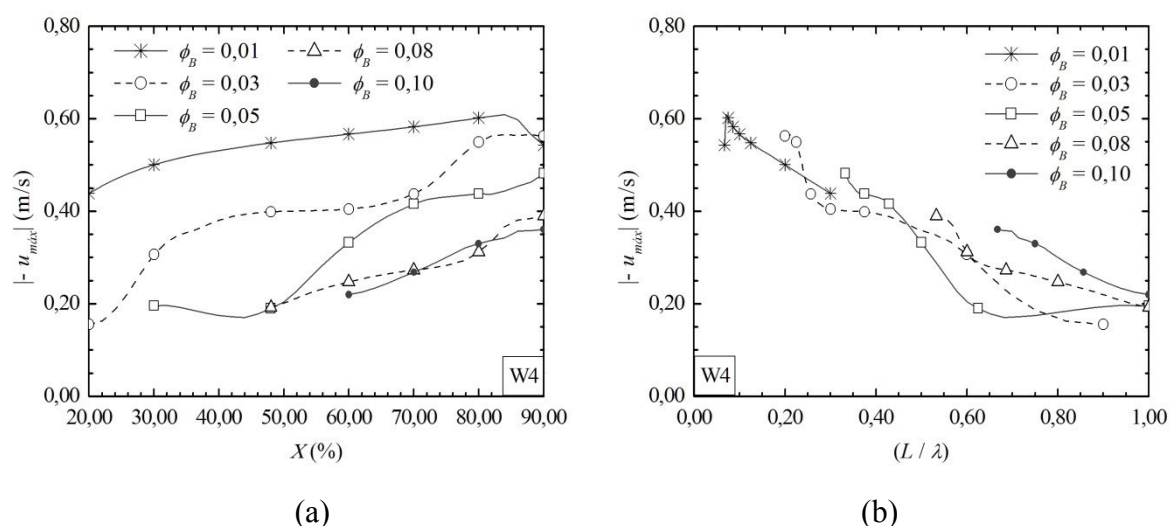


Figura 5.23 – Velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  em  $p6$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 12,00$  s, relativa ao:

(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Já a curva de  $\phi_B = 0,05$  (Figura 5.23a) se assemelha, apenas parcialmente, com as curvas de mesma razão de área  $\phi_B$  das ondas W1, W2 e W3, visto que o ponto de máximo global coincide com as demais curvas, em  $X = 90,00\%$ , e o ponto de mínimo global ocorre em um valor do GDL  $X$  próximo ao registrado nas demais curvas, em  $X = 44,00\%$  (ver Tabelas 5.8, 5.11, 5.14 e 5.17). Porém, quando comparada com as curvas de mesma razão  $\phi_B$  das demais ondas, percebe-se que, a partir de  $X \geq 72,00\%$ , a curva apresenta um crescimento menor das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  que o observado com as ondas W1, W2 e W3, bem como resultados inferiores aos da onda W3, nesta mesma região da curva (Figuras 5.14a, 5.17a e 5.20a, respectivamente; ou, ver Figura E.3a, Apêndice E). Além disso, verifica-se, nesta

curva, a ocorrência de pontos de máximo e mínimo locais, também na região da curva em que  $X \geq 72,00\%$  (ver Tabela 5.17).

Nas curvas  $\phi_B = 0,08$  e  $\phi_B = 0,10$  (Figura 5.23a), por sua vez, podem ser observados comportamentos análogos aos das respectivas curvas referentes a onda W3 (Figura 5.20a), registrando seus valores máximo e mínimo globais nas extremidades dessas curvas. Entretanto, em ambas as curvas, a maior parte dos resultados com a onda W4 são inferiores aos registrados com a onda W3 (ver Figuras E.4a e E.5a, Apêndice E).

A Tabela 5.17 apresenta o conjunto de pontos, máximos e mínimos, globais e locais, que caracterizam as curvas dos resultados de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda W4 (Figura 5.23).

Tabela 5.17 – Pontos característicos das curvas de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda de  $T = 12,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	84,00	0,071
	mínimo	90,00	0,067	20,00	0,300
0,03	máximo	84,00	0,214	88,00	0,205
	mínimo	86,00	0,209	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,937	90,00	0,333
	mínimo	80,00	0,375	44,00	0,682
0,08	máximo	30,00	1,000	90,00	0,533
	mínimo	82,00	0,366	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

A Figura 5.23b ratifica as características observadas na Figura 5.23a e permite visualizar mais claramente o decréscimo dos resultados de velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  com a onda W4, principalmente em relação à onda W3 (Figura 5.20b). Novamente, pode ser visto um incremento maior das velocidades  $|-u_{m\acute{a}x}|$  a partir da relação  $(L/\lambda) < 0,700$  para as diferentes curvas de  $\phi_B$ , o que reforça o efeito preponderante do comprimento da PHS em relação ao aumento da velocidade do escoamento sob a PHS.

Na Figura 5.24 são apresentadas as curvas dos resultados de vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$ , abaixo da PHS, para as diferentes razões de área  $\phi_B$  avaliadas, considerando a incidência da onda W3

(Tabela 5.7) no dispositivo. Na Figura 5.24a percebe-se que as curvas apresentam um comportamento semelhante ao observado com as ondas W1, W2 e W3 (Figuras 5.15a, 5.18a e 5.21a, respectivamente), onde há uma tendência de aumento da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  conforme o GDL  $X$  aumenta. Pode ser visto que este incremento se dá, novamente, desde o ponto de mínimo global de cada curva  $\phi_B$ , respectivamente, até o ponto de máximo global, onde  $X = 90,00\%$  em todas as curvas.

Outro aspecto observado anteriormente, com as ondas W1, W2 e W3, diz respeito às curvas  $\phi_B = 0,01, 0,03, 0,08$  e  $0,10$  (Figura 5.24a), onde o valor mínimo global ocorre no ponto de menor altura relativa  $X$ , conforme a faixa de valores do GDL  $X$  analisada, enquanto na curva  $\phi_B = 0,05$  o mínimo global ocorre em um ponto intermediário da curva, nesta curva, para a altura relativa  $X = 38,00\%$ . Dessa forma, reforça-se a perspectiva de que a altura da PHS (GDL  $X$ ) é a variável geométrica que tem efeito determinante sobre a magnitude dos resultados da vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$  do escoamento sob a PHS.

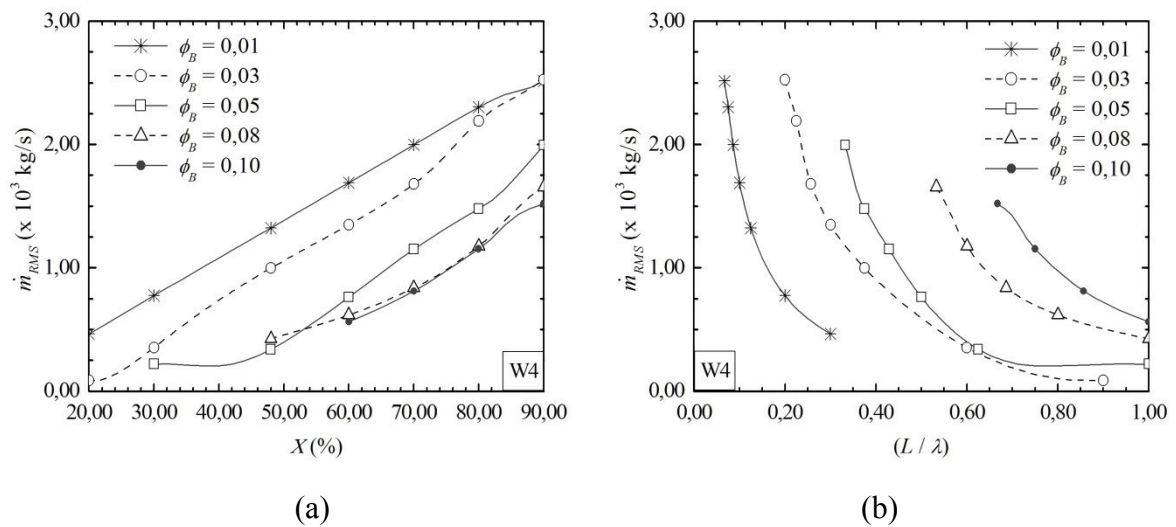


Figura 5.24 – Vazão  $\dot{m}_{RMS}$  em  $l$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 12,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo ( $L/\lambda$ ).

Ao comparar os resultados de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  da onda W4 com os das ondas W1, W2 e W3, percebe-se que, diferentemente do que ocorre para as velocidades  $|u_{máx}|$  (Figura 5.23), os valores obtidos são superiores aos das demais ondas, exceto em relação à onda W3, onde ocorre a coincidência entre alguns resultados nas diferentes curvas  $\phi_B$  das duas ondas (W3 e W4; Figuras 5.21a e 5.24a, respectivamente; ou, ver Apêndice E).



Os resultados apresentados de acordo com a Figura 5.24b ratificam as observações feitas a partir da Figura 5.24a, permitindo confirmar o efeito da altura da PHS sobre esse parâmetro do escoamento ( $\dot{m}_{RMS}$ ), como observado anteriormente com as ondas W1, W2 e W3. Na Tabela 5.18 são apresentados os pontos característicos das curvas de vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) referentes à Figura 5.24.

Tabela 5.18 – Pontos característicos das curvas de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  com a onda de  $T = 12,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	–	–	90,00	0,067
	mínimo	–	–	20,00	0,300
0,03	máximo	–	–	90,00	0,200
	mínimo	–	–	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,937	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	38,00	0,789
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

A Figura 5.25 apresenta as curvas dos resultados de eficiência teórica  $\phi$  da PHS, para as razões de área  $\phi_B$  avaliadas, devido à incidência da onda W4 (Tabela 5.7). A partir da Figura 5.25a percebe-se que as curvas de eficiência  $\phi$  mantiveram a característica ascendente conforme a altura relativa (GDL  $X$ ) aumenta, como visto anteriormente para as ondas W1, W2 e W3 (Figuras 5.16a, 5.19a e 5.22a, respectivamente). Entretanto, diferentemente do que foi observado com as demais ondas (W1, W2 e W3), a eficiência máxima ( $\phi_{máx}$ ) com a onda W4 não foi registrada no ponto de maior valor do GDL  $X$  ( $X = 90,00$  %) em todas as curvas da razão  $\phi_B$ , i.e., há uma exceção, a curva de  $\phi_B = 0,01$ , onde o melhor resultado ( $\phi_{máx}$ ) ocorre em  $X = 84,00$  %.

Semelhante ao observado com a onda W3 (Figura 5.22a), novamente a curva  $\phi_B = 0,01$  (Figura 5.25a) apresenta uma evolução no aumento da eficiência  $\phi$ , associada ao aumento da altura relativa (GDL  $X$ ), que a diferencia das demais curvas de  $\phi_B$  do gráfico. Mesmo que nesta curva o melhor resultado ( $\phi_{máx}$ ) não tenha ocorrido com o maior valor do GDL  $X$ , o comportamento quase linear da mesma, demonstra tanto a preponderância da altura da PHS sobre sua eficiência  $\phi$  quanto a tendência de que menores comprimentos da PHS

proporcionem melhor desempenho ao dispositivo. Análogo ao que se observou para as ondas W2 e W3 (Figura 5.19a e 5.22a, respectivamente), no intervalo de  $84,00\% \leq X \leq 90,00\%$  percebe-se uma redução da eficiência  $\varphi$  e a ocorrência de pontos de máximo e mínimo locais. Nesta curva ( $\phi_B = 0,01$ ) a eficiência  $\varphi$  no ponto de mínimo global, em  $X = 20,00\%$ , é de  $\varphi = 5,51\%$ , enquanto no ponto de máximo global ( $X = 84,00\%$ ), chega ao valor de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 68,29\%$ .

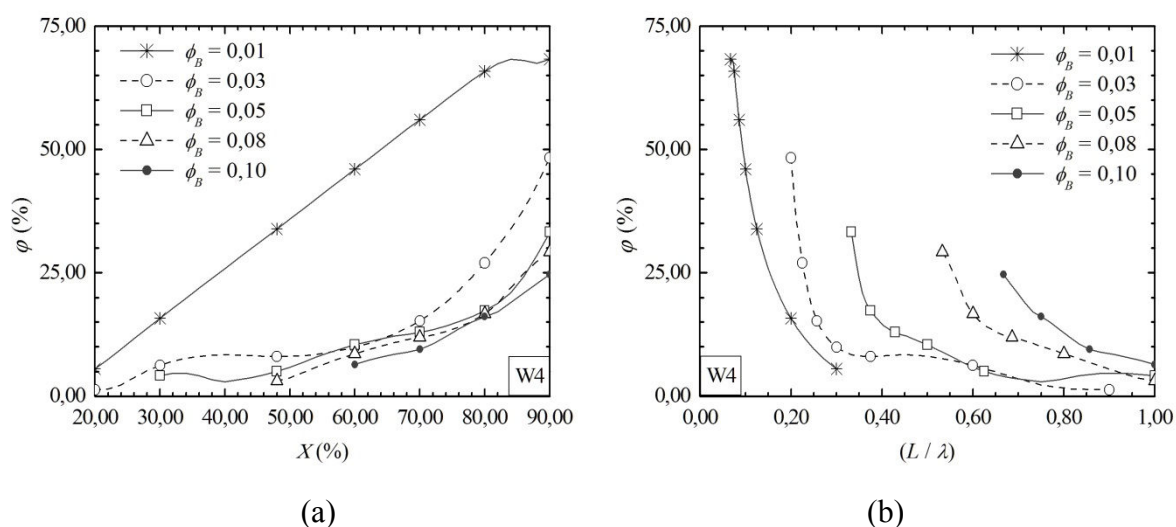


Figura 5.25 – Eficiência teórica  $\varphi$ , para cada  $\phi_B$  com a onda de  $T = 12,00$  s, relativa ao:  
(a) GDL  $X$ ; (b) comprimento relativo  $(L/\lambda)$ .

Por sua vez, a curva  $\phi_B = 0,03$  (Figura 5.25a) apresentada uma evolução do desempenho semelhante à observada com as demais ondas (W1, W2 e W3), de forma que a curva atinge eficiências  $\varphi$  superiores a 15,00% a partir de  $X = 70,00\%$ , enquanto que resultados superiores a 20,00% são obtidos somente a partir de  $X = 76,00\%$ . O menor resultado de eficiência  $\varphi$  obtido nesta curva é de  $\varphi = 1,29\%$ , e a eficiência máxima atingida é de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 48,32\%$ . Já na curva de  $\phi_B = 0,05$  o primeiro resultado acima de 20,00% ocorre em  $X = 84,00\%$ . Novamente, observa-se que os pontos de máximo e mínimo, tanto locais quanto globais, ocorrem nos mesmos valores do GDL  $X$  (Tabela 5.19), assim como visto para as ondas W2 e W3 (Tabelas 5.13 e 5.16, respectivamente). No ponto de mínimo global a eficiência resulta em  $\varphi = 2,88\%$ , enquanto no ponto de máximo global a eficiência atinge  $\varphi_{m\acute{a}x} = 33,25\%$ .

Nas curvas  $\phi_B = 0,08$  e  $\phi_B = 0,10$  (Figura 5.25a) é possível observar, também, a semelhança entre o comportamento apresentado por estas curvas devido a incidência da onda

W4 em relação às ondas W2 e W3 (Figuras 5.19a e 5.22a, respectivamente), de modo que, ambas as curvas, não apresentam pontos de máximo e mínimo locais, para as referidas ondas (W2, W3 e W4; Tabelas 5.13, 5.16 e 5.19, respectivamente). Comparando as duas curvas, percebe-se que a curva de  $\phi_B = 0,08$  apresenta resultados de eficiência  $\varphi$  maiores que 20,00 % a partir de  $X \geq 84,00$  %, enquanto a curva de  $\phi_B = 0,10$  a partir de  $X \geq 86,00$  %. O menor resultado de eficiência da curva  $\phi_B = 0,08$  é  $\varphi = 3,11$  % e o maior é  $\varphi_{m\acute{a}x} = 29,24$  %. Por sua vez, na curva  $\phi_B = 0,10$  a eficiência aumenta desde  $\varphi = 6,40$  % até atingir o máximo de  $\varphi_{m\acute{a}x} = 24,67$  %.

Na Tabela 5.19 são apresentadas as configurações geométricas da PHS, correspondentes aos pontos, máximos e mínimos, que caracterizam cada uma das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  resultantes da onda W4 (Figura 5.25).

Tabela 5.19 – Pontos característicos das curvas de eficiência teórica  $\varphi$  com a onda de  $T = 12,00$  s.

$\phi_B$	Característica	Local		Global	
		$X$ (%)	$(L/\lambda)$	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
0,01	máximo	90,00	0,067	84,00	0,071
	mínimo	88,00	0,068	20,00	0,300
0,03	máximo	40,00	0,450	90,00	0,200
	mínimo	48,00	0,375	20,00	0,900
0,05	máximo	32,00	0,937	90,00	0,333
	mínimo	30,00	1,000	40,00	0,750
0,08	máximo	–	–	90,00	0,533
	mínimo	–	–	48,00	1,000
0,10	máximo	–	–	90,00	0,667
	mínimo	–	–	60,00	1,000

Os resultados de eficiência  $\varphi$  com a onda W4 (Figura 5.25a) demonstram, novamente, uma tendência de decréscimo à medida que a razão de área  $\phi_B$  aumenta, com exceção de dois intervalos específicos: na curva  $\phi_B = 0,05$ , o intervalo de  $58,00\% \leq X \leq 64,00\%$ , onde os resultados da curva superam os registrados na curva  $\phi_B = 0,03$ ; e, na curva de  $\phi_B = 0,08$ , o intervalo de  $82,00\% \leq X \leq 86,00\%$ , em que os resultados desta curva são superiores aos da curva  $\phi_B = 0,05$  (Figura 5.25a).

A Figura 5.25b permite ratificar os aspectos observados a partir da Figura 5.25a, bem como, corroborar algumas das observações feitas anteriormente (com as ondas W1, W2 e W3)

quanto ao comprimento relativo da PHS ( $L/\lambda$ ). Mais uma vez, resultados de eficiência  $\varphi > 25,00\%$  são registrados somente quando  $(L/\lambda) < 0,600$ , enquanto que resultados  $\varphi > 30,00\%$  ocorrem a partir de  $(L/\lambda) < 0,400$ . Observa-se, também, uma grande diferença entre as curvas de  $\phi_B = 0,03, 0,05, 0,08$  e  $0,10$  e a curva de  $\phi_B = 0,01$  quanto aos resultados de eficiência  $\varphi$ , de modo que, por exemplo, em  $X = 62,00\%$  o maior resultado entre as curvas de maior razão  $\phi_B$  é de, aproximadamente,  $\varphi = 11,00\%$ , enquanto na curva de menor razão de área ( $\phi_B = 0,01$ ) tem-se  $\varphi = 48,02\%$ ; novamente, há uma diferença maior que  $36,00\%$  entre os resultados. Na comparação dos resultados máximos de eficiência ( $\varphi_{máx}$ ) da onda W4 com os da onda W3, com exceção da curva  $\phi_B = 0,01$ , onde o melhor resultado é  $1,51\%$  inferior, as demais curvas de  $\phi_B$  apresentam resultados de  $\varphi_{máx}$ , em média,  $3,00\%$  superiores aos encontrados com a onda W3 (Figura 5.22).

#### 5.4.6 Análise dos Resultados: Efeito das Ondas e Geometrias Ótimas

Como mencionado na Subseção 4.1.1, as ondas utilizadas neste estudo possuem características correspondentes à teoria de Stokes de 2ª ordem, conforme Figura 5.26.

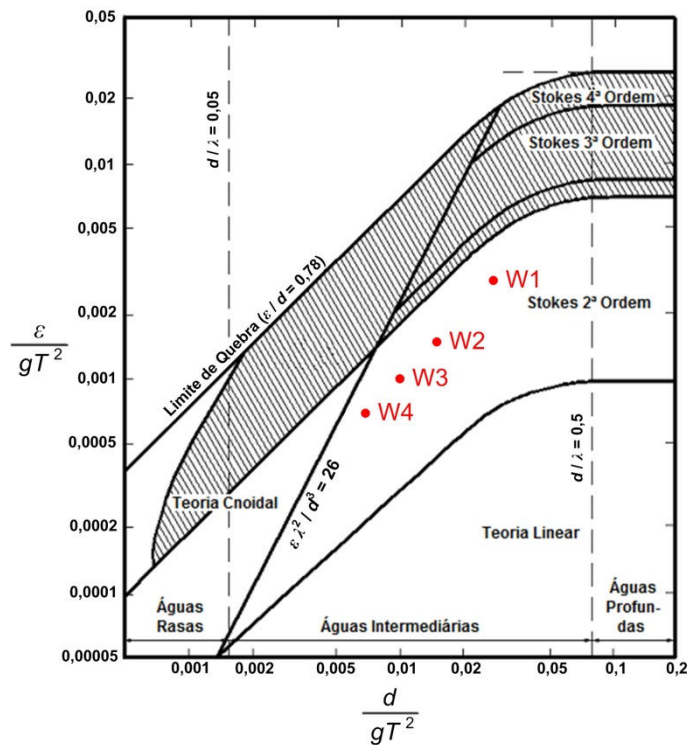


Figura 5.26 – Distribuição das ondas simuladas na região corresponde a Stokes de 2ª ordem do diagrama de classificação de ondas [adaptado de USACE, 2002].

Sendo assim, com base no diagrama de classificação de ondas (ver Figura 4.3), a Figura 5.26 permite verificar como as ondas W1, W2, W3 e W4 se distribuem na região do diagrama correspondente a teoria utilizada.

A fim de avaliar o efeito das características das ondas consideradas sobre os resultados encontrados, cabe determinar a potência média ( $P_W$ ) de cada uma delas. Resolvendo a Equação 4.12 percebe-se que cada onda utilizada neste estudo apresenta uma potência relativamente maior, conforme o período de onda ( $T$ ) aumenta. Ocorre que, a partir das características das ondas fixadas (altura  $\varepsilon$  e profundidade  $d$ ), o aumento do seu período  $T$  conduz ao aumento do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e, portanto, tem-se um acréscimo da potência da onda ( $P_W$ ) que incide no conversor tipo PHS, como é possível observar na Figura 5.27.

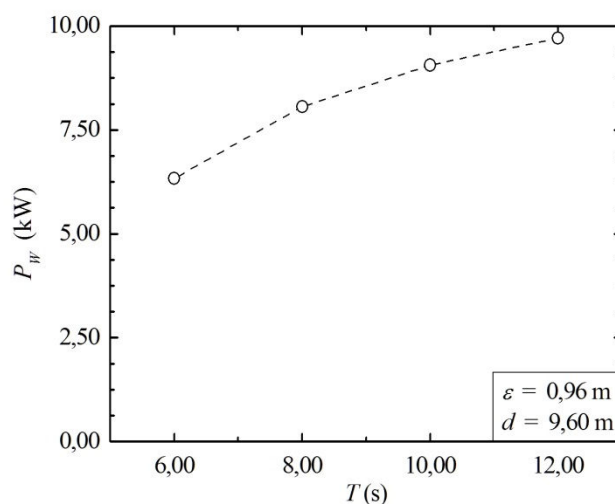


Figura 5.27 – Potência média  $P_W$  das ondas simuladas.

Na Figura 5.27, percebe-se que o aumento da potência  $P_W$  entre W1 e W4 (ver Tabela 5.7) foi de aproximadamente 53,00 %, o que é bastante superior ao aumento da eficiência  $\varphi$  observado entre as diferentes geometrias analisadas (diferentes razões de área  $\phi_B$ ).

Conforme a Tabela 5.20 é possível determinar que o maior incremento da eficiência  $\varphi$ , observado entre as diferentes geometrias analisadas, foi de somente 11,62 % para  $\phi_B = 0,05$ . A avaliação desse parâmetro permite verificar que a potência da onda incidente ( $P_W$ ), diante da gama de geometrias analisadas, não teve um efeito determinante sobre a eficiência teórica  $\varphi$  do conversor tipo PHS, diferentemente do que seria esperado, tendo em vista a significativa variação de potência ( $P_W$ ) entre as ondas regulares consideradas.

A Tabela 5.20 reúne as geometrias ótimas,  $(X)_o$  e respectivo  $(L/\lambda)_o$ , referentes aos resultados de eficiência teórica máxima ( $\varphi_{máx}$ ), obtidos para cada razão de área  $\phi_B$ , de acordo com a onda incidente simulada. Cabe destacar que a espessura relativa da PHS foi fixada, neste estudo, em  $(e/\varepsilon) = 1/3$  (conforme Equação 4.40).

Tabela 5.20 – Geometria ótima para cada onda e razão de área  $\phi_B$  analisadas ( $(e/\varepsilon) = 1/3$ ).

Onda	$\phi_B$	$(X)_o$ (%)	$(L/\lambda)_o$	$\varphi_{máx}$ (%)
W1	0,01	90,00	0,067	63,61
	0,03	90,00	0,200	42,45
	0,05	90,00	0,333	21,63
	0,08	90,00	0,533	18,63
	0,10	90,00	0,667	16,56
W2	0,01	90,00	0,067	69,28
	0,03	90,00	0,200	41,27
	0,05	90,00	0,333	25,78
	0,08	90,00	0,533	23,28
	0,10	90,00	0,667	19,66
W3	0,01	90,00	0,067	69,80
	0,03	90,00	0,200	45,05
	0,05	90,00	0,333	30,26
	0,08	90,00	0,533	26,73
	0,10	90,00	0,667	22,76
W4	0,01	84,00	0,071	68,29
	0,03	90,00	0,200	48,32
	0,05	90,00	0,333	33,25
	0,08	90,00	0,533	29,34
	0,10	90,00	0,667	24,67

A variação dos resultados de eficiência máxima ( $\varphi_{máx}$ ) do conversor tipo PHS, de acordo com a razão de área  $\phi_B$ , é apresentada na Figura 5.28, onde se pode perceber um claro aumento da eficiência  $\varphi$  à medida que  $\phi_B$  aumenta, independentemente da onda considerada. Comparando-se o melhor resultado obtido ( $\varphi_{máx}$ ) com a razão  $\phi_B = 0,10$  (maior razão de área avaliada) e o melhor resultado da razão  $\phi_B = 0,01$  (menor razão de área avaliada), para cada onda individualmente, percebe-se que o aumento na eficiência  $\varphi$  do dispositivo, em relação à variação de  $\phi_B$ , é de 46,83 %, na média entre as quatro ondas consideradas (ver Tabela 5.20). O que demonstra a relevância da utilização do método DC na avaliação geométrica de WECs.

Na Figura 5.28 é possível observar que, para as razões de área  $\phi_B = 0,05, 0,08$  e  $0,10$ , a eficiência da PHS  $\varphi$  aumenta proporcionalmente com a potência da onda ( $P_W$ ), ou seja, ondas de maior potência ( $P_W$ ) resultam em maior eficiência  $\varphi$  do conversor tipo PHS. Entretanto, para a razão  $\phi_B = 0,03$ , mesmo a onda W4 tendo apresentado um resultado superior ao das demais ondas, entre W1 e W2 observa-se que isso não ocorre, i.e., a onda W1 resulta em uma eficiência  $\varphi_{m\acute{a}x}$  superior a obtida com a onda W2 para uma mesma geometria ótima ( $(X)_o = 90,00\%$ ; Tabela 5.20).

Já quando a razão é  $\phi_B = 0,01$ , observa-se que, exceto a onda W1 que apresenta um resultado de  $\varphi_{m\acute{a}x}$  um pouco menor que as demais ondas, como esperado, as ondas W2, W3 e W4 apresentam resultados de eficiência máxima ( $\varphi_{m\acute{a}x}$ ) bastante próximos, além disso, o melhor resultado ocorre com a onda W3. Nesse caso, os resultados indicam que a potência da onda ( $P_W$ ) não foi determinante para o maior resultado entre as eficiências máximas ( $\varphi_{m\acute{a}x}$ ), mas, sim, as características geométricas atendidas com a razão  $\phi_B = 0,01$ . Nesse sentido, outra observação importante, quanto aos resultados desta razão de área ( $\phi_B = 0,01$ ), é que a geometria ótima obtida com a onda W4 foi diferente da geometria ótima obtida com a incidência das ondas W1, W2 e W3 (ver Tabela 5.20). Este fato, associado à distribuição dos resultados, observada na Figura 5.28, indica que uma redução da razão de área  $\phi_B$ , ou o aumento da potência da onda (considerando uma onda incidente de mesma altura  $\varepsilon$ ), para a faixa de valores do GDL  $X$  analisada, tende a não ocasionar um aumento na eficiência da PHS  $\varphi$  acima do obtido para o conjunto de restrições consideradas neste estudo.

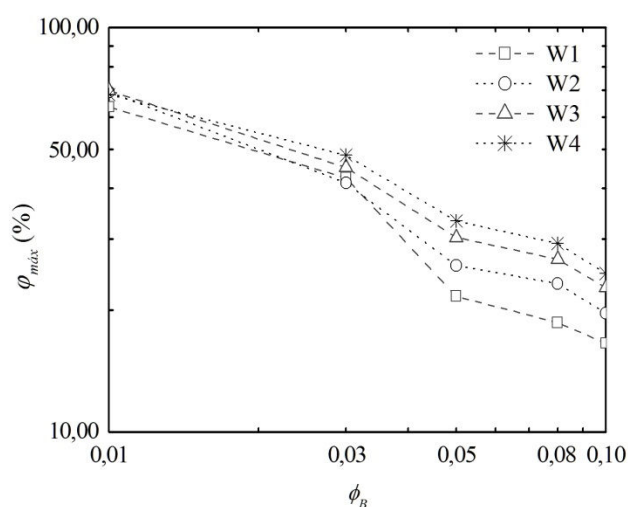


Figura 5.28 – Eficiência teórica máxima  $\varphi_{m\acute{a}x}$  obtida com as ondas estudadas em relação às razões de área  $\phi_B$  avaliadas.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um estudo numérico voltado à análise do funcionamento e à melhoria do desempenho de um WEC tipo PHS utilizando o método DC. Para tanto, foram realizadas simulações numéricas utilizando um modelo 2D, tanto em escala de laboratório como em escala real.

O modelo CFD empregado consistiu em um canal de ondas numérico, onde foram propagadas ondas regulares de 2ª ordem incidindo com o dispositivo tipo PHS situado abaixo da superfície da água. Este modelo foi validado e verificado anteriormente por Seibt, 2014, e não considera a presença da turbina hidráulica sob o dispositivo. A solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com o software Ansys Fluent®, com base no método FVM, usando o modelo VOF para modelagem da interface água-ar.

Foram desenvolvidas duas formulações distintas do método DC, ambas voltadas à otimização da altura da PHS, onde a geometria ótima foi obtida com a associação do método de Busca Exaustiva. Através da abordagem com o método DC foi possível avaliar diversas configurações geométricas submetidas a ondas de diferentes períodos incidindo no conversor.

Com a análise dos resultados dos parâmetros do escoamento ( $|u_{máx}|$  e  $\dot{m}_{RMS}$ ) foi possível apresentar uma descrição das principais características do funcionamento do conversor a partir do comportamento do escoamento abaixo do mesmo. Além disso, possibilitou a verificação da similaridade entre os modelos em ambas as escalas, baseada no critério de similaridade de Froude.

Já a análise da eficiência teórica do conversor e a obtenção de uma mesma altura ótima para o conversor tipo PHS, evidenciou que o objetivo de aplicar o método DC a fim de melhorar o desempenho do dispositivo foi alcançado. O que permitiu realizar a recomendação de uma geometria ótima para o WEC tipo PHS, como apresentado a seguir, juntamente com os principais resultados de cada etapa deste trabalho.

### 6.1 Conclusões: Ensaio Paramétrico

Os resultados apresentados na Seção 5.1 mostraram, para as configurações analisadas, que uma redução de 75,00 % no comprimento da PHS ( $L$ ) proporcionou um acréscimo de até 20,00 % na eficiência teórica  $\varphi$ , dependendo da altura da PHS ( $h$ ) considerada; por sua vez,



um acréscimo de 11,60 % na altura da PHS levou a um ganho de até 18,00 % na eficiência  $\varphi$ , dependendo do comprimento de PHS considerado. Portanto, conclui-se que há um maior ganho de eficiência  $\varphi$  com geometrias cuja configuração combine menores comprimentos relativos, a partir de  $(L/\lambda) < 0,50$ , e maiores alturas relativas, a partir de  $X > 83,33$  %; uma vez que, entre a menor e a maior eficiência  $\varphi$  obtidas com as configurações geométricas analisadas, houve um ganho de 29,34 % na eficiência teórica  $\varphi$  do conversor tipo PHS.

## 6.2 Conclusões: Design Construtal 1ª Formulação

A respeito da 1ª Formulação do método DC, empregada nas Seções 5.2 e 5.3 deste estudo, esta permitiu avaliar o desempenho do conversor tipo PHS para o GDL  $h$  (introduzido como  $X$ ) e a razão de área  $\phi_A = 0,05$ , simulando o modelo tanto em escala de laboratório como em escala real. Nesse sentido, considerando as constantes e restrições impostas, o GDL  $h$  foi analisado na faixa de valores correspondente a  $X = 20,00$  % até  $X = 90,00$  %, tendo a eficiência teórica  $\varphi$  como função objetivo, o que permitiu identificar uma geometria ótima, entre os casos simulados, em ambas as escalas.

A similaridade entre os modelos, em escala de laboratório e em escala real, foi alcançada, o que pode ser demonstrado pela estrita semelhança entre os resultados da velocidade axial  $|-u_{m\acute{a}x}|$  em ambas as escalas (Figura 5.9), em conformidade com o critério adotado. A concordância das curvas dos parâmetros de escoamento analisados ( $|-u_{m\acute{a}x}|$  e  $\dot{m}_{RMS}$ ), nos pontos de mínimo e máximo de ambas as escalas, reforçam essa afirmação. Além disso, obteve-se uma diferença média de 1,15 % entre os resultados da eficiência teórica  $\varphi$  de ambas as escalas.

As análises dos parâmetros  $|-u_{m\acute{a}x}|$  e  $\dot{m}_{RMS}$  permitiram visualizar a semelhança entre os resultados em ambas as escalas, verificando a similaridade dos modelos, além de identificar o efeito da variação da geometria sobre o escoamento alternante sob a PHS. Em relação à velocidade axial  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , a maior magnitude foi obtida com a geometria  $X = 76,67$  % ( $L/\lambda = 0,297$ ), a qual registrou um resultado cerca de 4 vezes superior ao da geometria que teve a menor magnitude em ambas as escalas; o que representa um incremento na velocidade de cerca de 300 %. Em relação à vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$ , o maior valor foi obtido com a geometria  $X = 86,67$  % ( $L/\lambda = 0,263$ ) onde se registrou um resultado cerca de 19 vezes superior ao da geometria que levou ao menor valor em ambas as escalas; representando, portanto, um acréscimo na vazão  $\dot{m}_{RMS}$  em torno de 1800 %.

Por outro lado, a eficiência teórica da PHS  $\varphi$  (função objetivo) alcançou o melhor resultado com a geometria  $(X)_o = 90,00\%$  e  $(L/\lambda)_o = 0,25$ , indicando esta como geometria ótima entre os casos analisados. Dessa forma, a partir do conjunto de constantes e restrições considerado, se obteve uma recomendação teórica sobre a geometria do conversor tipo PHS. O ganho de eficiência teórica  $\varphi$  da geometria ótima, em relação à pior geometria, foi de 35,61% como indicado pelo modelo em escala real, enquanto o modelo em escala de laboratório indicou que este ganho de eficiência  $\varphi$  pode chegar a 41,32%. Sendo assim, os resultados obtidos com esta 1ª Formulação DC indicaram um ganho de desempenho de pelo menos 35,00%, reforçando a relevância do emprego do método DC em estudos de otimização geométrica aplicados a WECs.

### 6.3 Conclusões: Design Construtal 2ª Formulação

Em relação a 2ª Formulação do método DC, utilizada na Seção 5.4 deste estudo, esta possibilitou avaliar o desempenho do conversor tipo PHS para um amplo conjunto de geometrias, onde o GDL selecionado foi a altura relativa da PHS ( $X$ ). Além disso, diferentes valores da razão de área  $\phi_B$  foram avaliados com a simulação do modelo em escala real. Aliado a isso, o estudo contemplou a variação das características da onda incidente no conversor. Dessa forma, uma grande variedade de parâmetros geométricos, entre constantes e restrições impostas nesta formulação, permitiu cobrir um amplo espaço de solução, possibilitando a obtenção de uma recomendação teórica para geometria do conversor tipo PHS, de acordo com as características da onda e da área disponível sob a PHS.

As análises de  $|-u_{m\acute{a}x}|$  e  $\dot{m}_{RMS}$  permitiram corroborar e ampliar observações, feitas nas demais avaliações, a respeito do efeito da variação da geometria sobre o escoamento alternante sob a PHS. Em relação à velocidade axial  $|-u_{m\acute{a}x}|$ , a maior magnitude foi obtida com a geometria de razão de área  $\phi_B = 0,03$ , para diferentes configurações dependendo da onda considerada, sendo que o maior resultado (entre todos) ocorreu com a onda W3 e a geometria  $X = 88,00\%$  ( $L/\lambda = 0,205$ ). Neste caso, a velocidade  $|-u_{m\acute{a}x}|$  registrada foi cerca de 4 vezes superior ao resultado da geometria em que ocorreu a menor magnitude com a onda W3; o que representa um incremento na velocidade de cerca de 300%. Em relação à vazão mássica  $\dot{m}_{RMS}$ , as maiores diferenças entre os resultados, de menor e de maior magnitude, também ocorreram com o conjunto de geometrias atendido pela razão de área  $\phi_B = 0,03$ . Nesse caso, os maiores resultados foram, em média, 25 vezes superiores aos menores resultados obtidos

com as quatro ondas consideradas; uma diferença, portanto, de até 2400 % entre os resultados. O maior resultado de vazão  $\dot{m}_{RMS}$  foi obtido com a razão  $\phi_B = 0,03$  e a geometria  $X = 90,00\%$  ( $L/\lambda = 0,200$ ), com a onda W4 incidindo no dispositivo.

Por outro lado, a eficiência teórica da PHS  $\varphi$  (função objetivo) alcançou o melhor resultado com a geometria  $(X)_o = 90,00\%$  e  $(L/\lambda)_o = 0,067$ , para a maior parte das razões de área  $\phi_B$  e ondas analisadas, permitindo identificar esta como a geometria ótima entre os casos analisados. Portanto, a partir do conjunto de constantes e restrições considerados, obteve-se uma recomendação teórica sobre a geometria do conversor tipo PHS. O ganho de eficiência  $\varphi$  proporcionado pela geometria ótima, em relação à pior geometria, foi de 63,39 %, em média, entre os resultados das quatro ondas com a razão de área  $\phi_B = 0,01$ ; reforçando a relevância do emprego do método DC em estudos de otimização geométrica de WECs.

#### 6.4 Geometria Ótima e Considerações Finais

A principal diferença entre as formulações, utilizadas neste trabalho, foi o destacamento da espessura da PHS ( $e$ ), de forma a torná-la uma constante do problema. Isto permitiu que a 2ª Formulação DC cobrisse um espaço de solução mais amplo, ao mesmo tempo em que manteve a PHS com uma forma retangular alongada e de espessura inferior a altura de onda ( $\varepsilon$ ). Tal aspecto, no contexto da 1ª Formulação DC, ficaria comprometido à medida que a razão de área  $\phi_A$  fosse modificada, assumindo valores diferentes de 0,05.

Por fim, de acordo com a 1ª Formulação DC proposta, a geometria recomendada para o conversor tipo PHS seria: altura  $h = 0,90d$ , comprimento  $L = 0,25\lambda$  e espessura  $e = 0,46\varepsilon$ ; ou, de acordo com a 2ª Formulação DC proposta, a seguinte recomendação: altura  $h = 0,90d$  e comprimento  $L = 0,067\lambda$ , para uma espessura  $e = 0,333\varepsilon$ .

Uma vez que ambas as formulações foram voltadas à otimização do mesmo GDL ( $h$  ou  $X$ ), apesar das diferenças relacionadas à abordagem da espessura da PHS, observa-se que os resultados indicaram o mesmo valor ótimo para a altura relativa  $X$ , ou seja, a função objetivo indicou o mesmo resultado para o GDL otimizado.

Dessa forma, através da utilização do método DC, esse trabalho contribui significativamente para o projeto de dispositivos conversores de energia das ondas do mar do tipo PHS. No Apêndice F – Produção Acadêmica – consta a relação de artigos produzidos durante o doutorado, cabendo destacar que alguns resultados deste trabalho estão sendo preparados para novas publicações.

## 6.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

A fim de contribuir para a continuidade deste trabalho e futuras pesquisas relacionadas ao conversor tipo PHS, visto que outros aspectos podem ser verificados, são sugeridas as seguintes propostas:

- considerar a otimização de outros GDLs, como a espessura relativa da PHS ( $e/\epsilon$ ) ou a razão de aspecto ( $e/L$ ), por exemplo;
- considerar variações da altura de onda ( $\epsilon$ ) e da profundidade da água ( $d$ );
- aperfeiçoar o modelo numérico com o emprego de zonas de absorção da onda (praia numérica);
- considerar a incidência de um espectro de ondas no conversor tipo PHS;
- considerar a perda de carga equivalente a uma turbina hidráulica sob a PHS;
- implementar um modelo 3D, possibilitando a avaliação da largura da PHS ( $b_p$ );
- implementar um modelo para avaliação da turbulência no escoamento sob a PHS;
- implementar uma abordagem multiobjetivo a fim de otimizar a geometria do dispositivo de PHS, considerando sua eficiência como WEC e parâmetros relacionados ao seu funcionamento como quebra-mar (coeficientes de transmissão e reflexão).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aghili, M., Ghadimi, P., Maghrebi, Y.F. e Nowruzi, H. Simulating the interaction of solitary wave and submerged horizontal plate using SPH method. **International Journal of Physical Research**, vol. 2, n. 2, p. 16-26, 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. ANEEL, Brasília - DF, 3ª Edição, 2008.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório ANEEL 2012**. ANEEL, Brasília - DF, 2013.

Astariz, S. e Iglesias, G. Co-located wind and wave energy farms: Uniformly distributed arrays. **Energy**, vol. 113, p. 497-508, 2016.

Astariz, S., Perez-Collazo, C., Abanades, J. e Iglesias, G. Towards the optimal design of a co-located wind-wave farm. **Energy**, vol. 84, p. 15-24, 2015.

AW-Energy – AW-Energy Ltd.. **WaveRoller®**. <http://aw-energy.com/about-waveroller/environment/>, 2016, Acesso em: 21-03-2017.

Barreiro, T.G. **Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica), Universidade Nova de Lisboa, 2009.

Barreiro, T.G., Didier, E., Gil, L. e Alves, M. **Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interação entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas**. In: Actas da III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE – Bragança 09). Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional, Instituto Politécnico, Bragança, Portugal, pp. 1-10, 2009.

Bejan, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 40, n. 4, p. 799-816, 1997.

Bejan, A. Evolution in thermodynamics. **Applied Physics Reviews**, vol. 4, n. 1, p. 011305-1 - 011305-19, 2017.

Bejan, A. **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

Bejan, A. **The Physics of Life: The Evolution of Everything**. St. Martins Press, New York, 2016.

Bejan, A., Charles, J.D. e Lorente, S. The evolution of airplanes. **Journal of Applied Physics**, vol. 116, n. 4, p. 044901-1 - 044901-6, 2014.

Bejan, A., Jones, E.C. e Charles, J.D. The evolution of speed in athletics: why the fastest runners are black and swimmers white. **International Journal of Design & Nature and Ecodynamics**, vol. 5, n. 3, p. 199-211, 2010.

Bejan, A. e Lorente, S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. **Journal of Applied Physics**, vol. 113, n. 15, p. 151301-1 - 151301-20, 2013.

Bejan, A. e Lorente, S. **Design with Constructal Theory**. Wiley, Hoboken, 2008.

Bejan, A. e Lorente, S. The constructal law of design and evolution in nature. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, vol. 365, n. 1545, p. 1335-1347, 2010.

Bejan, A. e Marden, J.H. Constructing animal locomotion from new thermodynamics theory: Although running, flying and swimming appear to be distinctly different types of movement, they may have underlying physics in common. **American Scientist**, vol. 94, n. 4, p. 342-349, 2006a.

Bejan, A. e Marden, J.H. Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying. **Journal of Experimental Biology**, vol. 209, n. 2, p. 238-248, 2006b.

Bejan, A., Tsatsaronis, G. e Moran, M.J. **Thermal design and optimization**. John Wiley & Sons, New York, 1996.

Bejan, A. e Zane, J.P. **Design in Nature: How The Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization**. Doubleday, New York, 2012.

Biserni, C., Dalpiaz, F.L., Fagundes, T.M. e Rocha, L.A.O. Constructal design of T-shaped morphing fins coupled with a trapezoidal basement: A numerical investigation by means of exhaustive search and genetic algorithm. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 109, p. 73-81, 2017.

Brossard, J. e Chagdali, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. **Coastal Engineering**, vol. 42, n. 4, p. 277-290, 2001.

Brossard, J., Perret, G., Blonce, L. e Diedhiou, A. Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume. **Coastal Engineering**, vol. 56, n. 1, p. 11-22, 2009.

Brum, R.S. **Teoria Construtal e Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Solo-Ar**. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Brum, R.S., Rodrigues, M.K., Ramalho, J.V.A., Rocha, L.A.O., Isoldi, L.A. e Dos Santos, E.D. On the Design of Two EAHE Assemblies with Four Ducts. **Defect and Diffusion Forum**, vol. 372, p. 31-39, 2016.

Bulkin, B.J. **The Future of Today's Energy Sources**. In: Hester, R.E.; Harrison, R.M. (Eds.) *Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Resources, Issues in Environmental Science and Technology*, vol. 19. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 1-18, 2003.

Burke, E.K. e Kendall, G. **Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques**. Springer Science & Business Media, London, 2005.

Caballero, F., Sauma, E. e Yanine, F. Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)-wind energy system without energy storage for an Easter Island's block. **Energy**, vol. 61, p. 248-261, 2013.

Calabrese, M., Powell, K., Marrone, M. e Buccino, M. **Submerged horizontal plate for coastal retreating control: the case of Polignano a Mare (Italy)**. In: Proceedings of Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering. PIANC, Palermo, Italy, pp. 280-290, 2008.

Callaway, E. To Catch a Wave. **Nature**, vol. 450, n. 7167, p. 156-159, 2007.

Carmigniani, R., Leroy, A. e Violeau, D. A simple SPH model of a free surface water wave pump: waves above a submerged plate. **Coastal Engineering Journal**, vol. 61, n. 1, p. 96-108, 2019.

Carneiro, M.L. **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

Carter, R.W. **Wave energy converters and a submerged horizontal plate**. Dissertação de Mestrado (Master Thesis), University of Hawai'i, 2005.

Carter, R.W. e Ertekin, R.C. Focusing of wave-induced flow through a submerged disk with a tubular opening. **Applied Ocean Research**, vol. 47, p. 110-124, 2014.

Carter, R.W., Ertekin, R.C. e Lin, P. **On the reverse flow beneath a submerged plate due to wave action**. In: Proceedings of 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2006). ASME, Hamburg, Germany, pp. 595-602, 2006.

Charles, J.D. e Bejan, A. The evolution of speed, size and shape in modern athletics. **Journal of Experimental Biology**, vol. 212, n. 15, p. 2419-2425, 2009.

Chen, K.H., Chen, J.T., Chou, C.R. e Yueh, C.Y. Dual boundary element analysis of oblique incident wave passing a thin submerged breakwater. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, vol. 26, n. 10, p. 917-928, 2002.

Chen, X., Chen, Q., Zhan, J. e Liu, D. Numerical simulations of wave propagation over a vegetated platform. **Coastal Engineering**, vol. 110, p. 64-75, 2016.

Cheng, Y., Ji, C., Ma, Z., Zhai, G. e Oleg, G. Numerical and experimental investigation of nonlinear focused waves-current interaction with a submerged plate. **Ocean Engineering**, vol. 135, p. 11-27, 2017.

Cheong, H.-F. e Patarapanich, M. Reflection and transmission of random waves by a horizontal double-plate breakwater. **Coastal Engineering**, vol. 18, n. 1-2, p. 63-82, 1992.

Cheong, H.-F., Shankar, N.J. e Nallayarasu, S. Analysis of submerged platform breakwater by eigenfunction expansion method. **Ocean Engineering**, vol. 23, n. 8, p. 649-666, 1996.

Cho, I.H. e Kim, M.H. Transmission of oblique incident waves by a submerged horizontal porous plate. **Ocean Engineering**, vol. 61, p. 56-65, 2013.

Chozas, J.F. e Soerensen, H.C. **State of the Art of Wave Energy in Spain**. In: 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). IEEE, Montreal, Canada, pp. 1-6, 2009.

Contestabile, P., Ferrante, V. e Vicinanza, D. Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina (Brazil). **Energies**, vol. 8, n. 12, p. 14219-14243, 2015.

Contestabile, P., Iuppa, C., Di Lauro, E., Cavallaro, L., Andersen, T. L. e Vicinanza, D. Wave loadings acting on innovative rubble mound breakwater for overtopping wave energy conversion. **Coastal Engineering**, vol. 122, p. 60-74, 2017.

Cruz, J. (Ed.) **Ocean wave energy: current status and future perspectives**. Springer-Verlag, Berlin, 2008.

Cruz, J.M.B.P. e Sarmiento, A.J.N.A. **Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais**. Instituto do Ambiente, Portugal, 2004.

Da Fonseca, R.J.C., Razera, A.L., Coelho, F.R., Seibt, F.M., Ortiz, P.R.B., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. **Design Construtal Aplicado ao Escoamento em uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade com Convecção Mista**. In: Anais do XIX Encontro Nacional de Modelagem Computacional – XIX ENMC e VII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais – VII ECTM. UERJ e UFPB, João Pessoa, Brasil: pp. 700-709, 2016.

Dalla Vecchia, L.C., Scharlau, C.C., D'Aquino, C.A., Antunes, V. e Pfitscher, L.L. **Modeling of wave energy absorption: A case study for a fishing pier in Brazil**. In: 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, Stoke on Trent, UK, pp. 1-6, 2015.

De Bortoli, A.L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

De Brito, M.G. **Simulação Numérica de Tomadas de Água**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

De Lima, Y.T.B. **Aplicação do método Design Construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal ou semicircular e estudo da influência da turbina no formato elíptico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Dean, R.G. e Dalrymple, R.A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. In: Liu, P. (Ed.) Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1991.



Dick, T.M. e Brebner, A. **Solid and Permeable Submerged Breakwaters**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 11th Conference on Coastal Engineering, London, United Kingdom, 1968), ASCE, vol. 1, n. 11, pp. 1141-1158, 1968.

Didier, E., Teixeira, P.R.F. e Neves, M.G. **Desenvolvimento de um Tanque de Ondas Numérico RANS-VOF 3D para Aplicações em Engenharia Costeira e Marítima**. In: 9<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, PIANC, LNEC, Portugal, pp. 1-17, 2017.

Dizadji, N. e Sajadian, S.E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, vol. 36, n. 5, p. 2360-2366, 2011.

Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A., Souza, J.A., Goulart, M.M., Rodrigues, M.K., Seibt, F.M., Souza, R.V. e Rocha, L.A.O. **Constructal Design of a Rectangular Fin Intruded Into Forced Convective Lid-Driven Cavity Flows**. In: Bejan, A.; Lorente, S.; Zhang, H. (Eds.) Proceedings of Constructal Law Conference (CLC 2013). Nanjing, China, pp. 126-134, 2013.

Drouin, A. e Ouellet, Y. **Experimental study of immersed plates used as breakwaters**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 21st Conference on Coastal Engineering, Torremolinos, Spain, 1988), ASCE, vol. 1, n. 21, pp. 2272-2283, 1988.

Estrada, E.S.D. **Otimização Geométrica de Cavidades e Caminhos de Alta Condutividade Empregando Design Construtal e Algoritmos Genéticos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Fagundes, T.M. **Design construtal de caminhos de condução assimétricos trifurcados**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Fagundes, T.M., Lorenzini, G., Estrada, E.S.D., Isoldi, L.A., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O. e Da Silva Neto, A.J. Constructal Design of Conductive Asymmetric Tri-Forked Pathways. **Journal of Engineering Thermophysics**, vol. 28, n. 1, p. 26-42, 2019.

Falcão, A.F.O. Wave energy utilization: A review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

Falcão, A.F.O. e Henriques, J.C.C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, vol. 85, p. 1391-1424, 2016.

Falnes, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**, vol. 20, n. 4, p. 185-201, 2007.

Farias, M.F. **Determinação da Influência de Parâmetros de Processo de Forjamento a Quente Utilizando DOE (Projeto de Experimentos)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

Fortuna, A.O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. Edusp, São Paulo, 2000.

Fusco, F., Nolan, G. e Ringwood, J.V. Variability reduction through optimal combination of wind/wave resources—An Irish case study. **Energy**, vol. 35, n. 1, p. 314-325, 2010.

Gadelho, J.F.M., Karmakar, D., Lavrov, A. e Soares, C.G. **CFD analysis of a rigid bottom fixed submerged plates**. In: Guedes Soares (Ed.) *Renewable Energies Offshore*. Taylor & Francis Group, London, pp. 531-537, 2015.

Gomes, M.N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna D'água Oscilante para a Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

Gomes, M.N. **Modelagem Computacional e Aplicação de Constructal Design para Análise Numérica da Geometria de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Gomes, M.N., Lara, M.F.E., Iahnke, S.L.P., Machado, B.N., Goulart, M.M., Seibt, F.M., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. Numerical approach of the main physical operational principle of several wave energy converters: oscillating water column, overtopping and submerged plate. **Defect and Diffusion Forum**, vol. 362, p. 115-171, 2015.

Gomes, M.N., Seibt, F.M., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Numerical analysis of an oscillating water column converter considering a physical constraint in the chimney outlet. **Marine Systems & Ocean Technology**, vol. 9, n. 2, p. 85-93, 2014.

Gomes, R.P.F., Lopes, M.F.P., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C. e Falcão, A.F.O. The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves. **Ocean Engineering**, vol. 96, p. 86-99, 2015.

Gonzales, G.V. **Otimização Geométrica da Forma e Estrutura em um Problema de Transferência de Calor Aplicando a Teoria Constructal e o *Simulated Annealing***. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2015.

Goulart, M.M. **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

Goulart, M.M., Martins, J.C., Junior, I.C.A., Gomes, M.N., Souza, J.A., Rocha, L.A.O., Isoldi, L.A. e Dos Santos, E.D. Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. **Marine Systems & Ocean Technology**, vol. 10, n. 2, p. 120-129, 2015.

Graw, K.-U. About the development of wave energy breakwaters. **LACER – Leipzig Annual Civil Engineering Report N° 1**, Universitat Leipzig, Germany, 1996.

Graw, K.-U. **Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?** In: *Proceedings of XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Napoli, Italia, pp. 1-9, 1994.

Graw, K.-U. **Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter**. In: *Proceedings of European Wave Energy Symposium*. Edinburgh, UK, pp. 379-384, 1993a.

Graw, K.-U. **The Submerged Plate as a Wave Filter: The Stability of the Pulsating Flow Phenomenon**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 23rd Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, 1992), ASCE, vol. 1, n. 23, pp. 1153-1160, 1992.

Graw, K.-U. **The submerged plate wave energy converter: A new type of wave energy device**. In: Proceedings of International Symposium on Ocean Energy Development (ODEC). Muroran, Hokkaido, Japan, pp. 307-310, 1993b.

Graw, K.-U. **Vorrichtung zur Erzeugung von Elektrischer Energie aus Wasserwellen**. PINA (Patent- und Innovationsagentur des Landes Nordrhein-Westfalen), Deutsches Patentamt, Patent Nr. P 43 24 110, 1995a.

Graw, K.-U. **Wave energy: need for protection - possible uses**. In: Information Booklet of the University of Leipzig at Expo'98: The Oceans, a Heritage for the Future. Lisbon, Portugal, pp. 1-16, 1998.

Graw, K.-U. **Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse**. Bericht Nr. 8, Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft. Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Berlin, 1995b.

Grimmler, J.A.M. **Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de coluna de água oscilante: simulação numérica e estudo geométrico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2013.

Gunn, K. e Stock-Williams, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, vol. 44, p. 296-304, 2012.

Hayatdavoodi, M. e Ertekin, R.C. **Nonlinear forces on a submerged, horizontal plate: The GN theory**. In: Proceedings of The 27th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Copenhagen, Denmark, pp. 73-76, 2012.

Hayatdavoodi, M. e Ertekin, R.C. Wave forces on a submerged horizontal plate-Part I: Theory and modelling. **Journal of Fluids and Structures**, vol. 54, p. 566-579, 2015a.

Hayatdavoodi, M. e Ertekin, R.C. Wave forces on a submerged horizontal plate-Part II: Solitary and cnoidal waves. **Journal of Fluids and Structures**, vol. 54, p. 580-596, 2015b.

Hayatdavoodi, M., Wagner, J.J., Wagner, J.R. e Ertekin, R.C. **Vertical Oscillation of a Submerged Horizontal Plate**. In: Proceedings of The 31st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Plymouth, Michigan, USA, pp. 53-56, 2016.

He, M., Gao, X., Xu, W., Ren, B. e Wang, H. Potential application of submerged horizontal plate as a wave energy breakwater: A 2D study using the WCSPH method. **Ocean Engineering**, vol. 185, p. 27-46, 2019.

Helbig, D. **Estudo numérico de placas finas de aço com perfuração, submetidas à flambagem elástica e elasto-plástica, aplicando-se o método Design Construtal**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Hildebrandt, A. e Schlurmann, T. **Velocity Field Under Propagating Waves Over a Submerged Horizontal Plate and Induced Forces**. In: Proceedings of Fourth Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2008). Darmstadt, Germany, pp. 421-425, 2008.

Hirt, C.W. e Nichols, B.D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.

Holland, J.H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. MIT Press, Massachusetts, 1992.

Horko, M. **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter**. Dissertação de Mestrado (Master Thesis), The University of Western Australia, 2007.

Hsu, H.-H. e Wu, Y.-C. Scattering of water wave by a submerged horizontal plate and a submerged permeable breakwater. **Ocean Engineering**, vol. 26, n. 4, p. 325-341, 1998.

Hu, H., Wang, K.-H. e Williams, A.N. Wave motion over a breakwater system of a horizontal plate and a vertical porous wall. **Ocean Engineering**, vol. 29, n. 4, p. 373-386, 2002.

Hu, H.H. e Wang, K.-H. Damping effect on waves propagating past a submerged horizontal plate and a vertical porous wall. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 131, n. 4, p. 427-437, 2005.

Hughes, S.A. **Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering**. In: Liu, P. (Ed.) Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 7. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1993.

Iahnke, S.L.P. **Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2014**. OECD/IEA, Paris, 2014.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook Special Report: Energy and Air Pollution**. OECD/IEA, Paris, 2016.

Ijima, T., Ozaki, S., Eguchi, Y. e Kobayashi, A. **Breakwater and Quay Wall by Horizontal Plates**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings 12th Coastal Engineers Conference, Washington, D.C., 1970), ASCE, vol. 1, n. 12, pp. 1537-1556, 1970.

Isaacson, M. e Cheung, K.F. Second order wave diffraction around two-dimensional bodies by time-domain method. **Applied Ocean Research**, vol. 13, n. 4, p. 175-186, 1991.

Isaacson, M. e Cheung, K.F. Time-domain solution for wave—current interactions with a two-dimensional body. **Applied Ocean Research**, vol. 15, n. 1, p. 39-52, 1993.

Isoldi, L.A., Real, M.V., Correia, A.L.G., Vaz, J., Dos Santos, E.D. e Rocha, L.A.O. **Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or Buckling**. In: Rocha, L.; Lorente, S.; Bejan, A. (Eds.) *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*. Springer, New York, pp. 195-217, 2013.

Jin, H., Liu, Y., He, S.-Y. e Li, H.-J. **Numerical study on the wave dissipating performance of a submerged horizontal plate breakwater using OpenFOAM**. In: *Proceedings of The Eleventh ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS-2014)*. ISOPE, Shanghai, China, ISOPE-P-14-065, 2014.

Kamphuis, J.W. **Introduction to Coastal Engineering and Management**. In: Liu, P. (Ed.) *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 30. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2nd Ed., 2010.

Kharati-Koopae, M. e Kiali-Kooshkghazi, M. Assessment of Plate-Length Effect on the Performance of the Horizontal Plate Wave Energy Converter. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 145, n. 1, p. 04018037-1 - 04018037-14, 2019.

Kinsman, B. **Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface**. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1965.

Kojima, H., Ijima, T. e Yoshida, A. **Decomposition and Interception of Long Waves by a Submerged Horizontal Plate**. In: *Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 22nd Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands, 1990)*, ASCE, vol. 1, n. 22, pp. 1228-1241, 1990.

Kojima, H., Yoshida, A. e Nakamura, T. **Linear and nonlinear wave forces exerted on a submerged horizontal plate**. In: *Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 24th Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, 1994)*, ASCE, vol. 1, n. 24, pp. 1312-1326, 1994.

Korde, U.A. e Ertekin, R.C. **An active-controlled submerged wave energy device with energy focusing**. In: *Proceedings of 4th International Conference on Ocean Energy (ICOE2012)*. Dublin, Ireland, pp. 1-7, 2012.

Lalli, F., Bruschi, A., Liberti, L., Pesarino, V. e Bassanini, P. Analysis of linear and nonlinear features of a flat plate breakwater with the boundary element method. **Journal of Fluids and Structures**, vol. 32, p. 146-158, 2012.

Lara, M.F.E. **Estudo numérico bidimensional com aplicação de constructal design para otimização da geometria e da profundidade de submersão de um dispositivo conversor de ondas do mar tipo coluna d'água oscilante**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Le Méhauté, B. **An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**. Springer-Verlag Inc., New York, 1976.

Lebon, B., Perret, G., Coëtmellec, S., Godard, G., Gréhan, G., Lebrun, D. e Brossard, J. A digital holography set-up for 3D vortex flow dynamics. **Experiments in Fluids**, vol. 57, n. 6, art. 103, p. 1-11, 2016.

Lengright, J., Graw, K.-U. e Kronewetter, H. **Stereoscopic PIV adapted to gravity wave analysis**. In: Proceedings of 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisboa, Portugal, pp. 14.4.1-14.4.12, 2000.

Letzow, M. **Avaliação Geométrica da Câmara de um Dispositivo OWC Onshore Inserido em um Tanque com Rampa Triangular em Escala Real Empregando Constructal Design**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

Lin, H.X., Ning, D.Z., Zou, Q.P., Teng, B. e Chen, L.F. Current effects on nonlinear wave scattering by a submerged plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 140, n. 5, p. 04014016-1 - 04014016-12, 2014.

Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F. e Didier, E. Regular and Irregular Wave Propagation Analysis in a Flume with Numerical Beach Using a Navier-Stokes Based Model. **Defect and Diffusion Forum**, vol. 372, p. 81-90, 2016.

Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F. e Fortes, C.J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, vol. 121, p. 176-184, 2017.

Liu, C., Huang, Z. e Tan, S.K. Nonlinear scattering of non-breaking waves by a submerged horizontal plate: Experiments and Simulations. **Ocean Engineering**, vol. 36, n. 17-18, p. 1332-1345, 2009.

Liu, P.L.-F. e Iskandarani, M. Scattering of short-wave groups by submerged horizontal plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 117, n. 3, p. 235-246, 1991.

Liu, Y. e Li, H.-J. Wave scattering by dual submerged horizontal porous plates: Further results. **Ocean Engineering**, vol. 81, p. 158-163, 2014.

Liu, Y., Li, H.-J. e Li, Y.-C. A new analytical solution for wave scattering by a submerged horizontal porous plate with finite thickness. **Ocean Engineering**, vol. 42, p. 83-92, 2012.

Liu, Y., Li, Y.-C. e Teng, B. Wave interaction with a perforated wall breakwater with a submerged horizontal porous plate. **Ocean Engineering**, vol. 34, n. 17, p. 2364-2373, 2007.

Liu, Y., Li, Y.-C. e Teng, B. Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates. **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, vol. 21, n. 4, p. 453-462, 2009.

Lo, H.-Y. e Liu, P.L.-F. Solitary waves incident on a submerged horizontal plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 140, n. 3, p. 04014009-1 - 04014009-17, 2014.

Lopes, N.R. **Modelagem computacional e otimização geométrica de um conversor do tipo coluna de água oscilante**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2012.

Lorenzini, G., Biserni, C., Isoldi, L.A., Dos Santos, E.D. e Rocha, L.A.O. Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of Y-Shaped Cavities Embedded in a

Conducting Medium. **Journal of Electronic Packaging**, vol. 133, n. 4, p. 041008-1 - 041008-8, 2011.

Lorenzini, G., Lara, M.F.E., Rocha, L.A.O., Gomes, M.N., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Constructal design applied to the study of the geometry and submergence of an oscillating water column. **International Journal of Heat and Technology**, vol. 33, n. 2, p. 31-38, 2015.

Lund, H. Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply. **Renewable Energy**, vol. 31, n. 4, p. 503-515, 2006.

Machado, B.N. **Estudo numérico tridimensional de um dispositivo de galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica aplicando o método Constructal Design**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Machado, B.N. **Modelagem computacional e otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2012.

Maliska, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

Margheritini, L., Hansen, A.M. e Frigaard, P. A method for EIA scoping of wave energy converters – based on classification of the used technology. **Environmental Impact Assessment Review**, vol. 32, n. 1, p. 33-44, 2012.

Margheritini, L., Vicinanza, D. e Frigaard, P. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, vol. 34, n. 5, p. 1371-1380, 2009.

Martins, J.C. **Design construtal de um dispositivo de galgamento onshore em escala real para diferentes áreas de construção e ondas monocromáticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2016.

McCormick, M.E. **Ocean Wave Energy Conversion**. Dover Publications, Inc., New York, 1981.

McIver, M. Diffraction of water waves by a moored, horizontal, flat plate. **Journal of Engineering Mathematics**, vol. 19, n. 4, p. 297-319, 1985.

Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H. e Teller, E. Equation of state calculations by fast computing machines. **The Journal of Chemical Physics**, vol. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 6th Ed., 2005.

Murakami, H., Itoh, S., Hosoi, Y. e Sawamura, Y. **Wave induced flow around submerged sloping plates**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 24th Conference on Coastal Engineering, Kobe, Japan, 1994), ASCE, vol. 1, n. 24, pp. 1454-1468, 1994.

Nallayarasu, S., Cheong, H.F. e Shankar, N.J. Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments. **Ocean Engineering**, vol. 22, n. 1, p. 77-86, 1995.

Neelamani, S. e Rajendran, R. Wave interaction with 'T'-type breakwaters. **Ocean Engineering**, vol. 29, n. 2, p. 151-175, 2002a.

Neelamani, S. e Rajendran, R. Wave interaction with '⊥'-type breakwaters. **Ocean Engineering**, vol. 29, n. 5, p. 561-589, 2002b.

Neelamani, S. e Reddy, M.S. Wave transmission and reflection characteristics of a rigid surface and submerged horizontal plate. **Ocean Engineering**, vol. 19, n. 4, p. 327-341, 1992.

Neelamani, S. e Vedagiri, M. Wave interaction with partially immersed twin vertical barriers. **Ocean Engineering**, vol. 29, n. 2, p. 215-238, 2002.

Ning, D., Li, Q., Lin, H. e Teng, B. Numerical Investigation of Nonlinear Wave Scattering by a Horizontal Submerged Plate. **Procedia Engineering**, vol. 116, p. 237-244, 2015.

Ning, D.-Z., Zhao, X.-L., Zhao, M., Hann, M. e Kang, H.-G. Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater. **Applied Ocean Research**, vol. 65, p. 102-111, 2017.

Oleinik, P.H., Marques, W.C. e Kirinus, E.P. Evaluation of the Seasonal Pattern of Wind-Driven Waves on the South-Southeastern Brazilian Shelf. **Defect and Diffusion Forum**, vol. 370, p. 141-151, 2016.

Orer, G. e Ozdamar, A. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter. **Renewable Energy**, vol. 32, n. 8, p. 1317-1327, 2007.

Patankar, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. McGraw Hill, New York, 1980.

Patarapanich, M. Forces and moment on a horizontal plate due to wave scattering. **Coastal Engineering**, vol. 8, n. 3, p. 279-301, 1984a.

Patarapanich, M. Maximum and zero reflection from submerged plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 110, n. 2, p. 171-181, 1984b.

Patarapanich, M. e Cheong, H.-F. Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate. **Coastal Engineering**, vol. 13, n. 2, p. 161-182, 1989.

Pelc, R. e Fujita, R.M. Renewable energy from the ocean. **Marine Policy**, vol. 26, n. 6, p. 471-479, 2002.

Pinon, G., Perret, G., Cao, L., Poupardin, A., Brossard, J. e Rivoalen, E. Vortex kinematics around a submerged plate under water waves. Part II: Numerical computations. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, vol. 65, p. 368-383, 2016.



Plamer, C.B. **Modelagem computacional e método constructal design aplicados a um conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante (CAO) analisando a influência em seu desempenho da variação da razão entre o volume de entrada e o volume total da câmara hidropneumática**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2016.

Poupardin, A., Perret, G., Pinon, G., Bourneton, N., Rivoalen, E. e Brossard, J. Vortex kinematic around a submerged plate under water waves. Part I: Experimental analysis. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, vol. 34, p. 47-55, 2012.

Ramalhais, R.S. **Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

Rao, S., Shirlal, K.G., Varghese, R.V. e Govindaraja, K.R. Physical model studies on wave transmission of a submerged inclined plate breakwater. **Ocean Engineering**, vol. 36, n. 15, p. 1199-1207, 2009a.

Rao, S., Shirlal, K.G., Varghese, R.V. e Prashanth, S. Experimental Investigation of Hydraulic Performance of a Horizontal Plate Breakwater. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, vol. 2, n. 5, p. 424-432, 2009b.

Razera, A.L. **Estudo numérico da maximização da densidade de transferência de calor do escoamento laminar sobre cilindros de seção transversal elíptica utilizando o método Design Construtal**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Razera, A.L., Da Fonseca, R.J.C., Isoldi, L.A., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O. e Biserni, C. Constructal design of a semi-elliptical fin inserted in a lid-driven square cavity with mixed convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 126, p. 81-94, 2018.

Razera, A.L., Fagundes, T.M., Seibt, F.M., Da Fonseca, R.J.C., Varela, D.J.C., Ortiz, P.R.B., Coelho, F.R., Lessa, L.Z., Schmidt, A., Furtado, G.M., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. Constructal Design of a Triangular Fin Inserted in a Cavity with Mixed Convection Lid-Driven Flow. **Defect and Diffusion Forum**, vol. 372, p. 188-201, 2016.

Renzi, E. e Dias, F. Resonant behaviour of an oscillating wave energy converter in a channel. **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 701, p. 482-510, 2012.

Rey, V., Capobianco, R. e Dulou, C. Wave scattering by a submerged plate in presence of a steady uniform current. **Coastal Engineering**, vol. 47, n. 1, p. 27-34, 2002.

Rey, V. e Touboul, J. Forces and moment on a horizontal plate due to regular and irregular waves in the presence of current. **Applied Ocean Research**, vol. 33, n. 2, p. 88-99, 2011.

Rey, V., Touboul, J. e Sous, D. Effect of a submerged plate on the near-bed dynamics under incoming waves in deep water conditions. **Applied Ocean Research**, vol. 53, p. 67-74, 2015.

Rocha, L.A.O., Lorente, S. e Bejan, A. **Constructal Theory in Heat Transfer**. In: Kulacki, F.A. (Ed.) *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Springer, Cham, pp. 329-360, 2017.

Rocha, L.A.O., Lorente, S. e Bejan, A. Tree-Shaped Vascular Wall Designs for Localized Intense Cooling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 52, n. 19, p. 4535-4544, 2009.

Schlichting, H. e Gersten, K. **Boundary-layer theory**. Springer, Berlin, 2000.

Seibt, F.M. **Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

Seibt, F.M., Couto, E.C., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A., Rocha, L.A.O. e Teixeira, P.R.F. Numerical Study on the Effect of Submerged Depth on the Horizontal Plate Wave Energy Converter. **China Ocean Engineering**, vol. 28, n. 5, p. 687-700, 2014a.

Seibt, F.M., Couto, E.C., Teixeira, P.R.F., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Análise numérica de uma placa submersa como quebra mar e conversor de energia das ondas. **VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, vol. 22, n. 2, p. 5-17, 2012a.

Seibt, F.M., Couto, E.C., Teixeira, P.R.F., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. **Estudo Numérico de uma Placa Submersa Vista como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas**. In: Anais do V Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO). PPGeo-FURG, Rio Grande, Brasil, pp. 108-115, 2012b.

Seibt, F.M., Couto, E.C., Teixeira, P.R.F., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. **Computational Modeling of the Submerged Plate Wave Energy Converter**. In: Proceedings of 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), vol. 1. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1-7, 2012c.

Seibt, F.M., Couto, E.C., Teixeira, P.R.F., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O. e Isoldi, L.A. Numerical Analysis of the Fluid-Dynamic Behavior of a Submerged Plate Wave Energy Converter. **Computational Thermal Sciences: An International Journal**, vol. 6, n. 6, p. 525-534, 2014b.

Seibt, F.M., De Camargo, F.V., Dos Santos, E.D., Gomes, M.N., Rocha, L.A.O., Isoldi, L.A. e Fragassa, C. Numerical Evaluation on the Efficiency of the Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter. **FME Transactions**, vol. 47, p. 543-551, 2019.

Seibt, F.M., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. Modelagem Computacional do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real e Análise de Similaridade com Modelo em Escala de Laboratório. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 6, n. 3, p. 397-418, 2017a.

Seibt, F.M., Dos Santos, E.D., Isoldi, L.A. e Rocha, L.A.O. **Simulação Numérica do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real e Comparação por Similaridade com Modelo em Escala de Laboratório**. In: Isoldi, L.A.; Ramos, A.P.; Troina, G.S.; Lima, J.P.S.; Teixeira, P.R.F.; Souza, J.A.; Gomes, M.N.;

Dos Santos, E.D. (Eds.) Anais do VII SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. PPGeo-FURG, Rio Grande, Brasil, pp. 425-434, 2016a.

Seibt, F.M., Isoldi, L.A., Dos Santos, E.D. e Rocha, L.A.O. **Study of the Effect of the Relative Height on the Efficiency of a Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter Applying Constructal Design**. In: Faria, P.O.; Lopez, R.H.; Miguel, L.F.F.; Gomes, W.J.S.; Noronha, M. (Eds.) Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE. ABMEC, Florianópolis, Brazil, pp. 1-17 (CILAMCE2017-0862), 2017b.

Seibt, F.M., Isoldi, L.A., Teixeira, P.R.F., Dos Santos, E.D. e Rocha, L.A.O. Avaliação Numérica do Efeito da Variação da Altura Relativa de um Conversor de Energia das Ondas do Mar Tipo Placa Submersa. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, vol. 7, n. 2, p. 102-115, 2015.

Seibt, F.M., Letzow, M., Gomes, M.N., Souza, J.A., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Computational modeling applied to the study of wave energy converters (WEC). **Marine Systems & Ocean Technology**, vol. 9, n. 2, p. 77-84, 2014c.

Seibt, F.M., Razera, A.L., Varela, D.J.C., Da Fonseca, R.J.C., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. **Constructal Design de uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade de Placa Superior Móvel com Escoamento por Convecção Mista**. In: Book of Abstracts of XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE. ABMEC, Brasília - DF, Brazil, pp. 244, 2016b.

Seibt, F.M., Razera, A.L., Varela, D.J.C., Da Fonseca, R.J.C., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Constructal Design de uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade de Placa Superior Móvel com Escoamento por Convecção Mista. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia – RIPE**, vol. 2, p. 72-84, 2016c.

Seibt, F.M., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. **Análise Numérica do Efeito da Variação do Comprimento e Altura Relativa de uma Placa Horizontal Submersa como Conversor de Energia das Ondas do Mar**. In: Isoldi, L.A.; Dos Santos, E.D.; Souza, J.A. (Eds.) Anais do 7º MCSul – Conferência Sul em Modelagem Computacional. PPGMC-FURG, Rio Grande, Brasil, pp. 275-284, 2016d.

Seibt, F.M., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Estudo Numérico do Efeito da Variação Conjunta do Comprimento e da Altura Relativa de um Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 6, n. 3, p. 586-605, 2017c.

Seibt, F.M., Souza, J.A., Dos Santos, E.D., Teixeira, P.R.F. e Isoldi, L.A. **Análise Numérica da Eficiência do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Submersa**. In: Del Prado, Z.J.G.N. (Ed.) Proceedings of XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE, vol. 1. ABMEC, Pirenópolis, Brazil, pp. 1-13, 2013.

Sendil, U. e Graf, W.H. **Transmission of regular waves past floating plates**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 14th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 1974), ASCE, vol. 1, n. 14, pp. 1924-1936, 1974.

Singh, P.M., Chen, Z. e Choi, Y.-D. Numerical analysis for a proposed hybrid system with single HAWT, double HATCT and vertical oscillating wave energy converters on a single tower. **Journal of Mechanical Science and Technology**, vol. 30, n. 10, p. 4609-4619, 2016.

Son, D., Belissen, V. e Yeung, R.W. Performance validation and optimization of a dual coaxial-cylinder ocean-wave energy extractor. **Renewable Energy**, vol. 92, p. 192-201, 2016.

Srinivasan, V., Salazar, A.J. e Saito, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, vol. 35, n. 8, p. 3710-3730, 2011.

Teh, H.M. Hydraulic performance of free surface breakwaters: A review. **Sains Malaysiana**, vol. 42, n. 9, p. 1301-1310, 2013.

Teh, H.M. **Hydrodynamic performance of free surface semicircular breakwaters**. Tese de Doutorado (PhD. Thesis), The University of Edinburgh, 2012.

Teh, H.M., Azizan, M.S.M., Kurian, V.J. e Hashim, A.M. Use of a Floating Breakwater System as an Environmentally Friendly Method of Coastal Shelter. **WIT Transactions on The Built Environment**, vol. 148, p. 309-318, 2015.

Teh, H.M. e Mohammed, N.I. **Wave interactions with a floating breakwater**. In: 2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering (CHUSER). IEEE, Kota Kinabalu, Malaysia, pp. 84-87, 2012.

Teh, H.M., Venugopal, V. e Bruce, T. Hydrodynamic characteristics of a free-surface semicircular breakwater exposed to irregular waves. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 138, n. 2, p. 149-163, 2012.

Teh, H.M., Venugopal, V. e Bruce, T. **Hydrodynamic Performance of a Free Surface Semicircular Perforated Breakwater**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China, 2010), ASCE, vol. 1, n. 32 (structures.20), pp. 1-13, 2010.

Thorpe, T.W. **An overview of wave energy technologies: status, performance and costs**. In: Institution of Mechanical Engineers (Ed.) Wave power: moving towards commercial viability. Professional Engineering Pub. Ltd., London, pp. 1-16, 1999.

Thorpe, T.W. **Wave Energy**. In: Trinnaman, J.; Clarke, A. (Eds.) 2004 Survey of Energy Resources. Elsevier Science, World Energy Council, pp. 401-417, 2004.

Uihlein, A. e Magagna, D. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 58, p. 1070-1081, 2016.

UN – United Nations. **World Population Prospects: The 2015 Revision**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, World Population 2015 Wallchart – ST/ESA/SER.A/378, 2015.

UNDP – United Nations Development Programme. **Human Development Report 2015**. New York, 2015.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto Protocol**. [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php), 2016, Acesso em: 22-02-2017.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Coastal Engineering Manual**. Part II. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, USACE Publications, Washington, D.C., 2002.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Shore Protection Manual**. Volume I. Waterways Experiment Station – Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 4th Ed., 1984.

Usha, R. e Gayathri, T. Wave motion over a twin-plate breakwater. **Ocean Engineering**, vol. 32, n. 8-9, p. 1054-1072, 2005.

Versteeg, H.K. e Malalasekera, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. Pearson, England, 2007.

Vianna, V.P., Seibt, F.M., Gomes, M.N., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real**. In: Isoldi, L.A.; Ramos, A.P.; Troina, G.S.; Lima, J.P.S.; Teixeira, P.R.F.; Souza, J.A.; Gomes, M.N.; Dos Santos, E.D. (Eds.) Anais do VII SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. PPGeo-FURG, Rio Grande, Brasil, pp. 474-482, 2016.

Vianna, V.P., Seibt, F.M., Gomes, M.N., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E.D. e Isoldi, L.A. Modelagem Computacional do Princípio de Funcionamento de um Conversor Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, vol. 2, n. 1, p. 31-1 - 31-18, 2017.

Vining, J.G. e Muetze, A. Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 45, n. 2, p. 547-554, 2009.

Wagner, J.J., Wagner, J.R. e Hayatdavoodi, M. **Hydrodynamic Analysis of a Submerged Wave Energy Converter**. In: Proceedings of The 4th Marine Energy Technology Symposium (METS2016). Washington, D.C., pp. 1-5, 2016.

Wang, G., Ren, B. e Wang, Y. Experimental study on hydrodynamic performance of arc plate breakwater. **Ocean Engineering**, vol. 111, p. 593-601, 2016.

Wang, K.-H. e Shen, Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. **International Journal of Engineering Science**, vol. 37, n. 6, p. 703-715, 1999.

Wang, Y., Wang, G. e Li, G. Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater. **Ocean Engineering**, vol. 33, n. 13, p. 1829-1839, 2006.

Windt, C., Tchoufag, J. e Alam, M.-R. **Numerical Investigation of Three-Dimensional Effects on Wave Excitation Forces on a Submerged Rigid Board**. In: Proceedings of 2nd International Conference on Offshore Renewable Energy (CORE2016). Glasgow, pp. 1-9, 2016.

Wu, J.P., Xu, L., Mei, T.L., Yi, S. e Wang, L.Q. Numerical Simulation of the Interaction between Surface Waves and Horizontal Plates at Free Surface. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 441, p. 456-460, 2014.

Yagci, O., Kirca, V.S.O. e Acanal, L. Wave attenuation and flow kinematics of an inclined thin plate acting as an alternative coastal protection structure. **Applied Ocean Research**, vol. 48, p. 214-226, 2014.

Yu, X. Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review. **Coastal Engineering Journal**, vol. 44, n. 02, p. 127-147, 2002.

Yu, X. e Chwang, A.T. Water waves above submerged porous plate. **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 120, n. 6, p. 1270-1282, 1994.

Yu, X., Isobe, M. e Watanabe, A. Wave breaking over submerged horizontal plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, vol. 121, n. 2, p. 105-113, 1995.

Yuce, M.I. e Muratoglu, A. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 43, p. 72-82, 2015.

Yueh, C.-Y. e Chuang, S.-H. A boundary element model for a partially piston-type porous wave energy converter in gravity waves. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, vol. 36, n. 5, p. 658-664, 2012.

Yueh, C.-Y. e Kuo, Y.-Y. The study of wave pressure and uplift force on a submerged plate. **Ocean Engineering**, vol. 20, n. 3, p. 263-280, 1993.

Zhang, W., Liu, H., Zhang, X., Zhang, L. e Ashraf, M.A. Optimal Configurations of Wave Energy Converter Arrays with a Floating Body. **Polish Maritime Research**, vol. 23, p. 71-77, 2016.

Zhang, Z.-Q., Luan, M.-T. e Wang, K. Flow field analysis of submerged horizontal plate type breakwater. **China Ocean Engineering**, vol. 27, n. 6, p. 821-828, 2013.

## APÊNDICE A – Desambiguação: Placa Submersa

Os termos mais comumente utilizados para referir-se a esse dispositivo (ou variações do mesmo) levam em conta a forma básica da estrutura, por exemplo: placa horizontal submersa (PHS), placa submersa e placa horizontal. No entanto, esses termos não caracterizam fisicamente a estrutura abordada pelo trabalho, por exemplo: placa horizontal submersa porosa.

As tabelas a seguir (Tabelas A.1 a A.4), permitem uma visão geral das principais variações das estruturas do tipo: PHS, placa submersa e placa horizontal. Sendo assim, a Tabela A.1 apresenta alguns trabalhos referentes a uma estrutura do tipo PHS, porém com características diferentes da estudada no presente trabalho.

Tabela A.1 – Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal submersa.

<b>Função</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Referência</b>	
Quebra-mar	Ancorada	McIver, 1985	
		Drouin e Ouellet, 1988	
	Porosa	Yu e Chwang, 1994	
		Liu et al., 2012	
		Cho e Kim, 2013	
		Usha e Gayathri, 2005	
		Liu, Y. et al., 2009	
	Dupla sobreposta	Liu e Li, 2014	
		Dupla tandem	Cheong e Patarapanich, 1992
		Múltipla	Wang e Shen, 1999
Wang et al., 2006			
Quebra-mar / WEC	Suportada por guias (translação vertical)	Hayatdavoodi et al., 2016	
		Wagner et al., 2016	
	Disco (translação vertical)	Korde e Ertekin, 2012	
		Carter e Ertekin, 2014	
		Zhang et al., 2016	

Dentre as variações do sistema de placa submersa, quanto a sua forma, estrutura e características físicas, que são encontradas na literatura, citam-se: i) placa horizontal submersa (Tabela A.1): porosa; ancorada; dupla, podendo ser sobreposta ou em sequência (tandem); dupla e sobreposta, podendo ser uma porosa e outra sólida ou, ainda, ambas porosas;

múltiplas e sobrepostas; suportada por guias, para permitir translação vertical; circular plana (disco), podendo ser fixa ou com translação vertical; ii) placa submersa (Tabela A.2): inclinada; curva, podendo ser semicircular ou em arco; vertical, podendo ser fixa ou móvel, com translação horizontal ou rotação; iii) placa horizontal (simples) (Tabela A.3): fixa na superfície ou flutuante; iv) placa horizontal composta (Tabela A.4): em forma de H (associada a duas placas verticais), podendo ser fixa (semisubmersa) ou flutuante; submersa em forma de T ou '⊥' (associada a uma placa vertical); flutuante com vegetação integrada.

Tabela A.2 – Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa submersa.

<b>Função</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Referência</b>
Quebra-mar	Inclinada	Murakami et al., 1994
		Rao et al., 2009a
		Yagci et al., 2014
	Semicircular	Teh et al., 2010
		Teh et al., 2012
	Arco	Wang et al., 2016
Quebra-mar / WEC	Vertical	Chen et al., 2002
		Liu et al., 2007
	Gadelho et al., 2015	
	Vertical (translação horizontal)	Yueh e Chuang, 2012
	Vertical (rotação)	Renzi e Dias, 2012 Gomes, R. et al., 2015

Tabela A.3 – Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal (simples).

<b>Função</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Referência</b>
Quebra-mar	Fixa na superfície	Ijima et al., 1970
		Isaacson e Cheung, 1991
		Isaacson e Cheung, 1993
		Wu et al., 2014
	Flutuante	Sendil e Graf, 1974

Diferentemente dos demais trabalhos, que abordam estruturas relativamente mais simples, alguns dos trabalhos apresentados na Tabela A.4 tratam de estruturas mais complexas, entretanto, todas compostas a partir de uma placa horizontal.



Tabela A.4 – Relação de artigos sobre estruturas do tipo: placa horizontal composta.

<b>Função</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Referência</b>
Quebra-mar	Formato H	Neelamani e Vedagiri, 2002
	Formato H flutuante	Teh e Mohammed, 2012
		Teh et al., 2015
	Formato T	Neelamani e Rajendran, 2002a
	Formato ‘L’	Neelamani e Rajendran, 2002b
Flutuante com vegetação integrada	Chen et al., 2016	

## **APÊNDICE B – Revisão Bibliográfica: Quebra-Mar Tipo PHS**

Conforme tratado na Subseção 2.3.4, uma revisão bibliográfica, a respeito do dispositivo de PHS como quebra-mar, foi realizada conforme a seguinte organização: i) trabalhos com abordagem experimental (Seção B.1); ii) trabalhos com abordagem numérica e experimental (Seção B.2); iii) trabalhos com abordagem numérica (Seção B.3). Cabe destacar que, ao final desta revisão (Seção B.4), são apresentadas informações complementares, bem como, um resumo desta revisão em forma de tabelas.

### **B.1 Trabalhos Experimentais**

Kojima et al., 1990, apresentam um estudo sobre as harmônicas geradas pela decomposição da onda quando passa sobre a PHS. Graw, 1992, apresentou uma análise sobre o comportamento do escoamento abaixo da PHS e o efeito do comprimento relativo da mesma sobre o coeficiente de transmissão do quebra-mar. Já Neelamani e Reddy, 1992, avaliaram o coeficiente de reflexão para diferentes condições de submersão da PHS, submetida a diversas ondas incidentes de pequena amplitude.

Nallayarasu et al., 1995, propuseram uma técnica de medição da reflexão a fim de separar a onda incidente da onda refletida em experimentos com PHS. Em Lengricht et al., 2000, os autores apresentam uma técnica de visualização do escoamento por meio da captura de imagens, tanto para placas verticais semisubmersas como para PHS. Os resultados apresentados neste estudo permitem visualizar o comportamento do escoamento sob a PHS.

Brossard e Chagdali, 2001, investigaram o processo de geração de harmônicas sobre uma PHS a partir de ondas regulares. Rey et al., 2002, estudaram o efeito de reflexão para uma PHS submetida a ondas monocromáticas e bicromáticas na presença de esforços de corrente uniforme e permanente.

Calabrese et al., 2008, propuseram um roteiro de cálculo para um quebra-mar tipo PHS a partir de resultados de experimentos realizados em escala com um protótipo do dispositivo, que fora proposto para uma cidade da Itália onde esta estrutura seria um recurso adequado. O roteiro permite determinar a capacidade reflexão da estrutura, bem como, a energia transmitida para a área protegida. Já Hildebrandt e Schlurmann, 2008, apresentam tanto os esforços sobre a PHS, como as características alternantes do escoamento sob a PHS, além de aspectos relacionados à vorticidade do escoamento nas extremidades da PHS.

Em Brossard et al., 2009, os autores fazem um estudo sobre a decomposição de ondas monocromáticas em harmônicas de primeira e segunda ordens devido a passagem das mesmas sobre uma PHS. Os autores compararam os resultados obtidos com a PHS e com blocos submersos, verificando uma melhor eficácia da PHS como quebra-mar submerso em relação ao bloco (degrau) submerso. Nesse trabalho os autores mencionam o possível uso do dispositivo como WEC.

Rao et al., 2009b, apresentam um estudo da PHS em diferentes profundidades da água e diferentes alturas relativas da PHS para ondas monocromáticas. Neste estudo, avaliaram o desempenho do quebra-mar quanto a diferentes parâmetros, como: coeficiente de reflexão, coeficiente de transmissão e coeficiente de “perda”; bem como, os esforços das ondas sobre a PHS. Posteriormente, Rey e Touboul, 2011, apresentaram um estudo sobre o dispositivo de PHS onde avaliaram esforços e momento sobre uma PHS sujeita a ondas, regulares e irregulares, na presença de corrente. Nesse estudo, foram avaliados os efeitos de reflexão e absorção das ondas pela estrutura do dispositivo.

Em Poupardin et al., 2012, os autores apresentam um estudo sobre a formação e o deslocamento de vórtices em torno de uma PHS, especialmente nas arestas inicial e final da PHS, a partir de ondas regulares. Em seus resultados avaliaram os efeitos dos vórtices gerados em relação aos esforços sobre a estrutura. Os autores descrevem tanto o escoamento sob a PHS, quanto a formação dos vórtices e a dinâmica dos mesmos em torno da PHS. Além disso, mencionam o possível uso do dispositivo como WEC.

Recentemente, Lebon et al., 2016, apresentaram um estudo sobre a formação e dinâmica de vórtices formados nos bordos da PHS, a fim de validar uma técnica de visualização 2D e 3D de escoamento. Para isso os resultados obtidos com a nova técnica foram comparados com uma técnica tradicional. As topologias de velocidade e de vorticidade obtidas permitiram a visualização do fenômeno abordado, de forma que os autores concluem que a nova técnica se mostrou adequada, devido à concordância dos resultados com a técnica tradicional. Nesse trabalho, foram apresentadas, também, algumas vantagens e limitações de cada técnica empregada.

## **B.2 Trabalhos Numérico-experimentais**

Patarapanich e Cheong, 1989, examinaram o comprimento e a profundidade de submersão da PHS para ondas regulares e irregulares, segundo o espectro de Pierson-

Moskovitz. O modelo numérico, desenvolvido com base no Método de Elementos Finitos (FEM – *Finite Elements Method*), foi validado com resultados de experimentos de forma satisfatória, segundo os autores. Em Kojima et al., 1994, os autores utilizaram um modelo numérico 2D, baseado no método de expansão de autofunções, com perturbações de 2ª ordem e de ordens superiores, para avaliar os esforços devido a ondas lineares e não-lineares, bem como, os esforços de harmônicos de alta ordem sobre uma PHS. O modelo considerou coeficientes de dissipação das ondas, nas extremidades do canal de ondas numérico, e foi validado com resultados experimentais. Já Yu et al., 1995, propuseram um método analítico empírico para predição da quebra da onda sobre a PHS e validaram o método com resultados de experimentos.

Lo e Liu, 2014, estudaram o comportamento do escoamento em torno da PHS devido a incidência de ondas solitárias. A abordagem numérica 2D utilizou o modelo de turbulência RANS (*Reynolds-Average Navier-Stokes*) e o modelo VOF para tratamento da interação água-ar. Foram analisados resultados de elevação da superfície livre, campo de velocidades, campo de pressões e esforços sobre a PHS. A partir da teoria linear, os autores determinaram os coeficientes de reflexão e transmissão. Com base em um modelo analítico, os autores desenvolveram uma formulação para avaliar a incidência de ondas oblíquas à placa. Por fim, observaram que o momento resultante da passagem da onda sobre a PHS não é nulo.

Rey et al., 2015, realizaram um estudo sobre o comportamento do campo de pressões e de velocidades abaixo da PHS, em condição de águas profundas, para uma PHS submetida a ondas lineares e não lineares, com e sem a presença de corrente em mesmo sentido (de propagação da ondas). Os resultados numéricos apontaram que a decomposição das ondas, ao passarem pela PHS, gerou esforços de reação com o fundo do canal de ondas. Ao analisarem os resultados do experimento em escala real, os autores concluíram que, apesar do surgimento de tal efeito, em ambos os casos (com e sem corrente) estudados, as velocidades eram relativamente baixas, podendo ser desconsiderada a ocorrência de erosão do fundo (leito marítimo) abaixo da PHS.

Recentemente, Cheng et al., 2017, estudaram a interação de ondas não lineares (espectro de ondas) com uma PHS na presença de corrente uniforme. O modelo numérico 2D, que considerou regiões de absorção das ondas, foi resolvido com o Método de Elementos de Contorno (BEM – *Boundary Elements Method*) de alta ordem e validado com resultados de experimentos realizados pelos próprios autores. Foram avaliados os efeitos da amplitude de onda e da velocidade da corrente, bem como, da profundidade de submersão e do

comprimento da PHS. Além disso, foram determinados os coeficientes de reflexão e transmissão e os esforços sobre a PHS. Os autores observaram que o coeficiente de reflexão não apresentou variação significativa com o aumento da amplitude das ondas, para diferentes velocidades de corrente. Por outro lado, apontaram que as maiores amplitudes de onda levaram a uma redução do coeficiente de transmissão na presença de corrente. Por fim, concluíram que a condição de máxima reflexão e mínima transmissão não foi afetada pela presença de corrente.

### **B.3 Trabalhos Numéricos**

Patarapanich, 1984a, utilizou um modelo numérico resolvido com o método FEM para determinar esforços sobre a PHS e os coeficientes de reflexão e transmissão para várias condições de submersão e diferentes geometrias da PHS. Em trabalho subsequente [Patarapanich, 1984b], o autor utilizou este mesmo modelo para determinar condições de máxima e mínima (zero) reflexão da estrutura do dispositivo.

Liu e Iskandarani, 1991, determinaram os coeficientes de transmissão e reflexão, sobre uma PHS sujeita a ondas curtas, utilizando o método de expansão de autofunções. Já Yueh e Kuo, 1993, utilizaram o método BEM para avaliar o campo de pressões e os esforços causados pelas ondas sobre uma PHS associada a um cais.

Cheong et al., 1996, propuseram uma modificação no método de expansão de autofunções, a fim de abranger casos com ondas em diferentes profundidades de água, desde águas rasas até águas profundas. Os autores fizeram verificações entre os resultados obtidos com o método proposto e resultados obtidos com outros dois métodos: FEM e *Long Wave Solution*. Neste estudo, obtiveram resultados dos coeficientes de transmissão e reflexão e de esforços sobre a PHS em três condições distintas: águas rasas, águas intermediárias e águas profundas.

Em Hsu e Wu, 1998, foi desenvolvido um modelo numérico 2D, empregando o método BEM e a teoria linear de ondas, de um sistema constituído por uma PHS e um bloco submerso permeável. Nesse modelo, quando o bloco é totalmente permeável o sistema se reduz a uma PHS. Para esta situação, foram apresentadas comparações entre os resultados obtidos com o modelo numérico e resultados experimentais, que demonstraram a dependência do coeficiente de transmissão com relação ao comprimento relativo da PHS.

Hu et al., 2002, apresentaram uma solução analítica 2D, baseada no método de expansão de autofunções, para estudar a reflexão e a transmissão de ondas lineares sobre uma PHS e uma parede vertical porosa, situada após a PHS. Para o caso limite, onde a parede vertical é completamente permeável, o sistema se resume a uma PHS. Os autores validaram seus resultados com base em resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura. A partir dos resultados obtidos, os autores observaram que os coeficientes de transmissão e de reflexão do dispositivo dependem diretamente do comprimento e da profundidade de submersão da PHS. Por fim, concluíram que o dispositivo é mais eficaz para ondas longas. Posteriormente, Hu e Wang, 2005, incluíram neste modelo [Hu et al., 2002] o efeito de dissipação das ondas causado pela PHS e apresentaram novos resultados para os coeficientes de reflexão e de transmissão da estrutura do dispositivo.

Liu, C. et al., 2009, reproduziram numericamente casos estudados por Brossard et al., 2009, utilizando um tanque numérico de ondas não lineares baseado no método das integrais de contorno desingularizadas. A viscosidade da água foi negligenciada e foram consideradas apenas ondas sem “quebra”, a fim de analisar harmônicas não lineares gerados por ondas regulares. Nesse estudo, os autores mencionam o possível uso do dispositivo como WEC. O modelo foi validado e os autores concluíram que, mesmo com a simplificação da viscosidade, o modelo conferiu resultados considerados satisfatórios.

Hayatdavoodi e Ertekin, 2012, apresentam um estudo da propagação de ondas não lineares (cnoidal e solitária), características de águas rasas, sobre uma PHS. Para isso, propuseram um modelo baseado no Método de Diferenças Finitas (FDM – *Finite Difference Method*). O modelo foi validado com base em resultados da literatura e os autores mencionam o uso do dispositivo como WEC. Nesse estudo, foram analisados resultados de elevação da superfície e os esforços gerados pelas ondas sobre a PHS.

Em Lalli et al., 2012, os autores apresentam um estudo numérico das características lineares e não lineares da interação das ondas com o dispositivo de PHS. Para tanto, utilizaram um modelo baseado no método BEM e avaliaram o desempenho da PHS sob diferentes condições de ondas e características geométricas. Por fim, analisaram e propuseram um arranjo com duas placas horizontais, sobrepostas e de comprimentos diferentes, como forma de melhorar o desempenho do dispositivo como quebra-mar.

Zhang et al., 2013, apresentam um estudo sobre a PHS onde analisam, principalmente, o campo de velocidades em torno da placa utilizando um modelo resolvido com o método BEM. Os autores sugerem que a interação entre a onda incidente e o escoamento “reverso”

abaixo da PHS ocasiona uma redução da velocidade do escoamento como um todo, sendo esta a causa da dissipação das ondas pela estrutura do dispositivo. Para essa análise, foram consideradas ondas regulares e desprezada a viscosidade da água.

Já em Aghili et al., 2014, os autores apresentam um estudo da PHS sujeita a ondas solitárias em quatro diferentes profundidades de submersão. O modelo utilizado foi implementado com base no método *Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics* (WCSPH). Nesse estudo, foram analisados os perfis de elevação da superfície, o campo de pressões e os esforços verticais sobre a PHS. Os resultados foram verificados com base no trabalho numérico de Hayatdavoodi e Ertekin, 2012.

Lin et al., 2014, apresentam um estudo da decomposição de ondas lineares sobre uma PHS na presença de efeitos de corrente. O modelo utilizado foi concebido com base no método BEM de alta ordem com formulação transiente. Foram avaliadas harmônicas não lineares geradas pela interação entre ondas regulares e a PHS na presença de corrente. O modelo foi validado e verificado com dados experimentais da literatura. Foi observado que o coeficiente de reflexão aumentou quando a corrente tinha o mesmo sentido de propagação das ondas e diminuiu quando a corrente tinha sentido contrário ao de propagação das ondas. Os autores identificaram, para as condições analisadas, um comprimento da PHS que ocasiona máxima reflexão e concluíram que este parâmetro não se altera na presença de corrente.

Jin et al., 2014, estudaram o desempenho da PHS quando sujeita a diferentes ondas monocromáticas. Sua abordagem foi baseada no método FVM, considerando o modelo multifásico VOF e o modelo de turbulência RANS. Os autores analisaram a formação de vórtices no escoamento em torno da PHS, bem como, o efeito da espessura e da profundidade de submersão da PHS sobre o seu desempenho. Em sua análise, propuseram um comprimento ótimo da PHS para cada condição de onda incidente, dependendo da profundidade e da espessura da PHS. Por fim, concluíram que uma PHS fina apresentou melhor desempenho. Além disso, indicaram uma PHS longa para prover menor transmissão da onda à medida que a profundidade de submersão da PHS seja aumentada ou a altura da onda incidente diminuída.

Hayatdavoodi e Ertekin, 2015a, apresentam o desenvolvimento e a validação, com resultados da literatura, de um modelo com formulação numérica 2D para o escoamento, unidirecional e não viscoso, de ondas não lineares (solitária e cnoidal) sobre uma PHS. Em sequência, Hayatdavoodi e Ertekin, 2015b, utilizaram esse modelo para avaliar os esforços sobre o dispositivo para diferentes geometrias da PHS.

Ning et al., 2015, investigaram a interação de ondas não lineares de 2ª ordem com a PHS, onde analisaram a geração de ondas harmônicas de alta ordem e os esforços não lineares induzidos pelas ondas. O modelo 2D, baseado no método BEM, foi validado com resultados da literatura. Os autores apresentaram as seguintes observações: o coeficiente de transmissão diminuiu com o aumento da profundidade da PHS; o coeficiente de reflexão ressonante diminuiu com o aumento da profundidade da água, mas aumentou com o aumento do período da onda; as harmônicas de 2ª ordem apresentaram relação com as ondas ressonantes de 2ª ordem; as variações no campo de pressão sobre a PHS apresentaram relação direta com o comprimento da PHS.

Pinon et al., 2016, em continuidade ao trabalho de Poupardin et al., 2012, propuseram um modelo numérico 2D, utilizando o método *Lagrangian Vortex*, o qual foi validado com os resultados dos experimentos conduzidos previamente [Poupardin et al., 2012]. Para tanto, reproduziram casos semelhantes ao estudo precedente e compararam os esforços exercidos pelos vórtices sobre a PHS e as estruturas formadas por esses vórtices. Em seguida, complementaram a análise estudando a influência da profundidade e do comprimento da PHS. Em sua análise, sugeriram que não seria possível a utilização do dispositivo como WEC com a inclusão de uma turbina hidráulica sob a PHS. Os autores relataram que o modelo reproduziu os fenômenos observados em laboratório. Além disso, concluíram que os maiores comprimentos da PHS, entre os casos estudados, ocasionaram a formação de uma maior quantidade de vórtices a partir das extremidades da PHS.

#### **B.4 Outras Revisões Bibliográficas e Resumo da Presente Revisão**

Yu, 2002, apresenta um trabalho voltado exclusivamente à revisão das pesquisas, realizadas até aquele momento, a respeito do dispositivo de PHS como quebra-mar. No trabalho de Liu, C. et al., 2009, a Seção 1 (Introdução) contém uma revisão bastante extensa sobre o dispositivo de PHS como quebra-mar.

Em Teh, 2013, é apresentado um trabalho de revisão sobre quebra-mares submersos, incluindo o dispositivo de PHS e diversas variações construtivas desse equipamento. Tal revisão tem por base a tese de doutorado do mesmo autor [Teh, 2012] e fornece uma ampla contextualização do dispositivo de PHS no âmbito dos quebra-mares submersos.

Outra revisão voltada ao dispositivo de PHS, neste caso, tanto para sua função como quebra-mar, quanto como WEC, pode ser encontrada em Carter, 2005.



A seguir, a revisão apresentada neste Apêndice B encontra-se resumida sob a forma de tabelas, onde constam: na Tabela B.1, os artigos de abordagem experimental; na Tabela B.2, os artigos de abordagem numérica-experimental; na Tabela B.3, os artigos de abordagem numérica.

Tabela B.1 – Relação de trabalhos experimentais da PHS como quebra-mar.

Referência	Referência
Kojima et al., 1990	Calabrese et al., 2008
Graw, 1992	Hildebrandt e Schlurmann, 2008
Neelamani e Reddy, 1992	Brossard et al., 2009 <sup>(*)</sup>
Nallayarasu et al., 1995	Rao et al., 2009b
Lengricht et al., 2000	Rey e Touboul, 2011
Brossard e Chagdali, 2001	Poupardin et al., 2012 <sup>(*)</sup>
Rey et al., 2002	Lebon et al., 2016

(\*) O artigo menciona o uso do dispositivo de PHS como WEC.

Tabela B.2 – Relação de trabalhos numérico-experimentais da PHS como quebra-mar.

Referência	Referência
Patarapanich e Cheong, 1989	Lo e Liu, 2014
Kojima et al., 1994	Rey et al., 2015
Yu et al., 1995	Cheng et al., 2017

Tabela B.3 – Relação de trabalhos numéricos da PHS como quebra-mar.

Referência	Referência
Patarapanich, 1984a	Lalli et al., 2012
Patarapanich, 1984b	Zhang et al., 2013
Liu e Iskandarani, 1991	Aghili et al., 2014
Yueh e Kuo, 1993	Lin et al., 2014 <sup>(*)</sup>
Cheong et al., 1996	Jin et al., 2014
Hsu e Wu, 1998	Hayatdavoodi e Ertekin, 2015a
Hu et al., 2002	Hayatdavoodi e Ertekin, 2015b
Hu e Wang, 2005	Ning et al., 2015 <sup>(*)</sup>
Liu, C. et al., 2009 <sup>(*)</sup>	Pinon et al., 2016 <sup>(*)</sup>
Hayatdavoodi e Ertekin, 2012 <sup>(*)</sup>	–

(\*) O artigo menciona o uso do dispositivo de PHS como WEC.

## APÊNDICE C – Códigos de Pós-Processamento

A seguir são apresentados cinco códigos (tarefas e funções), implementados no *software* MatLab®, que foram utilizados para o pós-processamento dos resultados das simulações ao longo deste trabalho.

### 1) Código de análise e verificação da elevação de superfície livre da onda gerada:

---

```
%VERIFICACAO NUMERICO X ANALITICO DA ELEVACAO DA ONDA (2a. Ordem)
%Determina pico da 5a crista para calculo da eficiencia
%Leitura dos valores de elevacao de onda
clear all;
clc;
%*****
% DADOS DE ENTRADA
%*****
%Parametros da onda
T = 3.000;          %[s] - periodo onda
lambda = 6.952;    %[m] - comprimento onda
epsilon = 0.060;   %[m] - altura onda
d = 0.600;         %[m] - profundidade
%Parametros da placa
h = 0.500;         %[m] - altura placa
L = 1.740;         %[m] - comprimento placa
e = 0.020;         %[m] - espessura placa
HT = (h+e);       %[m] - altura total placa
X = ((h/d)*100);  %[%] - altura relativa placa
%*****
%Intervalo de salvamento dos dados nos monitores
dt = 0.050;       %[s]
%Parametros da verificacao
xs = 6.950;       %[m] = posicao da sonda numerica (monitorXX-02)
ajuste = 2.40;    %constante arbitrada para compensacao de fase
%*****
% IMPORTAR MONITORES
%numero de monitores importados
nmon = 7;
%[A]=importdata(filename, delim, hline)
%nome dos monitores
monitor01 = 'monitor60-5A-1.out';
monitor02 = 'monitor60-5A-2.out';
monitor03 = 'monitor60-5A-3.out';
monitor04 = 'monitor60-5A-4.out';
monitor05 = 'monitor60-5A-5.out';
monitor06 = 'monitor60-5A-6.out';
monitor07 = 'monitor60-5A-7.out';
%delimitador (espaço)
delim = ' ';
%numero de linhas do cabeçalho
header = 2;
%carrega dados
Tab(1) = importdata(monitor01,delim,header);
n(1) = max(size(Tab(1).data));
```

```

Tab(2) = importdata(monитор02,delim,header);
n(2) = max(size(Tab(2).data));
Tab(3) = importdata(monитор03,delim,header);
n(3) = max(size(Tab(3).data));
Tab(4) = importdata(monитор04,delim,header);
n(4) = max(size(Tab(4).data));
Tab(5) = importdata(monитор05,delim,header);
n(5) = max(size(Tab(5).data));
Tab(6) = importdata(monитор06,delim,header);
n(6) = max(size(Tab(6).data));
Tab(7) = importdata(monитор07,delim,header);
n(7) = max(size(Tab(7).data));
%*****
% ARQUIVOS DE RESULTADOS
arqelevacao1 = 'arq1tabelevacao_C60-5A.txt';
arqelevacao2 = 'arq2verificaelevacao_C60-5A.txt';
%*****
%verificacao do tamanho dos monitores
no=0;
nl=0;
j=length(n);
for i=1:j-1,
    if (n(i)==n(i+1)),
        nl=nl+1; %numero de verificacoes positivas
    else no=no+1; %numero de verificacoes negativas
    end,
end,
if (no~=0),
    ('ATENCAO! Os monitores nao possuem mesmo numero de elementos')
else
    %montagem do vetor "tempo"
    t0=0;
    tf=Tab(1).data(n(1),1);
    tr=[t0:dt:tf]; %inclui o tempo "zero"
    %verificacao do tamanho dos monitores
    ntt=n(1)+1;
    mtt=length(tr);
    if (ntt~=mtt),
        ('ATENCAO! Os monitores nao possuem dados continuos no tempo')
    else ('OK! Os monitores possuem o numero de elementos correto')
%Se os vetores estao "OK" executa o restante do programa
%Na primeira coluna fica armazenado o tempo de escoamento 'tr' como
%referencia
%**Esse eh um recurso para monitores em que o tempo armazenado pelo FLUENT
%possui flutuacoes nas casas decimais mais altas
    tabelao(:,1)=tr';
    tabelav(:,1)=tr'; %tabela verificacao
%Nas colunas seguintes ficam armazenadas as leituras de elevacao
%Como cada monitor ja possui 2 colunas, apenas a segunda coluna e
%armazenada na matriz "tabela"
%=>Eh subtraida da medida de elevacao a parcela referente a profundidade
%local, uma vez que o FLUENT entrega uma medida 'integral' da elevacao
    for i=1:nmon,
        tabelev(:,i)=Tab(i).data(:,2)-d;
    end,
%acrescenta a medida "nula" no tempo "zero"
    for i=1:nmon,
        tabelao(:,i+1)=[0; tabelev(:,i)];
    end,
    tabelav(:,2)=[0; tabelev(:,2)]; %verificacao

```

```

%*****
%tempo da solucao analitica com fase ajustada
    ta=tr+ajuste;
    na=max(size(ta));
%variaveis auxiliares
    k=((2*pi)/lambda);
    sigma=((2*pi)/T);
%### ONDA ANALITICA - 2a ORDEM
    for i=1:na,
        eta(i)=((epsilon/2)*cos((k*xs)-
(sigma*ta(i))))+(((epsilon^2)*k)/16)*((cosh(k*d))/((sinh(k*d))^3))*(2+(cos
h(2*k*d))*(cos(2*((k*xs)-(sigma*ta(i))))));
        end,
        tabelav(:,3)=eta';
%plota apenas uma parte da tabela para demonstracao
    tabelao(1:8,:)
    tabelav(1:8,:)
%*****
%identifica indice da 5a crista medida em "monitor02"
    pico=0;
    pk=1;
    while (pk<(na-1)) && (pico<5),
        val1=tabelav(pk,2);
        val2=tabelav(pk+1,2);
        if (val1>=0) && (val1<val2),
            val3=tabelav(pk+2,2);
            if (val3<val2),
                pico=pico+1;
                valp(pico)=val2;
                tvalp(pico)=tabelav(pk+1,1);
            end,
        end,
        pk=pk+1;
    end,
    tabpicos(:,1)=tvalp';
    tabpicos(:,2)=valp';
    valp5=valp(5)
    tvalp5=tvalp(5)
    ip5=((tvalp5/dt)+1)
%*****
%plota apenas uma das linhas no grafico para demonstracao
    plot(tabelav(:,1),tabelav(:,2),'r',tabelav(:,1),tabelav(:,3),'k--
','LineWidth',2)
    grid on
%escrevendo a matriz em um arquivo txt
    y =
[tabelao(:,1)';tabelao(:,2)';tabelao(:,3)';tabelao(:,4)';tabelao(:,5)';tabe
lao(:,6)';tabelao(:,7)';tabelao(:,8)'];
    fid1 = fopen(arquelevacao1,'w');

fprintf(fid1,'tempo(s)\tmed01(m)\tmed02(m)\tmed03(m)\tmed04(m)\tmed05(m)\tm
ed06(m)\tmed07(m)\r\n');

fprintf(fid1,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',y
); %deve ter o mesmo numero de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid1);
%escrevendo o resultado em um arquivo txt
    yv = [tabelav(:,1)';tabelav(:,2)';tabelav(:,3)'];
    yvp5 = [tabpicos(:,1)';tabpicos(:,2)'];
    fid2 = fopen(arquelevacao2,'w');

```

```

    fprintf(fid2,'Verificacao para onda: T=%2.3fs - epsilon(H)=%2.3fm -
Lambda=%2.3fm - d=%2.3fm\r\n',T,epsilon,lambda,d);
    fprintf(fid2,'Geometria da placa: H=%2.3fm - h=%2.3fm - L=%2.3fm -
e=%2.3fm\r\n\r\n',HT,h,L,e);
    fprintf(fid2,'Parametros adimensionais: X=%2.2f[%%] - Lambda/L=%2.3f -
L/Lambda=%2.3f\r\n\r\n',X,(lambda/L),(L/lambda));
    fprintf(fid2,'Indice 5a crista (para calc. eficiencia):
%i\r\n\r\n',ip5);
    fprintf(fid2,'tp1-5[s]\tvp1-5[m]\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.4f\t%2.6f\r\n',yvp5);
    fprintf(fid2,'\r\ntempo[s]\tmed02[m]\tanalitica[m]\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',yv); %deve ter o mesmo numero de
colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid2);
end,
end,
%=====>FIM.

```

## 2) Código de análise e cálculo da média RMS da vazão mássica sob o WEC-PHS:

---

```

%CALCULO DA VAZAO MASSICA RMS SOB A PLACA SUBMERSA (no intervalo [3T,11T])
%Leitura dos valores de vazao massica
clear all;
clc;
%*****
% DADOS DE ENTRADA
%*****
%Parametros da onda
T = 3.000;          %[s] - periodo onda
lambda = 6.952;    %[m] - comprimento onda
epsilon = 0.060;   %[m] - altura onda
d = 0.600;        %[m] - profundidade
%Parametros da placa
h = 0.500;        %[m] - altura placa
L = 1.740;        %[m] - comprimento placa
e = 0.020;        %[m] - espessura placa
HT = (h+e);       %[m] - altura total placa
X = ((h/d)*100);  [%] - altura relativa placa
%*****
%Intervalo de salvamento dos dados nos monitores
dt = 0.050;       %[s]
%Numero de dados a coletar dos monitores
delta = (T/dt);   %numero de divisoes do periodo
ni = 3;          %[3T] - instante inicial
np = (delta*8);   %"8" representa 8 periodos utilizados no calculo [11T]
%*****
% IMPORTAR MONITORES
%numero de monitores importados
nmon = 3;
%[A]=importdata(filename, delim, hline)
%nome dos monitores
monitor01 = 'monitor60-5A-8.out';
monitor02 = 'monitor60-5A-9.out';
monitor03 = 'monitor60-5A-10.out';
%delimitador (espaço)
delim = ' ';
%numero de linhas do cabecalho

```

```

header = 2;
%carrega dados
Tab(1) = importdata(monitor01,delim,header);
n(1) = max(size(Tab(1).data));
Tab(2) = importdata(monitor02,delim,header);
n(2) = max(size(Tab(2).data));
Tab(3) = importdata(monitor03,delim,header);
n(3) = max(size(Tab(3).data));
%*****
% ARQUIVOS DE RESULTADOS
arqvazao1 = 'arq3tabvazao_C60-5A.txt';
arqvazao2 = 'arq4vazaorms_C60-5A.txt';
%*****
%verificacao do tamanho dos monitores
no=0;
nl=0;
j=length(n);
for i=1:j-1,
    if (n(i)==n(i+1)),
        nl=nl+1; %numero de verificacoes positivas
    else no=no+1; %numero de verificacoes negativas
    end,
end,
if (no~=0),
    ('ATENCAO! Os monitores nao possuem mesmo numero de elementos')
else
    %montagem do vetor "tempo"
    t0=0;
    tf=Tab(1).data(n(1),1);
    tr=[t0:dt:tf]; %inclui o tempo "zero"
    %verificacao do tamanho dos monitores
    ntt=n(1)+1;
    mtt=length(tr);
    if (ntt~=mtt),
        ('ATENCAO! Os monitores nao possuem dados continuos no tempo')
    else ('OK! Os monitores possuem o numero de elementos correto')
%Se os vetores estao "OK" executa o restante do programa
%Na primeira coluna fica armazenado o tempo de escoamento 'tr' como
%referencia
%**Esse eh um recurso para monitores em que o tempo armazenado pelo FLUENT
%possui flutuacoes nas casas decimais mais altas
    tabelao(:,1)=tr';
    tabelav(:,1)=tr';
%Nas colunas seguintes ficam armazenadas as leituras de vazao
%Como cada monitor ja possui 2 colunas, apenas a segunda coluna e
%armazenada na matriz "tabela"
%acrescenta a medida "nula" no tempo "zero"
    for i=1:nmon,
        tabelao(:,i+1)=[0; Tab(i).data(:,2)];
    end,
    tabelav(:,2)=[0; Tab(2).data(:,2)]; %verificacao
%plota apenas uma parte da tabela para demonstracao
    tabelao(1:8,:)
%*****
%limites de variacao para 'j' linha
j1=(ni*delta)+1; %instante inicial
j2=j1+np;
nl=1;
    for j=j1:j2,
        tabvazao(nl,1)=tabelav(j,1);

```

```

        n1=n1+1;
    end,
    n2=1;
    for j=j1:j2,
        tabvazao(n2,2)=tabelav(j,2);
        n2=n2+1;
    end,
    %numero de instantes de tempo considerados
    m=max(size(tabvazao));
    %eleva valores ao quadrado
    for j=1:m,
        tabvazao(j,3)=(tabvazao(j,2)^2);
    end,
    %soma os quadrados
    somavazao=0;
    for j=1:m,
        somavazao=somavazao+tabvazao(j,3);
    end,
    %calcula media dos valores quadrados
    mediavazao=somavazao/m;
    %extrai raiz da media
    rmsvazao=sqrt(mediavazao)
    %*****
    %plota apenas uma das linhas no grafico para demonstracao
    plot(tabelao(:,1),tabelao(:,3),'r--','LineWidth',2)
    grid on
    %escrevendo a matriz em um arquivo txt
    y = [tabelao(:,1)';tabelao(:,2)';tabelao(:,3)';tabelao(:,4)'];
    fid1 = fopen(arqvazao1,'w');
    fprintf(fid1,'tempo(s)\tvaz01(kg/s)\tvaz02(kg/s)\tvaz03(kg/s)\r\n');
    fprintf(fid1,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',y); %deve ter o mesmo
numero de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid1);
    %escrevendo o resultado em um arquivo txt
    yv = [tabvazao(:,1)';tabvazao(:,2)';tabvazao(:,3)'];
    fid2 = fopen(arqvazao2,'w');
    fprintf(fid2,'Vazao massica RMS para onda: T=%2.3fs - epsilon(H)=%2.3fm
- Lambda=%2.3fm - d=%2.3fm\r\n',T,epsilon,lambda,d);
    fprintf(fid2,'Geometria da placa: H=%2.3fm - h=%2.3fm - L=%2.3fm -
e=%2.3fm\r\n\r\n',HT,h,L,e);
    fprintf(fid2,'Resultado:\r\n\r\n');
    fprintf(fid2,'X[%%]\tVrms[kg/s]\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.2f\t%2.4f\r\n\r\n',X,rmsvazao);
    fprintf(fid2,'Lambda/L\tVrms[kg/s]\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(lambda/L),rmsvazao);
    fprintf(fid2,'L/Lambda\tVrms[kg/s]\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(L/lambda),rmsvazao);
    fprintf(fid2,'Dados para verificacao:\r\n\r\n');
    fprintf(fid2,'Intervalo considerado: [3T,11T] -
[%2.2fs,%2.2fs]\r\n\r\n',tabvazao(1,1),tabvazao(m,1));
    fprintf(fid2,'Instantes de tempo monitorados: %d\r\n',m);
    fprintf(fid2,'Somatorio=%2.6f\r\n',somavazao);
    fprintf(fid2,'Media=%2.6f\r\n\r\n',mediavazao);
    fprintf(fid2,'tempo[s]\tvaz02-monit09[kg/s]\tvaz02-quadrado\r\n');
    fprintf(fid2,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',yv); %deve ter o mesmo numero de
colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid2);
    end,
end,
%=====>FIM.

```

## 3) Código de análise das velocidades e pressões e cálculo da eficiência do WEC-PHS:

---

```

%CALCULO DA POTENCIA E EFICIENCIA DA PLACA HORIZONTAL SUBMERSA
%Determina perfis maximos de velocidade (Umax)
%Leitura dos valores de velocidade axial e pressao estatica
clear all;
clc;
%*****
% DADOS DE ENTRADA
%*****
%Parametros da onda
T = 3.000;           %[s] - periodo onda
lambda = 6.952;     %[m] - comprimento onda
epsilon = 0.060;    %[m] - altura onda
d = 0.600;          %[m] - profundidade
%Parametros da placa
h = 0.500;           %[m] - altura placa
L = 1.740;           %[m] - comprimento placa
e = 0.020;           %[m] - espessura placa
HT = (h+e);         %[m] - altura total placa
X = ((h/d)*100);    %[%] - altura relativa placa
b = 1.000;           %[m] - pseudo-largura canal (2D)
%Propriedades fisicas
rho = 998.200;      %[kg/m3] - massa especifica (H2O,Liq - Fluent)
g = 9.810;          %[m/s2] - aceleracao da gravidade
%*****
%Intervalo de salvamento dos dados nos monitores
dt = 0.050;         %[s]
%Numero de dados a coletar para determinar perfis maximos
delta = (T/dt);     %numero de divisoes do periodo
ni = 3;             %[3T] - instante inicial
np = delta*8;       %"8" representa 8 periodos utilizados no calculo [11T]
%-----
%Parametro de calculo
ip5 = 312; %POSICAO DETERMINADA PELO CODIGO "cod01verificacaoXXX.m".
%Serve para limitar o intervalo de dados utilizados no calculo de "Pm"
%e da "Eficiencia".
%Este calculo faz a media entre 2 periodos de onda,
%compreendendo os dados entre a 5a. crista e a 7a. crista da onda gerada.
%-----
%*****
% DISPOSICAO DOS PONTOS MONITORES
%pontos abaixo da placa --> [v/p]
hpt(1) = 0.000;      %pto00 - monitorXX-11/28
hpt(2) = 0.020;      %pto01 - monitorXX-12/29
hpt(3) = 0.090;      %pto02 - monitorXX-13/30
hpt(4) = 0.170;      %pto03 - monitorXX-14/31
hpt(5) = 0.210;      %pto04 - monitorXX-15/32
hpt(6) = 0.250;      %pto05 - monitorXX-16/33
hpt(7) = 0.290;      %pto06 - monitorXX-17/34
hpt(8) = 0.330;      %pto07 - monitorXX-18/35
hpt(9) = 0.410;      %pto08 - monitorXX-19/36
hpt(10) = 0.480;     %pto09 - monitorXX-20/37
hpt(11) = 0.500;     %pto10 - monitorXX-21/38
%pontos adicionais
hpt(12) = 0.150;     %pto11 - monitorXX-22/39

```



```

hpt(13) = 0.250;          %pto12 - monitorXX-23/40
hpt(14) = 0.350;          %pto13 - monitorXX-24/41
hpt(15) = 0.150;          %pto14 - monitorXX-25/42
hpt(16) = 0.250;          %pto15 - monitorXX-26/43
hpt(17) = 0.350;          %pto16 - monitorXX-27/44
%*****
% IMPORTAR MONITORES
%numero de monitores importados
nmon = 34;
nm2 = (nmon/2);
%[A]=importdata(filename, delim, hline)
%nome dos monitores
monitor01 = 'monitor60-5A-11.out';
monitor02 = 'monitor60-5A-12.out';
monitor03 = 'monitor60-5A-13.out';
monitor04 = 'monitor60-5A-14.out';
monitor05 = 'monitor60-5A-15.out';
monitor06 = 'monitor60-5A-16.out';
monitor07 = 'monitor60-5A-17.out';
monitor08 = 'monitor60-5A-18.out';
monitor09 = 'monitor60-5A-19.out';
monitor10 = 'monitor60-5A-20.out';
monitor11 = 'monitor60-5A-21.out';
monitor12 = 'monitor60-5A-22.out';
monitor13 = 'monitor60-5A-23.out';
monitor14 = 'monitor60-5A-24.out';
monitor15 = 'monitor60-5A-25.out';
monitor16 = 'monitor60-5A-26.out';
monitor17 = 'monitor60-5A-27.out';
monitor18 = 'monitor60-5A-28.out';
monitor19 = 'monitor60-5A-29.out';
monitor20 = 'monitor60-5A-30.out';
monitor21 = 'monitor60-5A-31.out';
monitor22 = 'monitor60-5A-32.out';
monitor23 = 'monitor60-5A-33.out';
monitor24 = 'monitor60-5A-34.out';
monitor25 = 'monitor60-5A-35.out';
monitor26 = 'monitor60-5A-36.out';
monitor27 = 'monitor60-5A-37.out';
monitor28 = 'monitor60-5A-38.out';
monitor29 = 'monitor60-5A-39.out';
monitor30 = 'monitor60-5A-40.out';
monitor31 = 'monitor60-5A-41.out';
monitor32 = 'monitor60-5A-42.out';
monitor33 = 'monitor60-5A-43.out';
monitor34 = 'monitor60-5A-44.out';
%delimitador (espaço)
delim = ' ';
%numero de linhas do cabeçalho
header = 2;
%carrega dados
Tab(1) = importdata(monitor01,delim,header);
n(1) = max(size(Tab(1).data));
Tab(2) = importdata(monitor02,delim,header);
n(2) = max(size(Tab(2).data));
Tab(3) = importdata(monitor03,delim,header);
n(3) = max(size(Tab(3).data));
Tab(4) = importdata(monitor04,delim,header);
n(4) = max(size(Tab(4).data));
Tab(5) = importdata(monitor05,delim,header);

```

```

n(5) = max(size(Tab(5).data));
Tab(6) = importdata(monитор06,delim,header);
n(6) = max(size(Tab(6).data));
Tab(7) = importdata(monитор07,delim,header);
n(7) = max(size(Tab(7).data));
Tab(8) = importdata(monитор08,delim,header);
n(8) = max(size(Tab(8).data));
Tab(9) = importdata(monитор09,delim,header);
n(9) = max(size(Tab(9).data));
Tab(10) = importdata(monитор10,delim,header);
n(10) = max(size(Tab(10).data));
Tab(11) = importdata(monитор11,delim,header);
n(11) = max(size(Tab(11).data));
Tab(12) = importdata(monитор12,delim,header);
n(12) = max(size(Tab(12).data));
Tab(13) = importdata(monитор13,delim,header);
n(13) = max(size(Tab(13).data));
Tab(14) = importdata(monитор14,delim,header);
n(14) = max(size(Tab(14).data));
Tab(15) = importdata(monитор15,delim,header);
n(15) = max(size(Tab(15).data));
Tab(16) = importdata(monитор16,delim,header);
n(16) = max(size(Tab(16).data));
Tab(17) = importdata(monитор17,delim,header);
n(17) = max(size(Tab(17).data));
Tab(18) = importdata(monитор18,delim,header);
n(18) = max(size(Tab(18).data));
Tab(19) = importdata(monитор19,delim,header);
n(19) = max(size(Tab(19).data));
Tab(20) = importdata(monитор20,delim,header);
n(20) = max(size(Tab(20).data));
Tab(21) = importdata(monитор21,delim,header);
n(21) = max(size(Tab(21).data));
Tab(22) = importdata(monитор22,delim,header);
n(22) = max(size(Tab(22).data));
Tab(23) = importdata(monитор23,delim,header);
n(23) = max(size(Tab(23).data));
Tab(24) = importdata(monитор24,delim,header);
n(24) = max(size(Tab(24).data));
Tab(25) = importdata(monитор25,delim,header);
n(25) = max(size(Tab(25).data));
Tab(26) = importdata(monитор26,delim,header);
n(26) = max(size(Tab(26).data));
Tab(27) = importdata(monитор27,delim,header);
n(27) = max(size(Tab(27).data));
Tab(28) = importdata(monитор28,delim,header);
n(28) = max(size(Tab(28).data));
Tab(29) = importdata(monитор29,delim,header);
n(29) = max(size(Tab(29).data));
Tab(30) = importdata(monитор30,delim,header);
n(30) = max(size(Tab(30).data));
Tab(31) = importdata(monитор31,delim,header);
n(31) = max(size(Tab(31).data));
Tab(32) = importdata(monитор32,delim,header);
n(32) = max(size(Tab(32).data));
Tab(33) = importdata(monитор33,delim,header);
n(33) = max(size(Tab(33).data));
Tab(34) = importdata(monитор34,delim,header);
n(34) = max(size(Tab(34).data));
%*****

```

```

% ARQUIVOS DE RESULTADOS
arqefic1 = 'arq5tabvelocidade_C60-5A.txt';
arqefic2 = 'arq6tabpressao_C60-5A.txt';
arqefic3 = 'arq7perfisvelmax_C60-5A.txt';
arqefic4 = 'arq8eficiencia_C60-5A.txt';
%*****
%verificacao do tamanho dos monitores
no=0;
nl=0;
j=length(n);
for i=1:j-1,
    if (n(i)==n(i+1)),
        nl=nl+1; %numero de verificacoes positivas
    else no=no+1; %numero de verificacoes negativas
    end,
end,
if (no~=0),
    ('ATENCAO! Os monitores nao possuem mesmo numero de elementos')
else
    %montagem do vetor "tempo"
    t0=0;
    tf=Tab(1).data(n(1),1);
    tr=[t0:dt:tf]; %inclui o tempo "zero"
    %verificacao do tamanho dos monitores
    ntt=n(1)+1;
    mtt=length(tr);
    if (ntt~=mtt),
        ('ATENCAO! Os monitores nao possuem dados continuos no tempo')
    else ('OK! Os monitores possuem o numero de elementos correto')
%Se os vetores estao "OK" executa o restante do programa
%Na primeira coluna fica armazenado o tempo de escoamento 'tr' como
%referencia
%**Esse eh um recurso para monitores em que o tempo armazenado pelo FLUENT
%possui flutuacoes nas casas decimais mais altas
    tabelaov(:,1)=tr';
    tabelaop(:,1)=tr';
%Nas colunas seguintes ficam armazenadas as leituras de velocidades
%Como cada monitor ja possui 2 colunas, apenas a segunda coluna e
%armazenada na matriz "tabela"
%acrescenta a medida "nula" no tempo "zero"
    for i=1:nm2,
        tabelaov(:,i+1)=[0; Tab(i).data(:,2)];
    end,
%plota apenas uma parte da tabela para demonstracao
    tabelaov(1:8,:);
%=>Eh subtraida da medida de pressao a parcela referente a pressao
%hidrostatica (coluna de liquido) referente a profundidade de cada sonda
%numerica, uma vez que o FLUENT entrega uma medida de pressao estatica
%total no ponto (sonda tipo 'point')
    for i=1:nm2,
        tabpress(:,i)=Tab(nm2+i).data(:,2)-((d-hpt(i))*rho*g);
    end,
%acrescenta a medida "nula" no tempo "zero"
    for i=1:nm2,
        tabelaop(:,i+1)=[0; tabpress(:,i)];
    end,
%plota apenas uma parte da tabela para demonstracao
    tabelaop(1:8,:);
%*****
%FUNCAO DETERMINA PERFIS MAXIMOS

```

```

[tabvelmax,vmi,vma,tmi,tma,periodotmi,periodotma]=func031perfismaxPHSub(tab
elaov,T,d,delta,ni,np,hpt);
    tabvelmax
%FUNCAO DETERMINA EFICIENCIA

[Potmedtotal,etatotal,etaDintotal,Pw,ye1,ye2]=func032calculaeficPHSub(tabel
aov,tabelaop,ip5,T,epsilon,lambda,d,b,rho,g,dt,delta,hpt);
    Pw
    Potmedtotal
    etatotal
%*****
%plota apenas uma das linhas no grafico para demonstracao
    figure
    plot(tabelaov(:,1),tabelaov(:,7),'r--','LineWidth',2)
    grid on
%plota apenas uma das linhas no grafico para demonstracao
    figure
    plot(tabelaop(:,1),tabelaop(:,7),'r--','LineWidth',2)
    grid on
%plota os perfis no grafico para verificacao
    figure

plot(tabvelmax(:,2),tabvelmax(:,1),'r',tabvelmax(:,3),tabvelmax(:,1),'k--
','LineWidth',2)
    grid on
%escrevendo a matriz em um arquivo txt
    yv =
[tabelaov(:,1)';tabelaov(:,2)';tabelaov(:,3)';tabelaov(:,4)';tabelaov(:,5)'
;tabelaov(:,6)';tabelaov(:,7)';tabelaov(:,8)';tabelaov(:,9)';tabelaov(:,10)
';tabelaov(:,11)';tabelaov(:,12)';tabelaov(:,13)';tabelaov(:,14)';tabelaov(
(:,15)';tabelaov(:,16)';tabelaov(:,17)';tabelaov(:,18)'];
    fid1 = fopen(arqefic1,'w');

fprintf(fid1,'tempo(s)\tvel00(m/s)\tvel01(m/s)\tvel02(m/s)\tvel03(m/s)\tvel
04(m/s)\tvel05(m/s)\tvel06(m/s)\tvel07(m/s)\tvel08(m/s)\tvel09(m/s)\tvel10(
m/s)\tvel11(m/s)\tvel12(m/s)\tvel13(m/s)\tvel14(m/s)\tvel15(m/s)\tvel16(m/s
)\r\n');

fprintf(fid1,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f
\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',yv);
%deve ter o mesmo numero de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid1);
%escrevendo a matriz em um arquivo txt
    yp =
[tabelaop(:,1)';tabelaop(:,2)';tabelaop(:,3)';tabelaop(:,4)';tabelaop(:,5)'
;tabelaop(:,6)';tabelaop(:,7)';tabelaop(:,8)';tabelaop(:,9)';tabelaop(:,10)
';tabelaop(:,11)';tabelaop(:,12)';tabelaop(:,13)';tabelaop(:,14)';tabelaop(
(:,15)';tabelaop(:,16)';tabelaop(:,17)';tabelaop(:,18)'];
    fid2 = fopen(arqefic2,'w');

fprintf(fid2,'tempo(s)\tpres00(Pa)\tpres01(Pa)\tpres02(Pa)\tpres03(Pa)\tpre
s04(Pa)\tpres05(Pa)\tpres06(Pa)\tpres07(Pa)\tpres08(Pa)\tpres09(Pa)\tpres10
(Pa)\tpres11(Pa)\tpres12(Pa)\tpres13(Pa)\tpres14(Pa)\tpres15(Pa)\tpres16(Pa
)\r\n');

fprintf(fid2,'%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f
\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',yp);
%deve ter o mesmo numero de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fclose(fid2);

```

```

%escrevendo o resultado em um arquivo txt
    yvm = [tabvelmax(:,1)';tabvelmax(:,2)';tabvelmax(:,3)'];
    fid3 = fopen(arqefic3,'w');
    fprintf(fid3,'Perfis de Vmax para onda: T=%2.3fs - epsilon(H)=%2.3fm -
Lambda=%2.3fm - d=%2.3fm\r\n',T,epsilon,lambdad);
    fprintf(fid3,'Geometria da placa: H=%2.3fm - h=%2.3fm - L=%2.3fm -
e=%2.3fm\r\n\r\n',HT,h,L,e);
    fprintf(fid3,'Resultado:\r\n\r\n');
    fprintf(fid3,'X[%%]\tVmin[m/s]\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.2f\t%2.4f\r\n\r\n',X,vmi);
    fprintf(fid3,'Lambda/L\tVmin[m/s]\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(lambda/L),vmi);
    fprintf(fid3,'L/Lambda\tVmin[m/s]\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(L/lambda),vmi);
    fprintf(fid3,'z[m]\tvp-Vmin[m/s]\tvp-Vmax[m/s]\r\n\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.4f\t%2.6f\t%2.6f\r\n',yvm); %deve ter o mesmo numero
de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fprintf(fid3,'\r\n\r\nDados para verificacao:\r\n\r\n');
    fprintf(fid3,'Vmax-pto05[m/s]\tVmin-pto05[m/s]\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.4f\t%2.4f\r\n\r\n',vma,vmi);
    fprintf(fid3,'t-max[s]\tt-min[s]\r\n');
    fprintf(fid3,'%2.2f\t%2.2f\r\n\r\n',tma,tmi);
    fprintf(fid3,'tr-max\ttr-min\r\n');
    fprintf(fid3,'[%2.2fT]\t[%2.2fT]\r\n',periodotma,periodotmi);
    fclose(fid3);
%escrevendo o resultado em um arquivo txt
    fid4 = fopen(arqefic4,'w');
    fprintf(fid4,'Eficiencia do conversor para onda: T=%2.3fs -
epsilon(H)=%2.3fm - Lambda=%2.3fm - d=%2.3fm\r\n',T,epsilon,lambdad);
    fprintf(fid4,'Geometria da placa: H=%2.3fm - h=%2.3fm - L=%2.3fm -
e=%2.3fm\r\n\r\n',HT,h,L,e);
    fprintf(fid4,'Resultado:\r\n\r\n');
    fprintf(fid4,'X[%%]\tFi-total[%%]\r\n');
    fprintf(fid4,'%2.2f\t%2.4f\r\n\r\n',X,etatotal);
    fprintf(fid4,'Lambda/L\tFi-total[%%]\r\n');
    fprintf(fid4,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(lambda/L),etatotal);
    fprintf(fid4,'L/Lambda\tFi-total[%%]\r\n');
    fprintf(fid4,'%2.3f\t%2.4f\r\n\r\n',(L/lambda),etatotal);
    fprintf(fid4,'\r\nDados para verificacao:\r\n\r\n');
    fprintf(fid4,'P_m=\t%2.4f\t[W]\r\n\r\n',Potmedtotal);
    fprintf(fid4,'P_w=\t%2.4f\t[W]\r\n\r\n',Pw);
    fprintf(fid4,'ciclo-T\tPcin-m[W]\tPdin-m[W]\tP-m[W]\t|\t|fi-
din[%%]\t|fi-tot[%%]\r\n');
    fprintf(fid4,'01\t%2.4f\t%2.4f\t%2.4f\t|\t|2.4f\t%2.4f\r\n',ye1);
%deve ter o mesmo numero de colunas que esta sendo incluido em "y"
    fprintf(fid4,'02\t%2.4f\t%2.4f\t%2.4f\t|\t|2.4f\t%2.4f\r\n',ye2);
    fclose(fid4);
end,
end,
%=====>FIM.

```

#### 4) Código da função (sub-rotina) de análise dos perfis de velocidade sob o WEC-PHS:

---

```

%DETERMINA PERFIS DE VELOCIDADE MAXIMOS (no intervalo [3T,11T])
%OBS: este codigo preve o uso de 11 pontos de medicao sob a placa
(monitores)

```

```

function
[tabvelmax,vmi,vma,tmi,tma,periodotmi,periodotma]=func031perfismaxPHSub(tab
elaov,T,D,delta,ni,np,hpt)
% # Usa as tabelas com todos os dados obtidos dos monitores.
%limites de variacao para 'j' linha
j1=(ni*delta)+1; %ponto inicial
j2=j1+np;
n=1;
  for j=j1:j2,
    ptomedio(n)=tabelaov(j,7);
    n=n+1;
  end,
%localiza a maior e a menor velocidades no ponto medio e sua posicao
[vma,ima]=max(ptomedio);
[vmi,imi]=min(ptomedio);
%ajuste da posicao em relacao a tabela
imar=ima+j1-1;
imir=imi+j1-1;
m=12; %devido a coluna 1 armazenar o tempo
%coleta os valores dos outros pontos correspondentes ao mesmo instante 't'
  for i=1:11,
    pvma(i)=tabelaov(imar,m);
    pvmi(i)=tabelaov(imir,m);
    m=m-1;
  end,
%coleta o instante de tempo de cada ocorrencia
tma=tabelaov(imar,1);
tmi=tabelaov(imir,1);
%calcula instante relativo a T
periodotma=tma/T;
periodotmi=tmi/T;
%vetor posicao 'z' dos pontos
  jp=11;
  for i=1:11,
    pz(i) = -(D - hpt(jp));
    jp=jp-1;
  end,
%monta tabela resposta
tabvelmax(:,1)=pz';
tabvelmax(:,2)=pvmi';
tabvelmax(:,3)=pvma';
end
%=====>FIM.

```

### 5) Código da função (sub-rotina) de cálculo da eficiência teórica do WEC-PHS:

```

%CALCULA POTENCIA MEDIA/EFICIENCIA DO ESCOAMENTO SOB A PLACA
%OBS: este codigo preve o uso de 11 pontos de medicao sob a placa
(monitores)
function
[Potmedtotal,etatotal,etaDintotal,Pw,ye1,ye2]=func032calculaeficPHSub(tabel
aov,tabelaop,ip5,T,H,L,D,b,rho,g,dta,nd,hpt)
% #1: Usa as tabelas com todos os dados obtidos dos monitores.
% #2: Em "tabelaop" a parcela de pressao hidrostatica ja foi subtraida,
%de forma que os valores sao de aplicacao direta na equacao
%-----
j1=ip5; %POSICAO DETERMINADA PELO CODIGO "cod01elevacaoXXX.m".

```

```

%Serve para limitar o intervalo de dados utilizados no calculo de "Pm"
%e da Eficiencia.
%Este calculo faz a media entre 2 periodos de onda,
%compreendendo os dados entre a 5a. crista e a 7a. crista da onda gerada.
j2=j1+nd;
%-----
%coleta dados do 1o. ciclo [T] da onda
for i=1:11,
    colv=1;
    for j=j1:j2,
        v1(i,colv)=tabelaov(j,i+1);
        colv=colv+1;
    end,
end;
for i=1:11,
    colp=1;
    for j=j1:j2,
        p1(i,colp)=tabelaop(j,i+1);
        colp=colp+1;
    end,
end;
%coleta dados do 2o. ciclo [T] da onda
j3=j2+nd;
for i=1:11,
    colv=1;
    for j=j2:j3,
        v2(i,colv)=tabelaov(j,i+1);
        colv=colv+1;
    end,
end;
for i=1:11,
    colp=1;
    for j=j2:j3,
        p2(i,colp)=tabelaop(j,i+1);
        colp=colp+1;
    end,
end;
%*****
%montagem do vetor 'dz'
for i=1:10,
    dz(i)=hpt(i+1)-hpt(i);
end,
%montagem do vetor 'dt'
for j=1:nd,
    dt(j)=dta; %intervalo de gravacao do monitor => T/nd
end;
%*****
%CALCULO MEDIA TEMPORAL
for i=1:11,
    for j=1:nd,
        p1(i,j)=(p1(i,j)+p1(i,j+1))/2; %media no tempo de p e v
        v1(i,j)=(v1(i,j)+v1(i,j+1))/2; %passou de 11 X 'n+1' para 11 X 'n'
        p2(i,j)=(p2(i,j)+p2(i,j+1))/2;
        v2(i,j)=(v2(i,j)+v2(i,j+1))/2;
    end,
end;
%CALCULO MEDIA ESPACIAL
for j=1:nd,
    for i=1:10,
        p1(i,j)=(p1(i,j)+p1(i+1,j))/2; %media no espaco de p e v
    end,
end;

```

```

v1(i,j)=(v1(i,j)+v1(i+1,j))/2; %passou de 11 X 'n' para 10 X 'n'
p2(i,j)=(p2(i,j)+p2(i+1,j))/2;
v2(i,j)=(v2(i,j)+v2(i+1,j))/2;
end,
end;
%CALCULO INTEGRACAO NO ESPACO
for j=1:nd, % trabalhamos com T/dt por isso j varia de 1 a 'n'
    intel(1,j)=(abs(p1(1,j))+0.5*rho*(v1(1,j))^2)*abs(v1(1,j))*dz(1);
    intel1(1,j)=(abs(p1(1,j)))*abs(v1(1,j))*dz(1);
    intel2(1,j)=(0.5*rho*(v1(1,j))^2)*abs(v1(1,j))*dz(1);
    inte2(1,j)=(abs(p2(1,j))+0.5*rho*(v2(1,j))^2)*abs(v2(1,j))*dz(1);
    inte21(1,j)=(abs(p2(1,j)))*abs(v2(1,j))*dz(1);
    inte22(1,j)=(0.5*rho*(v2(1,j))^2)*abs(v2(1,j))*dz(1);
end;
for j=1:nd,
    for i=2:10,
        intel(i,j)=intel(i-
1,j)+(abs(p1(i,j))+0.5*rho*(v1(i,j))^2)*abs(v1(i,j))*dz(i);
        intel1(i,j)=intel1(i-1,j)+(abs(p1(i,j)))*abs(v1(i,j))*dz(i);
        intel2(i,j)=intel2(i-1,j)+(0.5*rho*(v1(i,j))^2)*abs(v1(i,j))*dz(i);
        inte2(i,j)=inte2(i-
1,j)+(abs(p2(i,j))+0.5*rho*(v2(i,j))^2)*abs(v2(i,j))*dz(i);
        inte21(i,j)=inte21(i-1,j)+(abs(p2(i,j)))*abs(v2(i,j))*dz(i);
        inte22(i,j)=inte22(i-1,j)+(0.5*rho*(v2(i,j))^2)*abs(v2(i,j))*dz(i);
    end,
end;
%CALCULO INTEGRACAO NO TEMPO
intt1(1)=abs(intel(10,1));
intt11(1)=abs(intel1(10,1));
intt12(1)=abs(intel2(10,1));
intt2(1)=abs(inte2(10,1));
intt21(1)=abs(inte21(10,1));
intt22(1)=abs(inte22(10,1));
for j=2:nd;
    intt1(j)=abs(intt1(j-1))+abs(intel(10,j))*dt(j);
    intt11(j)=abs(intt11(j-1))+abs(intel1(10,j))*dt(j);
    intt12(j)=abs(intt12(j-1))+abs(intel2(10,j))*dt(j);
    intt2(j)=abs(intt2(j-1))+abs(inte2(10,j))*dt(j);
    intt21(j)=abs(intt21(j-1))+abs(inte21(10,j))*dt(j);
    intt22(j)=abs(intt22(j-1))+abs(inte22(10,j))*dt(j);
end;
%ARMAZENA RESULTADO FINAL DE INTEGRACAO
intd1=intt1(nd);
intd11=intt11(nd);
intd12=intt12(nd);
intd2=intt2(nd);
intd21=intt21(nd);
intd22=intt22(nd);
% ==> potencia media por periodo de onda
Potmed1=(1/T)*(intd1);
PmEst1=(1/T)*(intd11);
PmDin1=(1/T)*(intd12);
Potmed2=(1/T)*(intd2);
PmEst2=(1/T)*(intd21);
PmDin2=(1/T)*(intd22);
%*****
%CALCULA POTENCIA MEDIA DA ONDA INCIDENTE (eq. analitica - 2a. ordem)
Pw=(1/16)*rho*g*(H^2)*(L/T)*b*(1+((4*(pi)*D/L)/(sinh(4*(pi)*D/L)))*(1+((9/64)*((H^2)/((2*(pi)/L)^4)*(D^6)))));
%*****

```



```
% ==> eficiencia do escoamento sob a placa
eta1=100*(Potmed1/Pw);
etaDin1=100*(PmDin1/Pw);
eta2=100*(Potmed2/Pw);
etaDin2=100*(PmDin2/Pw);
Potmedtotal=(Potmed1+Potmed2)/2;
etatotal=(eta1+eta2)/2;
etaDintotal=(etaDin1+etaDin2)/2;
%*****
ye1=[PmEst1;PmDin1;Potmed1;etaDin1;eta1];
ye2=[PmEst2;PmDin2;Potmed2;etaDin2;eta2];
%*****
end
%=====>FIM.
```

---

## APÊNDICE D – Design Construtal: Rol de Geometrias Analisadas

### D.1 Design Construtal 1ª Formulação: Modelo em Escala Real

Tabela D.1 – Lista de casos simulados na otimização do GDL  $h$  para  $\phi_A = 0,05$  e onda  $T = 12,00$  s ( $A_T = 256,00$  m<sup>2</sup>).

Caso	$h$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$e$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
1	1,92	2,021	126,667	0,101	12,80	20,00	1,139
2	2,08	2,189	116,923	0,109	12,80	21,67	1,051
3	2,24	2,358	108,571	0,118	12,80	23,33	0,976
4	2,40	2,526	101,333	0,126	12,80	25,00	0,911
5	2,56	2,695	95,000	0,135	12,80	26,67	0,854
6	2,72	2,863	89,412	0,143	12,80	28,33	0,804
7	2,88	3,032	84,444	0,152	12,80	30,00	0,759
8	3,04	3,200	80,000	0,160	12,80	31,67	0,719
9	3,20	3,368	76,000	0,168	12,80	33,33	0,683
10	3,36	3,537	72,381	0,177	12,80	35,00	0,651
11	3,52	3,705	69,091	0,185	12,80	36,67	0,621
12	3,68	3,874	66,087	0,194	12,80	38,33	0,594
13	3,84	4,042	63,333	0,202	12,80	40,00	0,569
14	4,00	4,211	60,800	0,211	12,80	41,67	0,547
15	4,16	4,379	58,462	0,219	12,80	43,33	0,526
16	4,32	4,547	56,296	0,227	12,80	45,00	0,506
17	4,48	4,716	54,286	0,236	12,80	46,67	0,488
18	4,64	4,884	52,414	0,244	12,80	48,33	0,471
19	4,80	5,053	50,667	0,253	12,80	50,00	0,456
20	4,96	5,221	49,032	0,261	12,80	51,67	0,441
21	5,12	5,389	47,500	0,269	12,80	53,33	0,427
22	5,28	5,558	46,061	0,278	12,80	55,00	0,414
23	5,44	5,726	44,706	0,286	12,80	56,67	0,402
24	5,60	5,895	43,429	0,295	12,80	58,33	0,390
25	5,76	6,063	42,222	0,303	12,80	60,00	0,380
26	5,92	6,232	41,081	0,312	12,80	61,67	0,369
27	6,08	6,400	40,000	0,320	12,80	63,33	0,360
28	6,24	6,568	38,974	0,328	12,80	65,00	0,350
29	6,40	6,737	38,000	0,337	12,80	66,67	0,342
30	6,56	6,905	37,073	0,345	12,80	68,33	0,333
31	6,72	7,074	36,190	0,354	12,80	70,00	0,325
32	6,88	7,242	35,349	0,362	12,80	71,67	0,318
33	7,04	7,411	34,545	0,371	12,80	73,33	0,311

Tabela D.1 – Lista de casos simulados na otimização do GDL  $h$  para  $\phi_A = 0,05$  e onda  
 $T = 12,00$  s ( $A_T = 256,00$  m<sup>2</sup>, continuação).

Caso	$h$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$e$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$X$ (%)	$(L/\lambda)$
34	7,20	7,579	33,778	0,379	12,80	75,00	0,304
35	7,36	7,747	33,043	0,387	12,80	76,67	0,297
36	7,52	7,916	32,340	0,396	12,80	78,33	0,291
37	7,68	8,084	31,667	0,404	12,80	80,00	0,285
38	7,84	8,253	31,020	0,413	12,80	81,67	0,279
39	8,00	8,421	30,400	0,421	12,80	83,33	0,273
40	8,16	8,589	29,804	0,429	12,80	85,00	0,268
41	8,32	8,758	29,231	0,438	12,80	86,67	0,263
42	8,48	8,926	28,679	0,446	12,80	88,33	0,258
43	8,64	9,095	28,148	0,455	12,80	90,00	0,253

## D.2 Design Construtal 2ª Formulação: Onda $T = 6,00$ s

Tabela D.2 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,01$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	14,354	4,59	27,56	0,300
22,00	2,112	0,32	2,432	13,049	4,18	27,56	0,273
24,00	2,304	0,32	2,624	11,962	3,83	27,56	0,250
26,00	2,496	0,32	2,816	11,041	3,53	27,56	0,231
28,00	2,688	0,32	3,008	10,253	3,28	27,56	0,214
30,00	2,880	0,32	3,200	9,569	3,06	27,56	0,200
32,00	3,072	0,32	3,392	8,971	2,87	27,56	0,188
34,00	3,264	0,32	3,584	8,443	2,70	27,56	0,176
36,00	3,456	0,32	3,776	7,974	2,55	27,56	0,167
38,00	3,648	0,32	3,968	7,555	2,42	27,56	0,158
40,00	3,840	0,32	4,160	7,177	2,30	27,56	0,150
42,00	4,032	0,32	4,352	6,835	2,19	27,56	0,143
44,00	4,224	0,32	4,544	6,525	2,09	27,56	0,136
46,00	4,416	0,32	4,736	6,241	2,00	27,56	0,130
48,00	4,608	0,32	4,928	5,981	1,91	27,56	0,125
50,00	4,800	0,32	5,120	5,742	1,84	27,56	0,120
52,00	4,992	0,32	5,312	5,521	1,77	27,56	0,115
54,00	5,184	0,32	5,504	5,316	1,70	27,56	0,111
56,00	5,376	0,32	5,696	5,126	1,64	27,56	0,107
58,00	5,568	0,32	5,888	4,950	1,58	27,56	0,103
60,00	5,760	0,32	6,080	4,785	1,53	27,56	0,100
62,00	5,952	0,32	6,272	4,630	1,48	27,56	0,097
64,00	6,144	0,32	6,464	4,486	1,44	27,56	0,094
66,00	6,336	0,32	6,656	4,350	1,39	27,56	0,091
68,00	6,528	0,32	6,848	4,222	1,35	27,56	0,088
70,00	6,720	0,32	7,040	4,101	1,31	27,56	0,086
72,00	6,912	0,32	7,232	3,987	1,28	27,56	0,083
74,00	7,104	0,32	7,424	3,879	1,24	27,56	0,081
76,00	7,296	0,32	7,616	3,777	1,21	27,56	0,079
78,00	7,488	0,32	7,808	3,681	1,18	27,56	0,077
80,00	7,680	0,32	8,000	3,589	1,15	27,56	0,075
82,00	7,872	0,32	8,192	3,501	1,12	27,56	0,073
84,00	8,064	0,32	8,384	3,418	1,09	27,56	0,071
86,00	8,256	0,32	8,576	3,338	1,07	27,56	0,070
88,00	8,448	0,32	8,768	3,262	1,04	27,56	0,068
90,00	8,640	0,32	8,960	3,190	1,02	27,56	0,067

Tabela D.3 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,03$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	43,061	13,78	82,68	0,900
22,00	2,112	0,32	2,432	39,147	12,53	82,68	0,818
24,00	2,304	0,32	2,624	35,885	11,48	82,68	0,750
26,00	2,496	0,32	2,816	33,124	10,60	82,68	0,692
28,00	2,688	0,32	3,008	30,758	9,84	82,68	0,643
30,00	2,880	0,32	3,200	28,708	9,19	82,68	0,600
32,00	3,072	0,32	3,392	26,913	8,61	82,68	0,563
34,00	3,264	0,32	3,584	25,330	8,11	82,68	0,529
36,00	3,456	0,32	3,776	23,923	7,66	82,68	0,500
38,00	3,648	0,32	3,968	22,664	7,25	82,68	0,474
40,00	3,840	0,32	4,160	21,531	6,89	82,68	0,450
42,00	4,032	0,32	4,352	20,505	6,56	82,68	0,429
44,00	4,224	0,32	4,544	19,573	6,26	82,68	0,409
46,00	4,416	0,32	4,736	18,722	5,99	82,68	0,391
48,00	4,608	0,32	4,928	17,942	5,74	82,68	0,375
50,00	4,800	0,32	5,120	17,225	5,51	82,68	0,360
52,00	4,992	0,32	5,312	16,562	5,30	82,68	0,346
54,00	5,184	0,32	5,504	15,949	5,10	82,68	0,333
56,00	5,376	0,32	5,696	15,379	4,92	82,68	0,321
58,00	5,568	0,32	5,888	14,849	4,75	82,68	0,310
60,00	5,760	0,32	6,080	14,354	4,59	82,68	0,300
62,00	5,952	0,32	6,272	13,891	4,45	82,68	0,290
64,00	6,144	0,32	6,464	13,457	4,31	82,68	0,281
66,00	6,336	0,32	6,656	13,049	4,18	82,68	0,273
68,00	6,528	0,32	6,848	12,665	4,05	82,68	0,265
70,00	6,720	0,32	7,040	12,303	3,94	82,68	0,257
72,00	6,912	0,32	7,232	11,962	3,83	82,68	0,250
74,00	7,104	0,32	7,424	11,638	3,72	82,68	0,243
76,00	7,296	0,32	7,616	11,332	3,63	82,68	0,237
78,00	7,488	0,32	7,808	11,041	3,53	82,68	0,231
80,00	7,680	0,32	8,000	10,765	3,44	82,68	0,225
82,00	7,872	0,32	8,192	10,503	3,36	82,68	0,220
84,00	8,064	0,32	8,384	10,253	3,28	82,68	0,214
86,00	8,256	0,32	8,576	10,014	3,20	82,68	0,209
88,00	8,448	0,32	8,768	9,787	3,13	82,68	0,205
90,00	8,640	0,32	8,960	9,569	3,06	82,68	0,200

Tabela D.4 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,05$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
30,00	2,880	0,32	3,200	47,846	15,31	137,80	1,000
32,00	3,072	0,32	3,392	44,856	14,35	137,80	0,938
34,00	3,264	0,32	3,584	42,217	13,51	137,80	0,882
36,00	3,456	0,32	3,776	39,872	12,76	137,80	0,833
38,00	3,648	0,32	3,968	37,773	12,09	137,80	0,789
40,00	3,840	0,32	4,160	35,885	11,48	137,80	0,750
42,00	4,032	0,32	4,352	34,176	10,94	137,80	0,714
44,00	4,224	0,32	4,544	32,622	10,44	137,80	0,682
46,00	4,416	0,32	4,736	31,204	9,99	137,80	0,652
48,00	4,608	0,32	4,928	29,904	9,57	137,80	0,625
50,00	4,800	0,32	5,120	28,708	9,19	137,80	0,600
52,00	4,992	0,32	5,312	27,604	8,83	137,80	0,577
54,00	5,184	0,32	5,504	26,581	8,51	137,80	0,556
56,00	5,376	0,32	5,696	25,632	8,20	137,80	0,536
58,00	5,568	0,32	5,888	24,748	7,92	137,80	0,517
60,00	5,760	0,32	6,080	23,923	7,66	137,80	0,500
62,00	5,952	0,32	6,272	23,151	7,41	137,80	0,484
64,00	6,144	0,32	6,464	22,428	7,18	137,80	0,469
66,00	6,336	0,32	6,656	21,748	6,96	137,80	0,455
68,00	6,528	0,32	6,848	21,109	6,75	137,80	0,441
70,00	6,720	0,32	7,040	20,505	6,56	137,80	0,429
72,00	6,912	0,32	7,232	19,936	6,38	137,80	0,417
74,00	7,104	0,32	7,424	19,397	6,21	137,80	0,405
76,00	7,296	0,32	7,616	18,887	6,04	137,80	0,395
78,00	7,488	0,32	7,808	18,402	5,89	137,80	0,385
80,00	7,680	0,32	8,000	17,942	5,74	137,80	0,375
82,00	7,872	0,32	8,192	17,505	5,60	137,80	0,366
84,00	8,064	0,32	8,384	17,088	5,47	137,80	0,357
86,00	8,256	0,32	8,576	16,691	5,34	137,80	0,349
88,00	8,448	0,32	8,768	16,311	5,22	137,80	0,341
90,00	8,640	0,32	8,960	15,949	5,10	137,80	0,333

Tabela D.5 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
48,00	4,608	0,32	4,928	47,846	15,31	220,47	1,000
50,00	4,800	0,32	5,120	45,932	14,70	220,47	0,960
52,00	4,992	0,32	5,312	44,166	14,13	220,47	0,923
54,00	5,184	0,32	5,504	42,530	13,61	220,47	0,889
56,00	5,376	0,32	5,696	41,011	13,12	220,47	0,857

Tabela D.5 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>,  
continuação).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
58,00	5,568	0,32	5,888	39,597	12,67	220,47	0,828
60,00	5,760	0,32	6,080	38,277	12,25	220,47	0,800
62,00	5,952	0,32	6,272	37,042	11,85	220,47	0,774
64,00	6,144	0,32	6,464	35,885	11,48	220,47	0,750
66,00	6,336	0,32	6,656	34,797	11,14	220,47	0,727
68,00	6,528	0,32	6,848	33,774	10,81	220,47	0,706
70,00	6,720	0,32	7,040	32,809	10,50	220,47	0,686
72,00	6,912	0,32	7,232	31,897	10,21	220,47	0,667
74,00	7,104	0,32	7,424	31,035	9,93	220,47	0,649
76,00	7,296	0,32	7,616	30,219	9,67	220,47	0,632
78,00	7,488	0,32	7,808	29,444	9,42	220,47	0,615
80,00	7,680	0,32	8,000	28,708	9,19	220,47	0,600
82,00	7,872	0,32	8,192	28,007	8,96	220,47	0,585
84,00	8,064	0,32	8,384	27,341	8,75	220,47	0,571
86,00	8,256	0,32	8,576	26,705	8,55	220,47	0,558
88,00	8,448	0,32	8,768	26,098	8,35	220,47	0,545
90,00	8,640	0,32	8,960	25,518	8,17	220,47	0,533

Tabela D.6 – Lista de casos simulados para onda  $T = 6,00$  s e  $\phi_B = 0,10$  ( $A_R = 2755,93$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
60,00	5,760	0,32	6,080	47,846	15,31	275,59	1,000
62,00	5,952	0,32	6,272	46,303	14,82	275,59	0,968
64,00	6,144	0,32	6,464	44,856	14,35	275,59	0,938
66,00	6,336	0,32	6,656	43,496	13,92	275,59	0,909
68,00	6,528	0,32	6,848	42,217	13,51	275,59	0,882
70,00	6,720	0,32	7,040	41,011	13,12	275,59	0,857
72,00	6,912	0,32	7,232	39,872	12,76	275,59	0,833
74,00	7,104	0,32	7,424	38,794	12,41	275,59	0,811
76,00	7,296	0,32	7,616	37,773	12,09	275,59	0,789
78,00	7,488	0,32	7,808	36,805	11,78	275,59	0,769
80,00	7,680	0,32	8,000	35,885	11,48	275,59	0,750
82,00	7,872	0,32	8,192	35,009	11,20	275,59	0,732
84,00	8,064	0,32	8,384	34,176	10,94	275,59	0,714
86,00	8,256	0,32	8,576	33,381	10,68	275,59	0,698
88,00	8,448	0,32	8,768	32,622	10,44	275,59	0,682
90,00	8,640	0,32	8,960	31,897	10,21	275,59	0,667

### D.3 Design Construtal 2ª Formulação: Onda $T = 8,00$ s

Tabela D.7 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,01$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	20,938	6,70	40,20	0,300
22,00	2,112	0,32	2,432	19,034	6,09	40,20	0,273
24,00	2,304	0,32	2,624	17,448	5,58	40,20	0,250
26,00	2,496	0,32	2,816	16,106	5,15	40,20	0,231
28,00	2,688	0,32	3,008	14,955	4,79	40,20	0,214
30,00	2,880	0,32	3,200	13,958	4,47	40,20	0,200
32,00	3,072	0,32	3,392	13,086	4,19	40,20	0,188
34,00	3,264	0,32	3,584	12,316	3,94	40,20	0,176
36,00	3,456	0,32	3,776	11,632	3,72	40,20	0,167
38,00	3,648	0,32	3,968	11,020	3,53	40,20	0,158
40,00	3,840	0,32	4,160	10,469	3,35	40,20	0,150
42,00	4,032	0,32	4,352	9,970	3,19	40,20	0,143
44,00	4,224	0,32	4,544	9,517	3,05	40,20	0,136
46,00	4,416	0,32	4,736	9,103	2,91	40,20	0,130
48,00	4,608	0,32	4,928	8,724	2,79	40,20	0,125
50,00	4,800	0,32	5,120	8,375	2,68	40,20	0,120
52,00	4,992	0,32	5,312	8,053	2,58	40,20	0,115
54,00	5,184	0,32	5,504	7,755	2,48	40,20	0,111
56,00	5,376	0,32	5,696	7,478	2,39	40,20	0,107
58,00	5,568	0,32	5,888	7,220	2,31	40,20	0,103
60,00	5,760	0,32	6,080	6,979	2,23	40,20	0,100
62,00	5,952	0,32	6,272	6,754	2,16	40,20	0,097
64,00	6,144	0,32	6,464	6,543	2,09	40,20	0,094
66,00	6,336	0,32	6,656	6,345	2,03	40,20	0,091
68,00	6,528	0,32	6,848	6,158	1,97	40,20	0,088
70,00	6,720	0,32	7,040	5,982	1,91	40,20	0,086
72,00	6,912	0,32	7,232	5,816	1,86	40,20	0,083
74,00	7,104	0,32	7,424	5,659	1,81	40,20	0,081
76,00	7,296	0,32	7,616	5,510	1,76	40,20	0,079
78,00	7,488	0,32	7,808	5,369	1,72	40,20	0,077
80,00	7,680	0,32	8,000	5,234	1,68	40,20	0,075
82,00	7,872	0,32	8,192	5,107	1,63	40,20	0,073
84,00	8,064	0,32	8,384	4,985	1,60	40,20	0,071
86,00	8,256	0,32	8,576	4,869	1,56	40,20	0,070
88,00	8,448	0,32	8,768	4,759	1,52	40,20	0,068
90,00	8,640	0,32	8,960	4,653	1,49	40,20	0,067



Tabela D.8 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,03$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	62,813	20,10	120,60	0,900
22,00	2,112	0,32	2,432	57,103	18,27	120,60	0,818
24,00	2,304	0,32	2,624	52,344	16,75	120,60	0,750
26,00	2,496	0,32	2,816	48,318	15,46	120,60	0,692
28,00	2,688	0,32	3,008	44,866	14,36	120,60	0,643
30,00	2,880	0,32	3,200	41,875	13,40	120,60	0,600
32,00	3,072	0,32	3,392	39,258	12,56	120,60	0,563
34,00	3,264	0,32	3,584	36,949	11,82	120,60	0,529
36,00	3,456	0,32	3,776	34,896	11,17	120,60	0,500
38,00	3,648	0,32	3,968	33,059	10,58	120,60	0,474
40,00	3,840	0,32	4,160	31,406	10,05	120,60	0,450
42,00	4,032	0,32	4,352	29,911	9,57	120,60	0,429
44,00	4,224	0,32	4,544	28,551	9,14	120,60	0,409
46,00	4,416	0,32	4,736	27,310	8,74	120,60	0,391
48,00	4,608	0,32	4,928	26,172	8,38	120,60	0,375
50,00	4,800	0,32	5,120	25,125	8,04	120,60	0,360
52,00	4,992	0,32	5,312	24,159	7,73	120,60	0,346
54,00	5,184	0,32	5,504	23,264	7,44	120,60	0,333
56,00	5,376	0,32	5,696	22,433	7,18	120,60	0,321
58,00	5,568	0,32	5,888	21,660	6,93	120,60	0,310
60,00	5,760	0,32	6,080	20,938	6,70	120,60	0,300
62,00	5,952	0,32	6,272	20,262	6,48	120,60	0,290
64,00	6,144	0,32	6,464	19,629	6,28	120,60	0,281
66,00	6,336	0,32	6,656	19,034	6,09	120,60	0,273
68,00	6,528	0,32	6,848	18,474	5,91	120,60	0,265
70,00	6,720	0,32	7,040	17,947	5,74	120,60	0,257
72,00	6,912	0,32	7,232	17,448	5,58	120,60	0,250
74,00	7,104	0,32	7,424	16,976	5,43	120,60	0,243
76,00	7,296	0,32	7,616	16,530	5,29	120,60	0,237
78,00	7,488	0,32	7,808	16,106	5,15	120,60	0,231
80,00	7,680	0,32	8,000	15,703	5,03	120,60	0,225
82,00	7,872	0,32	8,192	15,320	4,90	120,60	0,220
84,00	8,064	0,32	8,384	14,955	4,79	120,60	0,214
86,00	8,256	0,32	8,576	14,608	4,67	120,60	0,209
88,00	8,448	0,32	8,768	14,276	4,57	120,60	0,205
90,00	8,640	0,32	8,960	13,958	4,47	120,60	0,200

Tabela D.9 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,05$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
30,00	2,880	0,32	3,200	69,792	22,33	201,00	1,000
32,00	3,072	0,32	3,392	65,430	20,94	201,00	0,938
34,00	3,264	0,32	3,584	61,581	19,71	201,00	0,882
36,00	3,456	0,32	3,776	58,160	18,61	201,00	0,833
38,00	3,648	0,32	3,968	55,099	17,63	201,00	0,789
40,00	3,840	0,32	4,160	52,344	16,75	201,00	0,750
42,00	4,032	0,32	4,352	49,851	15,95	201,00	0,714
44,00	4,224	0,32	4,544	47,586	15,23	201,00	0,682
46,00	4,416	0,32	4,736	45,517	14,57	201,00	0,652
48,00	4,608	0,32	4,928	43,620	13,96	201,00	0,625
50,00	4,800	0,32	5,120	41,875	13,40	201,00	0,600
52,00	4,992	0,32	5,312	40,265	12,88	201,00	0,577
54,00	5,184	0,32	5,504	38,773	12,41	201,00	0,556
56,00	5,376	0,32	5,696	37,389	11,96	201,00	0,536
58,00	5,568	0,32	5,888	36,099	11,55	201,00	0,517
60,00	5,760	0,32	6,080	34,896	11,17	201,00	0,500
62,00	5,952	0,32	6,272	33,770	10,81	201,00	0,484
64,00	6,144	0,32	6,464	32,715	10,47	201,00	0,469
66,00	6,336	0,32	6,656	31,724	10,15	201,00	0,455
68,00	6,528	0,32	6,848	30,791	9,85	201,00	0,441
70,00	6,720	0,32	7,040	29,911	9,57	201,00	0,429
72,00	6,912	0,32	7,232	29,080	9,31	201,00	0,417
74,00	7,104	0,32	7,424	28,294	9,05	201,00	0,405
76,00	7,296	0,32	7,616	27,550	8,82	201,00	0,395
78,00	7,488	0,32	7,808	26,843	8,59	201,00	0,385
80,00	7,680	0,32	8,000	26,172	8,38	201,00	0,375
82,00	7,872	0,32	8,192	25,534	8,17	201,00	0,366
84,00	8,064	0,32	8,384	24,926	7,98	201,00	0,357
86,00	8,256	0,32	8,576	24,346	7,79	201,00	0,349
88,00	8,448	0,32	8,768	23,793	7,61	201,00	0,341
90,00	8,640	0,32	8,960	23,264	7,44	201,00	0,333

Tabela D.10 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
48,00	4,608	0,32	4,928	69,792	22,33	321,60	1,000
50,00	4,800	0,32	5,120	67,000	21,44	321,60	0,960
52,00	4,992	0,32	5,312	64,423	20,62	321,60	0,923
54,00	5,184	0,32	5,504	62,037	19,85	321,60	0,889
56,00	5,376	0,32	5,696	59,822	19,14	321,60	0,857

Tabela D.10 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>,  
continuação).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
58,00	5,568	0,32	5,888	57,759	18,48	321,60	0,828
60,00	5,760	0,32	6,080	55,834	17,87	321,60	0,800
62,00	5,952	0,32	6,272	54,033	17,29	321,60	0,774
64,00	6,144	0,32	6,464	52,344	16,75	321,60	0,750
66,00	6,336	0,32	6,656	50,758	16,24	321,60	0,727
68,00	6,528	0,32	6,848	49,265	15,76	321,60	0,706
70,00	6,720	0,32	7,040	47,857	15,31	321,60	0,686
72,00	6,912	0,32	7,232	46,528	14,89	321,60	0,667
74,00	7,104	0,32	7,424	45,271	14,49	321,60	0,649
76,00	7,296	0,32	7,616	44,079	14,11	321,60	0,632
78,00	7,488	0,32	7,808	42,949	13,74	321,60	0,615
80,00	7,680	0,32	8,000	41,875	13,40	321,60	0,600
82,00	7,872	0,32	8,192	40,854	13,07	321,60	0,585
84,00	8,064	0,32	8,384	39,881	12,76	321,60	0,571
86,00	8,256	0,32	8,576	38,954	12,47	321,60	0,558
88,00	8,448	0,32	8,768	38,068	12,18	321,60	0,545
90,00	8,640	0,32	8,960	37,222	11,91	321,60	0,533

Tabela D.11 – Lista de casos simulados para onda  $T = 8,00$  s e  $\phi_B = 0,10$  ( $A_R = 4020,02$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
60,00	5,760	0,32	6,080	69,792	22,33	402,00	1,000
62,00	5,952	0,32	6,272	67,541	21,61	402,00	0,968
64,00	6,144	0,32	6,464	65,430	20,94	402,00	0,938
66,00	6,336	0,32	6,656	63,447	20,30	402,00	0,909
68,00	6,528	0,32	6,848	61,581	19,71	402,00	0,882
70,00	6,720	0,32	7,040	59,822	19,14	402,00	0,857
72,00	6,912	0,32	7,232	58,160	18,61	402,00	0,833
74,00	7,104	0,32	7,424	56,588	18,11	402,00	0,811
76,00	7,296	0,32	7,616	55,099	17,63	402,00	0,789
78,00	7,488	0,32	7,808	53,686	17,18	402,00	0,769
80,00	7,680	0,32	8,000	52,344	16,75	402,00	0,750
82,00	7,872	0,32	8,192	51,067	16,34	402,00	0,732
84,00	8,064	0,32	8,384	49,851	15,95	402,00	0,714
86,00	8,256	0,32	8,576	48,692	15,58	402,00	0,698
88,00	8,448	0,32	8,768	47,586	15,23	402,00	0,682
90,00	8,640	0,32	8,960	46,528	14,89	402,00	0,667

#### D.4 Design Construtal 2ª Formulação: Onda $T = 10,00$ s

Tabela D.12 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,01$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	27,231	8,71	52,28	0,300
22,00	2,112	0,32	2,432	24,755	7,92	52,28	0,273
24,00	2,304	0,32	2,624	22,692	7,26	52,28	0,250
26,00	2,496	0,32	2,816	20,947	6,70	52,28	0,231
28,00	2,688	0,32	3,008	19,451	6,22	52,28	0,214
30,00	2,880	0,32	3,200	18,154	5,81	52,28	0,200
32,00	3,072	0,32	3,392	17,019	5,45	52,28	0,188
34,00	3,264	0,32	3,584	16,018	5,13	52,28	0,176
36,00	3,456	0,32	3,776	15,128	4,84	52,28	0,167
38,00	3,648	0,32	3,968	14,332	4,59	52,28	0,158
40,00	3,840	0,32	4,160	13,615	4,36	52,28	0,150
42,00	4,032	0,32	4,352	12,967	4,15	52,28	0,143
44,00	4,224	0,32	4,544	12,378	3,96	52,28	0,136
46,00	4,416	0,32	4,736	11,839	3,79	52,28	0,130
48,00	4,608	0,32	4,928	11,346	3,63	52,28	0,125
50,00	4,800	0,32	5,120	10,892	3,49	52,28	0,120
52,00	4,992	0,32	5,312	10,473	3,35	52,28	0,115
54,00	5,184	0,32	5,504	10,085	3,23	52,28	0,111
56,00	5,376	0,32	5,696	9,725	3,11	52,28	0,107
58,00	5,568	0,32	5,888	9,390	3,00	52,28	0,103
60,00	5,760	0,32	6,080	9,077	2,90	52,28	0,100
62,00	5,952	0,32	6,272	8,784	2,81	52,28	0,097
64,00	6,144	0,32	6,464	8,510	2,72	52,28	0,094
66,00	6,336	0,32	6,656	8,252	2,64	52,28	0,091
68,00	6,528	0,32	6,848	8,009	2,56	52,28	0,088
70,00	6,720	0,32	7,040	7,780	2,49	52,28	0,086
72,00	6,912	0,32	7,232	7,564	2,42	52,28	0,083
74,00	7,104	0,32	7,424	7,360	2,36	52,28	0,081
76,00	7,296	0,32	7,616	7,166	2,29	52,28	0,079
78,00	7,488	0,32	7,808	6,982	2,23	52,28	0,077
80,00	7,680	0,32	8,000	6,808	2,18	52,28	0,075
82,00	7,872	0,32	8,192	6,642	2,13	52,28	0,073
84,00	8,064	0,32	8,384	6,484	2,07	52,28	0,071
86,00	8,256	0,32	8,576	6,333	2,03	52,28	0,070
88,00	8,448	0,32	8,768	6,189	1,98	52,28	0,068
90,00	8,640	0,32	8,960	6,051	1,94	52,28	0,067

Tabela D.13 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,03$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	81,692	26,14	156,85	0,900
22,00	2,112	0,32	2,432	74,266	23,76	156,85	0,818
24,00	2,304	0,32	2,624	68,077	21,78	156,85	0,750
26,00	2,496	0,32	2,816	62,840	20,11	156,85	0,692
28,00	2,688	0,32	3,008	58,352	18,67	156,85	0,643
30,00	2,880	0,32	3,200	54,461	17,43	156,85	0,600
32,00	3,072	0,32	3,392	51,058	16,34	156,85	0,563
34,00	3,264	0,32	3,584	48,054	15,38	156,85	0,529
36,00	3,456	0,32	3,776	45,385	14,52	156,85	0,500
38,00	3,648	0,32	3,968	42,996	13,76	156,85	0,474
40,00	3,840	0,32	4,160	40,846	13,07	156,85	0,450
42,00	4,032	0,32	4,352	38,901	12,45	156,85	0,429
44,00	4,224	0,32	4,544	37,133	11,88	156,85	0,409
46,00	4,416	0,32	4,736	35,518	11,37	156,85	0,391
48,00	4,608	0,32	4,928	34,038	10,89	156,85	0,375
50,00	4,800	0,32	5,120	32,677	10,46	156,85	0,360
52,00	4,992	0,32	5,312	31,420	10,05	156,85	0,346
54,00	5,184	0,32	5,504	30,256	9,68	156,85	0,333
56,00	5,376	0,32	5,696	29,176	9,34	156,85	0,321
58,00	5,568	0,32	5,888	28,170	9,01	156,85	0,310
60,00	5,760	0,32	6,080	27,231	8,71	156,85	0,300
62,00	5,952	0,32	6,272	26,352	8,43	156,85	0,290
64,00	6,144	0,32	6,464	25,529	8,17	156,85	0,281
66,00	6,336	0,32	6,656	24,755	7,92	156,85	0,273
68,00	6,528	0,32	6,848	24,027	7,69	156,85	0,265
70,00	6,720	0,32	7,040	23,341	7,47	156,85	0,257
72,00	6,912	0,32	7,232	22,692	7,26	156,85	0,250
74,00	7,104	0,32	7,424	22,079	7,07	156,85	0,243
76,00	7,296	0,32	7,616	21,498	6,88	156,85	0,237
78,00	7,488	0,32	7,808	20,947	6,70	156,85	0,231
80,00	7,680	0,32	8,000	20,423	6,54	156,85	0,225
82,00	7,872	0,32	8,192	19,925	6,38	156,85	0,220
84,00	8,064	0,32	8,384	19,451	6,22	156,85	0,214
86,00	8,256	0,32	8,576	18,998	6,08	156,85	0,209
88,00	8,448	0,32	8,768	18,566	5,94	156,85	0,205
90,00	8,640	0,32	8,960	18,154	5,81	156,85	0,200

Tabela D.14 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,05$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
30,00	2,880	0,32	3,200	90,769	29,05	261,41	1,000
32,00	3,072	0,32	3,392	85,096	27,23	261,41	0,938
34,00	3,264	0,32	3,584	80,090	25,63	261,41	0,882
36,00	3,456	0,32	3,776	75,641	24,21	261,41	0,833
38,00	3,648	0,32	3,968	71,660	22,93	261,41	0,789
40,00	3,840	0,32	4,160	68,077	21,78	261,41	0,750
42,00	4,032	0,32	4,352	64,835	20,75	261,41	0,714
44,00	4,224	0,32	4,544	61,888	19,80	261,41	0,682
46,00	4,416	0,32	4,736	59,197	18,94	261,41	0,652
48,00	4,608	0,32	4,928	56,731	18,15	261,41	0,625
50,00	4,800	0,32	5,120	54,461	17,43	261,41	0,600
52,00	4,992	0,32	5,312	52,367	16,76	261,41	0,577
54,00	5,184	0,32	5,504	50,427	16,14	261,41	0,556
56,00	5,376	0,32	5,696	48,626	15,56	261,41	0,536
58,00	5,568	0,32	5,888	46,950	15,02	261,41	0,517
60,00	5,760	0,32	6,080	45,385	14,52	261,41	0,500
62,00	5,952	0,32	6,272	43,921	14,05	261,41	0,484
64,00	6,144	0,32	6,464	42,548	13,62	261,41	0,469
66,00	6,336	0,32	6,656	41,259	13,20	261,41	0,455
68,00	6,528	0,32	6,848	40,045	12,81	261,41	0,441
70,00	6,720	0,32	7,040	38,901	12,45	261,41	0,429
72,00	6,912	0,32	7,232	37,820	12,10	261,41	0,417
74,00	7,104	0,32	7,424	36,798	11,78	261,41	0,405
76,00	7,296	0,32	7,616	35,830	11,47	261,41	0,395
78,00	7,488	0,32	7,808	34,911	11,17	261,41	0,385
80,00	7,680	0,32	8,000	34,038	10,89	261,41	0,375
82,00	7,872	0,32	8,192	33,208	10,63	261,41	0,366
84,00	8,064	0,32	8,384	32,418	10,37	261,41	0,357
86,00	8,256	0,32	8,576	31,664	10,13	261,41	0,349
88,00	8,448	0,32	8,768	30,944	9,90	261,41	0,341
90,00	8,640	0,32	8,960	30,256	9,68	261,41	0,333

Tabela D.15 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
48,00	4,608	0,32	4,928	90,769	29,05	418,26	1,000
50,00	4,800	0,32	5,120	87,138	27,88	418,26	0,960
52,00	4,992	0,32	5,312	83,787	26,81	418,26	0,923
54,00	5,184	0,32	5,504	80,684	25,82	418,26	0,889
56,00	5,376	0,32	5,696	77,802	24,90	418,26	0,857

Tabela D.15 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>,  
continuação).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
58,00	5,568	0,32	5,888	75,119	24,04	418,26	0,828
60,00	5,760	0,32	6,080	72,615	23,24	418,26	0,800
62,00	5,952	0,32	6,272	70,273	22,49	418,26	0,774
64,00	6,144	0,32	6,464	68,077	21,78	418,26	0,750
66,00	6,336	0,32	6,656	66,014	21,12	418,26	0,727
68,00	6,528	0,32	6,848	64,072	20,50	418,26	0,706
70,00	6,720	0,32	7,040	62,242	19,92	418,26	0,686
72,00	6,912	0,32	7,232	60,513	19,36	418,26	0,667
74,00	7,104	0,32	7,424	58,877	18,84	418,26	0,649
76,00	7,296	0,32	7,616	57,328	18,34	418,26	0,632
78,00	7,488	0,32	7,808	55,858	17,87	418,26	0,615
80,00	7,680	0,32	8,000	54,461	17,43	418,26	0,600
82,00	7,872	0,32	8,192	53,133	17,00	418,26	0,585
84,00	8,064	0,32	8,384	51,868	16,60	418,26	0,571
86,00	8,256	0,32	8,576	50,662	16,21	418,26	0,558
88,00	8,448	0,32	8,768	49,510	15,84	418,26	0,545
90,00	8,640	0,32	8,960	48,410	15,49	418,26	0,533

Tabela D.16 – Lista de casos simulados para onda  $T = 10,00$  s e  $\phi_B = 0,10$  ( $A_R = 5228,29$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
60,00	5,760	0,32	6,080	90,769	29,05	522,83	1,000
62,00	5,952	0,32	6,272	87,841	28,11	522,83	0,968
64,00	6,144	0,32	6,464	85,096	27,23	522,83	0,938
66,00	6,336	0,32	6,656	82,517	26,41	522,83	0,909
68,00	6,528	0,32	6,848	80,090	25,63	522,83	0,882
70,00	6,720	0,32	7,040	77,802	24,90	522,83	0,857
72,00	6,912	0,32	7,232	75,641	24,21	522,83	0,833
74,00	7,104	0,32	7,424	73,597	23,55	522,83	0,811
76,00	7,296	0,32	7,616	71,660	22,93	522,83	0,789
78,00	7,488	0,32	7,808	69,822	22,34	522,83	0,769
80,00	7,680	0,32	8,000	68,077	21,78	522,83	0,750
82,00	7,872	0,32	8,192	66,416	21,25	522,83	0,732
84,00	8,064	0,32	8,384	64,835	20,75	522,83	0,714
86,00	8,256	0,32	8,576	63,327	20,26	522,83	0,698
88,00	8,448	0,32	8,768	61,888	19,80	522,83	0,682
90,00	8,640	0,32	8,960	60,513	19,36	522,83	0,667

### D.5 Design Construtal 2ª Formulação: Onda $T = 12,00$ s

Tabela D.17 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,01$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	33,368	10,68	64,07	0,300
22,00	2,112	0,32	2,432	30,335	9,71	64,07	0,273
24,00	2,304	0,32	2,624	27,807	8,90	64,07	0,250
26,00	2,496	0,32	2,816	25,668	8,21	64,07	0,231
28,00	2,688	0,32	3,008	23,835	7,63	64,07	0,214
30,00	2,880	0,32	3,200	22,246	7,12	64,07	0,200
32,00	3,072	0,32	3,392	20,855	6,67	64,07	0,188
34,00	3,264	0,32	3,584	19,629	6,28	64,07	0,176
36,00	3,456	0,32	3,776	18,538	5,93	64,07	0,167
38,00	3,648	0,32	3,968	17,562	5,62	64,07	0,158
40,00	3,840	0,32	4,160	16,684	5,34	64,07	0,150
42,00	4,032	0,32	4,352	15,890	5,08	64,07	0,143
44,00	4,224	0,32	4,544	15,168	4,85	64,07	0,136
46,00	4,416	0,32	4,736	14,508	4,64	64,07	0,130
48,00	4,608	0,32	4,928	13,904	4,45	64,07	0,125
50,00	4,800	0,32	5,120	13,347	4,27	64,07	0,120
52,00	4,992	0,32	5,312	12,834	4,11	64,07	0,115
54,00	5,184	0,32	5,504	12,359	3,95	64,07	0,111
56,00	5,376	0,32	5,696	11,917	3,81	64,07	0,107
58,00	5,568	0,32	5,888	11,506	3,68	64,07	0,103
60,00	5,760	0,32	6,080	11,123	3,56	64,07	0,100
62,00	5,952	0,32	6,272	10,764	3,44	64,07	0,097
64,00	6,144	0,32	6,464	10,428	3,34	64,07	0,094
66,00	6,336	0,32	6,656	10,112	3,24	64,07	0,091
68,00	6,528	0,32	6,848	9,814	3,14	64,07	0,088
70,00	6,720	0,32	7,040	9,534	3,05	64,07	0,086
72,00	6,912	0,32	7,232	9,269	2,97	64,07	0,083
74,00	7,104	0,32	7,424	9,019	2,89	64,07	0,081
76,00	7,296	0,32	7,616	8,781	2,81	64,07	0,079
78,00	7,488	0,32	7,808	8,556	2,74	64,07	0,077
80,00	7,680	0,32	8,000	8,342	2,67	64,07	0,075
82,00	7,872	0,32	8,192	8,139	2,60	64,07	0,073
84,00	8,064	0,32	8,384	7,945	2,54	64,07	0,071
86,00	8,256	0,32	8,576	7,760	2,48	64,07	0,070
88,00	8,448	0,32	8,768	7,584	2,43	64,07	0,068
90,00	8,640	0,32	8,960	7,415	2,37	64,07	0,067



Tabela D.18 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,03$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
20,00	1,920	0,32	2,240	100,105	32,03	192,20	0,900
22,00	2,112	0,32	2,432	91,005	29,12	192,20	0,818
24,00	2,304	0,32	2,624	83,421	26,69	192,20	0,750
26,00	2,496	0,32	2,816	77,004	24,64	192,20	0,692
28,00	2,688	0,32	3,008	71,504	22,88	192,20	0,643
30,00	2,880	0,32	3,200	66,737	21,36	192,20	0,600
32,00	3,072	0,32	3,392	62,566	20,02	192,20	0,563
34,00	3,264	0,32	3,584	58,885	18,84	192,20	0,529
36,00	3,456	0,32	3,776	55,614	17,80	192,20	0,500
38,00	3,648	0,32	3,968	52,687	16,86	192,20	0,474
40,00	3,840	0,32	4,160	50,053	16,02	192,20	0,450
42,00	4,032	0,32	4,352	47,669	15,25	192,20	0,429
44,00	4,224	0,32	4,544	45,502	14,56	192,20	0,409
46,00	4,416	0,32	4,736	43,524	13,93	192,20	0,391
48,00	4,608	0,32	4,928	41,711	13,35	192,20	0,375
50,00	4,800	0,32	5,120	40,042	12,81	192,20	0,360
52,00	4,992	0,32	5,312	38,502	12,32	192,20	0,346
54,00	5,184	0,32	5,504	37,076	11,86	192,20	0,333
56,00	5,376	0,32	5,696	35,752	11,44	192,20	0,321
58,00	5,568	0,32	5,888	34,519	11,05	192,20	0,310
60,00	5,760	0,32	6,080	33,368	10,68	192,20	0,300
62,00	5,952	0,32	6,272	32,292	10,33	192,20	0,290
64,00	6,144	0,32	6,464	31,283	10,01	192,20	0,281
66,00	6,336	0,32	6,656	30,335	9,71	192,20	0,273
68,00	6,528	0,32	6,848	29,443	9,42	192,20	0,265
70,00	6,720	0,32	7,040	28,602	9,15	192,20	0,257
72,00	6,912	0,32	7,232	27,807	8,90	192,20	0,250
74,00	7,104	0,32	7,424	27,056	8,66	192,20	0,243
76,00	7,296	0,32	7,616	26,344	8,43	192,20	0,237
78,00	7,488	0,32	7,808	25,668	8,21	192,20	0,231
80,00	7,680	0,32	8,000	25,026	8,01	192,20	0,225
82,00	7,872	0,32	8,192	24,416	7,81	192,20	0,220
84,00	8,064	0,32	8,384	23,835	7,63	192,20	0,214
86,00	8,256	0,32	8,576	23,280	7,45	192,20	0,209
88,00	8,448	0,32	8,768	22,751	7,28	192,20	0,205
90,00	8,640	0,32	8,960	22,246	7,12	192,20	0,200

Tabela D.19 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,05$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
30,00	2,880	0,32	3,200	111,228	35,59	320,34	1,000
32,00	3,072	0,32	3,392	104,276	33,37	320,34	0,938
34,00	3,264	0,32	3,584	98,142	31,41	320,34	0,882
36,00	3,456	0,32	3,776	92,690	29,66	320,34	0,833
38,00	3,648	0,32	3,968	87,812	28,10	320,34	0,789
40,00	3,840	0,32	4,160	83,421	26,69	320,34	0,750
42,00	4,032	0,32	4,352	79,449	25,42	320,34	0,714
44,00	4,224	0,32	4,544	75,837	24,27	320,34	0,682
46,00	4,416	0,32	4,736	72,540	23,21	320,34	0,652
48,00	4,608	0,32	4,928	69,518	22,25	320,34	0,625
50,00	4,800	0,32	5,120	66,737	21,36	320,34	0,600
52,00	4,992	0,32	5,312	64,170	20,53	320,34	0,577
54,00	5,184	0,32	5,504	61,793	19,77	320,34	0,556
56,00	5,376	0,32	5,696	59,586	19,07	320,34	0,536
58,00	5,568	0,32	5,888	57,532	18,41	320,34	0,517
60,00	5,760	0,32	6,080	55,614	17,80	320,34	0,500
62,00	5,952	0,32	6,272	53,820	17,22	320,34	0,484
64,00	6,144	0,32	6,464	52,138	16,68	320,34	0,469
66,00	6,336	0,32	6,656	50,558	16,18	320,34	0,455
68,00	6,528	0,32	6,848	49,071	15,70	320,34	0,441
70,00	6,720	0,32	7,040	47,669	15,25	320,34	0,429
72,00	6,912	0,32	7,232	46,345	14,83	320,34	0,417
74,00	7,104	0,32	7,424	45,092	14,43	320,34	0,405
76,00	7,296	0,32	7,616	43,906	14,05	320,34	0,395
78,00	7,488	0,32	7,808	42,780	13,69	320,34	0,385
80,00	7,680	0,32	8,000	41,711	13,35	320,34	0,375
82,00	7,872	0,32	8,192	40,693	13,02	320,34	0,366
84,00	8,064	0,32	8,384	39,724	12,71	320,34	0,357
86,00	8,256	0,32	8,576	38,801	12,42	320,34	0,349
88,00	8,448	0,32	8,768	37,919	12,13	320,34	0,341
90,00	8,640	0,32	8,960	37,076	11,86	320,34	0,333

Tabela D.20 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
48,00	4,608	0,32	4,928	111,228	35,59	512,54	1,000
50,00	4,800	0,32	5,120	106,779	34,17	512,54	0,960
52,00	4,992	0,32	5,312	102,672	32,86	512,54	0,923
54,00	5,184	0,32	5,504	98,869	31,64	512,54	0,889
56,00	5,376	0,32	5,696	95,338	30,51	512,54	0,857

Tabela D.20 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,08$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>,  
continuação).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
58,00	5,568	0,32	5,888	92,051	29,46	512,54	0,828
60,00	5,760	0,32	6,080	88,982	28,47	512,54	0,800
62,00	5,952	0,32	6,272	86,112	27,56	512,54	0,774
64,00	6,144	0,32	6,464	83,421	26,69	512,54	0,750
66,00	6,336	0,32	6,656	80,893	25,89	512,54	0,727
68,00	6,528	0,32	6,848	78,514	25,12	512,54	0,706
70,00	6,720	0,32	7,040	76,271	24,41	512,54	0,686
72,00	6,912	0,32	7,232	74,152	23,73	512,54	0,667
74,00	7,104	0,32	7,424	72,148	23,09	512,54	0,649
76,00	7,296	0,32	7,616	70,249	22,48	512,54	0,632
78,00	7,488	0,32	7,808	68,448	21,90	512,54	0,615
80,00	7,680	0,32	8,000	66,737	21,36	512,54	0,600
82,00	7,872	0,32	8,192	65,109	20,83	512,54	0,585
84,00	8,064	0,32	8,384	63,559	20,34	512,54	0,571
86,00	8,256	0,32	8,576	62,081	19,87	512,54	0,558
88,00	8,448	0,32	8,768	60,670	19,41	512,54	0,545
90,00	8,640	0,32	8,960	59,322	18,98	512,54	0,533

Tabela D.21 – Lista de casos simulados para onda  $T = 12,00$  s e  $\phi_B = 0,10$  ( $A_R = 6406,73$  m<sup>2</sup>).

$X$ (%)	$h$ (m)	$e$ (m)	$H$ (m)	$L$ (m)	$A_P$ (m <sup>2</sup> )	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$(L/\lambda)$
60,00	5,760	0,32	6,080	111,228	35,59	640,67	1,000
62,00	5,952	0,32	6,272	107,640	34,44	640,67	0,968
64,00	6,144	0,32	6,464	104,276	33,37	640,67	0,938
66,00	6,336	0,32	6,656	101,116	32,36	640,67	0,909
68,00	6,528	0,32	6,848	98,142	31,41	640,67	0,882
70,00	6,720	0,32	7,040	95,338	30,51	640,67	0,857
72,00	6,912	0,32	7,232	92,690	29,66	640,67	0,833
74,00	7,104	0,32	7,424	90,185	28,86	640,67	0,811
76,00	7,296	0,32	7,616	87,812	28,10	640,67	0,789
78,00	7,488	0,32	7,808	85,560	27,38	640,67	0,769
80,00	7,680	0,32	8,000	83,421	26,69	640,67	0,750
82,00	7,872	0,32	8,192	81,386	26,04	640,67	0,732
84,00	8,064	0,32	8,384	79,449	25,42	640,67	0,714
86,00	8,256	0,32	8,576	77,601	24,83	640,67	0,698
88,00	8,448	0,32	8,768	75,837	24,27	640,67	0,682
90,00	8,640	0,32	8,960	74,152	23,73	640,67	0,667

## APÊNDICE E – Design Construtal: Gráficos Complementares

### E.1 Design Construtal 2ª Formulação: Gráficos $\phi_B = 0,01$

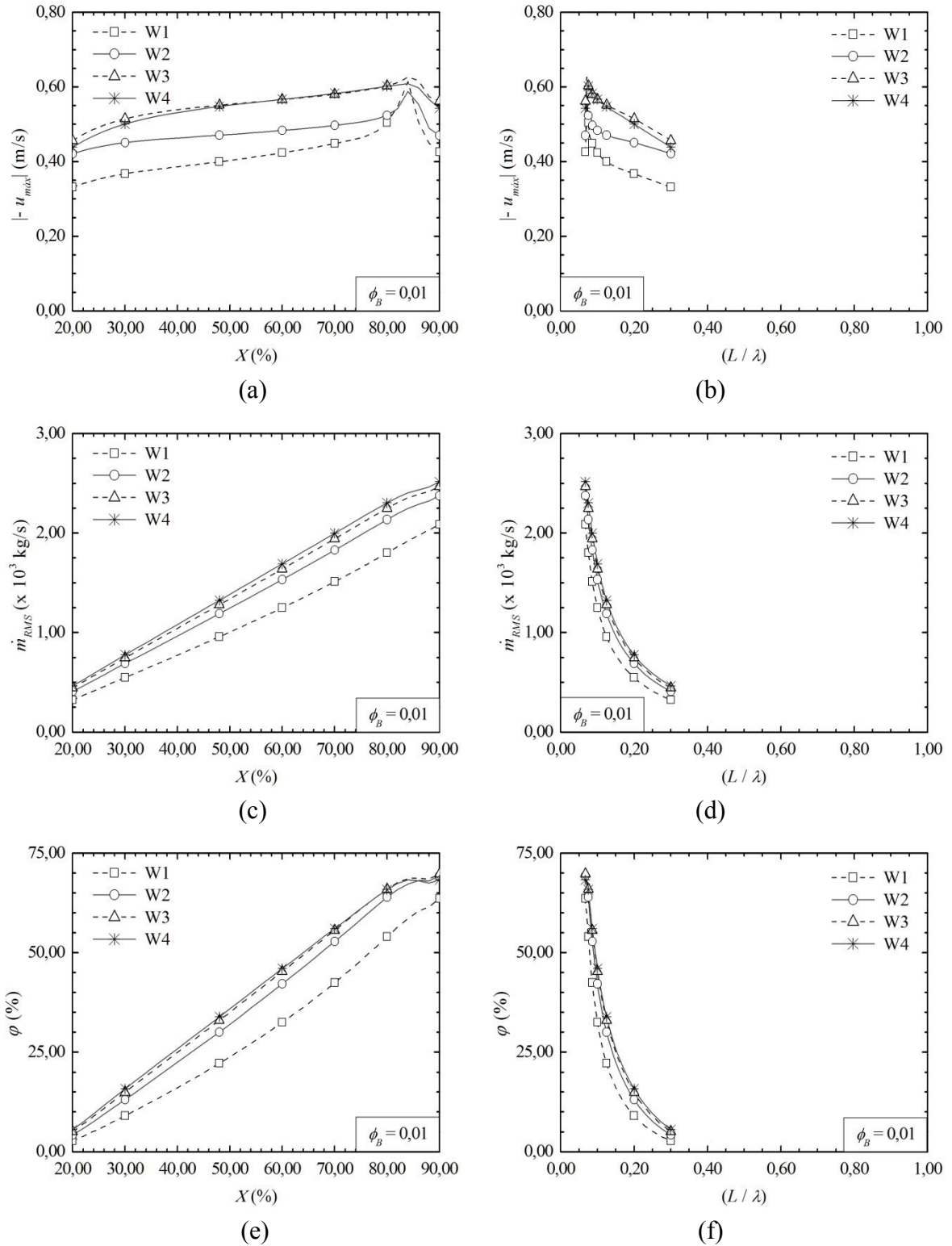


Figura E.1 – Resultados de  $\phi_B = 0,01$  para cada onda, quanto ao: (a) GDL  $X$  vs.  $| -u_{m\acute{a}x} |$ ; (b)  $(L/\lambda)$  vs.  $| -u_{m\acute{a}x} |$ ; (c) GDL  $X$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (d)  $(L/\lambda)$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL  $X$  vs.  $\phi$ ; (f)  $(L/\lambda)$  vs.  $\phi$ .

## E.2 Design Construtal 2ª Formulação: Gráficos $\phi_B = 0,03$

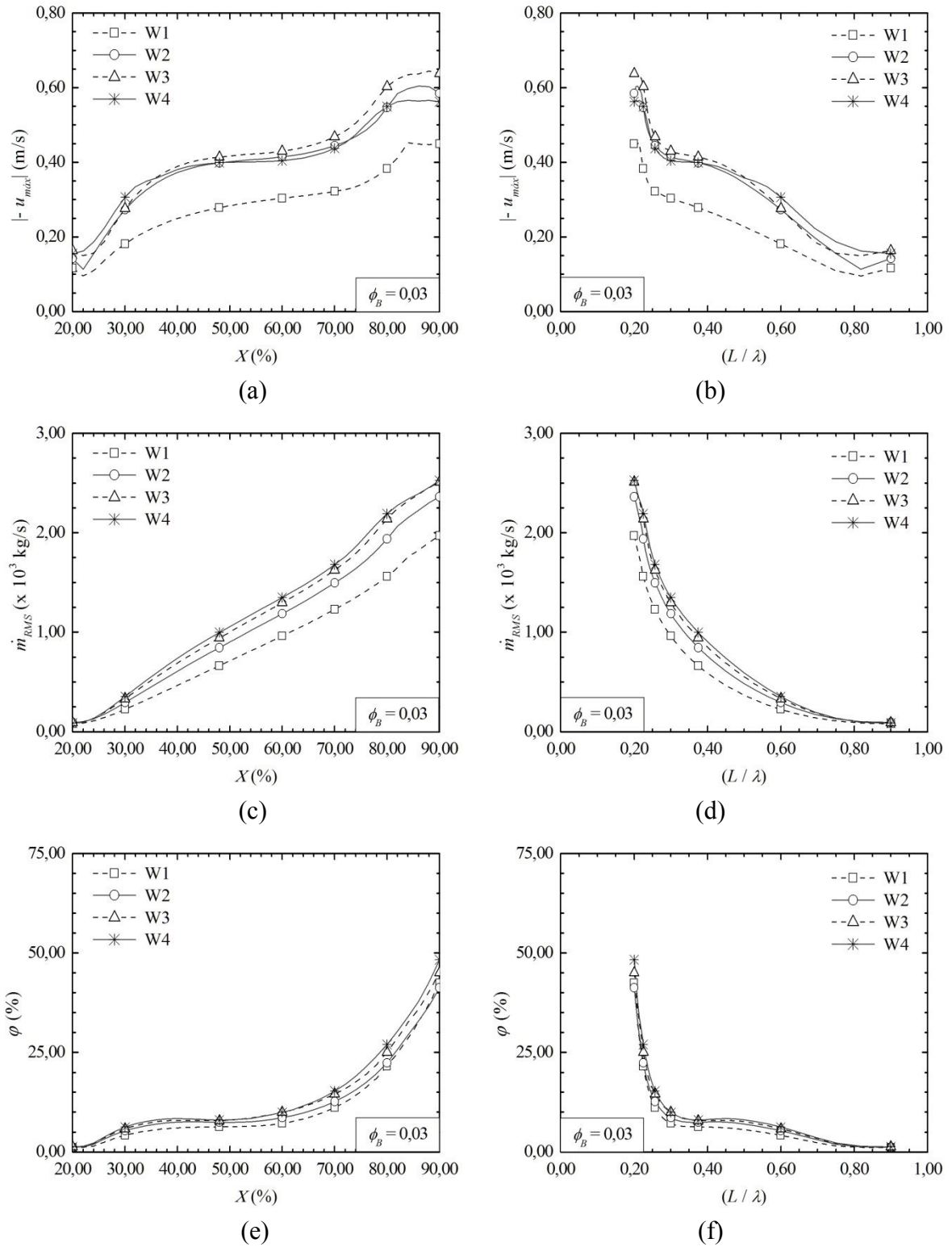


Figura E.2 – Resultados de  $\phi_B = 0,03$  para cada onda, quanto ao: (a) GDL  $X$  vs.  $| -u_{max} |$ ; (b)  $(L/\lambda)$  vs.  $| -u_{max} |$ ; (c) GDL  $X$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (d)  $(L/\lambda)$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL  $X$  vs.  $\phi$ ; (f)  $(L/\lambda)$  vs.  $\phi$ .

### E.3 Design Construtal 2ª Formulação: Gráficos $\phi_B = 0,05$

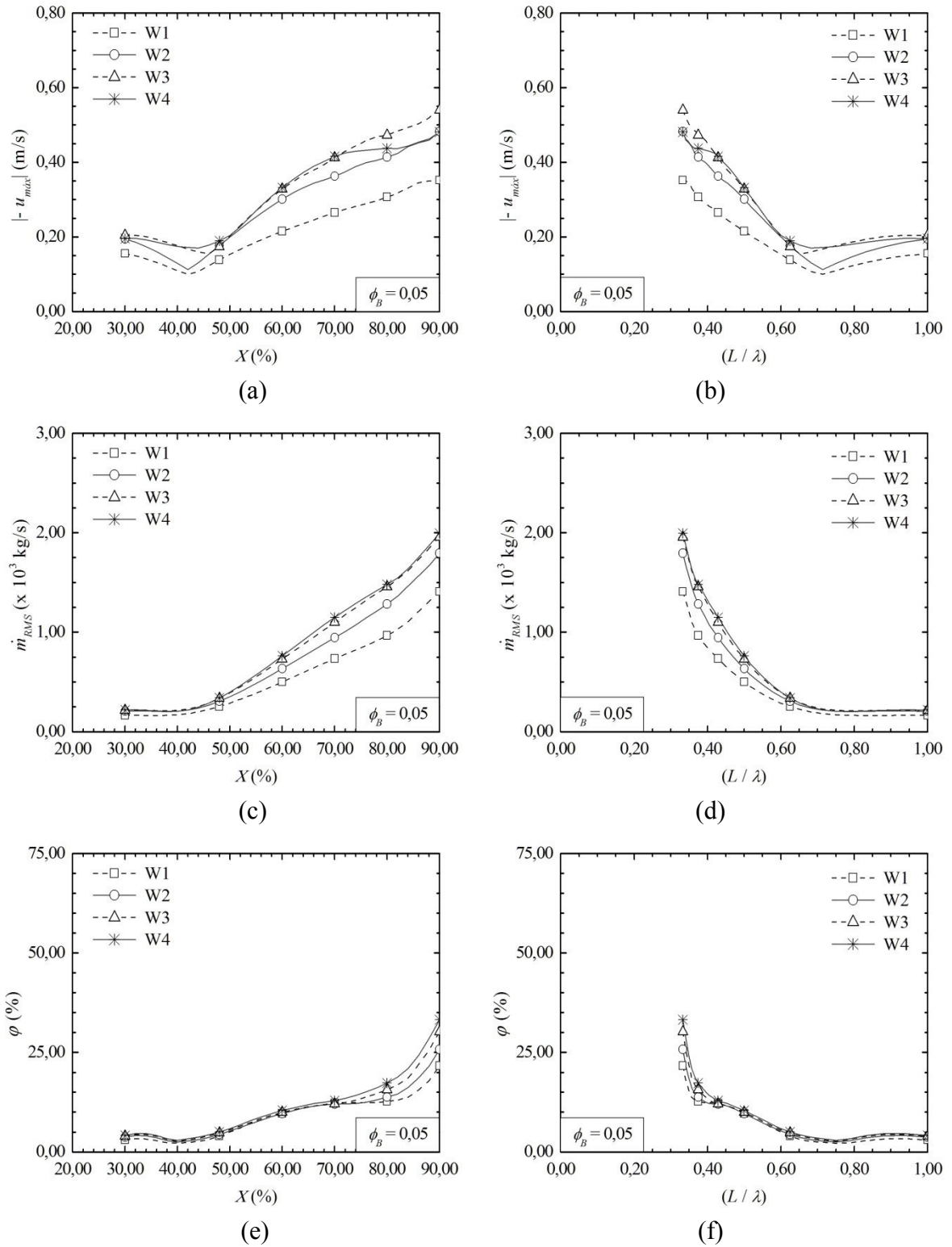


Figura E.3 – Resultados de  $\phi_B = 0,05$  para cada onda, quanto ao: (a) GDL  $X$  vs.  $|u_{max}|$ ; (b)  $(L/\lambda)$  vs.  $|u_{max}|$ ; (c) GDL  $X$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (d)  $(L/\lambda)$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL  $X$  vs.  $\phi$ ; (f)  $(L/\lambda)$  vs.  $\phi$ .

### E.4 Design Construtal 2ª Formulação: Gráficos $\phi_B = 0,08$

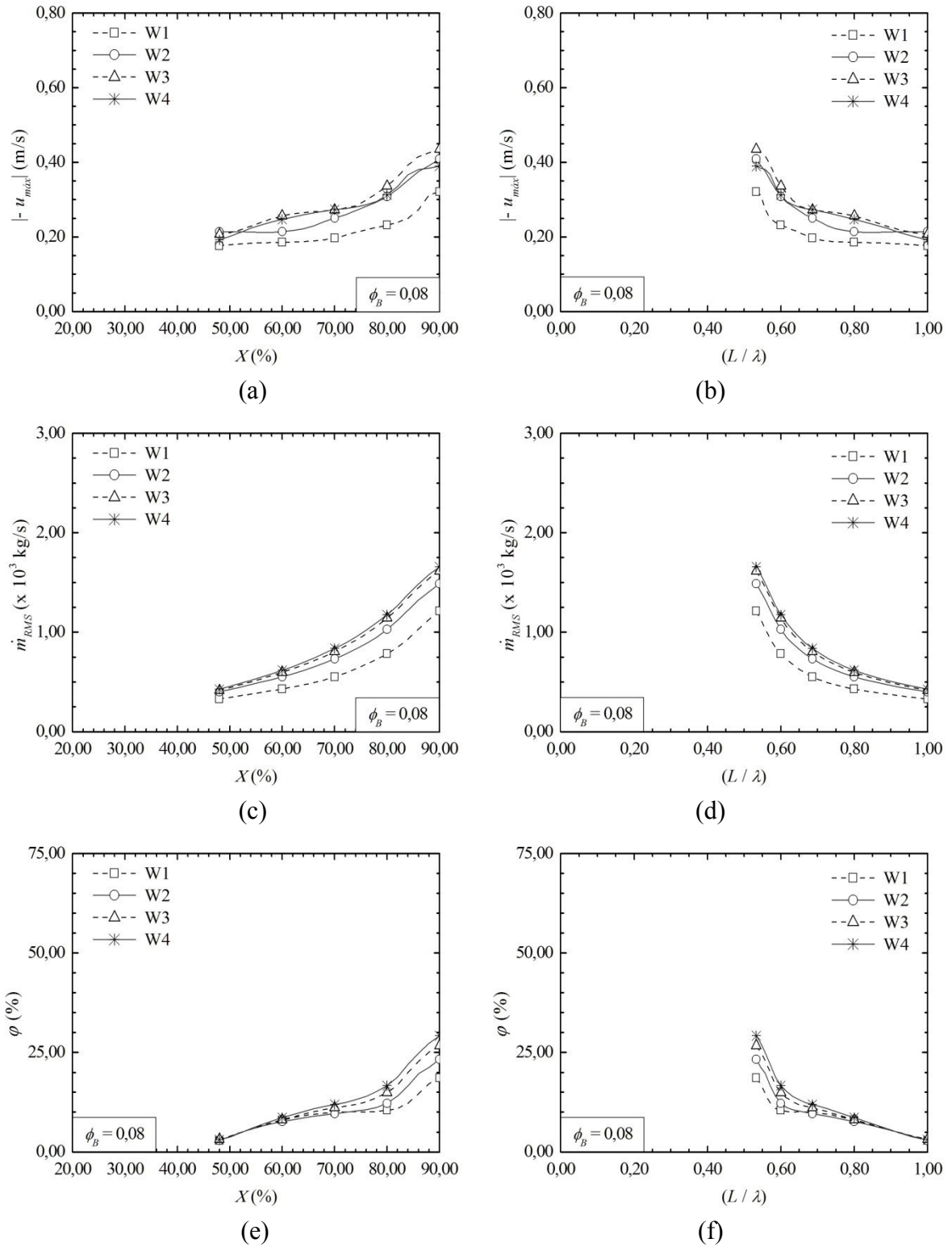


Figura E.4 – Resultados de  $\phi_B = 0,08$  para cada onda, quanto ao: (a) GDL  $X$  vs.  $| -u_{max} |$ ; (b)  $(L/\lambda)$  vs.  $| -u_{max} |$ ; (c) GDL  $X$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (d)  $(L/\lambda)$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL  $X$  vs.  $\phi$ ; (f)  $(L/\lambda)$  vs.  $\phi$ .

**E.5 Design Construtal 2ª Formulação: Gráficos  $\phi_B = 0,10$**

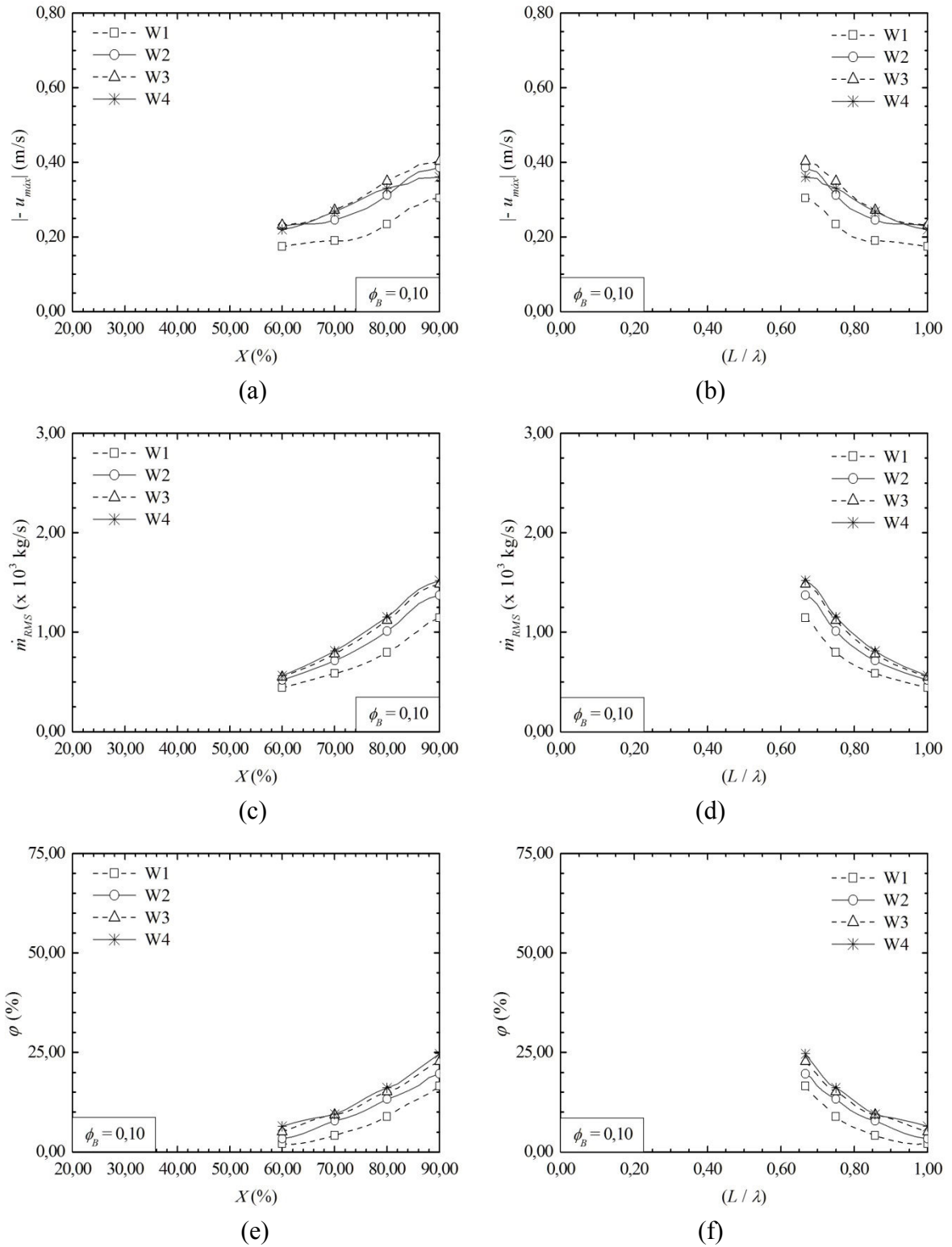


Figura E.5 – Resultados de  $\phi_B = 0,10$  para cada onda, quanto ao: (a) GDL  $X$  vs.  $-u_{max}$ ; (b)  $(L/\lambda)$  vs.  $-u_{max}$ ; (c) GDL  $X$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (d)  $(L/\lambda)$  vs.  $\dot{m}_{RMS}$ ; (e) GDL  $X$  vs.  $\phi$ ; (f)  $(L/\lambda)$  vs.  $\phi$ .



## APÊNDICE F – Produção Acadêmica

Durante o desenvolvimento da pesquisa que resultou nesta tese, alguns artigos foram produzidos com os resultados parciais desta. Entre os artigos escritos e publicados em anais de eventos científicos, citam-se congressos de grande relevância na área de pesquisa, como: XXXVIII CILAMCE (Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia), VII SEMENGO (Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica) e 7º MCSul (Conferência Sul em Modelagem Computacional). A Tabela F.1 apresenta a relação dos artigos publicados em anais de congressos.

Tabela F.1 – Relação de artigos publicados em anais de congressos.

Título	Evento	Ano
Study of the Effect of the Relative Height on the Efficiency of a Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter Applying Constructal Design	XXXVIII CILAMCE	2017 <sup>*(1)</sup>
Análise Numérica do Efeito da Variação do Comprimento e Altura Relativa de uma Placa Horizontal Submersa como Conversor de Energia das Ondas do Mar	7º MCSul	2016 <sup>*(2)</sup>
Simulação Numérica do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real e Comparação por Similaridade com Modelo em Escala de Laboratório	VII SEMENGO	2016 <sup>*(3)</sup>
Constructal Design de uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade de Placa Superior Móvel com Escoamento por Convecção Mista	XXXVII CILAMCE	2016 <sup>*(4)</sup>

\* Referência: (1) Seibt et al., 2017b; (2) Seibt et al., 2016d; (3) Seibt et al., 2016a; (4) Seibt et al., 2016b.

Entre os artigos apresentados nos congressos, alguns destes, posteriormente ao evento, foram selecionados e encaminhados a periódicos científicos, o que resultou em novas publicações. Já entre os artigos que foram submetidos para publicação em periódicos, destaca-se o artigo publicado, recente, no periódico FME Transactions, editado pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Belgrado, o qual foi disponibilizado no *site* da revista em abril do corrente ano. A Tabela F.2 apresenta a relação de artigos publicados em periódicos científicos.

Durante o período de doutoramento, houve, também, algumas oportunidades para contribuir na elaboração de outros trabalhos desenvolvidos dentro do grupo de pesquisa.

Dentre estas, algumas colaborações resultaram em artigos publicados (coautorias), tanto em anais de eventos quanto em periódicos científicos. A Tabela F.3 apresenta a relação de artigos publicados, por outros membros do grupo de pesquisa, nos quais houve contribuições.

Tabela F.2 – Relação de artigos publicados em periódicos científicos.

Título	Periódico	Ano
Numerical Evaluation on the Efficiency of the Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter	FME Transactions	2019 <sup>*(1)</sup>
Estudo Numérico do Efeito da Variação Conjunta do Comprimento e da Altura Relativa de um Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa	Revista Brasileira de Energias Renováveis	2017 <sup>*(2)</sup>
Modelagem Computacional do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real e Análise de Similaridade com Modelo em Escala de Laboratório	Revista Brasileira de Energias Renováveis	2017 <sup>*(3)</sup>
Constructal Design de uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade de Placa Superior Móvel com Escoamento por Convecção Mista	Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia	2016 <sup>*(4)</sup>

\* Referência: (1) Seibt et al., 2019; (2) Seibt et al., 2017c; (3) Seibt et al., 2017a; (4) Seibt et al., 2016c.

Tabela F.3 – Relação de artigos publicados em colaboração (coautoria).

Título	Periódico / Evento	Ano
Modelagem Computacional do Princípio de Funcionamento de um Conversor Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real	Revista Mundi Engenharia, Gestão e Tecnologia	2017 <sup>*(1)</sup>
Constructal Design of a Triangular Fin Inserted in a Cavity with Mixed Convection Lid-Driven Flow	Defect and Diffusion Forum	2016 <sup>*(2)</sup>
Modelagem Computacional de um Dispositivo Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real	VII SEMENGO	2016 <sup>*(3)</sup>
Design Construtal Aplicado ao Escoamento em uma Aleta Triangular Inserida em uma Cavidade com Convecção Mista	XIX ENMC	2016 <sup>*(4)</sup>

\* Referência: (1) Vianna et al., 2017; (2) Razera et al., 2016; (3) Vianna et al., 2016; (4) Da Fonseca et al., 2016.

## ANEXO I – Código para Geração de Ondas de 2ª Ordem (UDF)

Código da UDF (*User Defined Function*) utilizada como condição de contorno, para gerar ondas regulares a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, adaptado de Horko, 2007.

---

```

/*****
/* PERFIL DA ONDA*/
/* UDF da condicao de contorno: perfil de velocidade transiente*/
/* segundo a teoria de Stokes de 2a ordem (origem no fundo do canal)*/
/*****
#include "udf.h"
/*Definicao das constantes, caracteristicas da onda e outras variaveis*/
DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,position)
{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.8100; /*constant*/
real H=0.0600; /*wave height*/
real D=0.6000; /*water depth*/
real T=3.0000; /*wave period*/
real L=6.9520; /*wave lenght*/
real x[ND_ND]; /*hold the position vector*/
real y;
real AA,BB,CC,DD,EE,FF,GG,LL,ZZ,k; /*y=position vector, temporary stores*/
face_t f;
begin_f_loop(f,thread)
{
real t=RP_Get_Real("flow-time");
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
ZZ=y-D;
k=2*PI/L;
AA=cosh(k*(ZZ+D));
BB=cosh(k*D);
CC=sinh(k*D);
DD=cos(PI/2.0-2.0*PI*(t/T));
EE=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
FF=cosh(2.0*k*D);
GG=cosh(2.0*(k*(ZZ+D)));
/*this defines the wave height (LL) at time=y*/
LL=D+(H*DD/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(BB/pow(CC,3.0))*(2.0+FF)*EE;
if(y<=D)
/*this defines the profile below water level=D*/
F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*AA*DD/BB+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)
*GG*EE/pow(CC,4.0);
else if(y<=LL)
/*this stretches the velocity above mean water level*/
F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*BB*DD/BB+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)
*FF*EE/pow(CC,4.0);
else
/*this sets the velocity above the wave height to zero*/
F_PROFILE(f,thread,position)=0;
}
end_f_loop(f,thread)
}
DEFINE_PROFILE(y_velocity,thread,position)

```

```

{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.8100; /*constant*/
real H=0.0600; /*wave height*/
real D=0.6000; /*water depth*/
real T=3.0000; /*wave period*/
real L=6.9520; /*wave length*/
real x[ND_ND]; /*hold the position vector*/
real y;
real k,MM,NN,OO,PP,FF,QQ,RR,SS,TT,UU,VV,WW,ZZZ; /*y=position vector,
temporary stores*/
face_t f;
begin_f_loop(f,thread)
{
real t=RP_Get_Real("flow-time");
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
ZZZ=y-D;
k=2*PI/L;
MM=sinh(k*(ZZZ+D));
NN=cosh(k*D);
OO=cos(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));
WW=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
VV=sin(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));
QQ=sin(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
RR=sinh(k*D);
SS=cosh(2.0*k*D);
TT=sinh(2.0*(k*(ZZZ+D)));
UU=sinh(2.0*k*D);
PP=D+(H*OO/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(NN/pow(RR,3.0))*(2.0+SS)*WW;
if(y<=D)
F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*RR*VV/NN+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)
*UU*QQ/pow(RR,4.0);
else
F_PROFILE(f,thread,position)=0;
}
end_f_loop(f,thread)
}

```

---