

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE UM
DISPOSITIVO DE GALGAMENTO E INVESTIGAÇÃO
NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA APLICANDO
O MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL**

por

Marcelo Moraes Goulart

Tese para obtenção do Título
Doutor em Modelagem Computacional

Rio Grande, janeiro de 2022.

Ficha Catalográfica

G694v Goulart, Marcelo Moraes.

Validação de um modelo numérico de um dispositivo de galgamento e investigação numérica e experimental da geometria aplicando o método *design* construtal / Marcelo Moraes Goulart. – 2022.

240 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Mateus das Neves Gomes.

Coorientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

1. Modelagem Computacional 2. Galgamento 3. Design Construtal
4. Modelo Volume of Fluid 5. Energia das Ondas do Mar 6. Canal de Ondas 7. Verificação 8. Validação I. Gomes, Mateus das Neves
II. Santos, Elizaldo Domingues dos III. Título.

CDU 004.414.23

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO
DE GALGAMENTO E INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA APLICANDO O MÉTODO
DESIGN CONSTRUTAL

por

Marcelo Moraes Goulart

Mestre em Modelagem Computacional

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como requisito parcial à obtenção do Título de

Doutor em Modelagem Computacional

Área de Concentração: Modelagem Computacional

Linha de pesquisa: Mecânica Computacional

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Orientador (IFPR/PPGMC/FURG)

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coorientador (EE/PPGMC/FURG)

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
(EE/PPGMC/FURG)

Profa. Dra. Ana Paula Gomes
(EE/FURG)

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Membro Externo (PROMEC/UFRGS)

Coordenação do PPGMC/FURG:

Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada
(C3/PPGMC/FURG)
Coordenador do PPGMC

Rio Grande, 24 de Janeiro de 2022.

ATA DE DEFESA DE TESE**ATA Nº 2/2022**

Ao vigésimo quarto dia do mês de janeiro, através de videoconferência, realizou-se a segunda sessão de defesa de tese do ano de dois mil e vinte e dois do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. O doutorando, **Marcelo Moraes Goulart**, apresentou e defendeu a tese **“VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO E INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA GEOMETRIA APLICANDO O MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL”** como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às quatorze horas pelo Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes, orientador da tese e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além do presidente e orientador, pelo Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos da FURG (coorientador), Prof. Dr. Liércio André Isoldi da FURG, Profª. Dra. Ana Paula Gomes da FURG e Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha da UFRGS. Após cada integrante da Banca ter arguido o doutorando, e este ter tido a oportunidade de responder a cada um, a Comissão reuniu-se para deliberar sobre o conceito a ser atribuído ao trabalho. A Comissão de Avaliação considerou o candidato **APROVADO** neste requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional. Por fim, o presidente publicou e encerrou a sessão da qual eu, Emanuel da Silva Diaz Estrada, na qualidade de Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, lavrei a presente ata que vai assinada por todos os membros da Comissão de Avaliação. Rio Grande, vinte e quatro de janeiro de dois mil e vinte e dois.

Documento assinado digitalmente
 Mateus das Neves Gomes
Data: 27/01/2022 21:38:13-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Orientador


Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coorientador


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno


Profª. Dra. Ana Paula Gomes
Membro Interno


Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Membro Externo


Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
Em Modelagem Computacional

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado mais essa conquista em minha vida.

A todos que de alguma forma participaram e torceram pela minha vitória em especial aos meus amados filhos Marcelli, Yuri, Júlia e a minha amada esposa Arlete que nas horas difíceis sempre esteve presente com uma palavra de incentivo.

Ao meu grande amigo irmão Ricardo que durante o doutorado me auxiliou na fabricação do protótipo.

Aos meus pais Joel e Helena (in memoriam), com todo o meu amor e gratidão.

A todos os mestres que colaboraram para minha formação em especial Orientador Prof.

Dr. Mateus das Neves Gomes e o Co-Orientador Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos pela incansável dedicação no auxílio da elaboração deste trabalho.

A Profa. Dra. Cátia Maria dos Santos Machado pelo incentivo, motivação, ensinamentos, atenção e amizade.

Aos membros comissão de avaliação, Profa. Dra. Ana Paula Gomes, Dr.

Liércio André Isoldi e Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.

Ao Dr. Jaifer Corrêa Martins pela amizade, parceria e apoio nesta caminhada.

Aos amigos Dr. Michel Kepes Rodrigues e Me. Andrei Luís Garcia Santos pela parceria e apoio nas atividades de estudo e pesquisa.

Aos amigos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas agradeço aos ensinamentos, atenção e amizade durante a realização dos ensaios: Dr. Eduardo Puhl, Dr. Cristiano Fick e Me.

Cristian Valenti Schenk.

Agradecer às instituições que possibilitaram a realização do trabalho:

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, particularmente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e

À Universidade Federal do Rio Grande, particularmente a Escola de Engenharia.

Aos meus colegas de trabalho Dr. José Antônio Scotti Fontoura e Ma. Veridiana Herreira.

A todos que, direta ou indiretamente contribuíram, para a realização deste trabalho, porém, não tiveram aqui seu nome mencionado.

RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico e experimental sobre a validação de um modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal sobre dispositivos de galgamento *onshore* em escala de laboratório. Foi considerado o efeito da geometria sobre o desempenho do dispositivo empregando o método Design Construtal. Para a abordagem numérica dos escoamentos de ondas regulares incompressíveis, laminares em domínio bidimensional, as equações de conservação de massa e balanço da quantidade de movimento foram resolvidas através do método de volumes finitos (MVF) com o modelo *volume of fluid* (VOF) para abordagem da interface água-ar-estrutura. Mais precisamente, foi empregado o software ANSYS Fluent, v.18. O estudo experimental foi realizado no canal de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Com relação à investigação geométricas, o problema avaliado possui dois graus de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa e a profundidade da superfície livre da água) e duas restrições geométricas (área ocupada pela rampa no canal de ondas simulado e uma restrição construtiva para o comprimento da rampa). A geometria foi variada de forma a maximizar a quantidade de água das ondas incidentes que entram no reservatório do dispositivo de galgamento. O trabalho também comparou o efeito da geometria sobre a altura da água galgada no reservatório do dispositivo de galgamento obtido com o presente modelo numérico e o predito com os experimentos em laboratório desenvolvidos no presente trabalho. Os resultados obtiveram a validação do modelo numérico para propagação de uma onda regular bidimensional em um canal de ondas, ficando os erros relativos (E_R) nas sondas P_0 e P_1 oscilando respectivamente entre 0,83% a 2,15% e 2,22% a 2,92%, para o comportamento transiente da água acumulada nos dispositivos de galgamento em escala de laboratório e para a aplicação do Design Construtal para esse tipo de problema, o que é inédito na literatura. Além disso, foi realizada uma avaliação geométrica variando o efeito da razão altura/comprimento da rampa para diferentes profundidades da superfície livre da água (h) analisando o efeito da maré. Em todos os casos, foi observado que as menores razões de altura/comprimento da rampa conduziram aos melhores desempenhos, corroborando resultados previos da literatura.

Palavras-chave: Modelagem Computacional, Galgamento, Design Construtal, Modelo *Volume of Fluid*, Energia das Ondas do Mar, Canal de Ondas, Verificação e Validação.

ABSTRACT

In the present work, a numerical and experimental study was carried out on the validation of a numerical model developed for channel wave flows over laboratory-scale onshore overtopping devices. The effect of geometry on device performance was considered using the Construtal Design method. For the numerical approach of incompressible, laminar regular wave flows in two-dimensional domain, the equations of conservation of mass and momentum balance were solved using the finite volume method (MVF) with the volume of fluid (VOF) model to approach of the water-air-structure interface. More precisely, the software ANSYS Fluent, v.18 was used. The experimental study was carried out in the wave channel of the Hydraulic Research Institute (IPH) at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). Regarding the geometric investigation, the evaluated problem has two degrees of freedom (ratio between the height and length of the ramp and the depth of the free surface of the water) and two geometric constraints (area occupied by the ramp in the simulated wave channel and a constructive constraint for the length of the ramp). The geometry was varied in order to maximize the amount of water from incident waves that enter the reservoir of the overtopping device. The work also compared the effect of geometry on the height of the water overtopped in the reservoir of the overtopping device obtained with the present numerical model and the one predicted with the laboratory experiments developed in the present work. The results obtained the validation of the numerical model for the propagation of a two-dimensional regular wave in a wave channel, with the relative errors (E_R) in probes P_0 and P_1 oscillating respectively between 0.83% to 2.15% and 2.22% at 2.92%, for the transient behavior of water accumulated in laboratory scale overtopping devices and for the application of Constructal Design for this type of problem, which is unprecedented in the literature. In addition, a geometric evaluation was carried out by varying the effect of the height/length ratio of the ramp for different depths of the free surface of the water (h) analyzing the effect of the tide. In all cases, it was observed that the lowest height/length ratios of the ramp led to the best performances, corroborating previous results in the literature.

Keywords: Computational Modeling, Overtopping, Constructal Design, Volume of Fluid Model, Sea Wave Energy, Wave Channel, Verification and Validation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Estado da Arte	2
1.1.1. Modelagem Numérica em Tanques e Canais de Ondas.....	2
1.1.2. Estudos Numéricos e Experimentais sobre Dispositivos de Galgamento.	4
1.1.3. Estudos Numéricos com a Aplicação do Design Construtal em Dispositivos de Galgamento.....	12
1.1.4. Contribuição Científica ao Estado da Arte..	18
1.2. Objetivos	18
1.3. Organização do Texto	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. As Ondas do Mar como uma Fonte Renovável de Energia	21
2.2. Tecnologias de Aproveitamento da Energia das Ondas do Mar	23
2.3. Dispositivos de Galgamento	25
2.3.1. <i>Tapchan</i> (Noruega – <i>Tapered Chanel Wave Power Device</i>).....	26
2.3.2. <i>Wave Plane</i> (Dinamarca – <i>Wave Plane Production A/S – WPP A/S</i>).	27
2.3.2. <i>Wave Dragon</i> (Dinamarca – <i>Wave Dragon Aps</i>).....	28
2.3.3. <i>Sea Slot-cone Generator – SSG</i> (Noruega – <i>Wave Energy AS</i>).	29
2.4. Teoria das Ondas.....	30
2.4.1. Elementos de uma Onda.	31
2.4.2. Teoria de Stokes de 2ª Ordem.....	35
2.5. Clima de Ondas na Costa de Rio Grande, RS e Potencial Energético	36
2.6. Tanques e Canais de Ondas.....	37
2.6.1. Modelagem Física em Tanques e Canais de Ondas.....	38
2.6.2. Critérios de Semelhança	39
2.6.3. Semelhança Pelo Critério de Froude	40
2.6.4. Efeitos de Laboratório	41
2.6.5. Batedores de Ondas	42
2.6.6. Canal de Ondas do IPH	43
2.6.7. Curva do Gerador de Ondas do IPH	44
2.7. Teoria Construtal, Lei Construtal e Design Construtal	49

3. METODOLOGIA NUMÉRICA	51
3.1. Descrição do Problema	51
3.2. Modelagem Matemática.....	55
3.3. O Modelo Multifásico <i>Volume of Fluid</i> (VOF)	55
3.4. Condições de Contorno	57
3.5. Verificação e validação do Modelo Numérico	58
3.6. Técnicas Numéricas	59
3.7. Teste de Sensibilidade de Malha.....	59
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	63
4.1. Instrumentação	63
4.2. Processo de Fabricação do Protótipo	64
4.3. Ensaios	67
4.4. Incertezas que envolvem este tipo de experimento.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
5.1. Validação do Modelo Numérico para a Geração de Onda Regular em Canal de Ondas	76
5.2. Análise Numérica e Experimental de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório	85
5.3. Comparação Numérica e Experimental do Efeito de H_1/L_1 Sobre Altura da Água Galgada no Reservatório	98
5.4. Novas Recomendações Experimentais do Efeito de H_1/L_1 Sobre Altura da Água Galgada no Reservatório Para Diferentes Profundidades de Lâmina de Água	100
6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE	105
7.REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE A - Variações da geometria	120
APÊNDICE B - Artigo Goulart <i>et al</i> (2018).....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Dispositivo: a) ilustração e b) disposição das aletas (Adaptado de Nam <i>et al.</i> , 2008)	5
Figura 1.2 - Arranjo com 5 dispositivos <i>Wave Dragon</i> instalados em um arranjo desalinhado (Adaptado de Beels <i>et al.</i> , 2010).	6
Figura 1.3 - Dispositivo de galgamento circular (Adaptado de Jin <i>et al.</i> , 2012)	8
Figura 1.4 - Disposições das ranhuras do dispositivo (Adaptado de Jungrungruentaworn e Hyun, 2017)	10
Figura 2.1 - Potencial de energia das ondas ao redor do mundo em kW/m por frente de onda (Ghosh e Prelas, 2011)	22
Figura 2.2 - Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López <i>et al.</i> , 2013)	23
Figura 2.3 - Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad <i>et al.</i> , 2014)	25
Figura 2.4 - Princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento (Adaptado de Li e Yu, 2012)	26
Figura 2.5 - Dispositivo <i>Tapchan</i> : a) ilustração do esquema de funcionamento e b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010)	27
Figura 2.6 - <i>Wave Plane</i> (López <i>et al.</i> , 2013)	27
Figura 2.7 - <i>Wave Dragon</i> – visão frontal (Tedd e Kofoed, 2009)	28
Figura 2.8 - Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do <i>Wave Dragon</i> vista em corte com as suas dimensões em metros (Adaptado de Morais, 2009; Christensen <i>et al.</i> , 2006)	28
Figura 2.9 - Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral e b) ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini <i>et al.</i> , 2009)	29

Figura 2.10 - Vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG (Adaptado de Margheritini <i>et al.</i> , 2009).....	30
Figura 2.11 - Elementos da onda (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).....	32
Figura 2.12 - Teoria das ondas gravidade (Adaptado de <i>US Army Corps of Engineer</i> , 2008).....	34
Figura 2.13 - Regiões de validade das teorias de ondas (Adaptado de Le Méhauté, 1976)...	35
Figura 2.14 - Tipos de batedores de ondas (Bhattacharyya, 1978).Tipos de batedores de ondas (Bhattacharyya, 1978)	42
Figura 2.15 - Canal de ondas IPH (Rosauero, 2004).....	43
Figura 2.16 - Partes do gerador de ondas do IPH Canal de ondas IPH.....	44
Figura 2.17 - Esquema do gerador de ondas IPH (Gomes, 2018).....	44
Figura 2.18 - Curva teórica que relaciona o movimento da pá de um gerador articulado no fundo com as características da onda gerada (Dean e Dalrymple, 1991).....	45
Figura 2.19 - Esquema do gerador de ondas do IPH (Cerdeira, 2006).....	46
Figura 2.20 - Curva teórica do gerador de ondas do IPH para diversos valores de $\Delta V/h$ (Cerdeira, 2006).....	46
Figura 2.21 - Curvas de eficiência do gerador. Altura da onda gerada (H) em função do deslocamento da pá ($S/2$) dado em centímetros, para diferentes valores de período (Rosauero, 2004).	47
Figura 2.22 - Curvas de eficiência do gerador de ondas utilizado. Altura de onda em função do comprimento do braço do gerador ($S/2$) dado em centímetros, para diferentes valores de período (Gomes, 2018).....	48
Figura 2.23 - Frequência do motor versus períodos característicos das ondas (Gomes, 2018).....	48
Figura 3.1 - Domínio computacional do dispositivo no canal de ondas IPH	51

Figura 3.2 - Ilustração simplificada do processo de casos estudados aplicado ao dispositivo de galgamento.	54
Figura 3.3 - Ilustração da inicialização do problema em estudo..	57
Figura 3.4 - Posição das sondas no canal de ondas..	60
Figura 3.5 - Comparação dos resultados analíticos e numéricos empregados no estudo de independência de malha.....	62
Figura 3.6 - Discretização espacial do canal de ondas	62
Figura 4.1 - Sensor condutivo para medição da altura de onda.	63
Figura 4.2 - Esquema de aquisição de dados utilizado	64
Figura 4.3 - Detalhe do dispositivo de galgamento	66
Figura 4.4 - Montagem da placa frontal do dispositivo de galgamento	66
Figura 4.5 - Usinagem das placas do dispositivo de galgamento	67
Figura 4.6 - Desenho esquemático do canal de ondas (adaptado de Clemente, 2013)... ..	68
Figura 4.7 - Detalhes da primeira montagem do dispositivo de galgamento no canal de ondas do IPH	69
Figura 4.8 - Controle do nível na parte rasa do canal de ondas do IPH	70
Figura 4.9 - Processo de nivelamento das sondas.....	70
Figura 4.10 - Detalhe do sensor P ₂ no dispositivo de galgamento	71
Figura 4.11 - Processo de nivelamento das sondas.....	71
Figura 4.12 - Calibração das sondas P ₁	72
Figura 4.13 - Regulagem do braço do gerador de ondas	73
Figura 5.1 - Elevação da superfície da onda na sonda P ₀ em função do tempo para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$)... ..	78

Figura 5.2 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$)..	79
Figura 5.3 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$)..	79
Figura 5.4 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$)..	80
Figura 5.5 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 3.1 ($H_1/L_1 = 0,65$)..	80
Figura 5.6 - Elevação da superfície da onda na sonda P_1 em função do tempo para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$)..	82
Figura 5.7 - Elevação da superfície da onda na sonda P_1 em função do tempo para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$)..	83
Figura 5.8 - Elevação da superfície da onda na sonda P_1 em função do tempo para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$)..	83
Figura 5.9 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) ..	86
Figura 5.10 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 22$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem)..	87
Figura 5.11 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 22$ s.	87
Figura 5.12 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem)..	88
Figura 5.13 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 50$ s.	88
Figura 5.14 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$)..	89

Figura 5.15 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 24$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).	90
Figura 5.16 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 24$ s	90
Figura 5.17 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).	91
Figura 5.18 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 50$ s.	91
Figura 5.19 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$)..	92
Figura 5.20 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 25$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem)	93
Figura 5.21 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 20$ s.	93
Figura 5.22 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).	94
Figura 5.23 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 50$ s.	94
Figura 5.24 - Comportamento transiente da altura de água galgada para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$).....	95
Figura 5.25 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 29$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).	96

Figura 5.26 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 29$ s.	96
Figura 5.27 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).	97
Figura 5.28 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 50$ s.	97
Figura 5.29 - Efeito da razão H_1/L_1 sobre a altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo tempo ($0.00 \text{ s} \leq t \leq 50.00 \text{ s}$).	100
Figura 5.30 - Efeito da razão H_1/L_1 sobre a altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo tempo para diferentes profundidades da superfície livre da água.	101
Figura 5.31 - Efeito profundidade da lâmina da água (h_1) sobre a altura da água galgada no reservatório uma vez maximizada (h_{Rm}).	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Análise dos erros relativos e tempo de processamento	60
Tabela 4.1 - Dimensões para construção do dispositivo de galgamento	65
Tabela 4.2 - Valores de altura do nível do reservatório do canal de ondas, frequência do inversor, regulagem do curso do gerador, período e altura da onda.....	68
Tabela 4.3 - Fontes de incerteza do tipo B, precisão no processo de fabricação do protótipo e medição dos dados nos ensaios.....	75
Tabela 5.1 - Valores dos erros relativo na sonda P_0 para diversos intervalo de tempo..	81
Tabela 5.2 - Valores dos erros relativo na sonda P_1 para diversos intervalo de tempo..	84
Tabela 5.3 - Valores dos erros relativos na sonda P_2 no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$).	98
Tabela 5.4 - Valores da altura da água galgada no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$)..	99
Tabela 5.5 - Valores experimentais da altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo tempo para diferentes profundidades da superfície livre da água, ($0.00 \text{ s} \leq t \leq 50.00 \text{ s}$).	102
Tabela A.1 - Variações da geometria para $h_1 = 0,338 \text{ m}$ e $h = 0,808 \text{ m}$	120
Tabela A.2 - Variações da geometria para $h_1 = 0,347 \text{ m}$ e $h = 0,817 \text{ m}$	120
Tabela A.3 - Variações da geometria para $h_1 = 0,356 \text{ m}$ e $h = 0,826 \text{ m}$	120
Tabela A.4 - Variações da geometria para $h_1 = 0,365 \text{ m}$ e $h = 0,835 \text{ m}$	120
Tabela A.5 - Variações da geometria para $h_1 = 0,374 \text{ m}$ e $h = 0,844 \text{ m}$	121
Tabela A.6 - Variações da geometria para $h_1 = 0,383 \text{ m}$ e $h = 0,853 \text{ m}$	121
Tabela A.7 - Variações da geometria para $h_1 = 0,392 \text{ m}$ e $h = 0,862 \text{ m}$	121

LISTA DE ABREVIATURAS

CAO	Coluna de Água Oscilante
EDP	Equação Diferencial Parcial
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
MAE	<i>Mean Absolut Error</i>
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NEA	Nível Estático (ou Nível Médio) da Água
OBREC	<i>Overtopping Breakwater for Energy Conversion</i>
OWC	<i>Oscillating Water Column</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RS	<i>Rio Grande do Sul</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SSG	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
TAPCHAN	<i>Tapered Channel Wave Power Device</i>
UDF	Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined Function</i>)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VC	Volume de Controle
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Conveter</i>
WPP	<i>Wave Plane Production</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Área da rampa	[m ²]
A_T	Área do canal de ondas	[m ²]
C	Comprimento da superfície da rampa	[m]
d	Nível inicial do reservatório	[m]
E_R	Erro relativo	[%]
$\bar{f}$	Forças externas por unidade de volume	[N.m ⁻³]
g	Aceleração do campo gravitacional	[m.s ⁻²]
h	Distância do fundo do mar até o nível médio da água	[m]
h_R	Altura da água galgada no reservatório	[m]
h_1	Profundidade (altura - nível) do canal de ondas na parte rasa	[m]
h	Profundidade (altura - nível) do canal de ondas na parte profunda	[m]
H	Altura da onda	[m]
H_I	Altura da rampa	[m]
H_T	Altura total do canal	[m]
k	Número de onda	[m ⁻¹]
L_1	Comprimento da rampa	[m]
L_R	Comprimento do reservatório	[m]
L_T	Comprimento total do canal	[m]
M	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Fluxo de massa ou Vazão mássica instantânea	[kg/s]
P_O	Medição da sonda (sensor) a 10 m do batedor de ondas	[m]
P_1	Medição da sonda (sensor) a 22,2 m do batedor de ondas	[m]
P_2	Medição da sonda (sensor) no interior do reservatório	[m]
P	Pressão	[Pa]
P_{abs}	Pressão atmosférica	[kPa]
P_{man}	Pressão manométrica	[Pa]
S_D	Distância entre o nível inicial do reservatório do dispositivo e o fundo do canal de ondas	[m]
t	Tempo	[s]
t_f	Tempo final	[s]

T	Período de onda	[s]
U_r	Número de Ursell	
$\vec{V}$	Vetor velocidade	[m/s]
t	Coordenada temporal	[m]
w	Coordenada espacial	[m]
x	Coordenada espacial	[m]
z	Coordenada espacial	[m]
u_x	Componente da velocidade na direção x	[m/s]
u_z	Componente da velocidade na direção z	[m/s]

Símbolos gregos

μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
α_q	Fração de volumétrica das duas fases (ar e água)	
$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica da fase água	
α_{ar}	Fração volumétrica da fase ar	
η	Elevação da superfície livre	[m]
λ	Comprimento de onda	[m]
λ_1	Comprimento de onda na parte profunda do canal de ondas	[m]
λ_1	Comprimento de onda na parte rasa do canal de ondas	[m]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ϕ	Relação entre área da rampa e a área do canal de ondas	
σ	Frequência da onda	[s ⁻¹]
$\overset{=}{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[Pa]
Δ	Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço	

Subscritos

e	Face leste do volume de controle
f	Face
n	Face norte do volume de controle
s	Face sul do volume de controle
w	Face oeste do volume de controle

Sub-índices

- ()_o Uma vez otimizado
- ()_{oo} Duas vezes otimizado
- ()_m Uma vez maximizado
- ()_{mm} Duas vezes maximizado

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente na vida contemporânea das pessoas, sendo necessária para o funcionamento de residências e indústrias, tornando-se indispensável para a vida na sociedade e para o desenvolvimento de regiões. De acordo com Jannuzi e Swisher (1997), no contexto da energia, a ênfase deve ser dada à energia elétrica devido a sua participação na matriz energética mundial e facilidade de transmissão. Outro aspecto que merece destaque é a necessidade de diversificação nas formas de obtenção de energia, devido ao constante aumento na demanda de energia elétrica para aplicações residenciais, comerciais e industriais.

Considerando o crescimento da população mundial, a tendência é de ocorrer um aumento significativo na demanda global de energia. Para atender a estas necessidades adicionais, pensando ainda na preservação da natureza, é necessário promover o uso das fontes alternativas de energia, as quais representam apenas 20% do consumo de energia mundial (Tolmasquim, 2016).

A ideia de conversão da energia das ondas do mar em outras formas de energia não é nova. A primeira patente data de 1799, com o trabalho de Girard e Son, na França. Historicamente, o interesse pelo desenvolvimento da conversão da energia das ondas começou depois da crise dos preços do petróleo em 1973 (WAVEC, 2004).

A energia das ondas tem passado por um processo cíclico com fases de entusiasmo, desapontamento e reconsideração. No entanto, o persistente esforço na investigação, desenvolvimento e a experiência acumulada durante estes anos passados, tem constantemente aumentado o desempenho das técnicas de obtenção de energia a partir das ondas. Isso tem levado o recurso da energia das ondas a uma maior proximidade da exploração comercial que, até agora, não tinha sido vista (Alamian *et al.*, 2014).

Um dos principais propósitos no estudo de dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica é a racionalização do recurso energético disponível. Dessa forma, o desenvolvimento de modelos computacionais confiáveis e o design dos dispositivos são aspectos relevantes para a evolução na área. Consequentemente, o presente trabalho está relacionado com a conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica (WEC – do inglês: *Wave Energy Converter*), onde será avaliado o princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento. Este dispositivo é constituído por uma rampa sobre a qual a água das ondas em movimento incide, sendo posteriormente

galgada sobre a rampa e armazenada em um reservatório. Após a ocorrência do galgamento, a água acumulada no reservatório escoar devido à energia potencial através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica (Fleming, 2012).

O presente estudo apresenta como metodologia uma abordagem numérica e experimental sobre a validação de um modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal sobre dispositivos de galgamento onshore em escala de laboratório. Foi considerado o efeito da geometria sobre o desempenho do dispositivo empregando o método Design Construtal.

1.1. Estado da Arte

Para melhor organização, o estado da arte foi subdividido em seções. Primeiramente, apresentam-se a modelagem numérica em tanques e canais de ondas; na sequência estudos numéricos e experimentais nos dispositivos de galgamento e, finalmente, os estudos numéricos com a aplicação do Design Construtal nos dispositivos de galgamento.

1.1.1. Modelagem Numérica em Tanques e Canais de Ondas

Além da modelagem física da propagação de ondas existem outras abordagens que podem ser dadas a este tipo de problema, uma delas é por meio da simulação numérica. Com a utilização deste método podem ser reproduzidos modelos do comportamento de ondas oceânicas em tanque e canal.

Consequentemente é possível encontrar na literatura diversos trabalhos como por exemplo: em Gomes *et al.* (2009) foram apresentadas duas diferentes metodologias (a metodologia móvel (MM) que reproduz um gerador do tipo pistão; e a metodologia função (MF) que usa as equações analíticas da velocidade da onda para a criação das ondas) numéricas de geração de ondas regulares de gravidade num canal de ondas. Foram realizadas simulações numéricas da geração de ondas através do pacote Fluent, empregando-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) para reproduzir computacionalmente a propagação da onda no canal.

Os trabalhos de Gomes (2010), Teixeira *et al.* (2013) e Gomes (2014) também empregaram a metodologia função para a geração das ondas. Nestes estudos diferentes formas de absorção das ondas foram utilizadas: a) Parede vertical no final do tanque, b)

Rampa no final do tanque (praia física), c) Região de absorção da onda com perfil hidrostático no final do tanque (praia numérica).

Em Didier *et al.* (2017) foi utilizado o modelo numérico tridimensional RANS-VOF Fluent para implementar rotinas específicas que permitiram modelar um tanque de ondas 3D e analisar as interações complexas onda-estrutura que interessam aos projetos de engenharia costeira e marítima. Apresenta-se ainda a aplicação deste modelo ao estudo da interação de ondas com três tipos diferentes de estruturas marítimas: um emissário submarino, um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas e uma parte de uma ponte-cais.

No trabalho de Miranda *et al.* (2018) que apresentou um estudo numérico da propagação de ondas oceânicas em canais. Com a finalidade de analisar a influência da utilização de diferentes condições de contorno, considerando diferentes geometrias e malhas, no efeito de reflexão de ondas.

Goulart *et al.* (2018) realizou um estudo numérico baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) para simular a propagação de ondas regulares bidimensional em um canal de ondas e comparar com aos resultados de um modelo físico desenvolvido por Gomes (2018). Do ponto de vista qualitativo, foi observado que o modelo numérico reproduziu adequadamente o comportamento da onda, de forma semelhante ao obtido nos resultados experimentais. As comparações do modelo numérico com os resultados experimentais e analíticos conduziram a resultados satisfatórios, ficando de uma forma geral mais próximos aos experimentais. Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico VOF foi empregado. De uma forma geral, os resultados indicam que a metodologia VOF pode ser considerada válida para este tipo de análise de geração numérica de ondas em canal, ficando o MAE (erro absoluto médio) e o RMSE (erro médio quadrático) com diferenças de aproximadamente 2% e 3 % na comparação entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

Cabral *et al.* (2020) analisaram o desempenho de um módulo conversor de energia das ondas híbrido combinando uma coluna de água oscilante (CAO) e um dispositivo de galgamento integrados em um quebra-mar. Inicialmente o desempenho do dispositivo foi otimizado numericamente usando *ANSYS Fluent* e *WOPSim* v3.11 e, posteriormente, foi realizado um estudo com modelo físico em uma escala geométrica de 1:50. A energia das ondas capturada pelo modelo híbrido foi calculada e o desempenho dos dois princípios discutidos. Foi demonstrado a partir dos resultados que a hibridização pode levar a sistemas com maior eficiência do que seus componentes individuais, para uma gama mais

ampla de condições de onda. Os conceitos escolhidos se complementaram: o dispositivo de galgamento foi mais eficiente para os mais baixos períodos de onda testados e o CAO para os mais altos. Consequentemente, a produção de energia do modelo híbrido foi considerada menos dependente das características da onda.

1.1.2. Estudos Numéricos e Experimentais sobre Dispositivos de Galgamento

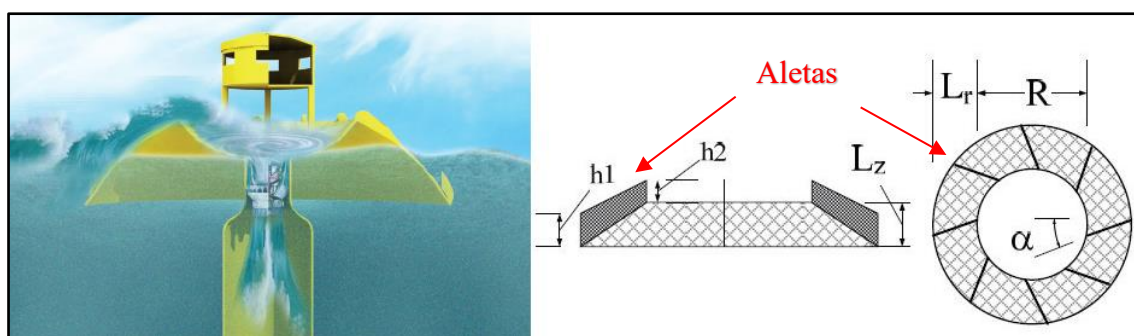
Dentre os trabalhos encontrados na literatura, no desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais do dispositivo de galgamento (*overtopping*), pode-se destacar os seguintes:

Kofoed (2002) realizou um estudo relacionado com o cálculo de descargas da água no galgamento para uma grande variedade de formas de rampa por meio de experimentos em laboratório. Estruturas com reservatório individual e com diferença de nível foram examinadas. A influência de vários parâmetros geométricos tais como: a inclinação da rampa, diferença de altura entre a borda do topo da rampa e a superfície livre da água, a forma do projeto das paredes de orientação e a saída livre da água na descarga do galgamento foi investigada. O efeito do uso de múltiplos reservatórios com diferença de nível do galgamento também foram quantificados. Foi analisada ainda a otimização da geometria ideal com a finalidade de maximizar a energia potencial da água acumulada no galgamento. O autor determinou através dos seus experimentos que a eficiência hidráulica global de conversores de energia das ondas, com base no princípio de galgamento, está entre 20% e 35% quando um único reservatório é utilizado, e até 45% e 50% para uma estrutura com quatro níveis nos reservatórios.

Kofoed *et al.* (2006) realizaram no período 1998-2001 extensos testes em um tanque de ondas em um protótipo em escala reduzida de 1:50 na Universidade de Aalborg. Em um segundo momento um novo protótipo em escala reduzida de 1:4,5 do *Wave Dragon* (WD), foi colocado em Nissum Bredning, na Dinamarca, sendo ligado à rede elétrica em maio 2003 como o primeiro conversor de energia das ondas *offshore* do mundo. No período de maio de 2003 a janeiro de 2005, um amplo programa de medição foi realizado para monitorar a potência, o clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, tensões na estrutura e movimentos do protótipo, resultando em plano de estudos com a finalidade de determinar a ideal concepção para a estrutura e o planejamento para implantação de uma unidade de produção de energia de 4 MW.

Em Liu *et al.* (2008) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo de galgamento. Utilizando a metodologia VOF para a interação entre ar e água no dispositivo. Para isso, diferentes geometrias para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D (bidimensional). As equações de conservação foram resolvidas com o MVF, através do *software* Fluent. Várias condições das ondas incidentes e geometrias do dispositivo foram analisadas, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo. Relações fixas de altura por comprimento da rampa de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas.

Nam *et al.* (2008) realizaram um estudo numérico de um dispositivo de galgamento circular, onde aletas igualmente espaçadas foram inseridas na área da rampa, com o objetivo de determinar os parâmetros geométricos ótimos que maximizam a quantidade de água galgada. Para a realização deste estudo foi utilizado o *software* comercial FLOW3D, sendo simulados casos 2D e 3D. Nos casos 2D foram testados diferentes ângulos e formas da rampa. Já as simulações 3D tiveram o objetivo de compreender o comportamento do escoamento da água sobre o dispositivo de galgamento, além do efeito causado com o acréscimo de aletas sobre a rampa. A Figura 1.1 (a) mostra uma ilustração do dispositivo e a Fig. 1.1 (b) a disposição das aletas.



a)

b)

Figura 1.1 – Dispositivo: a) ilustração e b) disposição das aletas (Adaptado de Nam *et al.*, 2008).

Margheritini *et al.* (2009) analisaram um dispositivo denominado *Sea Slot-cone Generator* (SSG). De acordo com os autores, uma chave para o êxito do SSG é o baixo custo da estrutura e a sua robustez. Este artigo descreve o conceito do conversor de energia das ondas SSG e os estudos que determinam o processo que leva à sua construção. Os resultados dos testes de laboratório foram usados para projetar uma planta piloto e

para definir suas características construtivas. Já em Margheritini *et al.* (2012), foi realizada uma análise de viabilidade de implementação do SSG no porto de Hanstholm na Dinamarca. Desta forma, um estudo numérico de otimização geométrica do SSG foi realizado por meio do *software* WOPSim, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Aalborg especificamente para a determinação de parâmetros do SSG.

No âmbito numérico, Beels *et al.* (2010) empregaram um modelo que resolve equações transientes denominado *mild-slope*. O modelo numérico desenvolvido foi implementado em um *Wave Dragon* e em diversas formações com cinco *Wave Dragon*, variando a distância entre os equipamentos em D , $2D$ e $3D$ sendo D a medida da distância entre as duas pontas do refletor do *Wave Dragon* (260 m), conforme ilustra a Fig. 1.2. Como resultado, os autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

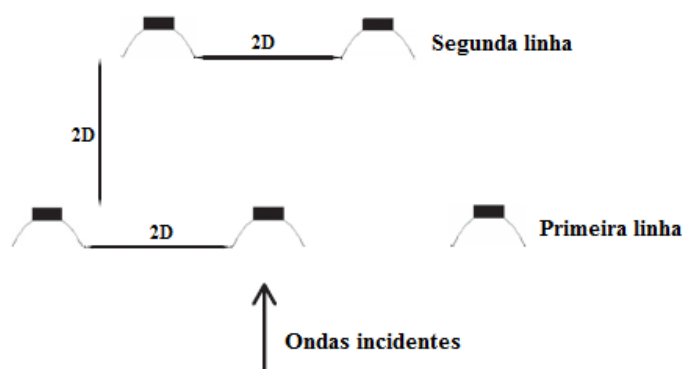


Figura 1.2 – Arranjo com 5 dispositivos *Wave Dragon* instalados em um arranjo desalinhado (Adaptado de Beels *et al.*, 2010).

Iahnke (2010) avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional por intermédio de um estudo numérico e experimental mas, de forma simplificada. Considerou-se um clima de ondas, semelhante ao encontrado no sul do Brasil (cidade de Rio Grande RS, localizada em aproximadamente 32°S e 52°W). Nesse trabalho, observou-se que a melhor geometria foi obtida para um ângulo de 30°. Vale destacar que a área da rampa variava para cada caso, não foi empregado o Design Construtal para avaliação das geometrias estudadas. Aqui acho que seria importante dizer.

Machado *et al.* (2011a) apresentaram uma abordagem numérica de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento, cujo principal objetivo foi avaliar a eficiência de um modelo tridimensional para o estudo. Para a simulação numérica das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica, fez-se o uso de um código comercial baseado no MVF, Fluent. E, para a abordagem da interação entre as fases ar e água empregou-se o modelo multifásico VOF. De forma geral foi observada a eficiência do modelo numérico (MVF e VOF) para a predição dos escoamentos transientes de ondas sobre um dispositivo de galgamento.

Machado *et al.* (2011b) realizaram um estudo empregando um modelo numérico tridimensional do dispositivo de galgamento onde o principal objetivo foi a determinação da influência do ângulo de abertura da rampa sobre a vazão mássica de água que entra no reservatório, ou seja, qual rampa conduz à maior geração de energia elétrica. Para tal investigação, foram avaliadas três rampas tridimensionais, com diferentes ângulos de abertura da rampa ($\alpha = 0,00^\circ$; $9,46^\circ$ e $18,43^\circ$), inseridas em um tanque de ondas em escala de laboratório. O tratamento das equações de conservação da massa e quantidade de movimento e a interação entre as fases (ar e água) foi realizado como em Machado *et al.* (2011a). Observou-se que o ângulo de abertura possui influência sobre a quantidade de água que entra no reservatório, ou seja, sobre o galgamento. Foi observado que a rampa com ângulo $\alpha = 18,43^\circ$ apresentou um desempenho 29% e 84% superior do que os das rampas com ângulos $\alpha = 9,46^\circ$ e $0,00^\circ$, respectivamente.

Norgaard e Andersen (2012) realizaram estudos numéricos, baseados nas mesmas formações dos estudos Beels *et al.* (2010), em um *Wave Dragon* e em diversas formações com cinco *Wave Dragon* a fim de calibrar o modelo Mike21BW. O modelo calibrado foi aplicado em cálculos da redução da altura das ondas após a passagem pelo dispositivo. Tal aplicação deu-se para um único WD e para múltiplos e, também, para diferentes climas de ondas. O modelo foi calibrado e validado através de resultados de publicações anteriores que apresentavam testes em modelos físicos. Concluiu-se que esta abordagem simplificada apresenta resultados relativamente semelhantes tanto para um único WD flutuante quanto para uma fazenda de WD.

Um dispositivo semelhante ao estudado em Nam *et al.* (2008) foi analisado em Jin *et al.* (2012), porém somente o efeito do número de aletas foi analisado. Neste estudo foi empregado o *software* comercial Fluent para as simulações em 3D, conforme a ilustração do dispositivo apresentado na Fig. 1.3. Para a abordagem dos escoamentos turbulentos foram resolvidas equações médias no tempo, metodologia RANS (*Reynolds*

Averaged Navier-Stokes), com modelo de fechamento $k - \varepsilon$. Com relação à mistura água-ar, a mesma foi abordada com o emprego do modelo multifásico VOF. Os resultados preliminares mostraram que com um número maior de aletas há um aumento no volume de água galgado, entretanto não foi definido um número ótimo de aletas.

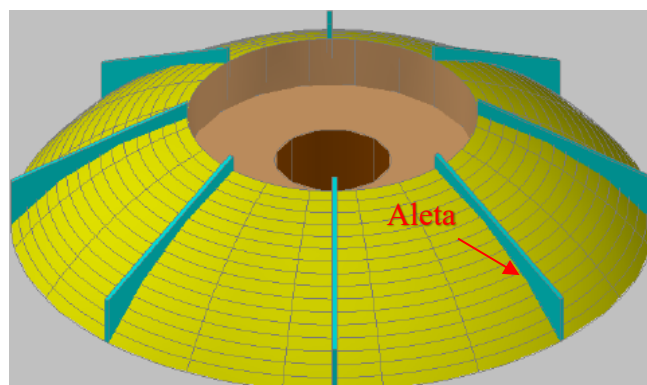


Figura 1.3 – Dispositivo de galgamento circular (Adaptado de Jin *et al.*, 2012).

Vicinanza *et al.* (2014) realizaram um estudo experimental sobre o aproveitamento de estruturas de quebra-mares para instalação de dispositivos de galgamento com a finalidade de aproveitar o acúmulo de água no reservatório para geração de energia, determinar o comportamento hidráulico e as cargas às quais o dispositivo é submetido. O modelo testado foi em uma escala de 1:30 em relação ao protótipo. O canal onde o modelo foi testado tem comprimento de 25 m e altura de 1,5 m. As ondas geradas foram baseadas em três parâmetros do espectro *JONSWAP*. O modelo foi testado para duas diferentes configurações chamadas: baixa ($d_w = 2,25$ m) e alta ($d_w = 3,75$ m), dimensões relativas ao protótipo. Além disso, parâmetros como altura e largura do reservatório entre outros foram modificados por valores predeterminados durante o experimento a fim de determinar a geometria que melhor favorecia a entrada de água no reservatório.

Buccino *et al.* (2015) fornecem uma primeira análise sobre a viabilidade de uma usina hidrelétrica com turbina de baixa queda, onde as ondas acumulam água em um reservatório da linha costeira criado por uma rampa íngreme. O sistema é particularmente adequado para ambientes com micro marés, como o Mar Mediterrâneo, e possui vantagem de proteger as linhas costeiras, os paredões e os recursos costeiros da ação das ondas. Testes de modelos físicos, conduzidos com ondas regulares, foram usados para obter uma estimativa preliminar da vazão média de água que sobe a rampa em um estado

do mar característico da região, também foi testado um novo tipo de turbina baixa queda, desenvolvida na Universidade de Southampton, para a conversão da energia hidráulica em eletricidade. Os resultados são interessantes tanto do ponto de vista técnico como do ponto de vista econômico e encorajam um aprofundamento nos estudos deste tipo de WEC.

Oliveira *et al.* (2016) investigaram a instalação de um dispositivo SSG em quebramar. Este estudo analisou o desempenho hidráulico da tecnologia SSG e o aprimoramento de desempenho associado ao uso de concentradores de onda, usando um modelo físico construído em uma escala geométrica de 1:40, testado sob a ação de condições de onda típicas da costa oeste portuguesa. As configurações SSG testadas foram definidas alterando o ângulo de abertura dos concentradores de onda. O uso desses elementos provou ser vantajoso, uma vez que a potência média total capturada aumentou em relação à configuração padrão, devido à maior frente de onda capturada e ao aprimoramento de aceleração e abertura na rampa SSG, explicado pela concentração de energia das ondas. A melhoria no desempenho foi maior nas menores alturas significativas e nos períodos mais curtos, já que o efeito de afunilamento criado pelas paredes convergentes possibilitou que as pequenas ondas chegassem ao reservatório, que de outra forma não poderiam atingir o primeiro reservatório e também aumentaram a energia potencial acumulada nos reservatórios superiores.

Jungrungruentaworn e Hyun (2017) realizaram uma investigação numérica bidimensional para estudar a influência da largura de ranhura do dispositivo de galgamento flutuante estacionário de múltiplos estágios. Os dispositivos de energia das ondas têm o seu desempenho na maioria das vezes baseado na vazão mássica, ou seja, a eficiência hidráulica baseada na energia capturada da onda, diferentes formas dos dispositivos foram comparadas com os do dispositivo de estágio único para determinar o efeito do desenho geométrico. Os resultados demonstraram tendência de aumento na energia acumulada do galgamento para dispositivos de múltiplos estágios em comparação ao de estágio único. Além disso, foram analisadas diferentes larguras da ranhura no dispositivo de múltiplos estágios. Os resultados numéricos mostraram que a eficiência hidráulica geral dos dispositivos varia quando se altera a distância de entrada das ranhuras. A Figura 1.4 mostra uma das disposições das ranhuras do dispositivo.

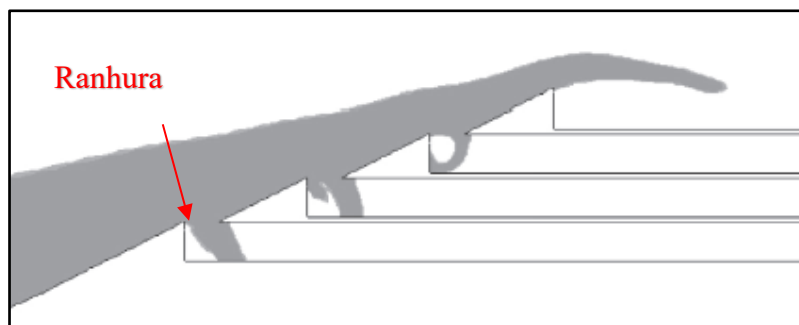


Figura 1.4 – Disposições das ranhuras do dispositivo (Adaptado de Jungrungruentaworn e Hyun, 2017).

Han *et al.* (2018) investigaram o design dos reservatórios dos dispositivos de galgamento com múltiplos estágios. Com o objetivo de melhorar o seu desempenho. Este dispositivo, da conversão de energia das ondas, consistindo de reservatórios com rampas inclinadas em diferentes níveis, foram propostos. Um tanque de ondas numéricas baseado no modelo VOF é estabelecido no Fluent para a investigação de desempenho do WEC. O modelo numérico e o processo de galgamento e as descargas médias por tempo são comparados aos dados experimentais correspondentes. Efeitos da largura de abertura do reservatório inferior, ângulos de inclinação de dois reservatórios e a altura do espaço entre os reservatórios nas descargas adimensionais de galgamento são estudados numericamente. Foi observado que a menor largura da abertura do reservatório, maior razão de altura e os ângulos de inclinação de 30° têm efeitos positivos para melhorar o desempenho de galgamento do dispositivo.

Liu *et al.* (2019) analisaram um dispositivo de galgamento com múltiplos estágios que foi projetado de acordo com a ampla faixa de marés e pequenas alturas de ondas na China. O dispositivo consistia em dois reservatórios com paredes inclinadas em diferentes níveis. Os reservatórios compartilham um duto de saída comum e uma turbina axial de baixa queda. O estudo experimental foi realizado em um canal de ondas de laboratório para investigar o desempenho do dispositivo de galgamento. Os medidores de nível foram utilizados para medir a variação do nível de água nos reservatórios. Os dados foram processados para analisar os valores médios do galgamento no decorrer do tempo. Observou-se que o reservatório inferior pode armazenar a água das ondas com nível baixo de água e quebrar as ondas que tentam subir até a parte superior reservatório. O ângulo de inclinação da rampa e a distância entre elas que permite o acesso ao interior do reservatório têm influência no efeito do galgamento no dispositivo.

Wan *et al.* (2019) realizaram estudo numérico 3D a fim de comparar os resultados com estudo experimental encontrado na literatura de um dispositivo de galgamento

offshore chamado *Wave Dragon*. Além disso, foi incorporado na geometria original um reservatório adicional. Para a rampa inferior foi considerado o ângulo de inclinação de 30° , como o original, e para a rampa superior um ângulo de 20° , onde o reservatório não apresentava saída de água para o tanque. Para o estudo foi utilizado o *software Star-CCM+* e a teoria linear de *Stokes* de quinta ordem para a geração das ondas. O trabalho considerou as características do mar da costa leste da China e simulado em escala de laboratório. Os resultados mostraram que para a mesma altura de onda o galgamento foi mínimo e a eficiência diminuiu com a mudança do período da onda. Já quando o período da onda mantido fixo e a altura da onda for aumentada, o galgamento e a eficiência crescem.

Lauro *et al.* (2020) realizaram estudo numérico 2D sobre a integração de um dispositivo de galgamento para geração de energia em um quebra mar do tipo vertical (OBREC-V - *Overtopping Breakwater for Energy Conversion - Vertical*), sendo analisada a performance do equipamento relativa à reflexão das ondas, influência da geometria no galgamento das ondas e cargas das ondas exercidas sobre o dispositivo em escala de 1:30, apresentando um domínio computacional de 6,6 m de comprimento e 1,3 m de altura. O dispositivo analisado apresenta reservatório único fechado, ou seja, sem saída de água. A inclinação da rampa foi mantida em 34° . Foram empregadas ondas irregulares de acordo com o espectro JONSWAP e utilizando o modelo numérico IH2VOF. Os resultados mostraram a integração do dispositivo de galgamento ao quebra mar aumenta a estabilidade da estrutura como um todo. Além disso, há uma redução de aproximadamente 40% na reflexão quando empregado o OBREC-V.

Jungrungruentaworn *et al.* (2021) avaliaram numericamente, utilizando o software comercial *ANSYS Fluent v17*, o desempenho de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento com múltiplas rampas 3D. O dispositivo tem três rampas com inclinação de $26,56^\circ$, distância entre as rampas igual a 0,4 m e altura entre o nível médio da água e a altura da rampa mais alta de 2,0 m, e foi considerado integrado em um quebra-mar. O principal parâmetro avaliado foi a largura do dispositivo associado aos efeitos tridimensionais sobre a eficiência hidráulica. Os resultados mostraram que o dispositivo de menor largura apresentou menor eficiência hidráulica, enquanto para dispositivos mais largos a eficiência hidráulica teve um aumento. Além disso, foi proposta uma equação para prever a relação entre as eficiências de dispositivos bidimensionais e tridimensionais.

1.1.3. Estudos Numéricos com a Aplicação do Design Construtal em Dispositivos de Galgamento.

A otimização é de fundamental importância na área da engenharia, pois a função clássica do engenheiro é projetar novos sistemas, mais eficientes e mais econômicos, de forma a elaborar planos e procedimentos para a melhoria do funcionamento de sistemas existentes (Reis, 2006). Portanto, o Design Construtal, que é baseado no princípio de restrições e objetivos, é um método importante para a avaliação geométrica de problemas de engenharia. Para os estudos de otimização geométrica, o Design Construtal precisa ser associado a um método de otimização, como o de busca exaustiva, permitindo assim a avaliação do espaço de busca.

Com relação à aplicação do Design Construtal na otimização de dispositivos de galgamento para conversão da energia das ondas em energia elétrica, podem-se destacar alguns trabalhos, tais como:

Em Machado (2012) o princípio operacional de um dispositivo de galgamento foi numericamente analisado para dois casos. No primeiro estudo o objetivo foi obter uma recomendação teórica, através do método Design Construtal, aplicado a um modelo numérico bidimensional, para a otimização geométrica de um conversor do tipo galgamento para dois climas de ondas: $h/\lambda = 0,50$ e $h/\lambda = 0,62$. No segundo estudo foi realizada uma abordagem numérica tridimensional de um dispositivo de galgamento com propósito de investigar a influência do ângulo de abertura da rampa sobre a vazão mássica de água que entra no reservatório, ou seja, qual rampa irá conduzir a uma maior geração de energia elétrica. O domínio computacional (2D e 3D) foi discretizado com o *software* Gambit e a análise numérica foi realizada com um código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) baseado no MVF, Fluent. O modelo multifásico VOF e um gerador de ondas foram adotados para gerar ondas regulares em um canal de ondas onde foi inserido o dispositivo de galgamento, garantindo uma interação adequada entre ar, água e o dispositivo. Os resultados mostraram a aplicabilidade do método Design Construtal para avaliação geométrica dos dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica do tipo galgamento. Por exemplo, para o clima de ondas $h/\lambda = 0,50$, a geometria ótima teve um desempenho 20 vezes maior do que a pior geometria onde o galgamento ocorreu. Além disso, os resultados encontrados para o caso tridimensional foram promissores e encorajam a realização de novos estudos de otimização.

Com relação ao dispositivo de galgamento, em Dos Santos *et al.* (2013) foi

realizado um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento *offshore* e em escala de laboratório por meio do Design Construtal. A ideia básica foi semelhante ao estudo realizado em Iahnke (2010) e Machado (2012) contudo em Dos Santos *et al.* (2013) o volume total e a fração de volume da rampa foram definidas como restrições. Assim, a razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do canal foi mantida constante. O objetivo foi maximizar vazão mássica de água que entrou no reservatório do dispositivo. Os resultados mostraram que havia uma razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,6$, que maximizou a quantidade de massa que entrou no reservatório (objetivo).

Posteriormente, em Dos Santos *et al.* (2014), foi realizado um estudo numérico para determinar a otimização geométrica de um WEC do tipo galgamento para algumas profundidades relativas: $h/\lambda = 0,30, 0,50$ e $0,62$ empregando o Design Construtal. O objetivo principal foi a avaliação da influência da profundidade relativa sobre a geometria da rampa (relação entre a altura e o comprimento da rampa: H_1/L_1), bem como, investigar a razão que conduz a uma maior quantidade de água ao reservatório. No estudo apresentado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o MVF. Para a solução da interface água-ar é utilizado o modelo multifásico VOF. Os resultados mostraram que a forma ótima, $(H_1/L_1)_o$, tem uma forte dependência da profundidade relativa, isto é, não há uma geometria universal que conduza ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de onda.

Goulart (2014) apresentou um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, empregando Design Construtal. O principal propósito foi identificar quais geometrias para a rampa (razão entre a altura e comprimento da rampa: H_1/L_1) maximizam a quantidade de massa de água que entra no reservatório do dispositivo para várias distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque (S) onde o mesmo foi inserido. Vale destacar que, neste trabalho, foi avaliado apenas o princípio físico de funcionamento do dispositivo. Consequentemente, as geometrias ótimas obtidas aqui servem como uma recomendação teórica para futuros estudos e construções desse tipo de conversor de energia das ondas. Nas presentes simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o MVF. Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico VOF foi empregado. Os resultados mostraram que as melhores geometrias foram obtidas para as

menores razões de H_1/L_1 para todas as profundidades analisadas. Também foi observado que não há uma geometria universal ótima que conduz à maior massa de água que entra no reservatório para as várias profundidades estudadas. Neste estudo, conforme esperado, a diminuição de S conduziu a um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (m_m) e da razão H_1/L_1 ótima, $(H_1/L_1)_o$.

Martins *et al.* (2015a) realizaram um estudo numérico a fim de observar o efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real por meio do Design Construtal. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da razão ϕ , isto é, a razão entre a área da rampa e a área total, e da razão entre a altura e o comprimento da rampa sobre o montante de água que entra no reservatório dispositivo de galgamento para dois períodos diferentes de onda do mar ($T = 5,0$ s e $7,5$ s). Todos os processos foram realizados por uma distância específica a partir do fundo do tanque para o inferior do dispositivo de $5,0$ m. Além disso, três valores de ϕ foram utilizados: $\phi = 0,006$, $\phi = 0,012$ e $\phi = 0,024$. Para todos os casos estudados, as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, assim como uma equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o MVF. Para tratamento adequado da mistura de ar e água, o modelo multifásico VOF foi usado. Os resultados mostraram que o Design Construtal permitiu uma melhoria da forma de rampa e que a maior quantidade de água que entra no reservatório ao longo do tempo foi obtida para as menores proporções da razão estudada, fato este, apresentado nos três valores estudados de ϕ e para os dois períodos diferentes de onda do mar. Os resultados também indicaram que a massa de água armazenada no reservatório aumentou com o aumento do período de onda de $T = 5,0$ s a $T = 7,5$ s.

Em Goulart *et al.* (2015) foi realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, empregando o Design Construtal. O objetivo principal foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo para distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque de $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica foram resolvidas com o MVF, além disso, a mistura água e ar foi abordada pelo modelo multifásico VOF é empregado. Os resultados mostraram que as melhores geometrias foram obtidas para as menores razões de H_1/L_1 . Também foi observado que a diminuição de S levou a um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (m_m) e da razão H_1/L_1 ótima,

$(H_1/L_1)_o$.

Martins *et al.* (2015b) realizaram um estudo numérico acerca de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. O intuito deste foi a análise do efeito da geometria rampa sobre o desempenho do dispositivo, por meio de Design Construtal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a altura e o comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório de um dispositivo para uma distância específica a partir do fundo do canal para o fundo do dispositivo de $S = 6,0$ m e para três diferentes proporções entre as áreas da rampa e do canal: $\phi = 0,006$, $0,012$ e $0,024$. As equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, assim como uma equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o método de MVF. Para o tratamento adequado da mistura de água-ar, o modelo multifásico VOF foi utilizado. Os resultados mostraram que a maior quantidade de água que entra no reservatório ao longo do intervalo de tempo foi obtida para as menores proporções de H_1/L_1 para os três valores estudados de ϕ . Além disso, a maior proporção de H_1/L_1 levou ao pior desempenho do dispositivo. A comparação entre o desempenho obtido com diferentes valores de ϕ mostrou que a maior quantidade de água foi obtida para a zona de menor razão ($\phi = 0,006$). Em seguida, recomendou-se a construção de rampas com pequenas áreas.

Barbosa *et al.* (2015) apresentaram um estudo de simulação numérica de um dispositivo de galgamento bidimensional que realizou a comparação de dois *softwares*: Fluent e OpenFOAM. Para tal, foram utilizadas simulações numéricas para diferentes geometrias de um dispositivo de galgamento em ambos os *softwares*. Para obtenção destas geometrias empregou-se o Design Construtal. Estudaram-se sete configurações de rampa diferentes ($H/L = 0,22; 0,24; 0,26; 0,28; 0,30; 0,32$, e $0,34$), mantendo-se constante a sua área. Independentemente das diferenças entre os *softwares*, o estudo apresentou simultaneidade de picos de galgamento para ambas as soluções e linhas de tendência semelhantes com relação ao armazenamento de água para os valores de H/L considerados.

Em Machado (2016) foram realizados dois estudos numéricos a respeito de um conversor de energia das ondas do mar do tipo galgamento, o primeiro estudo é realizado considerando uma escala de laboratório e, o segundo, considerando uma escala real ambos com aplicação do método Design Construtal na definição da melhor forma para a rampa. O grau de liberdade b/B , isto é, a razão entre a base superior e a base inferior da rampa trapezoidal, foi otimizado, mantendo-se fixas a área total do canal de ondas, a área da rampa e as características da onda. Para a análise numérica do princípio de

funcionamento deste dispositivo foi empregado um domínio computacional tridimensional (3D). Os resultados mostraram que houve uma razão ótima $(b/B)_o = 0,43$. Para o segundo estudo, as características da onda regular empregada estavam em escala real e os resultados mostraram que houve uma razão ótima $(b/B)_o = 0,38$. Para ambos os casos, a razão ótima foi encontrada para o extremo inferior do grau de liberdade, além dos resultados apontarem um aumento significativo na massa acumulada no reservatório e, conseqüentemente, um maior aproveitamento das ondas incidentes.

Martins *et al.* (2018) realizaram um estudo numérico de um dispositivo de galgamento relacionado ao efeito da geometria da rampa (razão entre a altura e comprimento da rampa: H_1/L_1) e a submersão (S) da mesma sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real para duas ondas monocromáticas diferentes e três diferentes áreas construtivas (ϕ) do dispositivo, empregando o Design Construtal e a Busca Exaustiva. Os resultados mostraram que para magnitudes fixas de S , as maiores magnitudes de P_d são alcançados pela menor razão possível de H_1/L_1 . Para as áreas menores da rampa, magnitudes intermediárias de S levaram às maiores magnitudes de P_d , ou seja, o afundamento do dispositivo não levou necessariamente para o melhor desempenho. Além disso, foi observado que não há uma forma geométrica universal que conduza ao melhor desempenho do dispositivo para todas as condições estudadas.

Barbosa *et al.* (2019) realizaram análises numéricas 2D avaliando o desempenho de dispositivos galgamento *near shore* para investigar a influência da curvatura sobre a quantidade de água galgada por meio do código OpenFOAM. O estudo realizou comparações entre as soluções Fluent e OpenFOAM (primeira parte dos resultados). A comparação de *software* é realizada com base em um caso encontrado na literatura considerando sete configurações de superfícies de galgamento lineares dentro de um tanque de ondas. A investigação de curvaturas de superfícies considera dispositivos de 12,5 m e 25 m de comprimento, com três formatos diferentes: côncavo, linear e convexo. Todos eles têm 6 m de altura com 5 m de imersão e 1 m acima do nível da água. As rampas são submetidas a ondas regulares incidentes ($H = 1$ m, $\lambda = 65,4$ m e $T = 7,5$ s) dentro de um canal de ondas de profundidade de 10 m. Os resultados mostraram que o modelo de ondas OpenFOAM está em conformidade com a modelagem matemática e também é muito coerente com os resultados obtidos no Fluent por Martins *et al.* (2018) sobre as formas das rampas, observou-se que a curvatura das rampas pode maximizar a massa de água que deságua no tanque. Além disso, este estudo concordou com os

resultados da literatura (menor razão possível de H_1/L_1) leva à melhoria da quantidade de água galgada. Outra observação importante é que o uso de plataformas curvas é uma opção muito boa para reduzir o tamanho dos dispositivos sem perder o potencial energético.

Martins (2021) realizou um estudo numérico bidimensional sobre um dispositivo de galgamento, com rampa única e com duas rampas, incorporado ao molhe leste de São José do Norte (SJN) – Rio Grande do Sul (RS). Foram analisadas a geometria do domínio computacional (comprimento do canal numérico, perfil do molhe parcial e completo - com e sem praia numérica) e o tempo de simulação de 100 e 400 s. Além disso, empregou-se o método Design Construtal para avaliar os efeitos das geometrias das rampas por meio dos graus de liberdade, razão entre as alturas e comprimentos das rampas, H_1/L_1 e H_2/L_2 , distância vertical entre as rampas, H_g , e distância horizontal entre as rampas, L_g . Com a finalidade de determinar a maior magnitude da vazão adimensional média de galgamento, $(Q_{\text{num}})_{\text{mm}}$ utilizando o espectro de ondas JONSWAP com as características das ondas do mar da região de SJN. Foi utilizado o programa computacional comercial *ANSYS Fluent* baseado no MVF e o modelo multifásico VOF para abordar a mistura água-ar e interação água-estrutura. Os resultados mostraram a aplicabilidade e a eficiência do Design Construtal para avaliação geométrica de dispositivos de galgamento. Além disso, para o dispositivo de galgamento com rampa única, a maior magnitude para vazão adimensional média de galgamento, $(Q_{\text{num}})_{\text{mm}}$, foi encontrada para o menor valor de H_1/L_1 entre os empregados. Já para o dispositivo com duas rampas, o melhor desempenho ocorreu para a menor distância vertical entre as duas rampas, H_g , distância intermediária para a distância horizontal, L_g , e mesmo valor para a razão entre as alturas e comprimentos das rampas, H_1/L_1 e H_2/L_2 , sendo este valor o mesmo da inclinação original do molhe leste de SJN.

Em todos os estudos mencionados os resultados indicaram que o Design Construtal pode ser usado de maneira satisfatória para a maximização do desempenho de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica pois, o Design Construtal proporciona a obtenção de geometrias que conduzem a desempenhos superiores comparado com geometrias não otimizadas.

1.1.4. Contribuição Científica ao Estado da Arte.

Este trabalho busca ter como contribuição ao estado da arte a obtenção do efeito da geometria de um dispositivo de galgamento em escala de laboratório sobre o seu desempenho através da análise numérica e experimental com a aplicação do Design Construtal. Cabe destacar que, apesar de existirem estudos de validação de modelos computacionais para casos específicos na literatura, a validação das curvas de efeito de geometrias sobre o desempenho de dispositivos de galgamento oriundas da aplicação do método Design Construtal não foram encontradas, sendo uma contribuição inédita para o estado da arte. Além disso, o comportamento transiente do galgamento para as diferentes geometrias estudadas e a influência da geometria sobre o volume de água galgado nos dispositivos são contribuições importantes deste trabalho.

1.2. Objetivos

Na presente tese, tem-se como objetivo geral validar o modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal sobre dispositivos de galgamento em escala de laboratório considerando o efeito da geometria sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento empregando o método Design Construtal. Para a validação do modelo numérico, é realizada uma comparação de resultados numéricos e experimentais obtidos no presente trabalho, o que não foi realizado até então no âmbito do Design Construtal.

No presente estudo se tem os seguintes objetivos específicos:

- a) construir protótipo do dispositivo de galgamento em escala de laboratório para realizar estudos experimentais no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);
- b) analisar numericamente a propagação de uma onda regular bidimensional em um canal de ondas e comparar com os resultados do modelo físico obtidos nos estudos experimentais realizados no IPH na presente Tese;
- c) aplicar o Método Design Construtal no estudo de investigação geométrica de um conversor do tipo galgamento *onshore* em escala de laboratório avaliando a influência

da geometria na quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo de galgamento;

d) desenvolver e realizar estudos experimentais em dispositivo de galgamento *onshore* em escala de laboratório no IPH da UFRGS para obtenção de resultados experimentais com a finalidade de validação de modelos numéricos (modelo numérico de geração de ondas e do modelo numérico do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento), permitindo futuras simulações de dispositivos de galgamento *onshore* em escala real;

e) avaliar o efeito da razão altura/comprimento da rampa (H_1/L_1) sobre o volume de água galgada no reservatório do dispositivo de galgamento para profundidade da superfície livre da água (h_1) comparando resultados numéricos e experimentais;

f) avaliar o efeito da profundidade da superfície livre da água ($h_1 = 0,392$ m) sobre o volume de água uma vez maximizado e a razão altura/comprimento da rampa, $(H_1/L_1)_o$, uma vez maximizada comparando resultados numéricos e experimentais.

1.3. Organização do Texto

A disposição do texto é estruturada da seguinte forma:

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as ondas do mar como uma fonte renovável de energia e das tecnologias de aproveitamento da energia das ondas do mar com foco nos dispositivos de galgamento, a teoria das ondas, o clima de ondas em Rio Grande, RS e potencial energético, os tanques e canais de ondas, onde serão descritas as características do canal de ondas do IPH, na sequência a curva do gerador de ondas do IPH, a análise das ondas geradas, a Teoria Construtal, Lei Construtal e Design Construtal.

Capítulo 3: Metodologia Numérica

Neste capítulo são abordados aspectos do Design Construtal aplicado ao dispositivo de galgamento e o processo de modelagem matemática. São discutidos detalhes do domínio computacional. É apresentado o modelo Multifásico *Volume of Fluid*

(VOF), bem como detalhes das condições de contorno e os procedimentos numéricos adotados. Também pode ser observado teste de sensibilidade de malha.

Capítulo 4: Metodologia Experimental

Este capítulo trata da modelagem experimental, a instrumentação, o planejamento para realização do experimento no canal de ondas do IPH. Também serão descritos detalhes do processo de fabricação do protótipo, a execução dos ensaios e as incertezas que envolvem este tipo de experimento.

Capítulo 5: Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes verificação e validação do modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal e sobre dispositivos de galgamento em escala de laboratório, utilizando o Design Construtal.

Capítulo 6: Conclusões e Proposta de Continuidade

No capítulo 6 são expostas as conclusões referentes a verificação e validação do modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal e sobre dispositivos de galgamento em escala de laboratório, utilizando o Design Construtal, além das contribuições desta pesquisa. Além disso, são apresentadas sugestões de continuidade do estudo.

Capítulo 7: Referências

Para finalizar, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo foi dividido em: Fundamentação Teórica da Energia das Ondas do Mar, Teoria das Ondas, Tanques de Ondas e Canal de Ondas, Características do Canal de Ondas do IPH/UFRGS e Design Construtal.

2.1. As Ondas do Mar como uma Fonte Renovável de Energia

De acordo com Cruz e Sarmento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são, sem dúvida a energia das marés, fruto da interação dos campos gravitacionais da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés; e, finalmente, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW/m de frente de onda.

A exploração da enorme reserva energética das ondas representa uma tarefa complexa, onde quase tudo ainda está por fazer. Em teoria, se fosse possível equipar os litorais do planeta com conversores energéticos, as centrais elétricas existentes poderiam em teoria ser desativadas. O valor do recurso energético proveniente dos mares torna-se extremamente atrativo considerando-se que o valor global da energia das ondas encontra-se em torno de 2 TW, valor este que é equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente (Cruz e Sarmento, 2004).

Segundo Ghosh e Praelas (2011) este valor global apresenta-se distribuído de modo irregular pelo globo terrestre, sendo sua avaliação estimada em termos de potência por comprimento de frente de onda (kW/m). Na Figura 2.1 é possível observar a distribuição

à interação fluido-estrutura; 5) os vibratórios, que podem afetar o sistema sonar de animais marinhos e 6) os socioeconômicos, com efeitos sobre a pesca, dentre outros (Cruz e Sarmiento, 2004).

2.2. Tecnologias de Aproveitamento da Energia das Ondas do Mar

Para realizar a transformação da energia das ondas do mar em energia elétrica existem diversos tipos de conversores com diferentes classificações. Uma proposta foi realizada por Cruz e Sarmiento (2004) onde os dispositivos podem ser classificados quanto ao seu local de instalação. A Figura 2.2 mostra esta classificação quanto ao seu local de instalação e as faixas de profundidades para instalação dos dispositivos *nearshore* e *offshore*:

- dispositivos costeiros (*onshore* ou *shoreline*);
- dispositivos próximos da costa (*nearshore*);
- dispositivos afastados da costa (*offshore*).

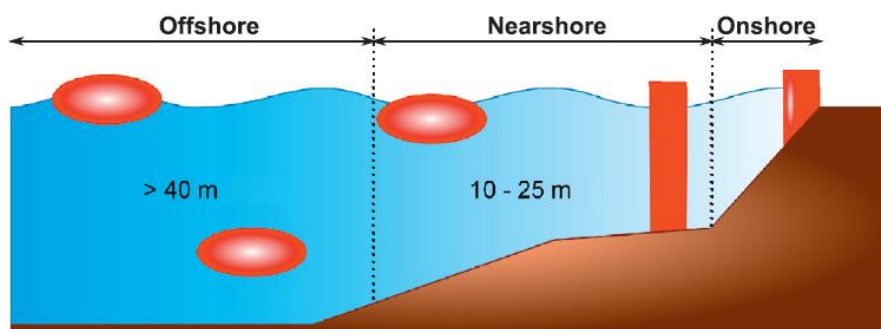


Figura 2.2 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López *et al.*, 2013).

Os dispositivos costeiros (*onshore* ou *shoreline*) possuem acesso por terra, são chamados de primeira geração. Esses dispositivos permitem fácil acesso para construção, instalação e manutenção, além de poderem estar junto aos centros consumidores, permitindo uma fácil distribuição da energia gerada. Adicionalmente, não necessitam de cabos de ancoragem e nem cabos submarinos. Porém, o potencial energético é menor, pois as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico e, conseqüentemente, têm a sua energia diminuída. Também possuem dificuldades em relação ao planejamento de proteção e conservação de costas (impacto ambiental).

Por outro lado, os dispositivos próximos da costa (*nearshore*), ou de segunda geração, aproveitam algumas vantagens das instalações sobre a costa, como a distância razoável para transporte e distribuição da energia produzida, estando localizadas em uma região de maior potencial de ondas. Em função de sua distância em relação à costa, ainda apresentam alguns problemas com relação a impactos ambientais.

Por fim, os dispositivos afastados da costa (*offshore*), ou de terceira geração, aproveitam os altos potenciais de energia presente nas ondas em mar aberto. Contudo, apresentam dificuldades de acesso para instalação e manutenção, além da grande distância para transporte da energia gerada. Também podem apresentar problemas relativos à ancoragem e interferência com rotas de navegação.

Uma outra classificação possível está associada ao princípio de conversão de energia das ondas em energia elétrica. Dessa forma, têm-se três classes principais de conversores de energia das ondas, que podem ser dados por (Cruz e Sarmiento, 2004):

- Coluna de Água Oscilante (CAO): trata-se de uma estrutura parcialmente submersa, em que a passagem das ondas provoca um aumento e uma diminuição do nível da água em seu interior, de forma sequencial. Consequentemente, há uma compressão e uma descompressão do ar que se encontra dentro desse compartimento. Esse ar passa por uma turbina que aciona um gerador, produzindo a eletricidade. Em relação à turbina, é recomendável que a mesma possua a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento, como é o caso das turbinas do tipo *Wells* (Cruz e Sarmiento, 2004).

- Corpos Oscilantes (*Oscillating devices*), podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*): são dispositivos em que a passagem da onda provoca oscilações, sendo a energia extraída desse movimento.

Na absorção pontual, o flutuador se move verticalmente ou em torno de um eixo, relativamente a uma estrutura fixa ao fundo. Enquanto nos progressivos, os componentes se movem relativamente sobre sua própria estrutura quando a onda passa.

Os corpos submersos podem aproveitar o movimento da translação ou da rotação da estrutura. O movimento oscilatório do conversor impulsiona sistemas hidráulicos que acionam um gerador, produzindo, então, eletricidade (Cruz e Sarmiento, 2004).

- Galgamento (*Overtopping devices*): as ondas que passam pela estrutura fixa são encaminhadas, através de rampas, para um reservatório que se encontra em um nível acima do mar. A água armazenada retorna ao oceano após passar por turbinas,

semelhantes às utilizadas em hidrelétricas, porém de baixa queda, acionando um gerador e assim produzindo energia elétrica (Cruz e Sarmento, 2004).

A Figura 2.3 apresenta a classificação dos dispositivos conversores de energia das ondas associada ao princípio de conversão.

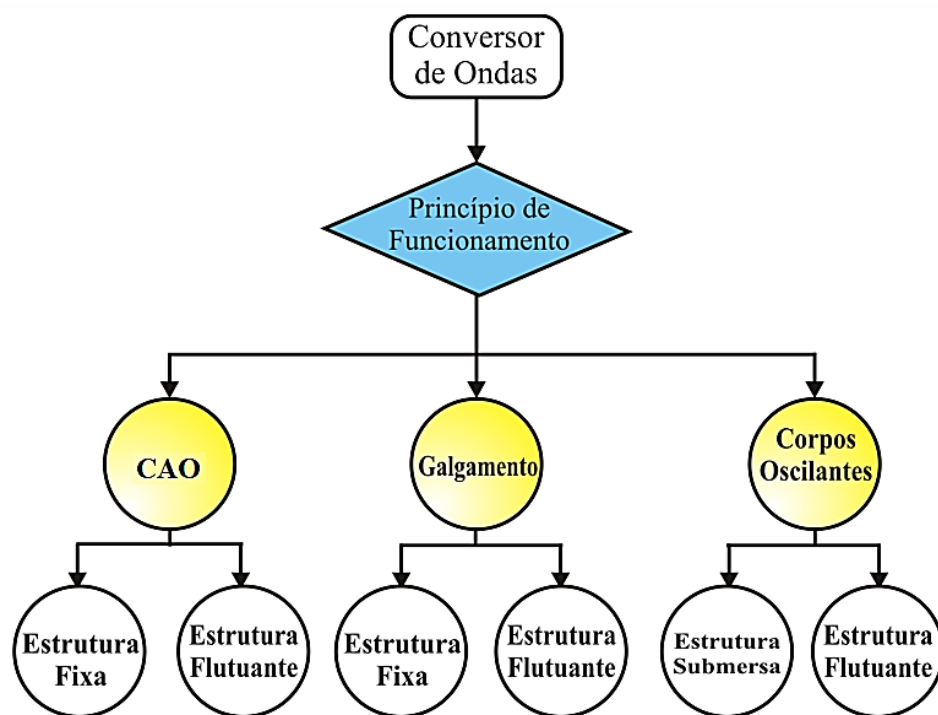


Figura 2.3 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad *et al.*, 2014).

Entende-se que são muitas as variáveis que definem qual dispositivo utilizar. Portanto, se deve conhecer os conversores com detalhes, bem como o clima de ondas da região em que se pretende instalar um dispositivo. Após isso, testam-se as diferentes opções e até mesmo pode se propor novas tecnologias de conversão.

A seguir serão apresentadas maiores informações, bem como aplicações do dispositivo de galgamento, que é o assunto principal desta pesquisa.

2.3. Dispositivos de Galgamento

Os dispositivos de galgamento são tecnologias flutuantes ou fixas, para aplicação, respectivamente, em *offshore* ou *onshore*. Seu princípio de funcionamento baseia-se na

acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar (Fig. 2.4). A água acumulada passa pela turbina hidráulica de baixa queda que aciona um gerador elétrico. O retorno da água ao mar acontece pela ação da energia potencial acionando turbina hidráulica. A acumulação da água no reservatório sobrelevado é produzida através do galgamento da onda sobre uma rampa inclinada (WAVEC, 2004).

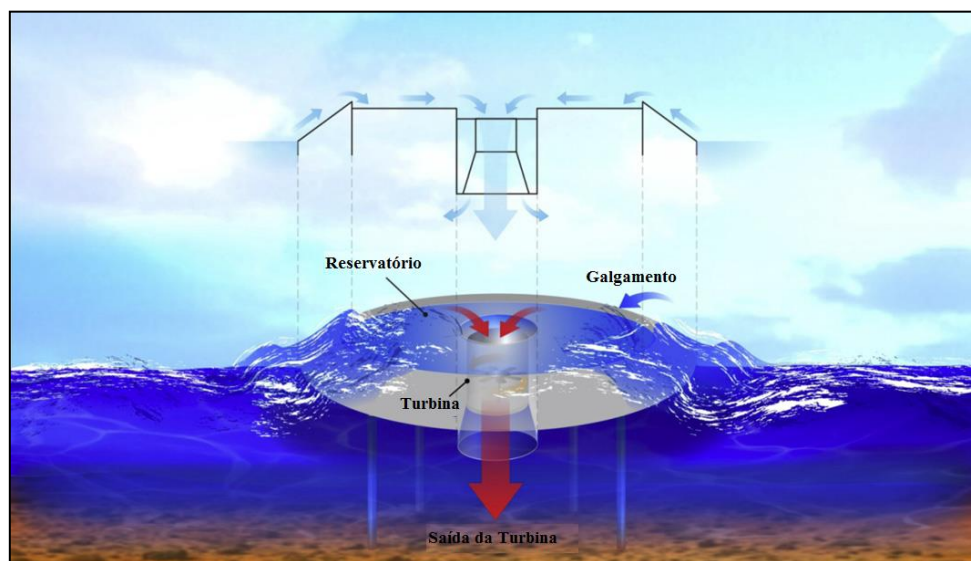
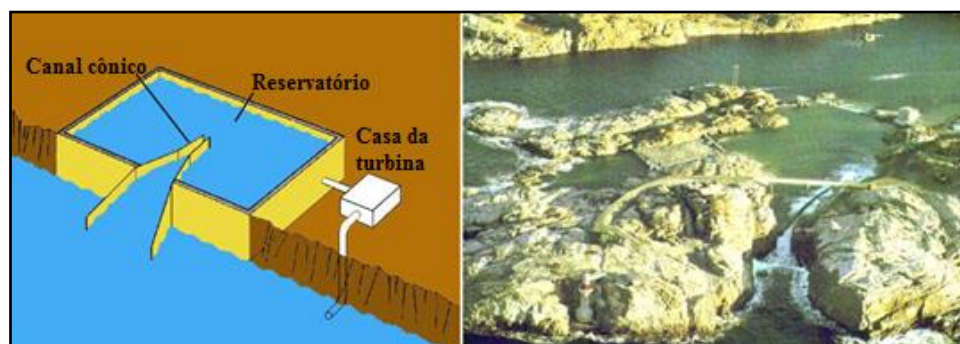


Figura 2.4 – Princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento (Adaptado de Li e Yu, 2012).

Os dispositivos com o princípio de funcionamento baseados no galgamento que existem em escala real estão em fase de testes ou são protótipos. Os principais exemplos são apresentados nas seções a seguir.

2.3.1. Tapchan (Noruega – *Tapered Chanel Wave Power Device*)

O equipamento *Tapchan* desenvolvido na Noruega nos anos 80 está instalado na cidade de Toftestallen desde 1985 com uma capacidade de 350 kW. O coletor está cavado na rocha e vai estreitando de modo a concentrar as ondas incidentes que neste protótipo chega aos 3 m de altura que é a altura do reservatório. O reservatório tem cerca de 8.500 m² de área superficial o que é muito importante pois é necessária uma área suficientemente grande para o correto funcionamento de uma turbina que neste caso é uma turbina *Kaplan* (Pereira, 2010). A Figura 2.5 (a) apresenta um esquema de funcionamento do equipamento e a Fig. 2.5 (b) uma fotografia do *Tapchan*.



a)

b)

Figura 2.5 – Dispositivo *Tapchan*: a) ilustração do esquema de funcionamento e b) imagem real do equipamento (Adaptado de Pereira, 2010).

2.3.2. *Wave Plane* (Dinamarca – *Wave Plane Production A/S – WPP A/S*)

É um dispositivo de galgamento cuja localização pode ser tanto próximo da costa como afastado da costa. Este dispositivo é equipado com uma praia artificial para tornar a captura da energia das ondas do mar mais eficiente. Em ambos os lados a captura da água das ondas é realizada para diferentes alturas, com objetivo de aproveitar ao máximo a energia cinética das mesmas. Essa energia é transformada em um fluxo de água, que causa a rotação das turbinas de baixa queda, as quais são equipadas com um gerador que é ligado à rede elétrica, devolvendo então a água novamente ao oceano (López *et al.*, 2013). A Figura 2.6 mostra o dispositivo.



Figura 2.6 – *Wave Plane* (López *et al.*, 2013).

Desde 1990, quando seu conceito foi criado por seu inventor Erik Skaarup, o *Wave Plane* tem sido desenvolvido. O primeiro teste oficial ocorreu na Irlanda em 1996, na *University College Cork*. Já o seu primeiro protótipo, localizado no Grenaa Píer, ficou pronto em 2008. Inicialmente seria testado no porto, para então ser deslocado para o local de testes em Hanstholm (López *et al.*, 2013).

2.3.3. *Wave Dragon* (Dinamarca – *Wave Dragon Aps*)

De acordo com Beels *et al.* (2010) o *Wave Dragon* (WD), é um conversor flutuante, do tipo galgamento, para uma localização *offshore*, consistindo basicamente em dois refletores que concentram e elevam a altura das ondas incidentes, canalizando-as em uma rampa para o interior de um reservatório. A água, contida temporariamente nesse reservatório, desce pela ação da gravidade passando por turbinas hidráulicas de baixa queda, situadas em sua região central, para a produção de energia elétrica. As Figuras 2.7 e 2.8 apresentam a imagem de seu protótipo e a representação da secção de rampa e principais partes constituintes do *Wave Dragon* (vista em corte) respectivamente.



Figura 2.7 – *Wave Dragon* – visão frontal (Tedd e Kofoed, 2009).

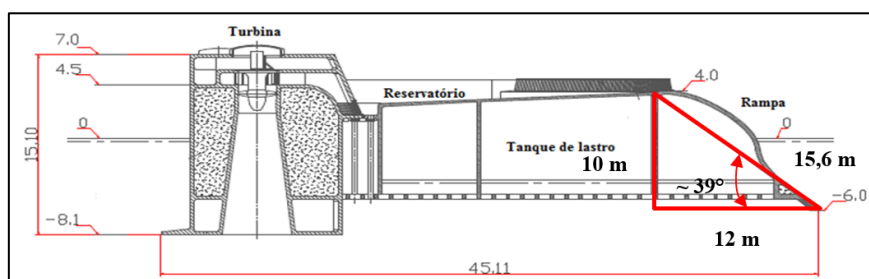


Figura 2.8 – Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do *Wave Dragon* vista em corte com as suas dimensões em metros (Adaptado de Moraes, 2009; Christensen *et al.*, 2006).

No final de 1990 o projeto do WD começou a ser desenvolvido por seu inventor, MSc Erik Friis-Madsen. Desde então, diversas de universidades e de parceiros industriais tem se envolvido no desenvolvimento e aprimoramento deste equipamento. Seu modelo em escala reduzida (em escala 1:4,5) foi instalado em Nisum Bredning, sendo testado de maio de 2003 até janeiro de 2005, destacando-se como primeiro dispositivo *offshore* a ser ligado a uma rede elétrica.

2.3.4. *Sea Slot-cone Generator* – SSG (Noruega – *Wave Energy AS*)

Desenvolvido pela *Wave Energy AS* a partir de 2004, o *Sea Slot-cone Generator* (SSG) é um dispositivo costeiro (*onshore*) de galgamento para a conversão da energia das ondas em eletricidade, através do armazenamento da energia potencial das ondas em vários reservatórios colocados um acima do outro. A água captada passará por uma turbina, convertendo dessa forma a energia potencial da água em energia mecânica de eixo. Esta é ligada a um gerador elétrico que converterá a energia mecânica em energia elétrica, para então abastecer à rede.

A Figura 2.9 (a) representa uma vista lateral em corte do equipamento e a Fig. 2.9 (b) mostra uma ilustração com sua possível forma de instalação.



a)

b)

Figura 2.9 – Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral e b) ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini *et al.*, 2009).

Sabe-se ainda que o SSG é uma estrutura de concreto com uma turbina axial de múltiplos estágios. No projeto desenvolvido pela *Wave Energy*, o dispositivo possui três reservatórios um acima do outro, podendo operar sob diferentes condições de ondas.

Dessa forma, é possível obter um fluxo ininterrupto de água para a operação da turbina, tornando o dispositivo mais eficiente em relação a estruturas com apenas um reservatório. Seu projeto piloto está instalado na costa da Noruega, na ilha de Kvitsøy, com uma potência aproximada de 150 kW e 10 m de largura em um clima de ondas de 19 kW/m (Frigaard *et al.*, 2006).

A Figura 2.10 apresenta a vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG com a dimensões da rampa.

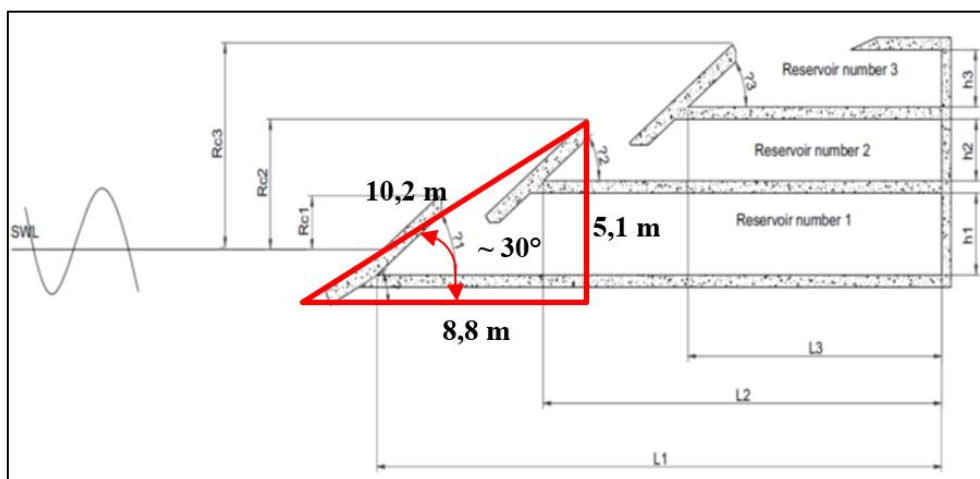


Figura 2.10 – Vista lateral do projeto de um dispositivo do tipo SSG (Adaptado de Margheritini *et al.*, 2009).

2.4. Teoria das Ondas

As ondas na superfície livre de líquidos existem devido à tendência natural de permanecer no estado de equilíbrio. Quando um objeto é largado num tanque de água, um distúrbio é criado e forma a onda de superfície. Os movimentos subsequentes na superfície são resultado da ação da gravidade fazendo com que a água retorne a sua posição sem distúrbio. Uma vez que estas ondas são resultado da gravidade elas são chamadas de ondas de gravidade (McCormick, 1973).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), outro fator que pode causar um distúrbio na superfície livre é a ação dos ventos. E ainda afirmam que as ondas podem ocorrer de todos os tamanhos e formas, dependendo da magnitude das forças que agem sobre a água.

De acordo com Cruz e Sarmento (2004), as ondas começam com o vento, que surge como resultado do aquecimento da Terra pelo sol. Devido ao formato irregular da Terra, o sol não a aquece de maneira uniforme. Normalmente, alguns pontos ficam mais aquecidos que outros. À medida que parte do ar se aquece, ele se torna menos denso

(torna-se mais leve) e desloca-se para cima. Isso gera espaço disponível para ar mais denso e frio, que pode mover-se para ocupar esse espaço. O influxo de ar nesses espaços denomina-se brisa. À medida que essa brisa percorre a superfície da água, a fricção gera atrito, causando ondulações. O vento continua a fazer pressão contra essas ondulações, em um efeito causa/consequência que, por fim, gera uma grande onda. Desta forma, pode-se afirmar que essa ação é uma transferência de energia solar do vento para as ondas.

As ondas oceânicas são formadas pela superposição de diferentes ondas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo então ser descritas através de teorias determinísticas (Chakrabarti, 2005).

Desta forma, descrever ondas no oceano é de grande complexidade, uma vez que elas são produto de diversas interações e superposições. Os principais fatores que influenciam na agitação marítima são as ondas gravitacionais, as marés, os ventos, as tempestades e os deslocamentos de gelo ou de terra (Carneiro, 2007).

Os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. Essa classificação também é conhecida como ondas determinísticas e aleatórias. A teoria de ondas regulares admite ondas com comportamento bem definido e constante em cada período de tempo ou espaço, diferentemente do que ocorre com as ondas irregulares. Nesses modelos, as ondas são formadas pela soma de pequenas ondas regulares com altura e período diferentes. Entre os modelos existentes, os de ondas irregulares são os que melhor representam o real estado do mar nos ambientes oceânicos (McCormick, 1973). Porém, ao longo deste trabalho utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico com a finalidade de determinar a melhor forma geométrica da rampa de um dispositivo de galgamento.

2.4.1. Elementos de uma Onda

Na Figura 2.11, é possível observar os elementos básicos das ondas regulares.

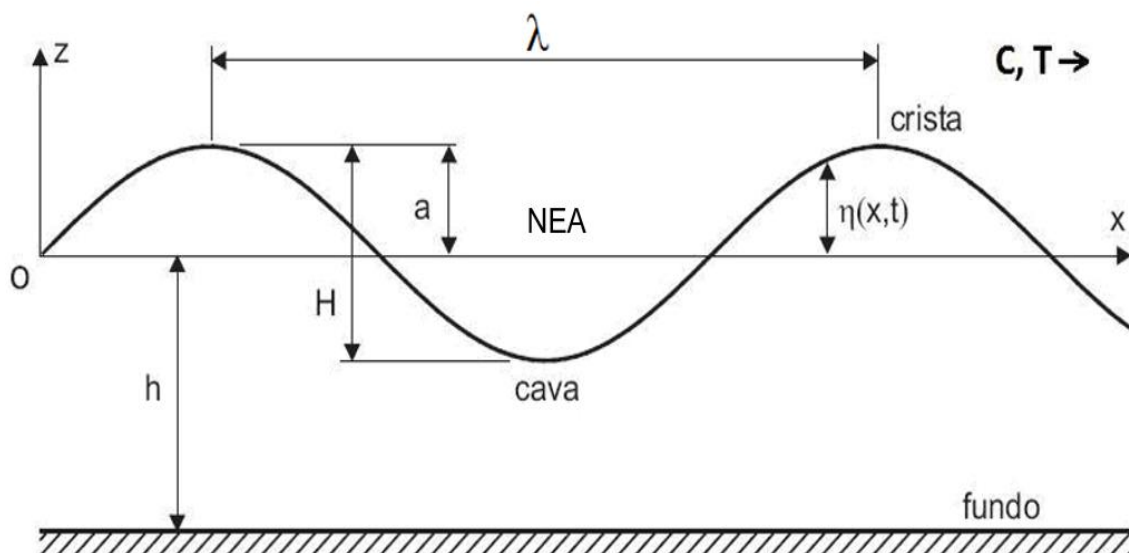


Figura 2.11 – Elementos da onda (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).

Ainda de acordo com a Fig. 2.11, os principais elementos de uma onda são:

NEA: Nível estático (ou médio) da água

Crista: é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.

Cava: é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o plano do nível médio da água.

Profundidade (h): é a distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre).

Período (T): é o tempo de uma oscilação completa, ou ainda, o tempo necessário para que um ponto qualquer da onda percorra uma distância igual ao comprimento de onda.

Frequência (σ): é o número de oscilações que ocorrem na unidade de tempo.

Amplitude (a): é a distância vertical entre a crista e a superfície livre (nível da água) ou a distância vertical entre a cava e a superfície livre da água.

Comprimento de Onda (λ): é a distância horizontal entre duas cristas consecutivas ou duas cavas consecutivas.

Celeridade (C): representa a velocidade de propagação da onda.

Altura (H): é a distância vertical entre as cristas e as cavas sucessivas.

Elevação da Superfície Livre (η): representa a distância vertical instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água.

Diversas teorias de ondas foram desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, dependendo das condições ambientais. Os principais fatores que devem ser levados em consideração para a determinação da teoria a ser aplicada são a altura da onda H , o comprimento da onda λ e a profundidade da água h . Esses fatores são comumente compostos nos seguintes parâmetros adimensionais (Le Méhauté, 1976):

$$\text{Declividade} \left(\frac{H}{\lambda} \right)$$

$$\text{Profundidade relativa} \left(\frac{h}{\lambda} \right)$$

$$\text{Altura de onda relativa} \left(\frac{H}{h} \right)$$

$$\text{Número de Ursell} \quad U_R = \left(\frac{\lambda^2 H}{h^3} \right)$$

A teoria de ondas mais simples é a teoria linear de ondas, também conhecida como teoria de Airy. Essa teoria é mais indicada quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades.

Segundo Le Méhauté (1976), teorias não lineares resultam em uma representação mais próxima das ondas reais, possibilitando a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas.

A teoria de Stokes se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. A partir da teoria de segunda ordem aparecem componentes super-harmônicas, isto é, componentes de frequências mais altas em 2, 3, ... n vezes a frequência fundamental, o que acarreta em cristas mais altas e cavas mais achatadas. Outro fenômeno que aparece é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução não apresenta mais o caminho das partículas como uma órbita fechada (Dean e Dalrymple, 1991).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), as abordagens de teoria de ondas são: Airy, Stokes, Cnoidal e Solitária. A forma da superfície livre da onda para cada uma dessas teorias é ilustrada na Fig. 2.12.

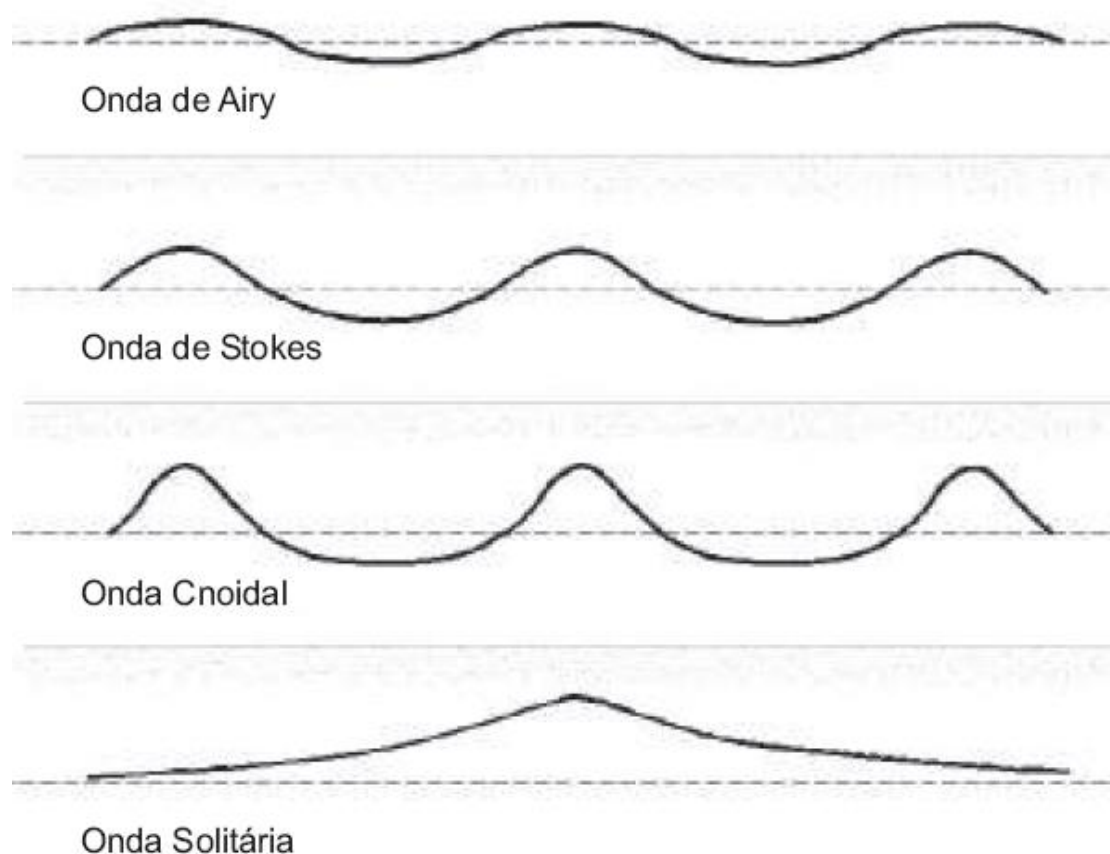


Figura 2.12 – Teoria das ondas gravidade (Adaptado de *US Army Corps of Engineer*, 2008).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é válida quando $k \cdot h < 1$ e $H / \lambda \leq 1$, sendo $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda. Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é $U_R < 26$. Quanto à profundidade, $h/\lambda > 0,5$ caracteriza águas profundas.

Conhecendo-se os parâmetros h , H , T e g (gravidade) e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 2.13 pode-se selecionar qual teoria de ondas é a mais recomendada. Nos trabalhos de âmbito numérico, as equações dos campos de velocidades definidas por cada teoria de ondas são empregadas como condições de contorno nos tanques numéricos para simular assim o efeito de um gerador de ondas, simulando o efeito do escoamento no mar.

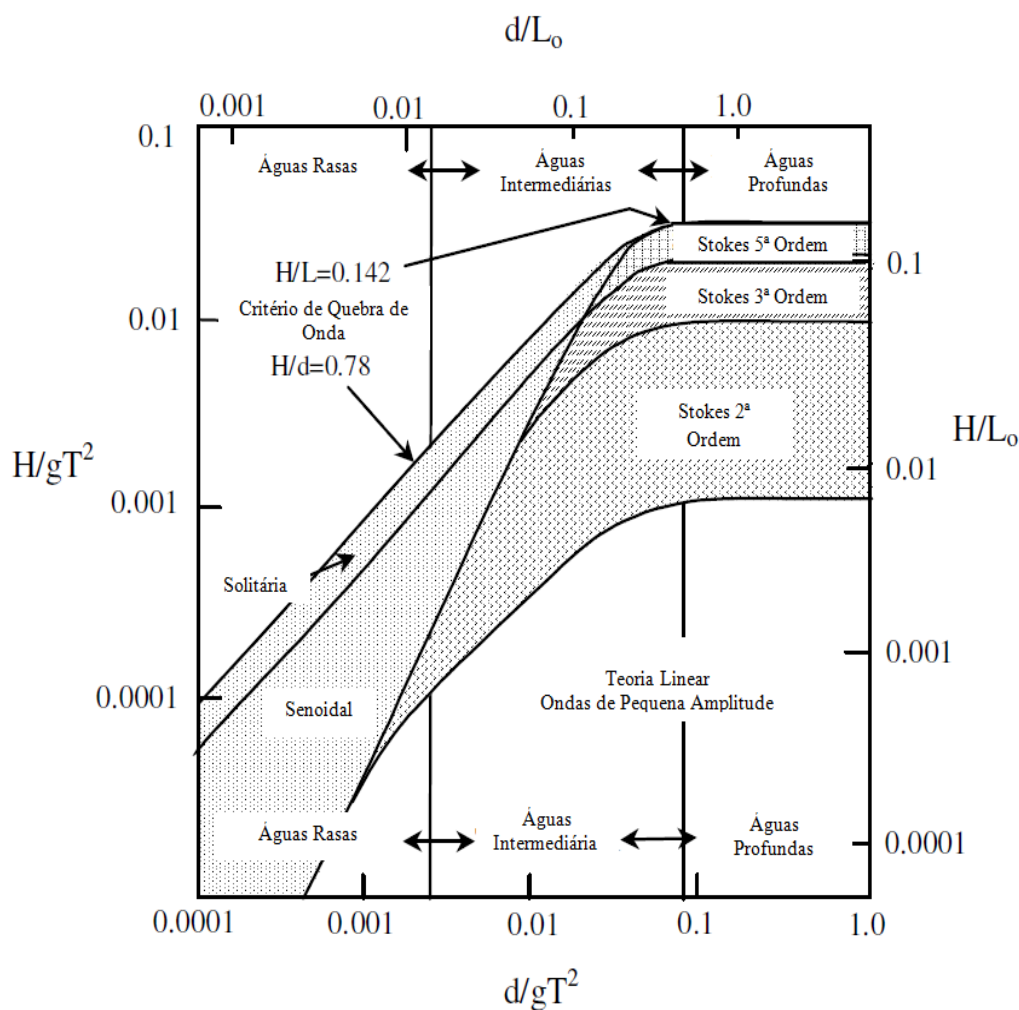


Figura 2.13 – Regiões de validade das teorias de ondas (Adaptado de Le Méhauté, 1976).

2.4.2. Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Stokes, em 1880, desenvolveu um método de alta ordem para análise de ondas de alturas finitas. Esta teoria consiste basicamente em assumir que as propriedades do movimento de onda, tais como o potencial de velocidades, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto maior o número de termos incluídos na série, melhor será a aproximação das propriedades da onda (McCormick, 1973).

Portanto, no presente estudo a teoria de Stokes de 2ª ordem foi empregada, pois assim é possível obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas. A partir da teoria de segunda ordem, componentes harmônicas, isto é, componentes de frequências maiores em 2, 3, ...

n vezes a frequência fundamental, o que acarreta em cristas mais altas e cavas mais achatadas (Dean e Dalrymple, 1991).

Para esta teoria, as expressões do potencial de velocidades e da elevação da superfície livre são dadas, respectivamente, por (Chakrabarti, 2005):

$$\phi = -\frac{Hg}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) - \frac{3H^2\sigma}{32} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2k}{16} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2(kh)) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.2)$$

Após a derivação da Eq. (2.1) em relação a u e w , são encontradas as respectivas componentes da velocidade (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k}{16} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.3)$$

$$w(x, z) = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k}{16} \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.4)$$

onde, H (m) é a altura da onda, g (m.s^{-2}) gravidade, k (m^{-1}) número de onda, σ (rad.s^{-1}) frequência angular da onda, t (s) tempo, h (m) profundidade, η (m) elevação da superfície da água, ϕ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) potencial de velocidade, x coordenada horizontal, z coordenada vertical, u (m.s^{-1}) velocidade horizontal e w (m.s^{-1}) velocidade vertical.

2.5. Clima de Ondas na Costa de Rio Grande, RS e Potencial Energético

Com o objetivo de estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental para implantação de uma usina piloto de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica na costa de Rio Grande surgiram diversos estudos entre eles destaca-se o de Coli (2000). Ele analisou os registros apresentados por Strauch (1996) e com base nas análises

realizadas e nos dados medidos foi possível determinar o clima de ondas e também o potencial energético da região. Os resultados indicaram que as alturas significativas e períodos de pico de todos os dados analisados se distribuíram entre as direções nordeste e sul. Em águas rasas, os registros indicaram o predomínio de alturas significativas entre 0,5 m e 2,5 m, e período de pico entre 4 s e 14 s, já em águas profundas os registros indicaram altura significativa mínima de 0,8 m e máxima de 4 m, atingindo até 7 m, e o período de pico variou entre 4 s e 16 s. Do ponto de vista sazonal, observa-se que ondulações de sudeste ocorrem durante todo ano, sendo dominantes durante o outono e o inverno. O potencial energético das ondas na costa do Rio Grande, calculado a partir das medições pretéritas por Strauch (1996), apresentou um valor médio de 15,8 kW/m por frente de onda, valor esse um pouco menor que a média de 20 kW/m por frente de onda usualmente encontrada nesta faixa de latitude (Coli, 2000).

2.6. Tanques e Canais de Ondas

Tanque de ondas é uma instalação que permite a geração de ondas de superfície para observação, de forma simulada, do comportamento de estruturas no ambiente marinho. Este tipo de laboratório é usualmente composto de um tanque de água doce aberto para pressão atmosférica, apresentando um atuador para geração de ondas em uma das paredes e uma região de absorção no extremo oposto para minimizar a reflexão (Hermann, 2016).

Segundo Hermann (2016) há dois tipos principais de tanques para o estudo de ondas: canal de ondas e tanque oceânico. O primeiro apresenta a largura significativamente menor que o comprimento, compondo um canal estreito ideal para visualização das propriedades das ondas em duas dimensões. O segundo, possui as dimensões de mesma magnitude, eliminando o efeito da parede do tanque sobre as ondas e proporcionando um ambiente ideal para o teste de modelos da indústria *offshore*, inclusive de análise multidirecional.

O emprego de tanques de prova para obtenção de características hidrodinâmicas de sistemas flutuantes é realizado a centenas de anos. Como um dos pioneiros, pode-se citar o tanque de Dr. William Froude (1810-1879), no qual eram executados ensaios com embarcações em escala reduzida para, através de medidas de sua resistência ao avanço, estabelecer previsões para força de resistência experimentada pelas embarcações. Com o aumento da demanda do conhecimento da performance de embarcações sob a ação de

ondas, gradualmente os tanques foram equipados com geradores de ondas (Quadrante, 2011).

Trabalhos experimentais de Engenharia Naval e Oceânica têm usado tanques de ensaios e canais desde longa data. Inicialmente foram executados testes hidrostáticos e ensaios de reboque para o estudo da resistência ao avanço, realizados em tanques sem ondas. Com o aumento da demanda do conhecimento do desempenho de embarcações, gradualmente os tanques foram equipados com um gerador de ondas de um dos lados e no lado oposto era instalado um absorvedor passivo (praia). Com o passar do tempo, o gerador de ondas foi segmentado com acionamento independente de cada elemento, tornando possível gerar ondas com direções variadas (Carneiro, 2012).

2.6.1. Modelagem Física em Tanques e Canais de Ondas

Modelos físicos são reproduções, usualmente em tamanho menor, dos sistemas físicos onde as forças dominantes representam, proporcionalmente, o sistema físico real. Em paralelo com os modelos físicos existem os modelos numéricos, que são a representação matemática dos sistemas físicos (Hughes, 2005).

Os canais de ondas são utilizados para ensaios de estruturas e equipamentos que funcionam nas áreas oceânicas e costeiras. Usualmente, esses canais são extensos, com capacidade de simular alguns fenômenos marítimos, fundamentalmente as ondas geradas pelo vento. São necessárias instalações bastante específicas com a capacidade de gerar, propagar e absorver a energia advinda das ondas. A fidelidade da simulação é associada à qualidade da onda gerada, que depende diretamente do batedor de ondas. O batedor de ondas é uma das peças-chave do sistema que compõe o tanque ou canal e pode ser de vários tipos e configurações (Martins, 2003).

A construção de modelos físicos, em escala reduzida, embora tentada anteriormente por Arquimedes, Leonardo Da Vinci e outros estudiosos, só foi possível após a descoberta da Teoria da Semelhança por Isaac Newton e do Teorema de Bridgman. Os modelos simulam algumas condições naturais, mas não são uma cópia fiel de todos os processos físicos existentes no protótipo: devem ser escolhidos os agentes dominantes no processo físico e ignorados outros menos importantes (Carneiro, 2012).

De acordo com Clemente (2013) no desenvolvimento da Engenharia de Energia das Ondas, os modelos reduzidos dos dispositivos de extração de energia das ondas são testados em modelos marítimos (assim como na engenharia naval, onde modelos

reduzidos de navios são testados em canais de ondas). Através desses modelos físicos pode-se prever o comportamento das obras e equipamentos associados ao empreendimento, em diversas situações de funcionamento. Outra grande finalidade dos modelos físicos é prover subsídios para modelos numéricos, ou ainda simular situações onde a modelagem numérica não oferece confiabilidade.

Podem-se citar, como um dos exemplos, das possíveis aplicabilidades da modelagem física em tanques de ondas e canais de ondas os estudos realizados por Gomes (2018) onde foi apresentado um estudo experimental sobre o efeito da ação das ondas nas margens de rios que estão a jusante de estruturas hidráulicas. O trabalho foi realizado no Pavilhão do IPH/UFRGS em três etapas: na primeira etapa (vertedouro em degraus com canal a jusante), diferentes condições de vazão e submergência foram consideradas, com o objetivo de avaliar as características das ondas de superfície, geradas a jusante de um dissipador de energia por ressalto hidráulico. As características avaliadas foram: altura, período, comprimento e celeridade das ondas. Os resultados dessa primeira etapa indicaram que as características principais das ondas, altura e período, estão mais relacionadas com a vazão escoada do que com a submergência do ressalto hidráulico. Na segunda etapa dos ensaios (em canal de ondas), as características das ondas obtidas na primeira etapa do estudo foram reproduzidas em um canal de ondas bidimensional. Desta forma, foi possível avaliar o efeito da ação das ondas sobre taludes com diferentes inclinações e granulometrias de material de proteção. Os resultados desta etapa demonstraram que o talude construído com material de proteção, denominado de brita grande (G) e com inclinação 1(V):3(H), foi o que apresentou maior estabilidade após a ação das ondas. Na terceira etapa dos ensaios, as características das ondas obtidas na primeira etapa do estudo foram reproduzidas novamente, porém em um tanque de ondas tridimensional. Nesta etapa do estudo, foi avaliado o efeito da ação das ondas sobre diferentes ângulos de incidência das ondas sobre talude de proteção. Os resultados obtidos nesta etapa demonstraram que o aumento do ângulo de incidência das ondas sobre o talude de proteção, intensifica o processo erosivo do material de proteção das margens.

2.6.2. Critérios de Semelhança

A condição de semelhança, entre o modelo e o protótipo, varia de acordo com o problema a ser estudado e com o grau de precisão desejado do modelo. Os modelos considerados completamente semelhantes são aqueles em que os valores de todos os

parâmetros relevantes adimensionais do protótipo são mantidos no modelo. Os modelos podem ter Semelhança Geométrica, Semelhança Cinemática e Semelhança Dinâmica (Hughes, 2005).

Semelhança Geométrica – Na semelhança geométrica procura-se manter as mesmas proporções entre os diversos elementos geométricos, no modelo e no protótipo (Hughes, 2005);

Semelhança Cinemática – A semelhança cinemática procura estabelecer relações entre espaço e tempo, onde a escala do tempo está atrelada à escala geométrica (Hughes, 2005);

Semelhança Dinâmica – É o tipo mais importante de semelhança para fins de construção de modelos para uso nas engenharias. Neste caso, impõem-se simultaneamente relações de escalas geométricas, cinemáticas e de forças (dinâmicas). São identificados diversos números adimensionais, os quais podem ser interpretados como uma razão entre efeitos ou forças (Hughes, 2005).

Gomes (2018) cita exemplos destes critérios de semelhança: Froude (relaciona as forças de inércia e às forças gravitacionais), Reynolds (representa uma razão entre as forças de inércia e as forças viscosas), Weber (relaciona as forças inerciais com a tensão superficial), Cauchy (relaciona as forças inerciais com as forças elásticas), Euler (relaciona as forças de pressão com as forças inerciais) e Strouhal (relaciona as forças inerciais convectivas e temporais).

Para a definição de escala, o critério de semelhança de Froude é o mais adequado para este estudo por se tratar de um escoamento a céu aberto, sendo a força mais importante a ser avaliada a gravitacional. Assim, para se obter a semelhança dinâmica entre o modelo e o protótipo, o número de Froude foi o parâmetro adimensional utilizado, visto que os efeitos gravitacionais são os mais relevantes comparados aos efeitos viscosos.

2.6.3. Semelhança Pelo Critério de Froude

O Número de Froude expressa a influência relativa entre forças inerciais e forças gravitacionais. Representa a importância das forças inerciais para uma determinada massa de fluido. É dado por:

$$\sqrt{\frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Gravitacionais}}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \text{Número de Froude} \quad (2.5)$$

onde: V é a velocidade (m/s); L é o comprimento (m) e g é a aceleração da gravidade (m/s²). O número de Froude também é representado por (V^2/gL) .

O critério de Froude apresenta uma condição onde o número de Froude no modelo e no protótipo deve ser o mesmo, sendo (Hughes, 2005):

$$\left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)_m \quad (2.6)$$

O que leva à:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\left(\frac{g_p}{g_m}\right) \left(\frac{L_p}{L_m}\right)} \quad (2.7)$$

Expressando em termos de fatores de escala, e fazendo os rearranjos necessários, obtém-se (Hughes, 2005):

$$\frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = 1 \quad (2.8)$$

onde: N_V é a escala de velocidade entre modelo e protótipo; N_L é a escala de comprimento entre modelo e protótipo e N_g é a escala de gravidade entre modelo e protótipo.

A escala de gravidade entre o modelo e o protótipo é considerada igual a 1, e a escala de velocidade (N_V) é igual à relação entre a escala de comprimento (N_L) e a escala de tempo (N_T). Considerando essas relações na Eq. (2.8) obtém-se a relação entre a escala de tempo e a escala de comprimento, como (Hughes, 2005):

$$N_T = \sqrt{N_L} \quad (2.9)$$

A maior parte dos modelos hidráulicos em engenharia costeira é dimensionada de acordo com o critério de Froude, por ser o critério mais importante a ser considerado na concepção de um modelo reduzido (Hughes, 2005).

2.6.4. Efeitos de Laboratório

Segundo Clemente (2013) uma outra classe de efeitos surge em laboratório, consequência da imposição de limites ou de condições que não existem na natureza. Não se pode confundí-los com os efeitos de escala. Quando as ondas atingem os limites sólidos do modelo elas são refletidas, retornam em direção ao batedor de ondas, onde são

novamente refletidas. Essa reflexão múltipla das ondas é um efeito existente somente em laboratório, sem nenhum paralelo na natureza.

Instabilidades no batedor de ondas também podem gerar efeitos indesejados nas ondas criadas, como ondas capilares que venham a afetar as medidas e a correta representação dos fenômenos a serem estudados. As ondas podem também não serem devidamente geradas, quando há a existência de componentes transversais ao canal, que conceitualmente deve ter apenas ondas bidimensionais (Clemente, 2013).

2.6.5. Batedores de Ondas

Bhattacharyya (1978) diferencia os batedores de ondas (também chamado de geradores) em duas categorias gerais: ativos e passivos. Os geradores de ondas ativos deslocam a água através de contato direto com o gerador de ondas, já os passivos utilizam pressão do ar para gerar oscilações na água (gerador pneumático). Os mais comuns são os geradores ativos, e dentro desta categoria existem três principais tipos: tipo cunha (*plunger type*), placa basculante (*flap type*) e do tipo pistão (*piston type*). A Figura 2.14 demonstra os tipos de batedores que são utilizados em canal de ondas ou em tanque de ondas.

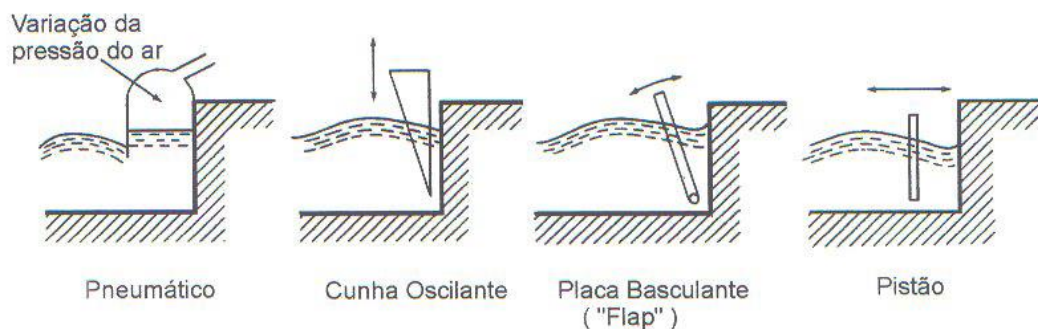


Figura 2.14 - Tipos de batedores de ondas (Bhattacharyya, 1978).

O pneumático consiste em uma câmara parcialmente imersa na água que permite variar a pressão na superfície, gerando as ondas. Por não conter partes mecânicas móveis em contato com a água, pode ser considerado um atuador passivo (Bhattacharyya, 1978).

O batedor tipo cunha oscilante gera as ondas a partir da oscilação vertical de um corpo prismático. Sua maior limitação é a necessidade de espaço acima da superfície da água para permitir a movimentação da cunha (Bhattacharyya, 1978).

O modelo pistão é uma placa rígida parcialmente imersa que oscila na horizontal, gerando as ondas a partir do deslocamento da massa de água. E, para finalizar, tem-se o atuador do tipo placa basculante, que é análogo ao pistão, porém apresenta sua movimentação em torno de um ponto articulado (Bhattacharyya, 1978).

2.6.6. Canal de Ondas do IPH

Antes de funcionar como canal de ondas, era um canal de escoamento contínuo, que foi alterado, sendo adicionado um gerador situado a 2 m de uma das extremidades. Atualmente, conforme pode ser observado na Fig. 2.15, o canal possui um gerador de ondas em uma de suas extremidades e na outra extremidade uma praia artificial (talude). O canal possui 43 m de comprimento, de ponta a ponta, 1 m de largura, 1,5 m de altura na sua parte mais profunda, 1,02 m de altura na sua parte mais rasa e uma rampa dentro do canal que reduz sua profundidade em 0,47 m. A rampa está situada a 15 m de distância do ponto de articulação do gerador de ondas. O canal é de alvenaria e revestido com cimento alisado e impermeabilizado.

A parte situada atrás do gerador, foi preenchida em parte com tijolos furados, para absorver a onda proveniente do movimento de ré da pá do gerador (placa basculante).

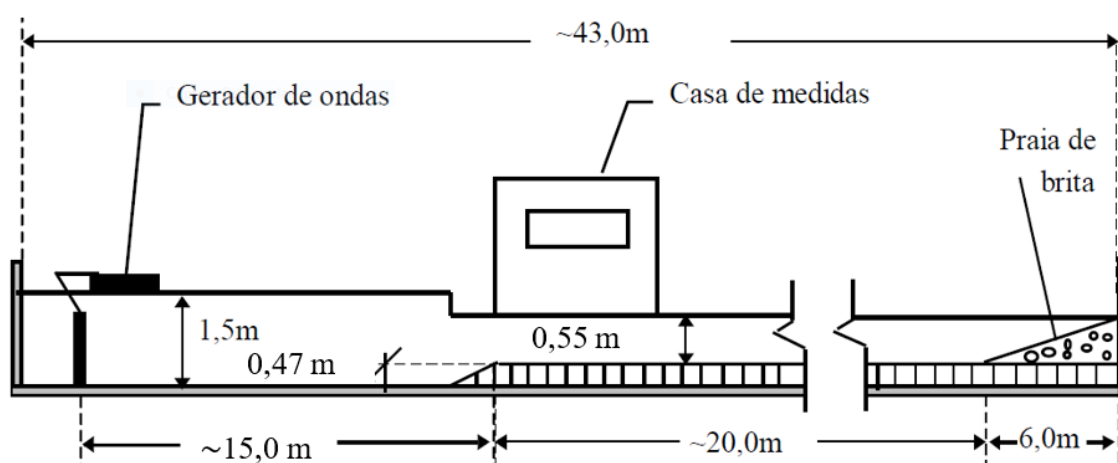


Figura 2.15 - Canal de ondas IPH (Rosauero, 2004).

O gerador é do tipo placa basculante, articulado no fundo. A pá do gerador é movimentada por um braço, acoplado a um disco (volante de inércia), onde se ajusta a excentricidade, que é movimentado por uma redutora de rotação movida por um motor elétrico controlado por um inversor de frequência (variador de frequência). O controle da velocidade do gerador é obtido pelo ajuste do inversor de frequência, que controla a

rotação de um motor elétrico. Entre o motor e o disco de ajuste da excentricidade existe uma redutora (variador mecânico). Estes elementos podem ser vistos na Fig. 2.16 com a identificação das partes do gerador de ondas e na representação esquemática da Fig. 2.17.



Figura 2.16 – Partes do gerador de ondas do IPH

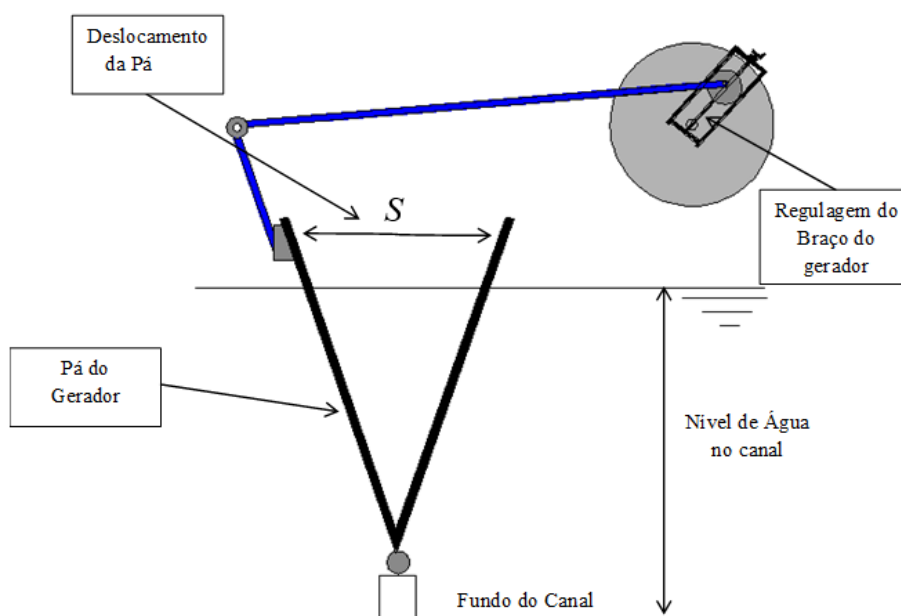


Figura 2.17 – Esquema do gerador de ondas IPH (Gomes, 2018).

2.6.7. Curva do Gerador de Ondas do IPH

A relação existente entre o movimento da pá de um gerador e as características da onda gerada não é um processo imediato. Esta relação depende de vários fatores como,

por exemplo, a região em que se está gerando a onda. Dependendo da região de geração da onda, águas rasas, intermediária ou profunda, o perfil de velocidade vertical será diferente, influenciando diretamente as características da onda gerada (Gomes, 2018).

Dean e Dalrymple (1991) apresentaram uma teoria completa para as ondas geradas por um gerador de ondas de laboratório, onde a amplitude da onda progressiva é dada em função do deslocamento da pá como:

$$\frac{H}{S} = 4 \left(\frac{\sinh kh}{kh} \right) \frac{(kh \sinh kh) - (\cosh kh + 1)}{(\sinh 2kh + 2kh)} \quad (2.10)$$

A Eq. (2.10) foi deduzida fazendo-se a suposição de que o movimento da pá e a altura da onda gerada fossem pequenos. Quando o movimento da pá é grande, efeitos não lineares ocorrem e ondas “secundárias” podem ser geradas. As ondas produzidas pelo movimento de uma pá não têm a forma senoidal pura, ideal e constante (Rosauero, 2004).

A Eq. (2.10) encontra-se plotada na Fig. 2.18.

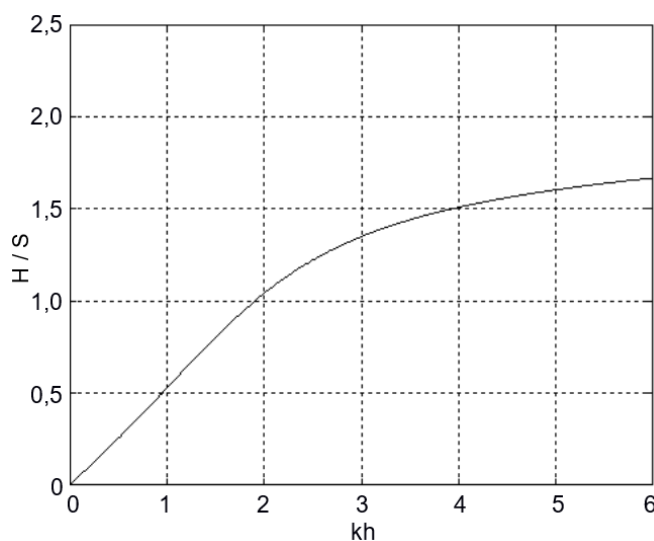


Figura 2.18 – Curva teórica que relaciona o movimento da pá de um gerador articulado no fundo com as características da onda gerada (Dean e Dalrymple, 1991).

O gerador de ondas do IPH é do tipo articulado no fundo montado sobre uma elevação no fundo do canal de ondas, conforme Fig. 2.19.

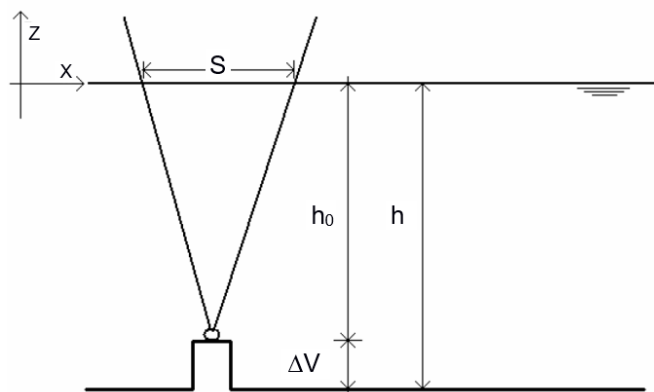


Figura 2.19 – Esquema do gerador de ondas do IPH (Cerdeira, 2006).

Cerdeira (2006) desenvolveu uma relação entre a altura da onda gerada (H) e o deslocamento da pá (S) para o gerador de ondas do IPH com base na teoria apresentada por Dean e Dalrymple (1991) como:

$$\frac{H}{S} = \frac{4 \tanh kh \left[\sinh kh + \frac{\cosh \Delta V - \cosh kh}{kh} \right] \cos kh}{2kh + \sinh 2kh} \quad (2.11)$$

A Figura 2.20 apresenta a curva teórica do gerador de ondas do IPH para diversos valores de $\Delta V/h$.

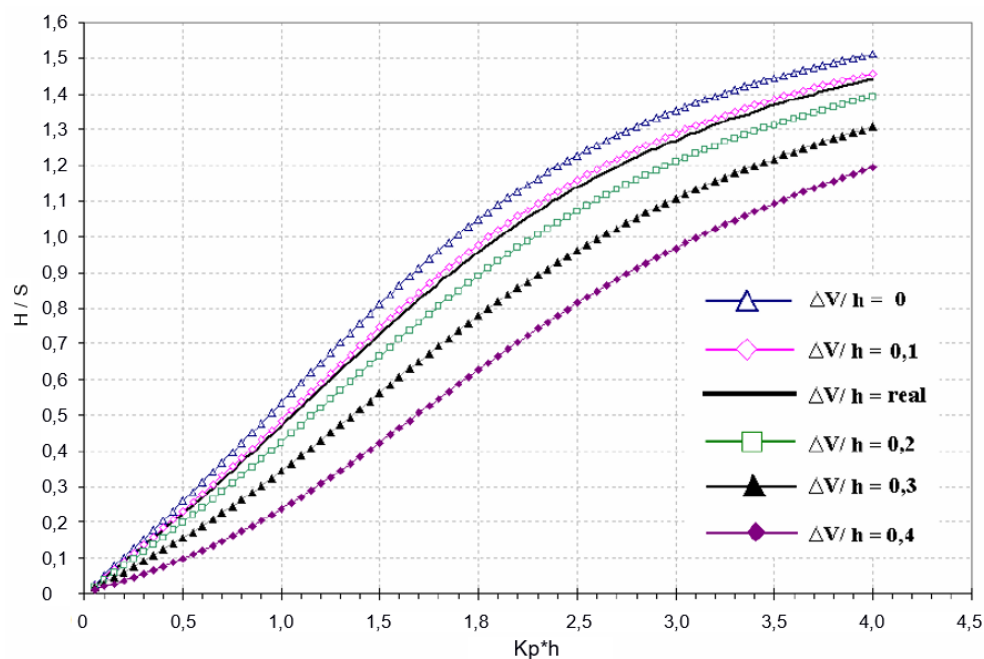


Figura 2.20 – Curva teórica do gerador de ondas do IPH para diversos valores de $\Delta V/h$ (Cerdeira, 2006).

Na Figura 2.20 a curva designada por $\Delta V/h$ real foi determinada para a altura de 11 cm medida do degrau em que a pá está apoiada (altura considerada na metodologia numérica) e a profundidade de 87 cm na qual foram realizados os testes por Cerdeira, (2006).

Para facilitar o trabalho de planeamento de experimentos, as curvas de eficiência do gerador, para parte profunda do canal (10 m do gerador) foram plotadas por Rosauro (2004) em termos de valores absolutos (não adimensionalizados) do período e da altura de onda gerada para cada regulagem do braço ($S/2$). Estas curvas encontram-se na Fig. 2.21.

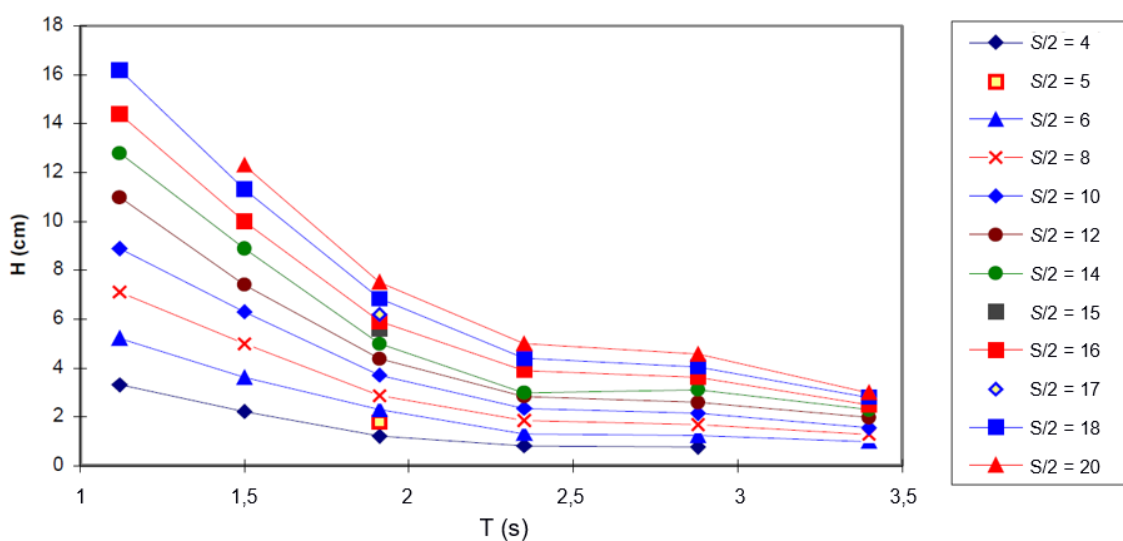


Figura 2.21 - Curvas de eficiência do gerador. Altura da onda gerada (H) em função do deslocamento da pá ($S/2$) dado em centímetros, para diferentes valores de período (Rosauro, 2004).

Gomes (2018) elaborou as curvas de eficiência do gerador de ondas, para a parte rasa do canal, ou seja, próximo ao final do canal de ondas (talude), região de interesse de sua pesquisa. Utilizaram-se os dados adquiridos somente da parte rasa do canal, ou seja, numa posição fixa distante de 24 m do gerador de ondas. A Figura 2.22 apresenta as curvas de eficiência do gerador de ondas, em termos de valores absolutos do período e da altura das ondas para diferentes comprimentos do braço do gerador de ondas.

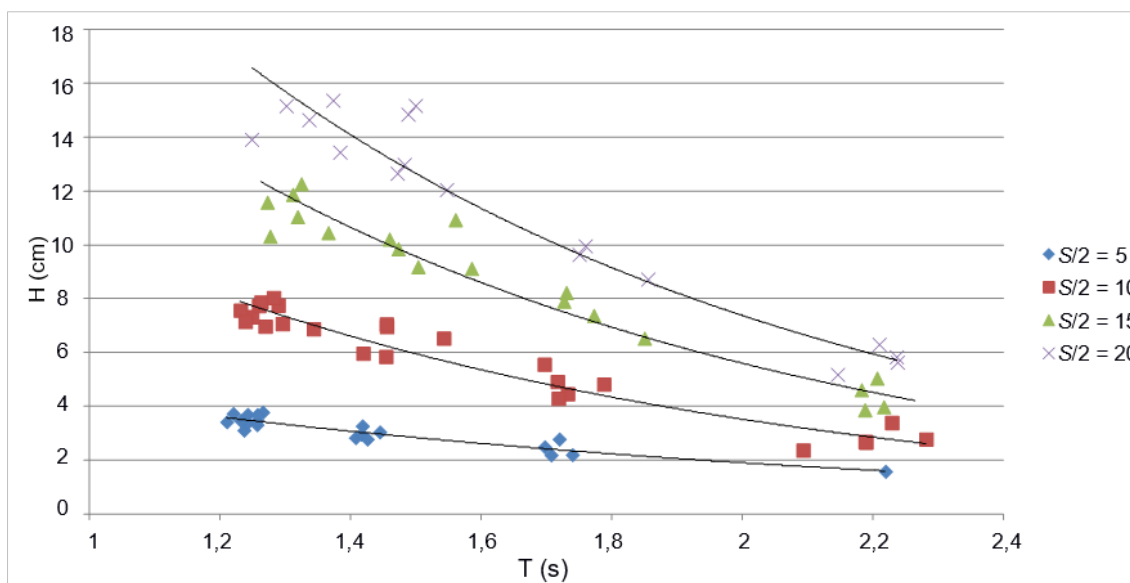


Figura 2.22 - Curvas de eficiência do gerador de ondas utilizado. Altura de onda em função do comprimento do braço do gerador ($S/2$) dado em centímetros, para diferentes valores de período (Gomes, 2018).

Através dos dados obtidos, Gomes (2018) também relacionou os períodos característicos das ondas com os valores de frequência do motor e observou que o gerador de ondas apresentou uma maior restrição com relação à altura de onda gerada à medida que o período da onda aumentou. Isso pode-se observar na Fig. 2.23 que ilustra o range de aplicação de períodos de onda a serem gerados para as diferentes frequências do motor.

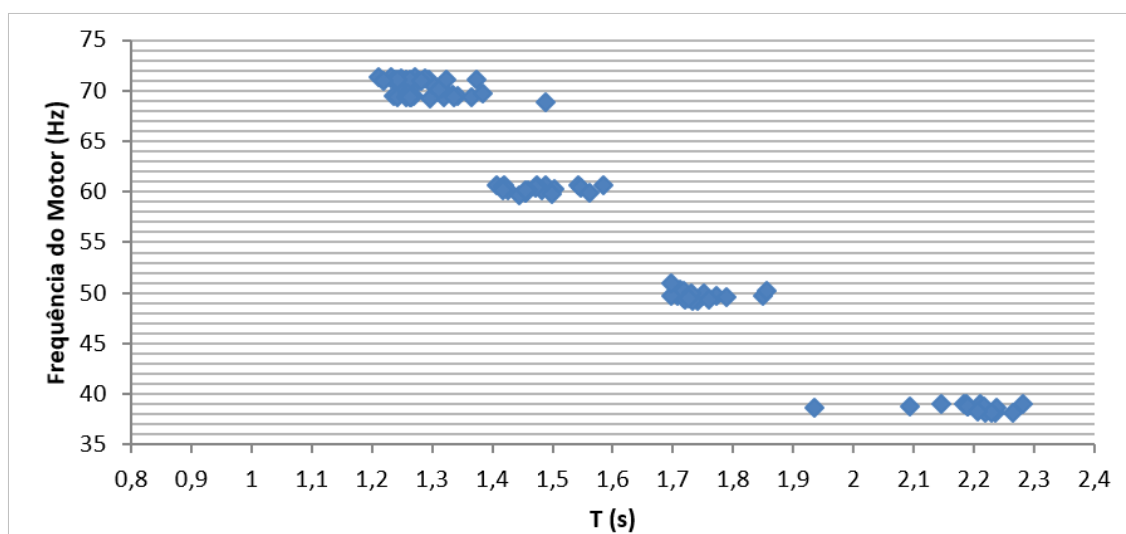


Figura 2.23 - Frequência do motor versus períodos característicos das ondas (Gomes, 2018).

2.7. Teoria Construtal, Lei Construtal e Design Construtal

A Teoria Construtal foi concebida e proposta por Adrian Bejan, em 1997, quando um método de avaliação geométrica foi aplicado para o resfriamento de placas de circuitos eletrônicos, que eram idealmente representados por uma placa com geração interna de energia e baixa condutividade e resfriada por um caminho condutivo de elevada condutividade conectado a um sumidouro de energia. Esse estudo teve uma importância significativa, pois foi o ponto de partida para aplicação da Teoria Construtal em problemas de engenharia e outros ramos da ciência (Bejan, 1997; Bejan, 2000). De uma maneira geral, a Teoria Construtal explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo (fluxo e/ou escoamento), que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros), pode ser fundamentada através de um princípio físico do acesso aos fluxos (fluxo e/ou escoamento) no tempo (Bejan, 2000).

Ela surgiu com o propósito de demonstrar que qualquer sistema natural de escoamento tem sua forma ou design regidos por um princípio físico: a Lei Construtal do Design e Evolução (Bejan, 1997; 2017). Assim, esta lei de acordo com Bejan (2017), é definida como: “Para um sistema de fluxo e/ou escoamento de tamanho finito persistir (viver) ao longo do tempo, ele deve evoluir livremente de forma a proporcionar maior acesso às suas correntes”.

Desta forma, a Teoria Construtal afirma que os formatos dos objetos encontrados na natureza não foram gerados por acaso. Eles têm tal design com o objetivo de facilitar e diminuir o esforço de movimentos dos escoamentos naturais (animados e inanimados) ao longo do tempo. Ou seja, é possível prever a evolução da configuração dos sistemas de escoamento: a configuração (forma e estrutura) evolui (muda o seu design) para facilitar às suas correntes (Bejan e Zane, 2012).

Aplica-se a Lei Construtal do Design e Evolução com o auxílio do método Design Construtal. Este método permite calcular deterministicamente a forma (estrutura, design, configuração) de sistemas onde há escoamento (fluxo/escoamento) empregando o princípio físico chamado de Lei Construtal do Design e Evolução (Bejan, 2000; 2016; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012).

Eventualmente, o Design Construtal pode ser associado a um método de otimização (Fagundes *et al.*, 2018). O método, então, é empregado na definição (determinação de um campo de busca) e avaliação de formas geométricas de sistemas

submetidos a alguma espécie de fluxo/escoamento aplicado, a fim de obter-se um desempenho global máximo para os casos selecionados. Para isto, neste método, o fluxo/escoamento é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho. Assim, a determinação da geometria se dá aplicando restrições globais (constantes, por exemplo, áreas ou volumes) e graus de liberdade, isto é, dimensões geométricas (ou razões entre elas) que serão variadas e cujos efeitos no indicador de desempenho serão estudados (Bejan e Lorente, 2008; Miguel e Rocha, 2018).

De acordo com a Teoria Construtal, cada sistema em escoamento existe por um propósito (ou objetivo, função). Na natureza o escoamento ocorre sob um largo intervalo de escalas com o propósito de reduzir os gradientes existentes (temperatura, pressão). Este princípio é utilizado para produção de projetos novos em diversas áreas, como por exemplo na eletrônica e em células de combustível (Bejan e Lorente, 2006). Em estruturas de engenharia, os fluxos de massa e calor ocorrem pelo mesmo motivo e, através da dissipação mínima de energia, os sistemas reduzem a quantidade de combustível necessária, tornando-os mais eficientes (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008).

O propósito de um conversor de energia das ondas, por exemplo, é extrair o máximo trabalho possível do escoamento. O desempenho é uma medida de quanto o sistema consegue alcançar seu propósito. O projeto de sistemas de engenharia evolui ao longo do tempo em direção às configurações que oferecem melhor desempenho, ou seja, melhor alcance de seu propósito.

O objetivo do sistema é global. É apresentado com restrições fixas como, por exemplo a área da rampa de um equipamento de conversão da energia das ondas de galgamento. O projetista do sistema agrupa todos os componentes do sistema e otimiza a organização a fim de atingir o máximo desempenho. Para isso, ele “constrói” a arquitetura de escoamento ótima. Assim, a arquitetura do escoamento (formato, estrutura) é deduzida, não assumida em antecipação. Diferentemente de processos de otimização baseados em variáveis operacionais, a Teoria Construtal foca-se na construção da arquitetura de escoamento ótima.

3. METODOLOGIA NUMÉRICA

Este capítulo trata da modelagem matemática, onde são apresentados método Design Construtal aplicado ao dispositivo de galgamento, o domínio computacional do problema, modelagem matemática, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), as condições de contorno, os procedimentos numéricos e teste de sensibilidade de malha.

3.1. Descrição do Problema

O problema físico analisado consiste de um dispositivo de galgamento bidimensional colocado em um canal de ondas IPH, conforme representado na Fig. 3.1. A terceira dimensão W (1,0 m) é perpendicular ao plano da figura. O movimento da onda é gerado pela imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do canal.

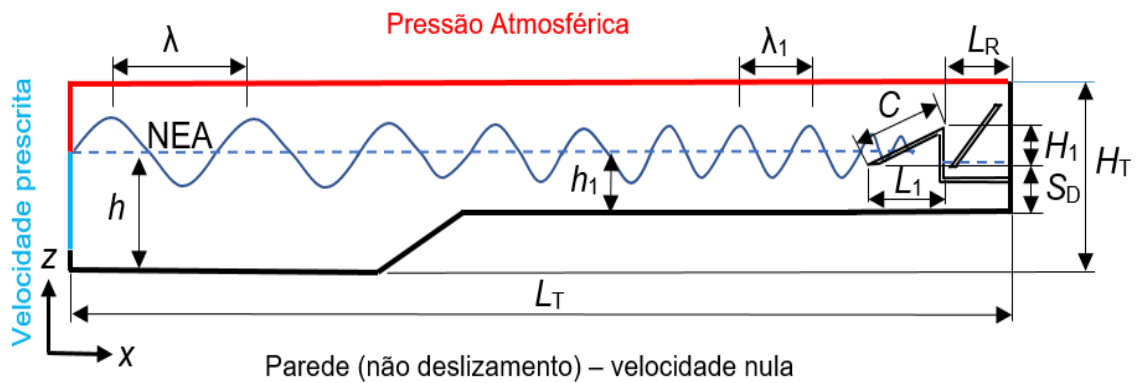


Figura 3.1 – Domínio computacional do dispositivo no canal de ondas IPH.

Em um primeiro momento, o objetivo da análise numérica é a determinação da geometria ideal (H_1/L_1) que conduz à maior quantidade de massa de água que entra no reservatório. O grau de liberdade H_1/L_1 é otimizado para um escoamento com uma profundidade $h = 0,862$ m e $h_1 = 0,392$ m para uma onda com comprimento de onda de $\lambda = 3,54$ m e $\lambda_1 = 4,78$ m, período $T = 1,94$ s e altura da onda de $H = 0,067$ m. Sendo que as características listadas de acordo com Fig. 2.13, que apresenta as regiões de validade das teorias de ondas, enquadra-se como uma onda em águas intermediárias e a teoria que a descreve de forma mais aquada é a Teoria de Stokes de 2ª ordem.

Cabe destacar que as características da onda empregada nos experimentos, em escala de laboratório em redução geométrica de 1:15 pelo critério de Froude, têm origem nos trabalhos de Goulart *et al.* (2015), Martins *et al.* (2018) e Barbosa *et al.* (2019) entre outros, em escala real, partindo das análises do clima de ondas da região realizadas nos estudos de Oliveira *et al.* (2012), tendo esta onda características realísticas: $T = 7,5$ s, $H = 1,0$ m, $\lambda = 65,4$ m e $h = 10,0$ m. A escala de redução adotada neste estudo também considerou a curva de eficiência do gerador de ondas IPH (Fig. 2.23), elaborada por Gomes (2018), para parte rasa do canal e também os períodos característicos das ondas com os valores de frequência do motor, conforme Fig. 2.24 (Gomes, 2018).

Neste estudo será mantida fixa a relação entre as áreas da rampa e do canal de ondas ($\phi = A_r/A_T = 0,003$). Também foram mantidos fixos outros parâmetros $H_T/L_T = 0,03$ (relação entre a altura do canal, $H_T = 1,0$ m e o comprimento do mesmo, $L_T = 34,20$ m) e a distância entre o nível inicial do reservatório do dispositivo e o fundo do canal de $S_D = 0,15$ m.

O reservatório será considerado com um comprimento de $L_R = 0,50$ m. Além disso, nos caso experimentais foi realizada uma avaliação geométrica, para isto foi variada a profundidade da superfície livre da água, h_1 na seguinte faixa de profundidade de água: $0,338 \text{ m} \leq h_1 \leq 0,392 \text{ m}$, totalizando 7 variações de h_1 com um intervalo de $\Delta h = 0,009 \text{ m}$ ($H + H/3$), ou seja, serão investigados 7 diferentes valores de h_1 como se a maré estivesse variando. Para cada valor de h_1 serão investigados 7 razões de H_1/L_1 (7 geometrias de construção para o protótipo).

No âmbito do Design Construtal, a otimização do problema estudado está sujeita a duas restrições, ou seja, a área total de restrição do canal de ondas

$$A_T = H_T L_T \quad (3.1)$$

e a área de restrição da rampa

$$A_r = \frac{H_1 L_1}{2} \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) pode ser reescrita como a fração de volume (área) do dispositivo

$$\phi = \frac{A_r}{A_T} \quad (3.3)$$

Também está sendo considerada como uma restrição do problema que $(S_D + H_1) > (h_1 + H/2)$ de forma que a crista da onda não seja superior a máxima altura do dispositivo. Além disso, será adotada uma restrição construtiva para o comprimento da rampa C ($C \geq 0,632$ m), conforme recomendações de Liu *et al.* (2008), Iahnke *et al.* (2009) e Iahnke (2010) que concluíram em seus estudos, tanto no modelo físico como no numérico que os valores da descarga do galgamento é praticamente nulo para relação geométrica de 1:1 (H_1/L_1) o que representa uma inclinação da rampa de 45° ficando o dispositivo funcionando como se fosse um quebra-mar.

Com relação ao processo de investigação geométrica com a aplicação do método Design Construtal, o mesmo é dividido em dois passos conforme ilustrado na Fig. 3.2. No primeiro passo, a geometria é investigada pela variação da razão H_1/L_1 e mantendo-se fixos os parâmetros remanescentes, neste caso a profundidade da superfície livre da água h_1 ($h_1 = 0,392$ m).

O valor da altura de água no interior do reservatório, quando houver descargas do galgamento no seu interior, foi denominado de altura da água galgada no reservatório, h_R . Já o valor máximo encontrado para a altura de água que entra no reservatório foi denominado altura da água galgada no reservatório uma vez maximizada, h_{Rm} , e a correspondente razão H_1/L_1 foi denominada a razão uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$.

Em um segundo momento, o mesmo processo é repetido para 7 variações de h_1 (para cada h_1 a razão H_1/L_1 é novamente variada). Nesse caso, a altura da água máxima galgada no reservatório obtida é duas vezes maximizada, h_{Rmm} , e a razão H_1/L_1 é duas vezes otimizada, $(H_1/L_1)_{oo}$. Vale destacar que, essa segunda etapa do processo de investigação geométrica foi realizada apenas com a análise experimental.

Neste estudo foi realizado um total de 7 simulações numéricas para a profundidade da superfície livre da água do canal de ondas na parte rasa h_1 ($h_1 = 0,392$ m) e um total de 87 ensaios experimentais no canal de ondas do IPH distribuídas da seguinte forma para cada a profundidade da superfície livre da água h_1 : $h_1 = 0,392$ m (7 casos), $h_1 = 0,383$ m (6 casos), $h_1 = 0,374$ m (5 casos), $h_1 = 0,365$ m (4 casos), $h_1 = 0,356$ m (3 casos), $h_1 = 0,347$ m (2 casos) e $h_1 = 0,338$ m (2 casos). Foi adotado como procedimento nos casos experimentais repetir 3 vezes cada ensaio.

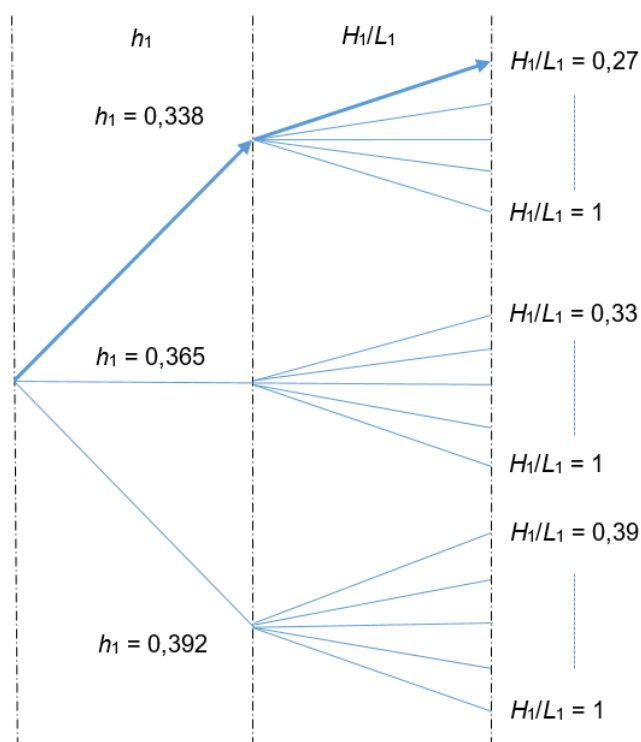


Figura 3.2 – Ilustração simplificada do processo de casos estudados aplicado ao dispositivo de galgamento.

Aplicação do método Design Construtal segue as seguintes etapas:

- inicia-se pela definição do sistema de escoamento a ser estudado: dispositivo de galgamento em escala de laboratório;
- posteriormente identifica-se o que está escoando: escoamento da água no canal de ondas (fluido) e água acumulada no reservatório do dispositivo de galgamento;
- na sequência identifica-se o indicador de desempenho: maximizar a energia potencial acumulada representada por h_R ;
- posteriormente identifica-se as constantes que limitam a liberdade do sistema: A_T , A_r , $(S_D + H_1) > (h_1 + H/2)$, $C \geq 0,632$ m;
- identifica-se os graus de liberdade de forma que o sistema possa alterar sua geometria: H_1/L_1 , h_1 ;
- finalmente emprega-se da Modelagem Matemática, Numérica e Experimental para calcular o indicador de desempenho: solução numérica das equações de conservação e transporte para o escoamento bifásico e realização do experimento analisando o escoamento no canal de ondas;

- para finalizar calcular o indicador de desempenho (máximo ou mínimo, de acordo com o problema estudado) e as geometrias que permitem ao sistema obter o melhor desempenho e calcular a altura de água (h_R) buscando maximizar sua magnitude para diversas geometrias.

3.2. Modelagem Matemática

O domínio computacional apresentado na Fig. 3.1 foi gerado com o *software* ANSYS Workbench v.18, a solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com um código de dinâmica dos fluidos computacional baseado no MVF, *software* ANSYS Fluent, v.18. No que diz respeito a geração da onda, a mesma foi realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria de Stokes de 2ª ordem, que no *software* Fluent é realizado pelo emprego de uma metodologia função. Esta metodologia foi empregada anteriormente no trabalho de Goulart *et al.* (2018). Para a abordagem adequada da interação entre ar, água e dispositivo será empregado o modelo multifásico VOF, semelhante ao utilizado por Liu *et al.* (2008), Iahnke (2010), Machado (2012), Dos Santos *et al.* (2013), Gomes. (2014) e Martins (2021).

3.3. O Modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF)

O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), é um método utilizado para encontrar uma solução para escoamentos que tenham misturas de dois ou mais fluidos imiscíveis como, por exemplo, ar-água e interações entre água-estrutura, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase. A análise consiste em encontrar a solução de um escoamento de uma mistura ar-água. Por isso, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidas com o MVF.

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por (Schlichting, 1979):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.4)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e é $\vec{v}$ o vetor de velocidade do escoamento (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.5)$$

onde p é a pressão (N/m^2), $\rho \vec{v}$ e $\vec{F}$ são as forças de campo (empuxo) e forças externas ao corpo (N/m^3), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, consequentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (3.6)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)), I é um tensor unitário. O segundo termo do lado direito da Eq. (3.6) descreve as tensões desviadoras ou deviatórias (N/m^2) e está relacionada com a deformação volumétrica em escoamentos compressíveis.

Pelo fato de se empregar no estudo duas fases (ar e água), o conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações deve ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Consequentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária (Ling *et al.* 2001; Lv *et al.*, 2011; Gomes, 2010):

$$\frac{\partial(\rho \alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (3.7)$$

Como as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por

Vale ressaltar que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (3.8)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (3.9)$$

A Figura 3.3 ilustra a inicialização de um dos casos do problema em estudo sendo a água representada na cor vermelha e o ar na cor azul.

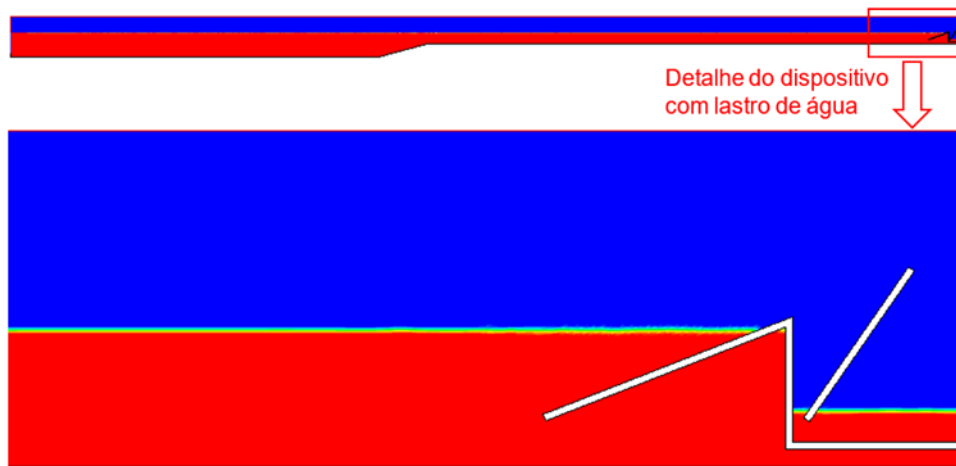


Figura 3.3 – Ilustração da inicialização do problema em estudo.

Também pode ser observado que o reservatório contém água em seu interior (lastro 0,10 m) e uma placa defletora. Este nível inicial do reservatório (d) se faz necessário nos ensaios experimentais, maiores detalhes podem ser observados no Cap. 4.

3.4. Condições de Contorno

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (parte central da superfície lateral esquerda da Fig. 3.1) e simula o comportamento de um gerador de onda (Horko, 2007). Os componentes de velocidade na direção de propagação de onda (x) e na direção vertical (z) para o canal de entrada são baseados na teoria de Stokes de 2ª ordem conforme as Equações (2.3) e (2.4) (Chakrabarti, 2005).

Ainda é possível determinar a elevação da superfície livre utilizando-se a Eq. (2.2) (Dean e Dalrymple, 1991).

Para as outras condições de contorno, na região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica $P_{abs} = 101,3$ kPa (veja as linhas vermelhas na Fig. 3.1). Nas superfícies inferior, lateral direita, parte inferior da lateral esquerda, bem como, na superfície do dispositivo de galgamento é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = w = 0$ m/s).

Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso (método de inicialização do gerador de ondas utilizado foi o *None*, por ser está condição que mais se assemelha com a condição real de inicialização do gerador da ondas na modelagem física) e que a superfície livre com altura de $h_1 = 0,392$ m para as 7 razões de H_1/L_1 . Além disso, o escoamento foi considerado laminar, pois no presente estudo o objetivo foi uma análise sobre a vazão de água galgada sobre o dispositivo de galgamento, não considerando os efeitos da turbulência durante o processo.

3.5. Verificação e validação do Modelo Numérico

Uma importante etapa na utilização de metodologias numéricas é a verificação e validação do modelo numérico empregado (Gomes, 2014).

Verificação é o processo usado para quantificar o erro numérico. Ele mede o quão bem o modelo matemático é resolvido numericamente. Não tem como objetivo o fenômeno real. É um processo puramente matemático (Versteeg & Malalasekera, 2007). Na prática, o valor verdadeiro é desconhecido e, portanto, consegue-se apenas estimar (U) o valor do erro experimental ou do erro de modelagem. A mesma situação ocorre com relação ao erro numérico: normalmente, em situações práticas uma solução numérica é obtida porque a solução analítica é desconhecida; assim o erro numérico também tem que ser estimado.

Validação é o processo para quantificar o erro de modelagem é o processo usado para quantificar o erro de modelagem. Ele mede o quão bem o modelo matemático representa a realidade. É um processo puramente físico (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Três tipos de métodos podem ser empregados na solução de um problema: experimentais (erros experimentais), analíticos (erros de modelagem) e numéricos (erros de modelagem e numéricos (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Validações e verificações desse modelo numérico aplicado a energia das ondas do mar, podem ser encontradas em Horko (2007), Liu *et al.* (2008), Gomes *et al.* (2009), Gomes (2010), Gomes (2014) e Liu *et al.* (2019).

3.6. Técnicas Numéricas

Os Métodos Numéricos adotados durante a etapa de processamento no *software* FLUENT das simulações do dispositivo de galgamento no canal de ondas no IPH são apresentados a seguir: o *solver* baseado na pressão; esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem; PRESTO (*Pressure Staggering Option*) para a discretização espacial; o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) para o acoplamento pressão-velocidade; método *Geo-Reconstruction* para a superfície ocupada pela água; fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Esta metodologia numérica foi anteriormente utilizada nos estudos de, por exemplo: Gomes (2010); Lopes (2012), Machado (2012), Dos Santos *et al.* (2014), Goulart (2014); Goulart *et al.* (2018) e Martins (2021). Além disso, Martins *et al.* (2018) e Barbosa *et al.* (2017), chegaram à conclusão que este foi o procedimento de melhor desempenho para simulação de um dispositivo de galgamento.

As soluções obtidas aqui foram consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y foram inferiores a 10^{-6} . O processamento das simulações foram realizadas usando um computador Intel Core i7-5500U com clock de 2.4 GHz de 2 núcleos e 8 GB de memória RAM. Emprega-se uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: Message Passing Interface) para paralelização. O tempo de processamento de cada uma das simulações foi de, aproximadamente 7 h. O *software* EXCEL foi utilizado na etapa de pós-processamento na geração de planilhas e gráficos.

3.7. Teste de Sensibilidade de Malha

Um aspecto muito importante a ser considerado em simulações numéricas é o tipo de discretização espacial empregado ao domínio analisado. A discretização empregada possui grande importância para uma predição adequada dos escoamentos simulados, bem como, no esforço computacional requerido para a realização destas simulações. Sendo

assim, a etapa de geração da malha tem se tornado muito importante e diversas recomendações a respeito da sua construção têm sido realizadas (Santos, 2008).

Na Tabela 3.1 é apresentado o teste de sensibilidade de malha realizado que consistiu em comparar a elevação da superfície livre de água obtida analiticamente a partir da Eq. (2.2) e a solução obtida numericamente para onda regular num dado ponto do canal de ondas (sonda P_0 situada a 10 m do batedor de ondas (Fig. 3.4)). Nesta etapa foram observadas três malhas com volumes finitos no formato quadrangular. Em função da complexidade geométrica na região da rampa e do reservatório, utilizou-se uma malha não estruturada nessa parte do domínio computacional.

A onda utilizada nas simulações tem as mesmas características anteriormente mencionadas. Cabe salientar que somente foram observadas as séries espaciais, pois, o avanço do passo de tempo foi mantido constante em 0,02 s, sendo este o mesmo critério adotado nos experimentos de Gomes (2018) e Goulart *et al.* (2018).

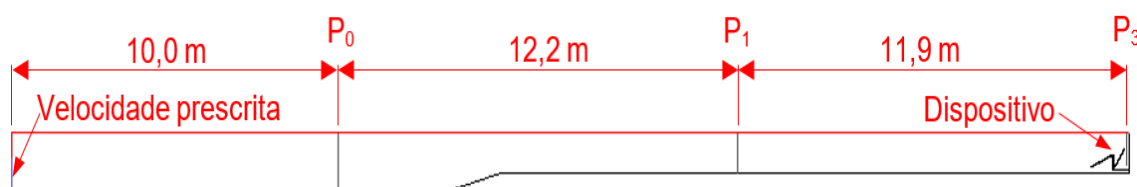


Figura 3.4 – Posição das sondas no canal de ondas.

Na Tabela 3.1 são apresentados os erros médios, que foram obtidos através de uma média aritmética do erro calculado em cada instante de tempo ao longo dos 50 s analisados das soluções encontradas. É importante destacar-se que a referência nesses cálculos de erro é a solução analítica.

Tabela 3.1. Análise dos erros relativos e tempo de processamento.

Dimensões da Malha (m)	Número de volumes	Tempo de processamento (h)	Erro relativo Ana x Num (%)
0,0200 × 0,0200	99.199	5,30	1,36
0,0175 × 0,0175	129.625	7,00	0,98
0,0150 × 0,0150	175.499	8,15	1,03

Para quantificar a diferença entre a solução numérica e a solução para a variação da superfície livre em um dado ponto é utilizado como critério o erro relativo. O erro relativo é definido da seguinte forma (Gilat e Subramaniam; 2008):

$$E_R = \left| \frac{x_n - x}{x} \right| 100\% \quad (3.10)$$

onde x é o valor de referência da variável em questão e x_n é o valor obtido pela aproximação numérica.

Com base nos resultados apresentados justifica-se a escolha por uma malha com dimensões de 0,0175m x 0,0175 m, pois analisando-se a Tab. 3.1 nota-se que essa malha já está suficiente refinada, permitindo uma solução numérica com boa acurácia e também seu tempo de processamento é mais rápido se comparado com a malha mais refinada.

Na Figura 3.5 é possível observar o gráfico da comparação da elevação da superfície livre obtida analiticamente e numericamente, respectivamente da malha escolhida, na sonda P_0 , situada a 10 m do batador de ondas (Fig. 3.4).

A primeira faixa de tempo, para $0,00 \text{ s} \leq t \leq 10,00 \text{ s}$, observa-se que o escoamento da onda numérica parte do repouso em função da inércia do escoamento e a onda analítica já parte formada e mantém-se.

Na segunda faixa de tempo, para $10,00 \text{ s} \leq t \leq 30,00 \text{ s}$, a altura da superfície livre da onda em função do tempo assume um comportamento cíclico. Também pode-se observar a tendência de a amplitude da onda analítica apresentar magnitudes superiores para as alturas das cristas e cavas em comparação com as ondas geradas numericamente.

Posteriormente, na terceira faixa de tempo, para $30,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$, nota-se um aumento gradual na amplitude das ondas numéricas. Nesta faixa de tempo os resultados mostram os efeitos da reflexão das rampas nos casos numéricos.

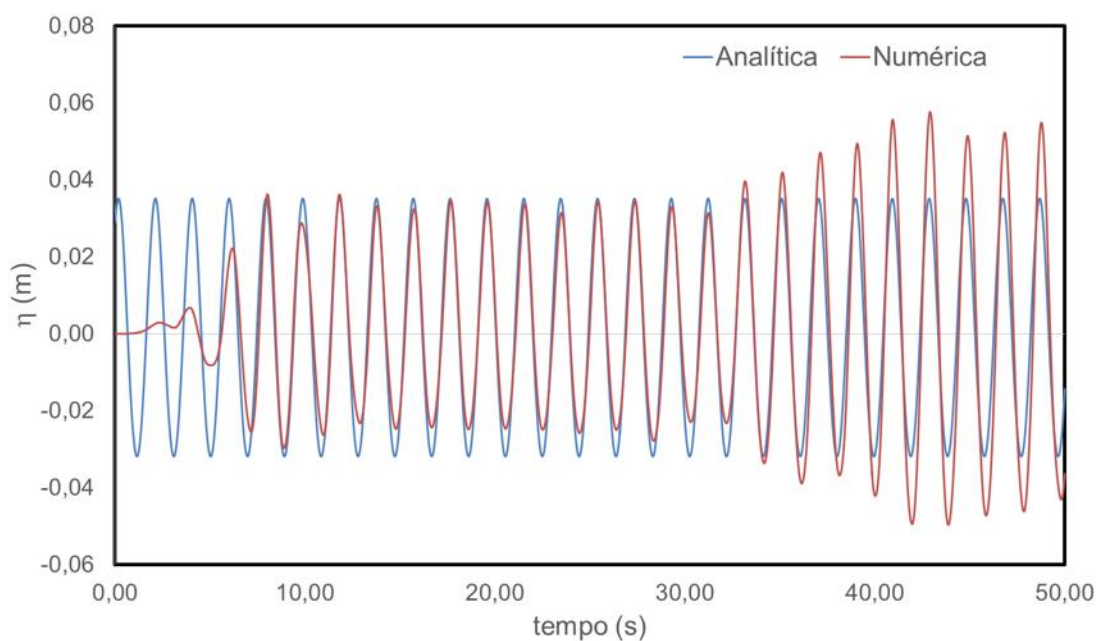


Figura 3.5 - Comparação dos resultados analíticos e numéricos empregados no estudo de independência de malha.

Na Figura 3.5, os resultados analisados no intervalo de tempo total ($0 \leq t \leq 50$ s). Nesta faixa de tempo, é observada uma diferença, calculada pela Eq. (3.10), é de aproximadamente 0,98%. A Figura 3.6 ilustra a malha empregada no presente trabalho, com quadriláteros de dimensões $0,0175 \text{ m} \times 0,0175 \text{ m}$.

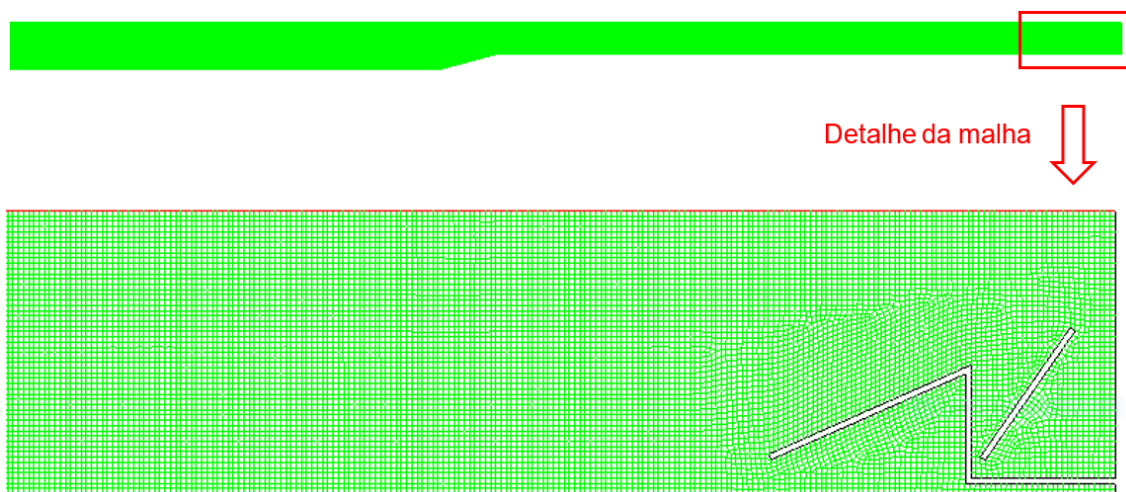


Figura 3.6 – Discretização espacial do canal de ondas.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da modelagem experimental, instrumentação e planejamento para realização do experimento no canal de ondas do IPH/UFRGS. Também serão descritos detalhes do processo de fabricação do protótipo e as incertezas que envolvem este tipo de experimento.

4.1. Instrumentação

Existem vários tipos de medidores de ondas utilizados em tanques e canais de ensaios. Os dois tipos mais comuns são os medidores por resistividade (condutividade) e por capacitância. Nos dois casos, existem fios paralelos que servem de haste de medição da resistência elétrica ou da capacitância em função do nível de água imerso.

O sensor capacitivo tem um revestimento dielétrico nos fios, diferentemente do resistivo, funcionando por contato direto com a água. O funcionamento dos sensores de altura de onda é baseado na medida da condutividade entre dois eletrodos paralelos (rígidos, finos, em aço inoxidável) parcialmente imersos na água (Clemente, 2013).

Na Figura 4.1 pode ser observado o tipo de sensor (sondas) condutivo utilizado nos experimentos no IPH.



Figura 4.1 – Sensor condutivo para medição da altura de onda.

A variação do nível de água em contato com as hastes provoca a variação da condutividade elétrica. As sondas estão conectadas ao condicionador de sinais, com a saída em tensão elétrica (V), proporcional ao nível da superfície livre da água.

O sinal em volts é enviado para uma placa de aquisição de dados que digitaliza a variação da voltagem a uma taxa de tempo escolhida no *software*, que neste caso foi o DAQExpress.

A Figura 4.2 ilustra o esquema de aquisição de dados utilizado com sondas resistivas nos experimentos no IPH.



Figura 4.2 – Esquema de aquisição de dados utilizado.

4.2. Processo de Fabricação do Protótipo

Para a realização dos testes em laboratório, foi desenvolvido um modelo reduzido na escala de redução geométrica 1:15. A referida escala guarda uma relação apenas na grandeza fundamental comprimento, sendo assim o comprimento da rampa (C) e o seu ângulo.

As dimensões do reservatório do dispositivo de galgamento foram estabelecidas em função de análises numéricas iniciais fundamentais para determinação da capacidade mínima de volume do reservatório (volume aproximado ocupado por 15 ondas galgando o reservatório) para um comprimento de $L_R = 0,50$ m.

A largura interna do canal W de 1,0 m (Fig. 3.1), sendo esta a largura que foi adotada para todas as dimensões de largura do dispositivo. Com o objetivo de facilitar a montagem do dispositivo no canal de ondas a distâncias S_D de 0,15 m (para todos os casos), entre o nível inicial do reservatório (d) do dispositivo e o fundo do canal de ondas, criou-se um sistema de sapatas na base do dispositivo que a mantém ajustada (Fig. 4.3).

Tabela 4.1. Dimensões para construção do dispositivo de galgamento.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769
1.1	23,7°	0,44	0,297	0,674	0,737
2.0	26,6°	0,50	0,316	0,632	0,707
3.0	30,5°	0,59	0,344	0,582	0,676
3.1	33,0°	0,65	0,361	0,555	0,662
4.0	35,4°	0,71	0,377	0,531	0,651
5.0	38,7°	0,80	0,400	0,500	0,640
6.0	41,6°	0,89	0,4219	0,4740	0,635
7.0	45,0°	1	0,4472	0,4472	0,632

O dispositivo de galgamento foi construído em placas de acrílico com espessura de 10 mm, com largura 1050 mm e comprimento 2050 mm com 7 dimensões distintas para as razões de H_1/L_1 (Tab. 4.1) com a finalidade de obter informações necessárias para a validação do modelo numérico do dispositivo de galgamento.

Nas rampas dos casos 6.0 e 7.0 em função de não ter ocorrido galgamento nos ensaios, estas configurações foram alteradas no decorrer dos ensaios e deram origem às rampas dos casos 1.1 e 3.1, que originalmente não faziam parte dos casos propostos.

As rampas do dispositivo possuem uma montagem em módulos para um melhor aproveitamento do material. Nesse esquema, as placas ficam montadas sobre trilhos e são fixadas por parafusos dispostos sobre as bases que permitem a regulação das alturas e dos ângulos. Além disso, foi respeitada uma restrição construtiva para o comprimento da superfície da rampa ($C \geq 0,632$ m).

O defletor no interior do reservatório tem a função de direcionar as descargas do galgamento no dispositivo permitindo leituras mais estáveis da altura da água galgada no reservatório (h_R).

Na Figura 4.3 podem ser observados com maior clareza os detalhes do dispositivo.

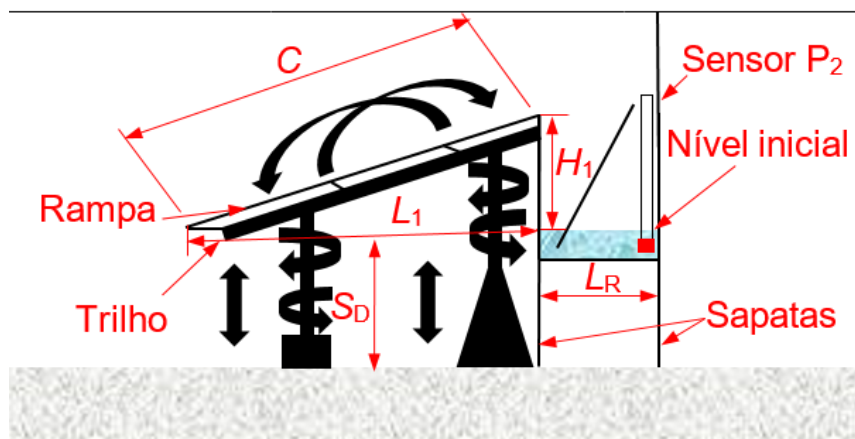


Figura 4.3 - Detalhe do dispositivo de galgamento.

Para alterar as alturas H_1 basta retirar os parafusos frontais de fixação e substituir a placa frontal e colocar a placa da configuração desejada. Conforme pode ser observado na Fig. 4.4.

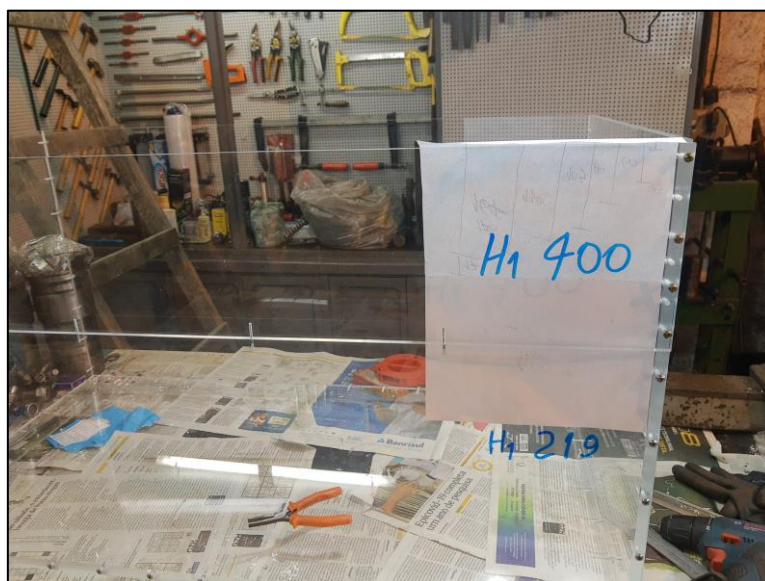


Figura 4.4 - Montagem da placa frontal do dispositivo de galgamento.

Todas as placas de acrílico utilizadas na fabricação do dispositivo de galgamento foram usinadas em máquina operatriz (Fig. 4.5). Para montagem das placas do reservatório utilizou-se parafusos auto brocantes com diâmetro de 4,2 mm com 25 mm de comprimento.



Figura 4.5 - Usinagem das placas do dispositivo de galgamento.

4.3. Ensaaios

Antes de detalhar as variáveis a serem medidas e os métodos utilizados na realização deste estudo, deve-se mencionar que foram analisadas as recomendações contidas nos estudos de Rosauero (2004), Cerdeira (2006), Clemente (2013) e Gomes (2018) para o planejamento dos ensaios.

Nos ensaios realizados no canal de ondas do IPH, com o objetivo de validar o modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal e sobre dispositivos de galgamento em escala de laboratório, as ondas reproduzidas no canal foram estabelecidas de modo que representassem os parâmetros característicos, período e altura, das ondas, partindo das análises do clima de ondas da cidade de Rio Grande RS obtidas em escala real ($T = 7,5$ s e $H = 1,0$ m).

Sendo assim nos experimentos realizados foram mantidos constantes o período e altura, aplicando-se a redução geométrica de 1:15 pelo critério de Froude ($T = 1,94$ s e $H = 0,067$ m), na parte rasa do canal de ondas.

A Tabela 4.2 permite observar as demais características da onda em escala de laboratório na parte profunda do canal de ondas e na parte rasa do canal de ondas a serem reproduzidas nos ensaios. As correlações podem ser visualizadas na Fig. 4.6.

Tabela 4.2. Valores de altura do nível do reservatório do canal de ondas, frequência do inversor, regulação do curso do gerador, período e altura da onda.

ensaio	h_1 (m)	f (Hz)	$S/2$ (m)	T (s)	H (m)
1	0,347	42,5	0,20	1,94	0,067
2	0,365	42,5	0,19	1,94	0,067
3	0,383	42,5	0,18	1,94	0,067

Os ensaios no canal de ondas foram iniciados pela instalação do dispositivo no canal posicionado conforme Fig. 4.6 com a configuração do primeiro caso para a geometria $H_1/L_1 = 0,39$ (Tab. 4.1).

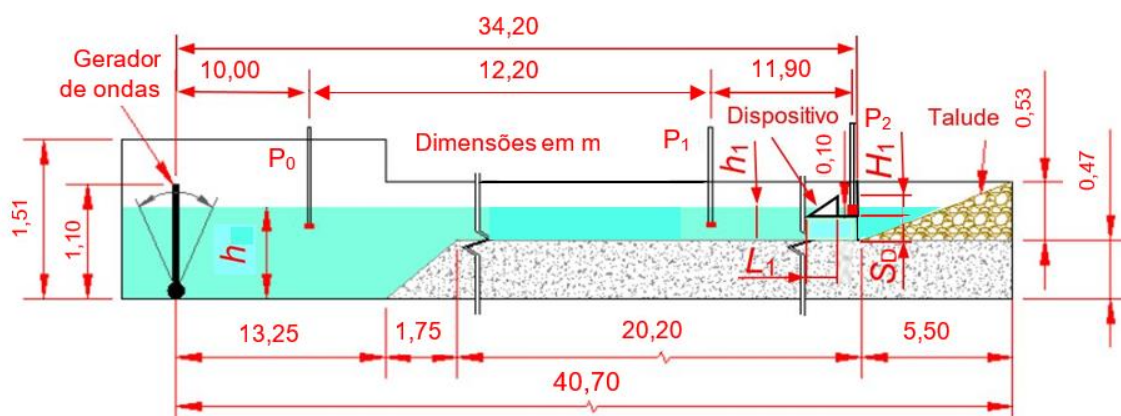


Figura 4.6 – Desenho esquemático do canal de ondas, com dimensões em m (adaptado de Clemente, 2013).

No processo de fixação do dispositivo de galgamento algumas soluções tiveram que ser adotadas para evitar que ocorressem danos estruturais ao canal. Uma das soluções encontradas foi a fixação do dispositivo por intermédio da utilização de barras rosçadas que exerciam pressão sobre as paredes do canal de ondas (com proteção de borracha em suas extremidades) que permitiram a ancoragem do dispositivo ao canal.

Outra solução encontrada para a ancoragem do dispositivo e a fim de minimizar o empuxo proveniente do reservatório foi a colocação de lastro no interior do reservatório (~ 82 kg). Na Figura 4.7 é possível observar os detalhes desta montagem.

Para o procedimento de calibração das sondas, primeiramente deve-se preencher o canal com água, no caso para o maior valor de profundidade $h_1 = 0,392$ m de nível na parte rasa do canal (Fig. 4.8) e por consequência $h = 0,862$ m de nível na parte profunda do canal.

A sonda P_0 tem o objetivo de medir a altura de onda na parte profunda do canal, enquanto a sonda P_1 mede na parte rasa. Portanto, é possível estudar a transformação que ocorre na onda quando há a redução da profundidade. Já a sonda P_2 possibilita medir a altura da água galgada no reservatório (h_R) do dispositivo de galgamento, para isto o mesmo tem em seu interior um nível inicial $d = 0,10$ m.

A sonda P_2 permite quantificar as elevações da altura de água galgada no reservatório (h_R) quando houver descargas do galgamento no seu interior no decorrer do tempo em função da sua geometria.



Figura 4.7 – Detalhes da primeira montagem do dispositivo de galgamento no canal de ondas do IPH.



Figura 4.8 – Controle do nível na parte rasa do canal de ondas do IPH.

Na sequência as sondas devem ser fixadas em seus suportes, niveladas de maneira que fiquem posicionadas ao centro do canal de ondas, respeitando as distâncias em relação ao gerador de ondas e imersas na água em um nível adequado (Fig. 4.9).



Figura 4.9 – Processo de nivelamento das sondas.

No caso da P_2 deve-se colocar água no interior do reservatório em quantidade suficiente para realizar a variação da altura nas três posições e, posteriormente a execução

da calibração, se retira o excedente de água, deixando o nível inicial em $d = 0,10$ m (Fig. 4.10).

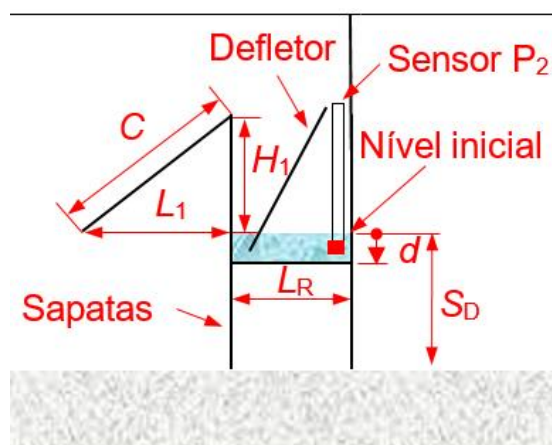


Figura 4.10 - Detalhe do sensor P_2 no dispositivo de galgamento.

O procedimento de calibração em todos os ensaios realizados foi com a água completamente em repouso e consiste em variar a imersão dos sensores em três posições: um zero central, uma posição acima e uma posição abaixo do zero central. Os suportes dos sensores possuem um sistema de deslocamento milimetrado, que permite essa variação da altura dos sensores (Fig. 4.11).



Figura 4.11 – Processo de nivelamento das sondas.

Quando a resposta das sondas se apresenta linear para curva de calibração é possível obter a relação tensão versus comprimento a partir de uma reta. Obteve-se o sinal de tensão pelo amplificador a uma taxa de 50 Hz, nas três elevações diferentes dos

suportes das sondas. Na Figura 4.12 é apresentado o resultado do processo de calibração realizado na sonda P₁.

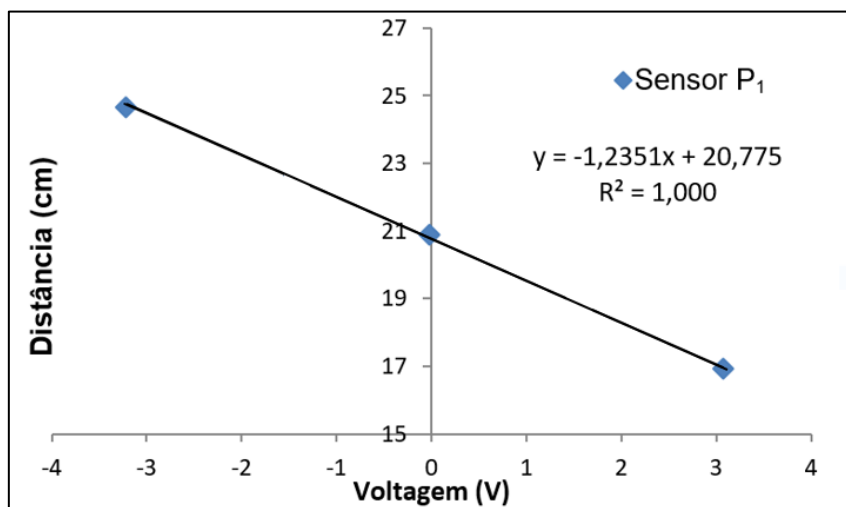


Figura 4.12 – Calibração das sondas P₁.

Cabe salientar que os sensores de duplo eletrodo metálicos são altamente suscetíveis às mudanças de temperatura, com conseqüente variação da leitura da condutividade elétrica.

Quando os ensaios são demasiadamente longos, estendendo-se ao longo do dia, ou quando há grandes variações da temperatura ambiente, mais de uma calibração pode ser necessária (Clemente, 2013). Sendo assim adotou-se o procedimento de uma calibração para cada 6 h de ensaios.

Após o procedimento de calibração das sondas, deve-se regular as condições da onda regular a ser gerada pelo batedor em função de três parâmetros: profundidade do canal, frequência do motor e amplitude do batedor. Para auxiliar nesta tarefa utilizou-se as curvas de eficiência do gerador de ondas (Fig. 2.22) elaboradas por Gomes (2018).

O procedimento parte da regulagem do comprimento do braço do batedor (Fig. 4.13), por intermédio do ajuste da excentricidade. Posteriormente, para a regulagem da frequência no inversor, onde é ajustada a velocidade de rotação do motor, foi utilizada a curva da frequência versus períodos característicos da onda (Fig. 2.23) elaborada por Gomes (2018).



Figura 4.13 – Regulagem do braço do gerador de ondas.

Vencidas estas etapas, o ensaio poderá efetivamente ser executado observando o limite de tempo determinado (90 s). Para determinação do limite do tempo, considerou-se a capacidade máxima de acúmulo de água no interior do reservatório.

As leituras obtidas pelos sensores apresentam um sinal de tensão elétrica (em V) que é enviado para uma placa de aquisição de dados que digitaliza a variação da voltagem a uma taxa de tempo escolhida no *software* DAQExpress. Neste caso, o avanço do passo de tempo foi mantido constante em 0,02 s. O que facilita a comparação transiente com os resultados do modelo computacional empregado aqui. Entre cada ensaio foi atribuído um tempo mínimo de 15 min entre os mesmos a fim de que os movimentos no interior do canal venham a atingir a nova condição de repouso.

A análise foi limitada ao intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$, embora os ensaios tenham um tempo máximo de execução de $t_f = 90 \text{ s}$. A estratégia para análise consistiu em observar todos os resultados experimentais e constatar o limite de tempo que não houvesse transbordamento no reservatório do dispositivo de galgamento para nenhum dos casos, permitindo uma comparação igualitária para todos os casos.

Uma vez estabelecida a primeira razão de H_1/L_1 (primeira geometria da rampa do dispositivo de galgamento) esta foi mantida constante para todas as 7 profundidades h_1 com o objetivo de facilitar a execução dos ensaios. Esse procedimento foi adotado pelo fato de ser mais fácil alterar a profundidade do nível de água no canal para cada geometria da rampa do que alterar a rampa.

Cabe ainda destacar que inicialmente foi realizada uma série de ensaios com a finalidade de avaliar se os parâmetros regulados inicialmente estavam adequados com base nas informações da Tab. 4.2.

Através do tratamento dos dados iniciais, obteve-se a regulação mais adequada para o curso do gerador de ondas que deve ser 20 cm sendo esta adotada para todos os ensaios.

Os procedimentos foram repetidos para os 87 ensaios, observando-se as variações dos respectivos valores de h e h_1 no nível da água e as razões de H_1/L_1 conforme Tab. 4.1 e Tab 4.2.

4.6. Incertezas que envolvem este tipo de experimento

Resultados experimentais obtidos de ensaios realizados para a análise do comportamento de estruturas de engenharia podem possuir um número grande de variáveis que influenciam os valores medidos. A mudança do valor destas variáveis durante os ensaios e a diferença entre tais valores nas condições dos ensaios e na situação de interesse, bem como imperfeições no conhecimento das magnitudes destas variáveis, são fatores que aumentam a incerteza do resultado final medido (Sales, 2016).

Normalmente um experimento se compõe de três etapas, que são: A) a calibração dos instrumentos; B) a medição propriamente dita da variável de interesse durante o teste e C) a conversão dos dados medidos à variável de saída, através da interpretação dos primeiros. A cada uma destas etapas pode-se associar a inserção de erros inerentes aos seus processos (Sales, 2016).

Sendo assim as principais fontes de incerteza relativas à metodologia experimental adotada na execução dos ensaios de galgamento em canal de ondas são provenientes da fabricação do protótipo, da montagem do experimento em si e da execução do mesmo. Nessa última, a incerteza consiste na medição propriamente dita das variáveis de interesse. Também aparecem nesta etapa incertezas devidas às condições ambientais às quais o experimento foi submetido. No presente trabalho limitou-se a listar as principais fontes de incerteza do tipo B, referentes a esta etapa e a sua precisão (sensibilidade) no processo de medição. Essas incertezas são apresentadas na Tab. 4.3.

Tabela 4.3. Fontes de incerteza do tipo B, precisão no processo de fabricação do protótipo e medição dos dados nos ensaios.

Fonte de incerteza	Resolução do instrumento
Paquímetro	0,02 mm
Escala	0,5 mm
Nível	0,5 mm / m
Goniômetro	0,1°
Trena	1 mm
Fresadora	0,01 mm
Sensores	0,001 mm

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção apresenta os resultados obtidos para os casos numéricos e experimentais estudados ao longo deste trabalho. Para tal, apresenta-se neste capítulo resultados subdivididos nos seguintes itens: 1) análise numérica da propagação de uma onda regular bidimensional em um canal de ondas e comparação com os resultados do modelo físico obtidos nos estudos experimentais realizados no canal de ondas do IPH, ambos com o dispositivo de galgamento *onshore* instalado; 2) análise da comparação de resultados numéricos e experimentais para a quantidade de água galgada em dispositivo de galgamento *onshore* em escala de laboratório no IPH com a finalidade de validação de modelos numéricos aplicados para este tipo de dispositivo; 3) análise do efeito da geometria sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* empregando o método Design Construtal, mais particularmente, sendo estudada a influência da razão H_1/L_1 para diferentes profundidades da superfície livre da água (h_1) na altura da água galgada no reservatório (h_R) comparando resultados numéricos e experimentais.

5.1. Validação do Modelo Numérico para a Geração de Onda Regular em Canal de Ondas

Empregando o canal de ondas bidimensional com escoamento laminar, conforme o esquema apresentado pela Fig. 4.6, com 34,20 m de comprimento, 1,51 m de altura e largura 1 m, foi avaliada a onda numérica através da comparação da mesma com a solução experimental. As análises apresentadas nessa subseção foram realizadas para 5 diferentes configurações de rampa para investigar se a variação da rampa causaria alguma influência sobre as previsões numéricas do modelo computacional utilizado. Mais precisamente, são avaliados os casos 1.0, 1.1, 2.0, 3.0 e 3.1, conforme indicado na Tab. 4.1.

Adotando a profundidade de lâmina de água $h = 0,862$ m e comprimento de onda $\lambda = 4,78$ m na parte profunda do canal de ondas $h_1 = 0,392$ m e $\lambda_1 = 3,54$ m na parte rasa do canal de ondas. A onda gerada possui período $T = 1,94$ s e altura $H = 0,067$ m. Vale ressaltar que a onda gerada numericamente possui as mesmas características da onda gerada experimentalmente, sendo regulado o curso do batedor de ondas ($S = 0,2$ m) e sua frequência ($f = 42,5$ Hz) em concordância com uma série de testes realizados inicialmente. Todos os resultados foram obtidos com passo de tempo de $\Delta t = 0,02$ s.

Para esta tarefa, foi realizada a comparação entre a altura da superfície livre da água ao longo do tempo obtida numericamente e experimentalmente. A análise consiste em gerar a onda em um canal de ondas e observar a variação na posição da superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do canal de ondas (sonda P_0 situada a 10 m do batedor de ondas e a sonda P_1 situada a 22,2 m do batedor de ondas, conforme ilustrado na Fig. 4.6).

A análise foi limitada ao intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$, embora os ensaios tenham um tempo máximo de execução de $t_f = 90 \text{ s}$. A estratégia para análise consistiu em observar todos os resultados experimentais e constatar o limite de tempo que não houvesse transbordamento no reservatório do dispositivo de galgamento para nenhum dos casos, permitindo uma comparação igualitária para todos os casos.

As Figuras 5.1 a 5.5 apresentam as comparações da onda do modelo numérico e a onda do modelo físico na sonda P_0 no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$) para os casos 1.0 ($H_I/L_I = 0,39$), 1.1 ($H_I/L_I = 0,44$), 2.0 ($H_I/L_I = 0,50$), 3.0 ($H_I/L_I = 0,59$) e 3.1 ($H_I/L_I = 0,65$), respectivamente. Para a análise do fenômeno vale considerar três faixas de tempo na Tab. 5.1.

Na primeira faixa de tempo, para $0,00 \text{ s} \leq t \leq 10,00 \text{ s}$, observa-se que em todos os casos analisados o escoamento da onda parte do repouso e, em função da inércia do escoamento, as primeiras ondas geradas no canal são mais amortecidas no numérico e experimental. Foram observados desvios com valores entre 0,81% a 1,36% entre as amplitudes de cristas e cavas na comparação entre os resultados numéricos e experimentais. Este amortecimento tende a diminuir com o avanço do tempo de simulação.

Na segunda faixa de tempo, para $10,00 \text{ s} \leq t \leq 30,00 \text{ s}$, a altura da superfície livre da onda em função do tempo assume um comportamento cíclico estável em todos os casos. Também pode-se observar a tendência de a amplitude da onda experimental apresentar magnitudes superiores em todos os casos analisados para as alturas das cristas em comparação com as ondas geradas numericamente. Apesar disso, nesta faixa de tempo, são observadas diferenças pouco significativas entre 0,58% a 1,83% para as amplitudes de cristas e cavas.

Posteriormente, na terceira faixa de tempo, para $30,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$, nota-se um aumento gradual na amplitude das ondas numéricas e experimentais em todos os casos analisados. Nesta faixa de tempo os resultados mostram os efeitos da reflexão das rampas nos casos numéricos e experimentais e das paredes nos casos experimentais.

Os efeitos da reflexão interferiram na altura e no período das ondas. Nos casos 1.1, 2.0, 3.0 e 3.1 observou-se diferenças entre 0,94% a 3,21% nas amplitudes de cristas e cavas de forma progressiva. Este aumento progressivo está relacionado com o aumento da razão H_1/L_1 entre os casos analisados.

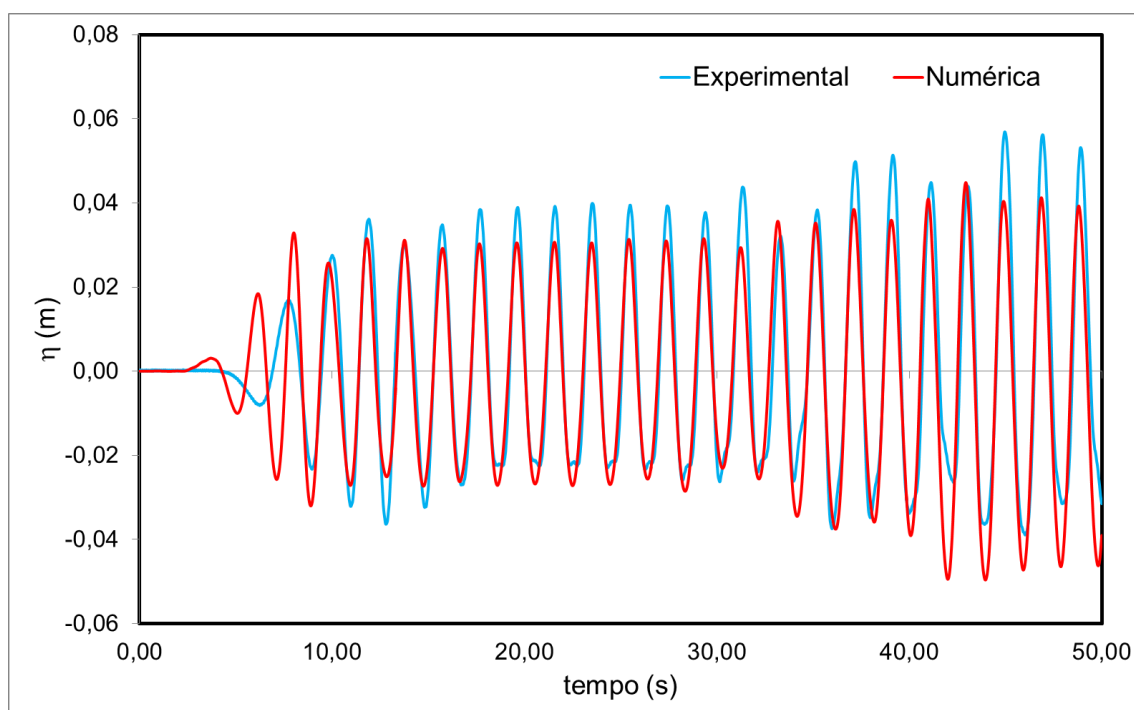


Figura 5.1 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$).

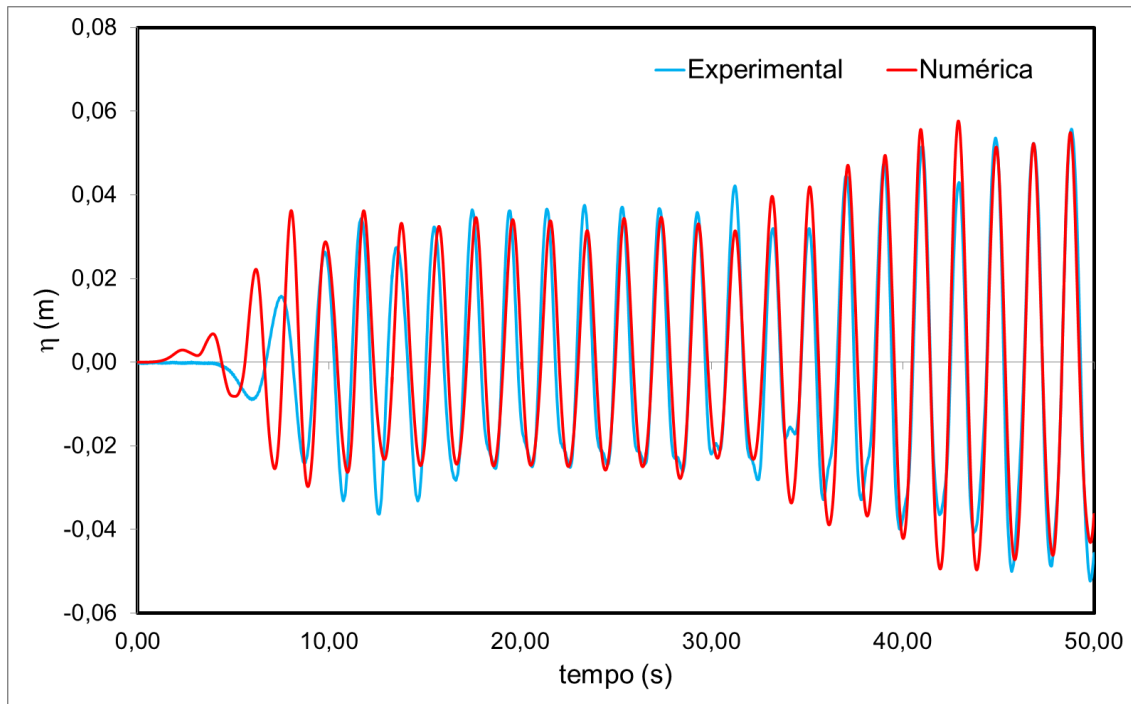


Figura 5.2 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$).

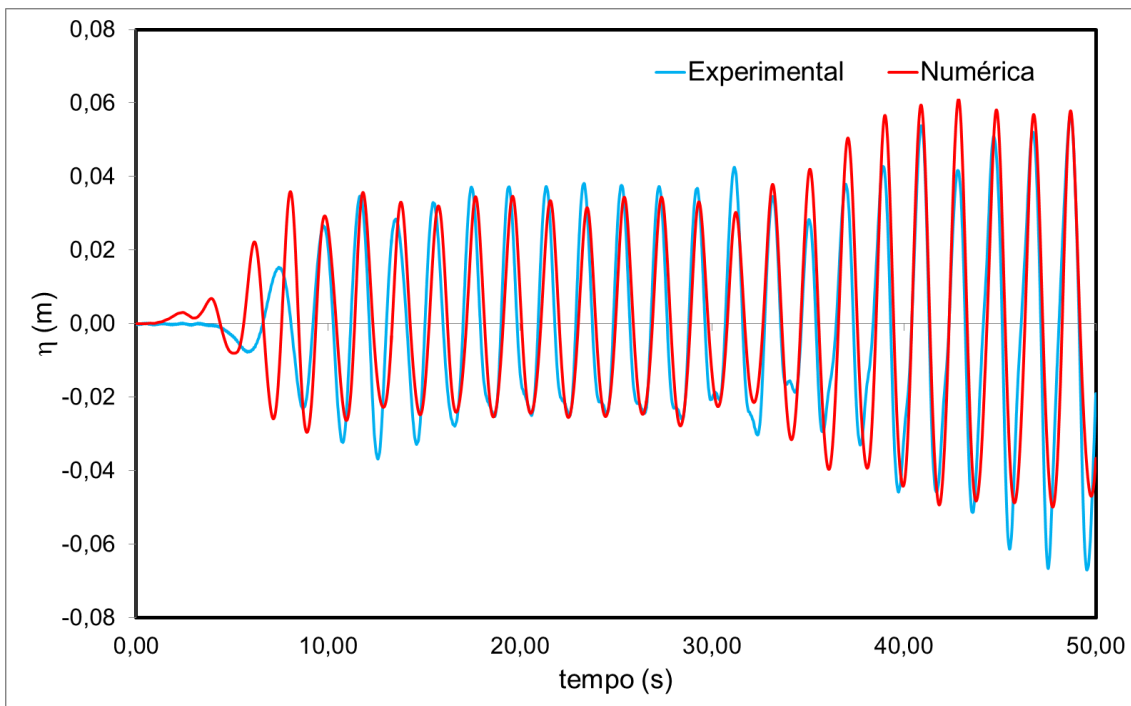


Figura 5.3 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$).

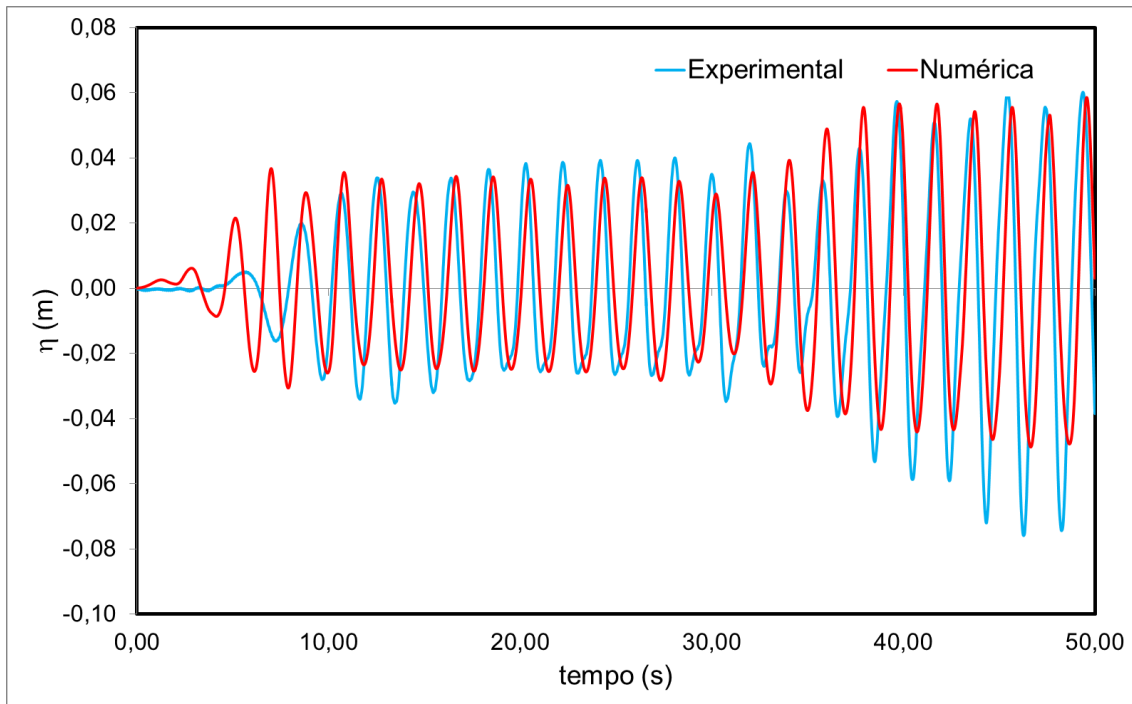


Figura 5.4 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$).

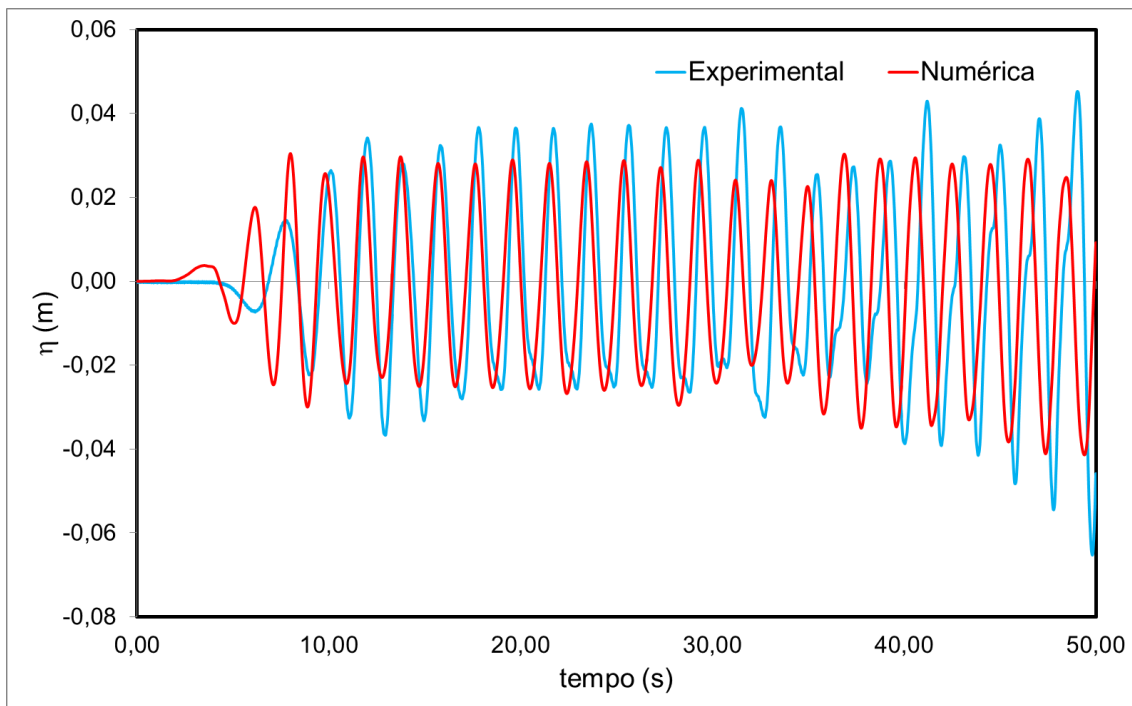


Figura 5.5 - Elevação da superfície da onda na sonda P_0 em função do tempo para o caso 3.1 ($H_1/L_1 = 0,65$).

Na Tabela 5.1 é possível observar os resultados dos erros relativos nas sondas P_0 para diversos intervalos de tempo. No intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$) é observada uma diferença oscilando entre 0,83% a 2,15% para os resultados dos casos analisados na sonda P_0 .

Tabela 5.1. Valores dos erros relativo na sonda P_0 para diversos intervalo de tempo.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	$E_R (t \leq 10\text{s})$	$E_R (10\text{s} \leq t \leq 30\text{s})$	$E_R (30\text{s} \leq t \leq 50\text{s})$	$E_R (t \leq 50\text{s})$
1.0	21,3°	0,39	0,81%	0,58%	1,10%	0,83%
1.1	23,7°	0,44	1,07%	1,08%	0,94%	1,03%
2.0	26,6°	0,50	1,09%	1,27%	1,54%	1,34%
3.0	30,5°	0,59	1,36%	1,83%	2,86%	2,15%
3.1	33,0°	0,65	0,84%	1,68%	3,21%	2,13%

As Figuras 5.6 a 5.8 mostram as comparações da onda do modelo numérico e a onda do modelo físico na sonda P_1 no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$) para os casos 1.0, 1.1 e 2.0. Para análise do fenômeno vale considerar três faixas de tempo indicadas na Tab. 5.2.

Na primeira faixa de tempo, para $0,00 \text{ s} \leq t \leq 20,00 \text{ s}$, observa-se que, em todos os casos analisados, há similaridade com a fenomenologia observada nos resultados para sonda P_0 , ou seja, as mesmas tendências de defasagem entre as ondas geradas experimentalmente e numericamente. A principal diferença com relação aos casos monitorados na sonda P_0 são relacionados à defasagem de tempo para que a onda alcance a sonda P_1 . Os desvios observados apresentam valores entre 1,35% a 1,84% entre as amplitudes de cristas e cavas na comparação com os resultados experimentais. Estas diferenças tendem a diminuir quando analisado todo intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$).

Na segunda faixa de tempo, para $20,00 \text{ s} \leq t \leq 30,00 \text{ s}$, a altura da superfície livre da onda em função do tempo assume um comportamento cíclico estável nos casos 1.0, 1.1 e 2.0. Também pode-se observar a tendência da amplitude da onda experimental apresentar magnitude superior no caso 2.0 para este intervalo de tempo ($20,00 \text{ s} \leq t \leq 30,00 \text{ s}$), nas alturas das cavas. Nesta faixa de tempo, são observadas diferenças entre 2,57% a 2,86% entre as amplitudes de cristas e cavas.

Posteriormente, na terceira faixa de tempo, para $30,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$, nota-se uma diminuição gradual mais acentuada nas amplitudes das ondas numéricas comparando-se entre os casos progressivamente das ondas numéricas conforme houve aumento da razão H_1/L_1 . Para as ondas geradas experimentalmente, as variações de magnitudes entre crista e cava não sofreram um achatamento tão grande quanto o observado nos casos numéricos. Nesta faixa de tempo, assim como para a sonda P_0 , os resultados mostram os efeitos consideráveis da reflexão das rampas nos casos numéricos e experimentais e das paredes nos casos experimentais.

Os efeitos da reflexão interferiram na altura e no período das ondas. Além disso, pode-se observar o comportamento de quebra das ondas, quando se atinge a rampa do dispositivo de galgamento. Este tipo de quebra das ondas é classificado como de rebentação progressiva (*spilling*), devido à inclinação suave da rampa, este efeito também foi observado nos trabalhos de Goulart (2014), e Martins *et al.* (2018).

Destacando-se que este tipo de quebra da onda ocorreu em todos os casos experimentais e no caso 2.0 numérico. Observou-se diferenças entre 2,28% e 4,55% nas amplitudes de cristas e cavas. Sendo estas as maiores diferenças encontradas entre todos as faixas de tempo analisadas da sonda P_1 .

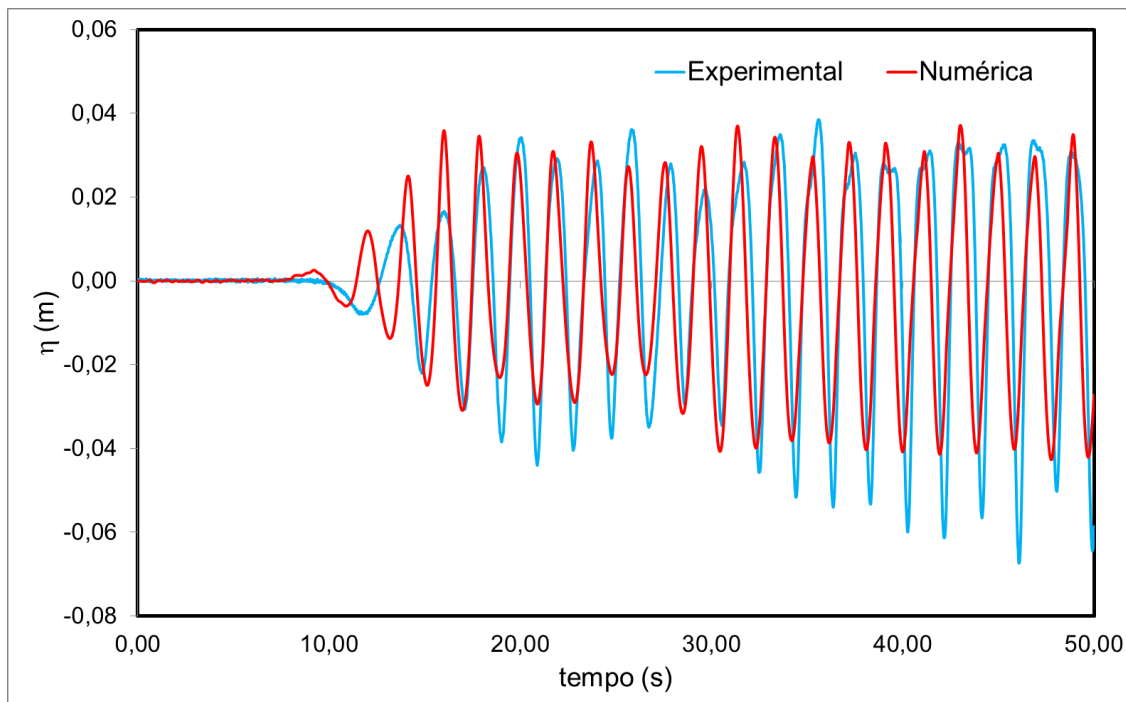


Figura 5.6 - Elevação da superfície da onda na sonda P_1 em função do tempo para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$).

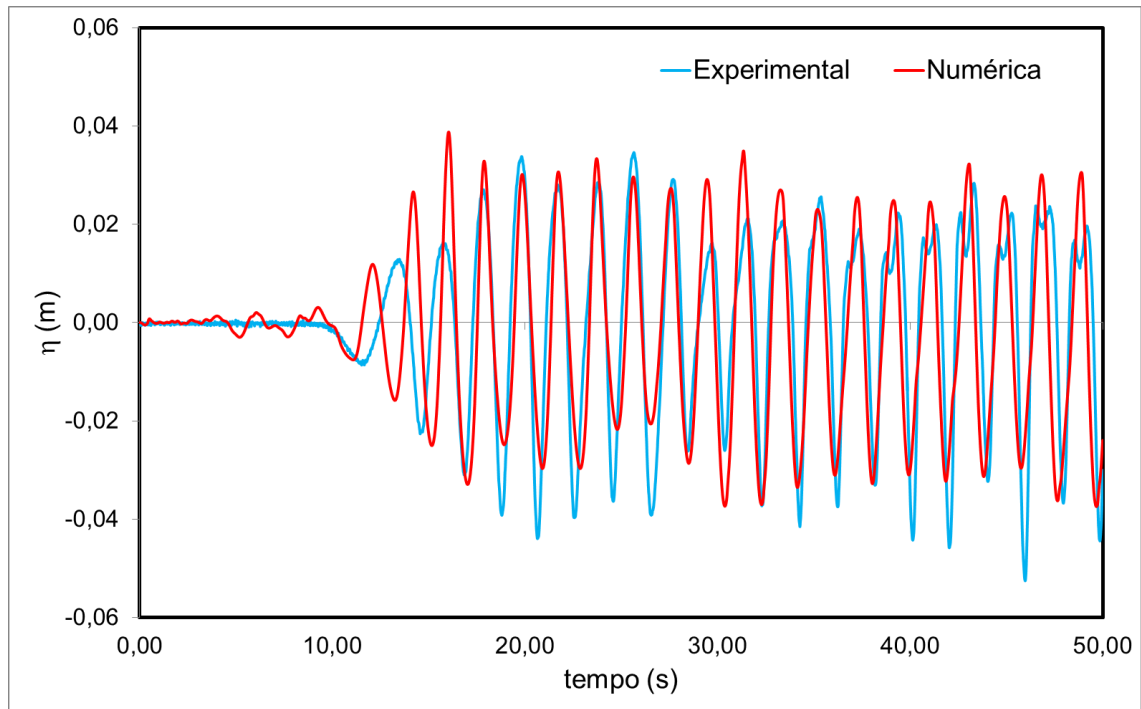


Figura 5.7 - Elevação da superfície da onda na sonda P₁ em função do tempo para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$).

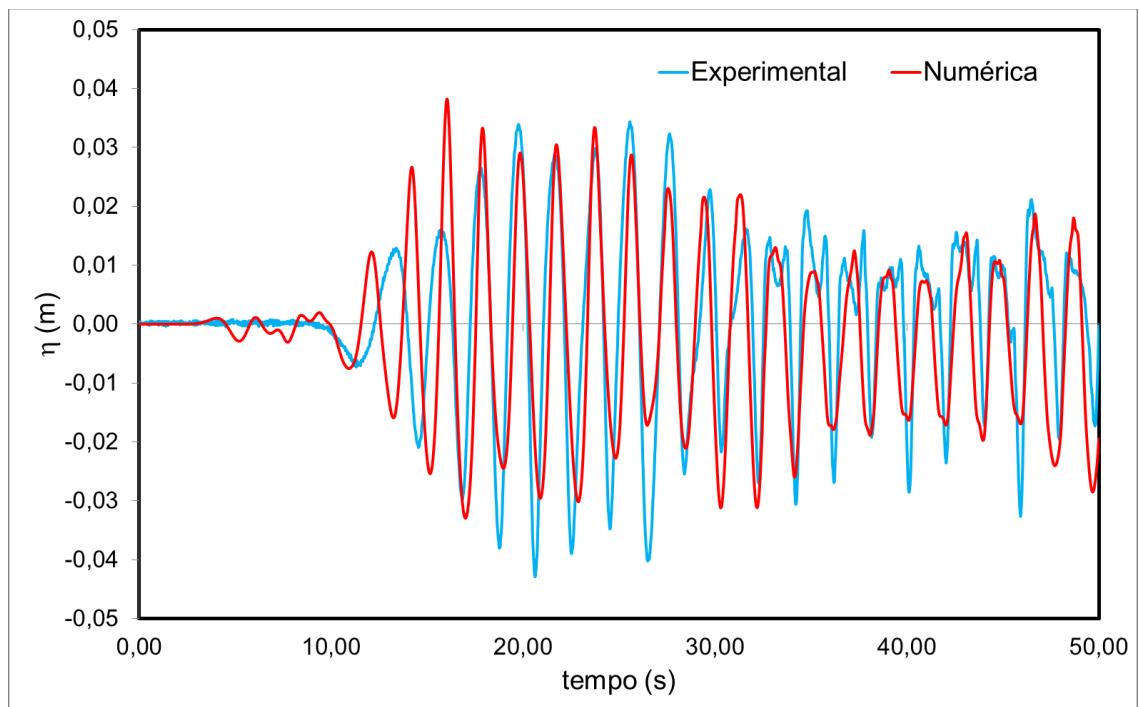


Figura 5.8 - Elevação da superfície da onda na sonda P₁ em função do tempo para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$).

Na Tabela 5.2 é possível visualizar os resultados dos erros relativos na sonda P_1 para diversos intervalos de tempo e casos investigados.

No intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$) é observada uma diferença oscilando entre 2,26% a 3,84% para os resultados dos casos analisados na sonda P_1 .

Tabela 5.2. Valores dos erros relativo na sonda P_1 para diversos intervalo de tempo.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	$E_R (t \leq 20\text{s})$	$E_R (20\text{s} \leq t \leq 30\text{s})$	$E_R (30\text{s} \leq t \leq 50\text{s})$	$E_R (t \leq 50\text{s})$
1.0	21,3°	0,39	1,35%	2,79%	4,55%	2,92%
1.1	23,7°	0,44	1,75%	2,57%	3,18%	2,48%
2.0	26,6°	0,50	1,84%	2,86%	2,28%	2,22%

De uma forma geral, é possível observar que o modelo numérico adotado neste estudo apresenta um comportamento satisfatório quando comparado com a solução experimental.

Os resultados obtidos aqui foram concordantes nos estudos realizados em Goulart *et al.* (2018) com a mesma metodologia, porém sem a presença do dispositivo de galgamento no canal de ondas.

Os erros relativos e os resultados instantâneos de elevação da superfície livre da onda indicam que o modelo numérico pode ser considerado validado para a representação do escoamento de ondas no canal estudado, independente da configuração do dispositivo inserido no canal de ondas.

Para maiores magnitudes da razão H_1/L_1 , houve uma maior influência do efeito de reflexão para os casos numéricos, causando diferenças mais significativas entre os resultados numéricos e experimentais.

Tais diferenças podem estar associadas ao emprego de um modelo computacional com domínio bidimensional, que forçam a reflexão a ocorrer apenas na direção principal do escoamento.

5.2. Análise Numérica e Experimental de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório

O rendimento dos dispositivos de galgamento está diretamente relacionado com a geometria destes dispositivos. Naturalmente, quanto maior for este rendimento, maior será o retorno energético e monetário.

A validação do galgamento é uma etapa essencial no desenvolvimento do estudo em questão, que trata deste problema de otimização consiste no primeiro momento em calcular numericamente a altura da água galgada no reservatório (h_R) para várias geometrias do dispositivo de galgamento (rampa e reservatório) inserido em um canal de ondas regulares em escala de laboratório.

Neste estudo também deve-se considerar em uma segunda etapa, na qual diferentes profundidades da superfície livre da água (h_1) foram investigadas, avaliando as influências na altura da água galgada no reservatório (h_R) e posteriormente comparando resultados numéricos e experimentais. O objetivo é otimizar o grau de liberdade H_1/L_1 (razão entre a altura e o comprimento da rampa), isto é, determinar o design que maximiza a massa de água que entra no reservatório, avaliado pela altura da água galgada no reservatório (h_R).

Foram mantidas constantes a área total do tanque de ondas (A_T), Eq. (3.1), área da rampa do dispositivo de galgamento (A_r), Eq. (3.2), por consequência a relação entre as áreas da rampa e do canal de ondas (ϕ), Eq. (3.3). Além destas áreas, foram mantidos fixos outros parâmetros $H_T/L_T = 0,03$ (relação entre a altura do canal, $H_T = 1,0$ m e o comprimento do mesmo, $L_T = 34,20$ m), distâncias entre o nível inicial do reservatório (d) do dispositivo e o fundo do canal de $S_D = 0,15$ m e o comprimento do reservatório, $L_R = 0,50$ m.

Maiores características do tanque de ondas e do dispositivo podem ser observadas no Cap. 3. Em suma, o processo de otimização numérica consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de H_1/L_1 , variações estas, indicadas na Tab. 4.1.

Nas Figuras 5.9 a 5.28 são apresentados o comportamento transiente da altura de água acumulada mensurada no reservatório para os casos 1.0, 1.1, 2.0 e 3.0 obtidos numericamente e experimentalmente no intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$.

Pode-se observar a variação da altura da água galgada no reservatório (h_R) nos respectivos instantes de tempo que ocorrem as descargas de galgamento, estas descargas apresentaram um comportamento cíclico para os casos onde ocorreu galgamento.

Para quantificar a diferença entre a solução numérica e a solução experimental para a variação da altura da água galgada no reservatório (h_R), medida pela sonda P₂ situada no interior do reservatório e ilustrada nas Figs. 4.6 e 4.11, foi utilizado como critério o erro relativo definido pela Eq. (3.10).

Na Figura 5.9 é possível observar o comportamento transiente do escoamento da onda para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no reservatório para um intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$ obtidos experimentalmente e numericamente.

É possível notar que a primeira descarga do galgamento no interior do reservatório ocorreram aproximadamente no mesmo instante de tempo ($t \sim 22 \text{ s}$) para ambos os casos. Os valores encontrados para a altura final da água galgada no reservatório (h_R) apresentam valores 0,249 m (numérico) e 0,248 m (experimental), também é observada uma diferença 0,40% (Tab. 5.3) para o erro relativo entre os resultados numérico e experimental.

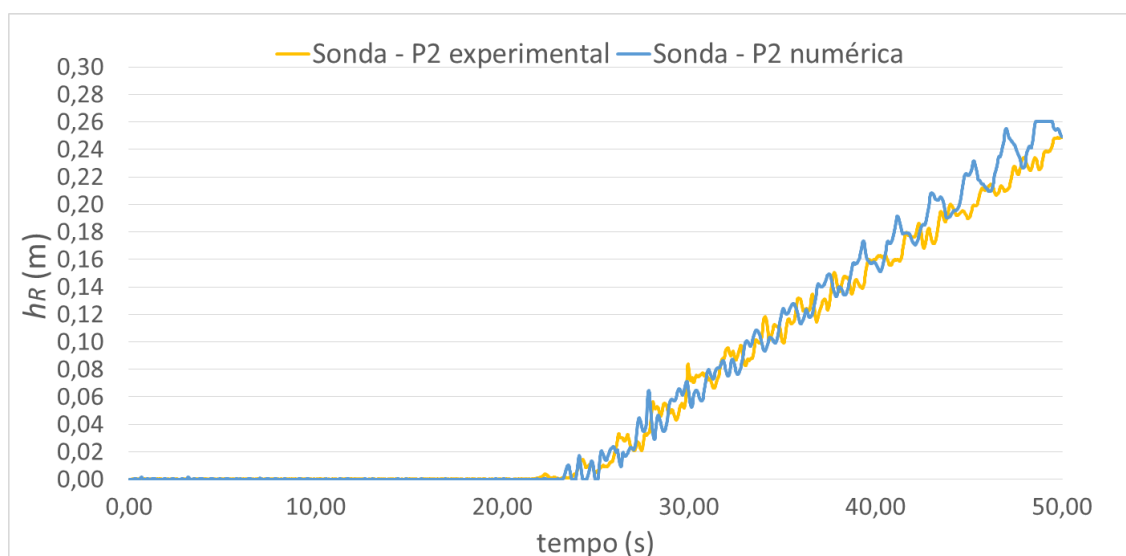


Figura 5.9 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$).

Nas Figuras 5.10 e 5.11 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no reservatório. Registra-se o

momento em que a primeira descarga do galgamento ocorre no interior do reservatório ($t \sim 22$ s) para os casos numérico e experimental.



Figura 5.10 – Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 22$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

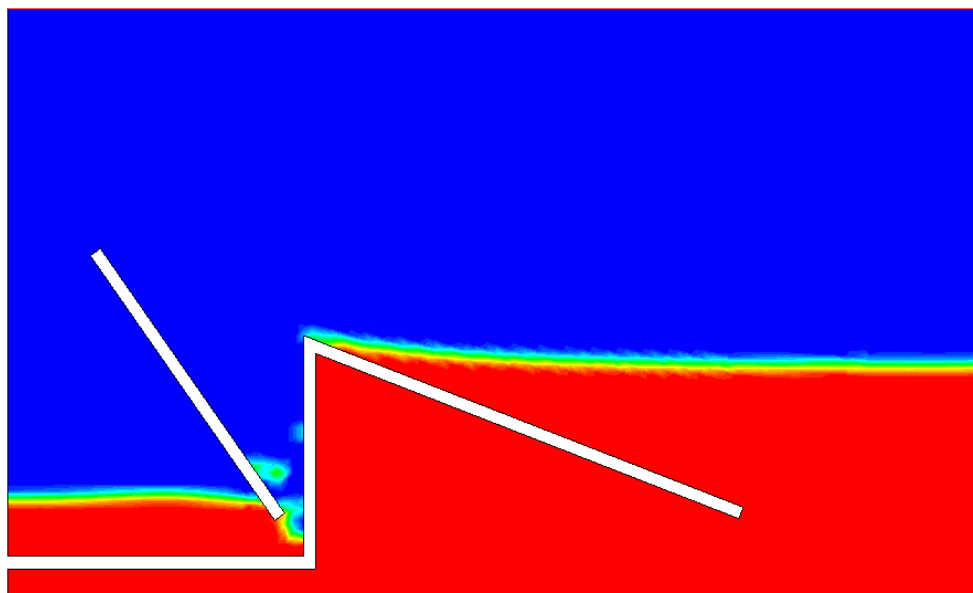


Figura 5.11 – Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 22$ s.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no reservatório. Registra-se o momento em que foi encerrada a análise dos casos numérico e experimental ($t \sim 50$ s).

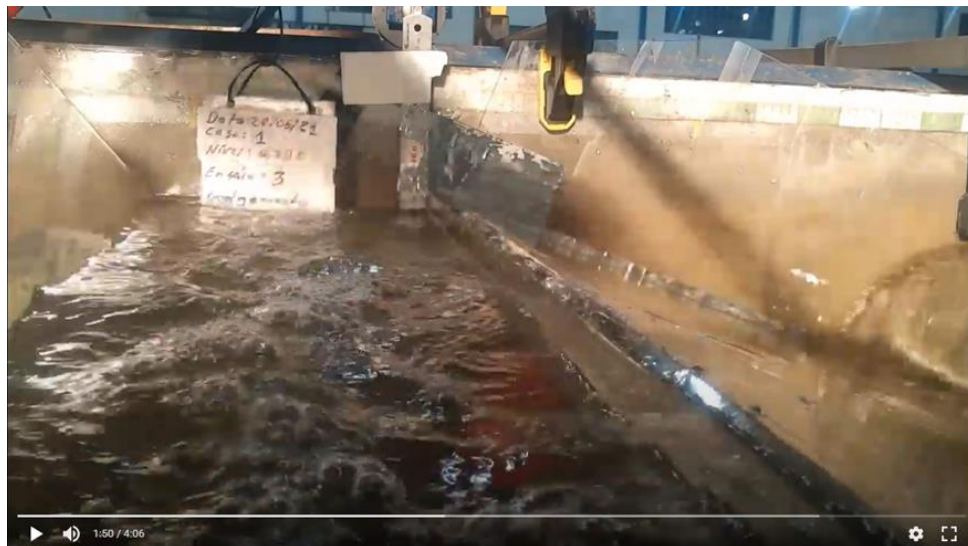


Figura 5.12 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

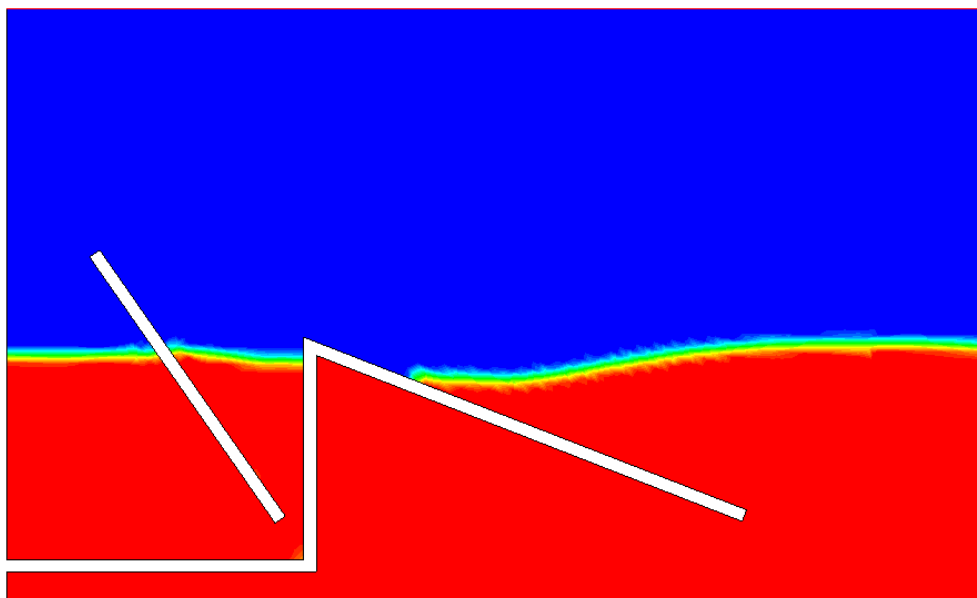


Figura 5.13 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 1.0 ($H_1/L_1 = 0,39$) no instante de tempo $t = 50$ s.

Na Figura 5.14 é possível observar o comportamento transiente instantâneo do escoamento da onda para o caso 1.1 - $H_1/L_1 = 0,44$ no reservatório para um intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$ obtidos experimentalmente e numericamente. Observa-se que a primeira descarga do galgamento no interior do reservatório ocorreram aproximadamente no mesmo instante de tempo ($t \sim 24 \text{ s}$) para ambos os casos. Os valores encontrados para altura da água galgada no reservatório (h_R) apresentam valores 0,134 m (numérico) e 0,132 m (experimental), (Tab. 5.3). Além disso, também é observada uma diferença de 1,52% (Tab. 5.3) para o erro relativo entre os casos numérico e experimental.

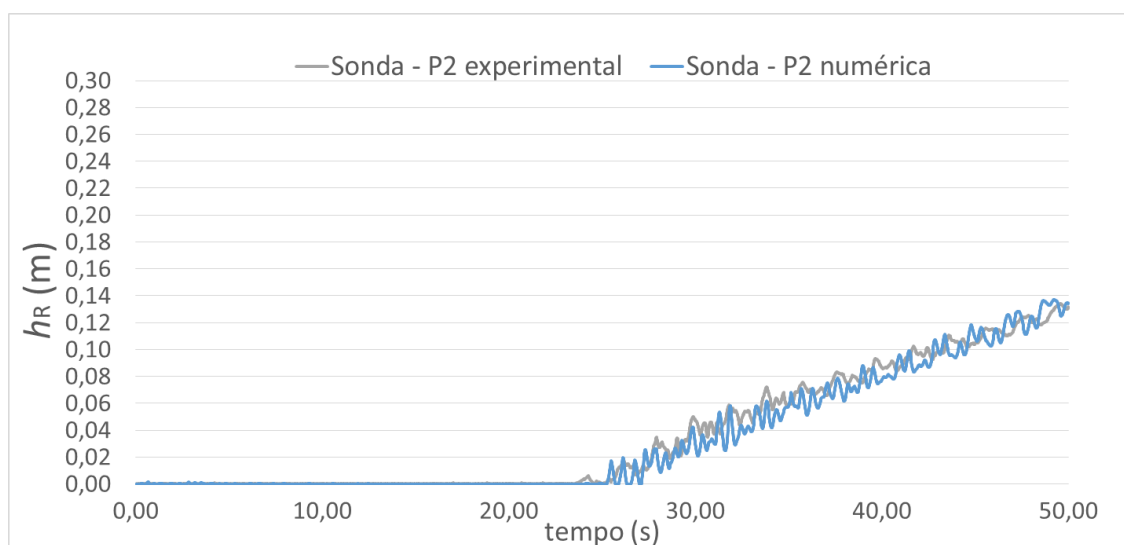


Figura 5.14 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$).

Nas Figuras 5.15 e 5.16 é possível observar o comportamento transiente do escoamento da onda para o caso 1.1 - $H_1/L_1 = 0,44$ no reservatório. Registra-se o momento em que a primeira descarga do galgamento ocorrem no interior do reservatório ($t \sim 24 \text{ s}$) para os casos numérico e experimental.



Figura 5.15 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 24$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

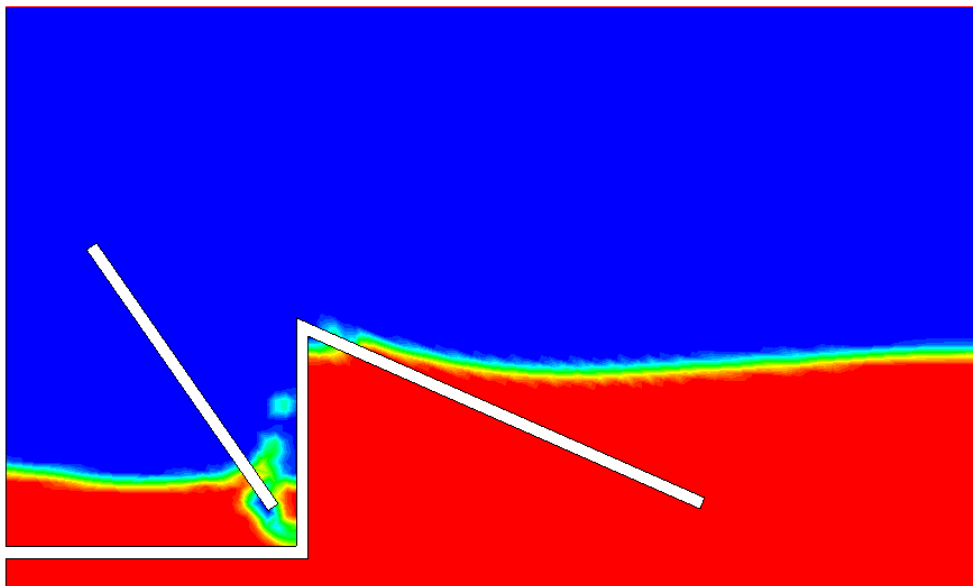


Figura 5.16 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 24$ s.

Nas Figuras 5.17 e 5.18 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 1.1 - $H_1/L_1 = 0,44$ no reservatório. Registra-se o momento em que foi encerrada a análise dos casos numérico e experimental ($t \sim 50$ s).



Figura 5.17 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

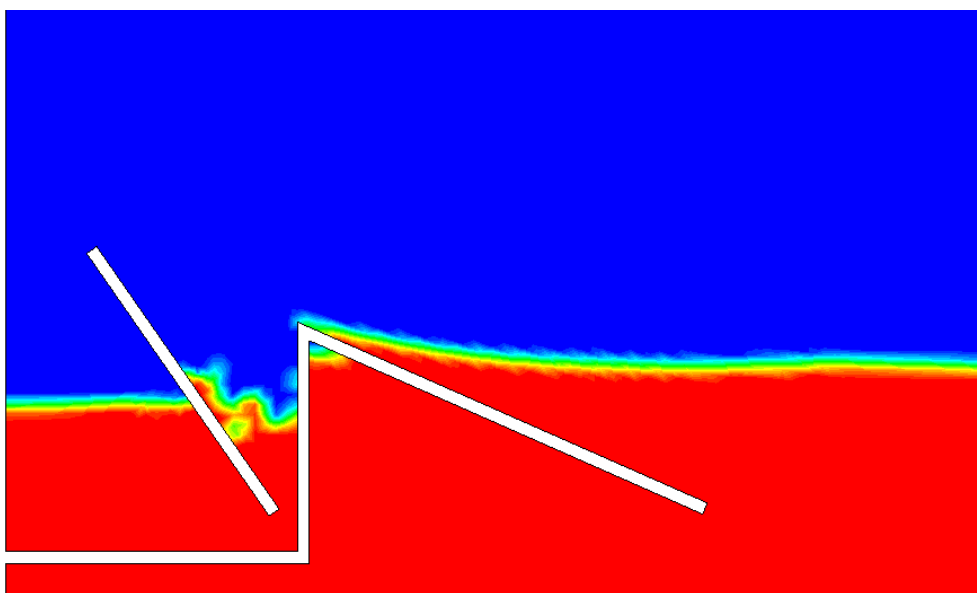


Figura 5.18 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 1.1 ($H_1/L_1 = 0,44$) no instante de tempo $t = 50$ s.

Na Figura 5.19 é possível observar o comportamento transiente do escoamento da onda para o caso 2.0 - $H_1/L_1 = 0,50$ no reservatório para um intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$ obtidos experimentalmente e numericamente. Nota-se que a primeira

descarga do galgamento no interior do reservatório ocorreu aproximadamente no instante de tempo 25 s, para o resultado experimental e aproximadamente no instante de tempo 20 s, para resultado numérico. É possível observar que após $t \sim 30$ s, os resultados numéricos e experimentais possuem a mesma taxa de crescimento de h_R em função do tempo.

Os valores encontrados para altura da água galgada no reservatório (h_R) final apresentam valores 0,049 m (numérico) e 0,051 m (experimental), também é observada uma diferença 3,92% (Tab. 5.3) para o erro relativo entre os resultados numérico e experimental.

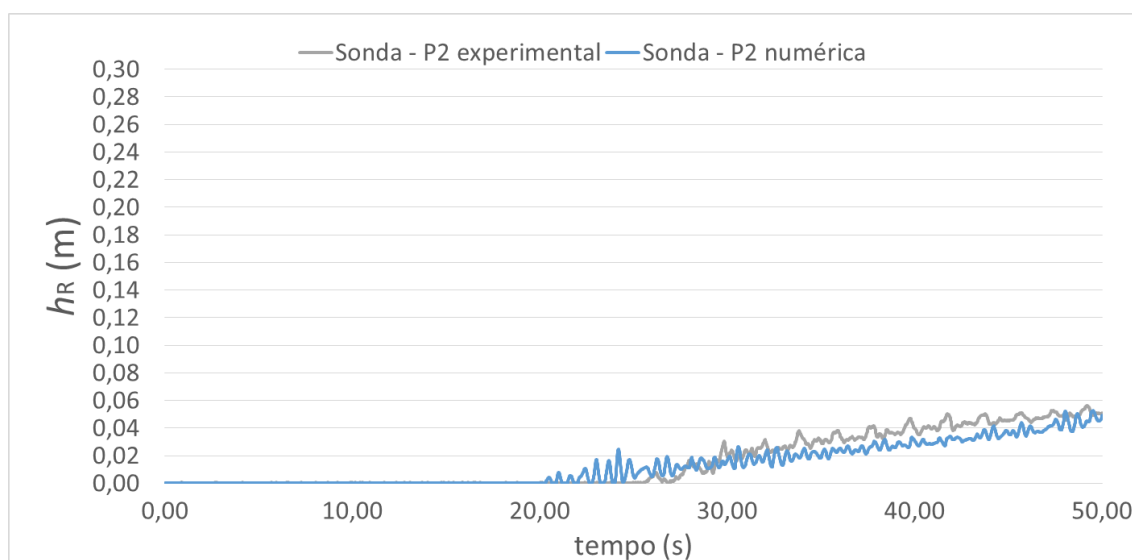


Figura 5.19 - Comportamento transiente da altura de água galgada no reservatório para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$).

Nas Figuras 5.20 e 5.21 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no reservatório ocorreu aproximadamente no instante de tempo 25 s, para o resultado experimental e aproximadamente no instante de tempo 20 s, para resultado numérico



Figura 5.20 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo experimental para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 25$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

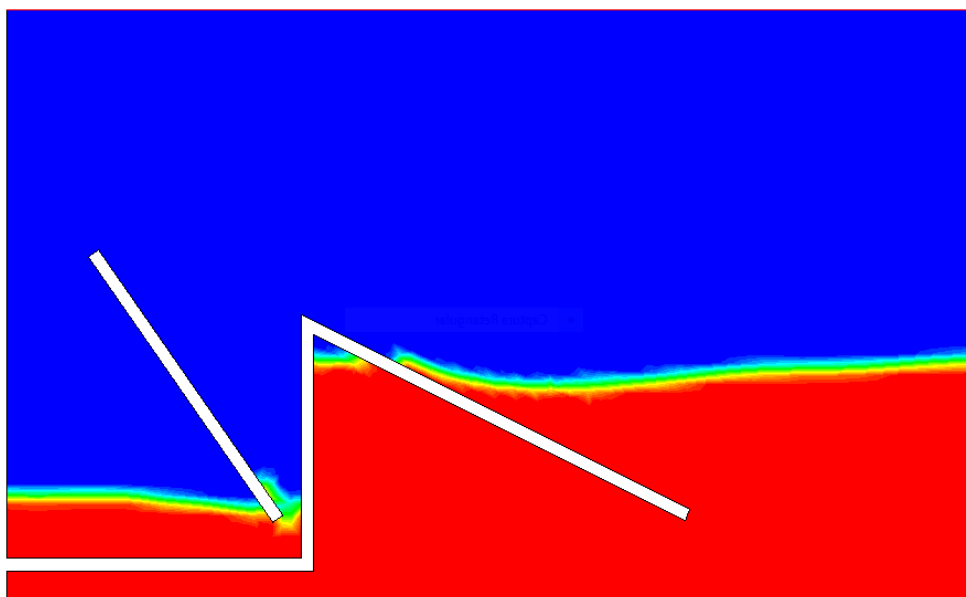


Figura 5.21 - Ilustração da ocorrência do primeiro galgamento no estudo numérico para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 20$ s.

Nas Figuras 5.22 e 5.23 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no reservatório. Registra-se o momento em que foi encerrada a análise dos casos numérico e experimental ($t \sim 50$ s).



Figura 5.22 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

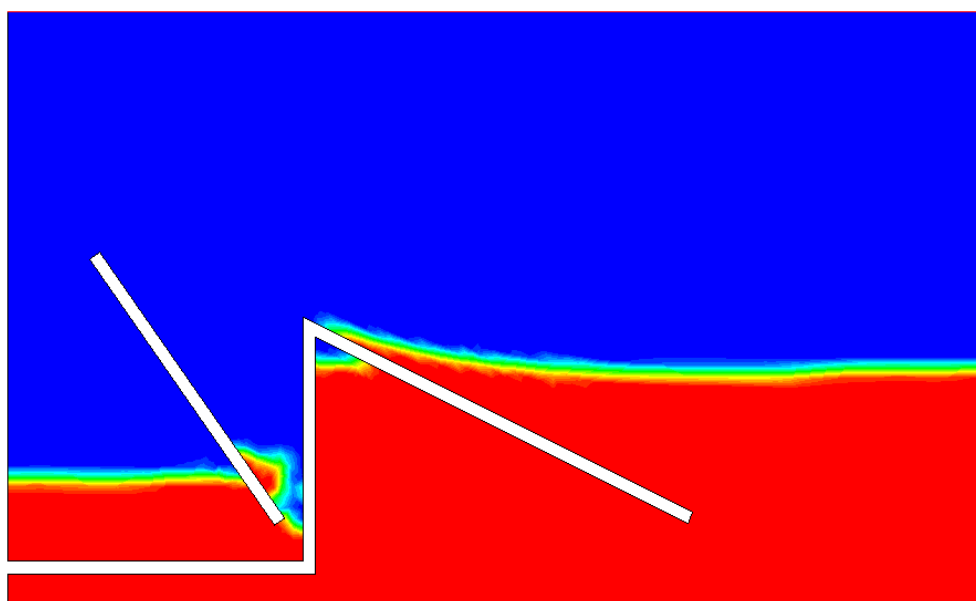


Figura 5.23 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 2.0 ($H_1/L_1 = 0,50$) no instante de tempo $t = 50$ s.

Na Figura 5.24 é possível observar o comportamento transiente do escoamento da onda para o caso 3.0 - $H_1/L_1 = 0,59$ no reservatório para um intervalo de tempo de $0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$ obtidos experimentalmente e numericamente. Verifica-se que a primeira descarga e única para este caso, do galgamento no interior do reservatório ocorreu aproximadamente no mesmo instante de tempo ($t \sim 29 \text{ s}$) para ambos os casos. Em função

das magnitudes serem inexpressivas que refletem alguma captura de oscilação das sondas numérica e experimental, para os intervalos de tempo inferiores a $t = 29$ s. Depois desse tempo, há uma pequena quantidade de galgamento ocorrendo nesse problema. Os valores encontrados para altura da água galgada no reservatório (h_R) final apresentam valores tendendo a zero (0,001 m a 0,001m). Também foi possível notar que, no instante de tempo de aproximadamente 50 s, a quebra da onda, que ocorreu diversas vezes neste caso, tem o efeito de minimizar sensivelmente a quantidade de água que galgou a rampa, devido a dissipação da energia contida na onda, ocorrida pela presença do dispositivo de galgamento. Observa-se a inexistência (Tab. 5.3) para o erro relativo entre os resultados numérico e experimental. Este caso, se comparado aos demais casos analisados onde houve galgamento, é o que apresentou menor magnitude para a altura da água galgada no reservatório (h_R) final.

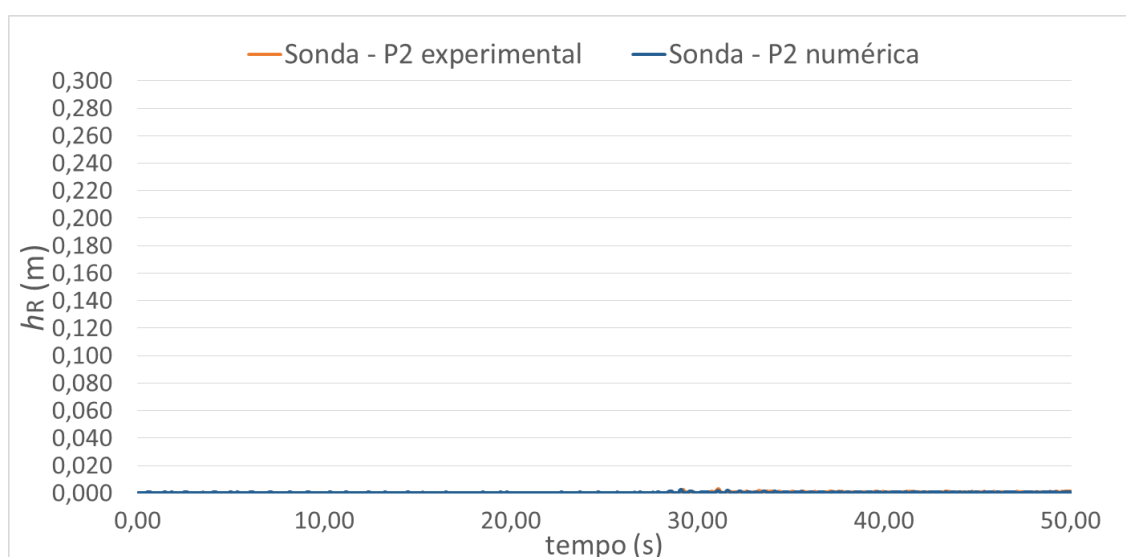


Figura 5.24 - Comportamento transiente da altura de água galgada para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$).

Nas Figuras 5.25 e 5.26 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no reservatório. Registra-se o momento em que a primeiras descargas do galgamento ocorre no interior do reservatório ($t \sim 29$ s) para os casos numérico e experimental.



Figura 5.25 - Ilustração da ocorrência do primeiro gargamento no estudo experimental para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 29$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

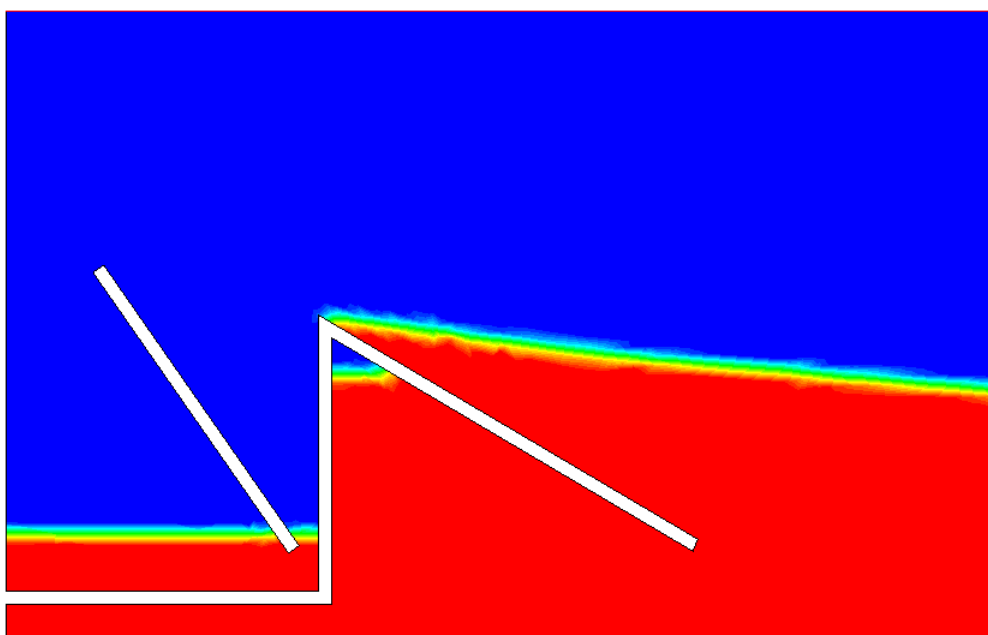


Figura 5.26 - Ilustração da ocorrência do primeiro gargamento no estudo numérico para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 29$ s.

Nas Figuras 5.27 e 5.28 é possível observar o comportamento instantâneo do escoamento da onda para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no reservatório. Registra-se o momento em que encerra-se a análise dos casos numérico e experimental ($t \sim 50$ s).



Figura 5.27 - Comportamento instantâneo experimental do dispositivo de galgamento para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 50$ s (ensaio iniciado após 60 s de filmagem).

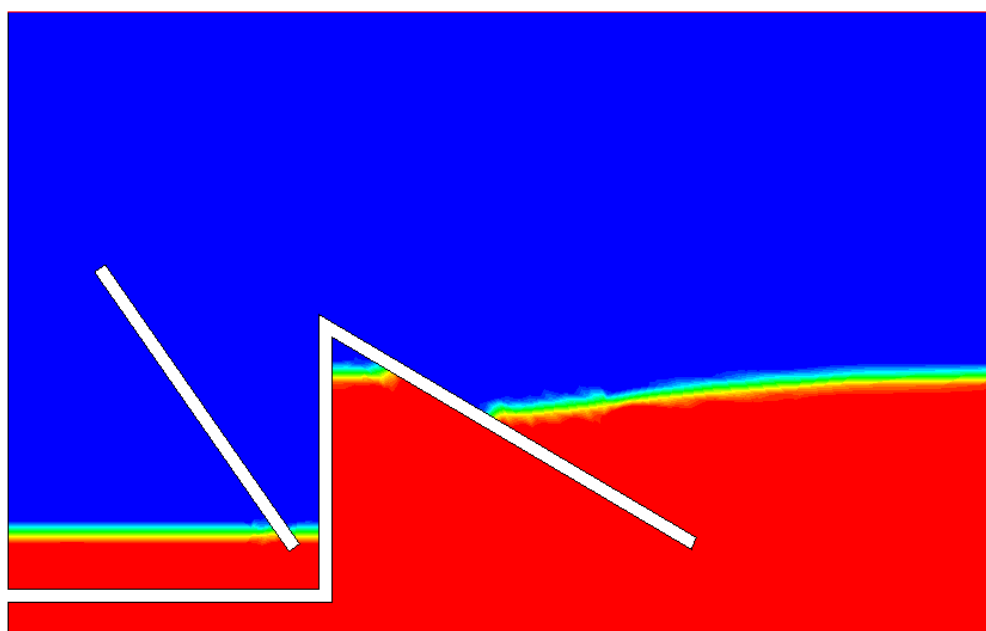


Figura 5.28 - Comportamento instantâneo numérico do dispositivo de galgamento para o caso 3.0 ($H_1/L_1 = 0,59$) no instante de tempo $t = 50$ s.

Na tabela 5.3 são apresentados os valores dos erros relativos na sonda P₂ no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$), para os casos numéricos e experimentais, quando foram observadas descargas de galgamento. Percebeu-se que não houve descargas de galgamento no interior do reservatório para ambos os casos. Nos casos 3.1 ($H_1/L_1 = 0,65$),

4.0 ($H_1/L_1 = 0,71$) e 5.0 ($H_1/L_1 = 0,80$), indicando que o aumento da razão H_1/L_1 conduz à redução do galgamento e que esse comportamento foi adequadamente predito pelo modelo numérico empregado. Observa-se que embora os erros relativos (E_R) tenham apresentado diferenças máximas entorno de 3,92%, quando analisadas todas as geometrias, as diferenças na altura da água galgada no reservatório (h_R) quando contabilizadas no tempo final de 50 s ficam no faixa de 1 mm a 3 mm na altura da água galgada no reservatório (h_R). Cabe ainda destacar um acréscimo no tempo para ocorrer a primeira descarga à medida que se varia a geometria, nos casos que ocorrem o galgamento.

Tabela 5.3. Valores dos erros relativos na sonda P₂ no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$).

Caso	Ângulo	H_1/L_1	h_R - caso numéricos	h_R - caso experimentais	$E_R (t \leq 50 \text{ s})$
1.0	21,3°	0,39	0,249 m	0,248 m	0,40
1.1	23,7°	0,44	0,134 m	0,132 m	1,52
2.0	26,6°	0,50	0,049 m	0,051 m	3,92
3.0	30,5°	0,59	0,001 m	0,001 m	0,00
3.1	33,0°	0,65	-	-	-
4.0	35,4°	0,71	-	-	-
5.0	38,7°	0,80	-	-	-

Os resultados instantâneos de h_R em função do tempo e os campos apresentados das ondas incidindo sobre o dispositivo capturados numericamente e experimentalmente indicam que o modelo computacional pode ser considerado validado para a reprodução do comportamento físico transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento.

5.3. Comparação Numérica e Experimental do Efeito de H_1/L_1 Sobre Altura da Água Galgada no Reservatório

Primeiramente, a fim de comparar os resultados obtidos nos 7 casos estudados (onde foram comparados os casos numéricos e experimentais), realizou-se um somatório de todos os valores encontrados para altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo

dos 50 s nos casos numéricos e experimentais, conforme pode ser visualizado na Tab. 5.4.

Tabela 5.4. Valores da altura da água galgada no intervalo de tempo ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$).

Caso	Ângulo	H_1/L_1	h_R - caso numéricos	h_R - caso experimentais
1.0	21,3°	0,39	0,249 m	0,248 m
1.1	23,7°	0,44	0,134 m	0,132 m
2.0	26,6°	0,50	0,049 m	0,051 m
3.0	30,5°	0,59	0,001 m	0,001 m
3.1	33,0°	0,65	-	-
4.0	35,4°	0,71	-	-
5.0	38,7°	0,80	-	-

Para tal, a Fig. 5.29 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo do tempo. Pode ser observado que há uma razão de $(H_1/L_1)_o = 0,39$, que maximiza a altura da água galgada no reservatório (h_R) para o instante de tempo $t = 50 \text{ s}$. A altura da água galgada no reservatório (h_R) máxima para este caso foi de aproximadamente $h_{Rm} = 0,25 \text{ m}$, tanto no estudo numérico quanto experimental. Entre os casos analisados numericamente e experimentalmente, o caso com menor quantidade de água galgada foi o caso de maior razão $H_1/L_1 = 0,59$, onde a quantidade total de água encontrada no reservatório do dispositivo de galgamento ao final dos 50 s apresentaram valores tendendo a zero (0,001 m a 0,001 m). A partir de $H_1/L_1 = 0,65$, não foi observado galgamento em ambas abordagens. Uma importante observação é que os resultados numéricos e experimentais apresentaram grande concordância. Assim, o modelo numérico não apenas é capaz de reproduzir o fenômeno físico de um caso de galgamento como também a predição do efeito da razão H_1/L_1 sobre o indicador de performance do dispositivo, nesse caso (h_R). Consequentemente, o presente trabalho mostra de forma inédita a validação de uma curva de efeito geométrico sobre o desempenho do dispositivo através da aplicação do método Design Construtal. Além disso, os resultados claramente demonstram a capacidade do método numérico empregado aqui para o projeto fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento.

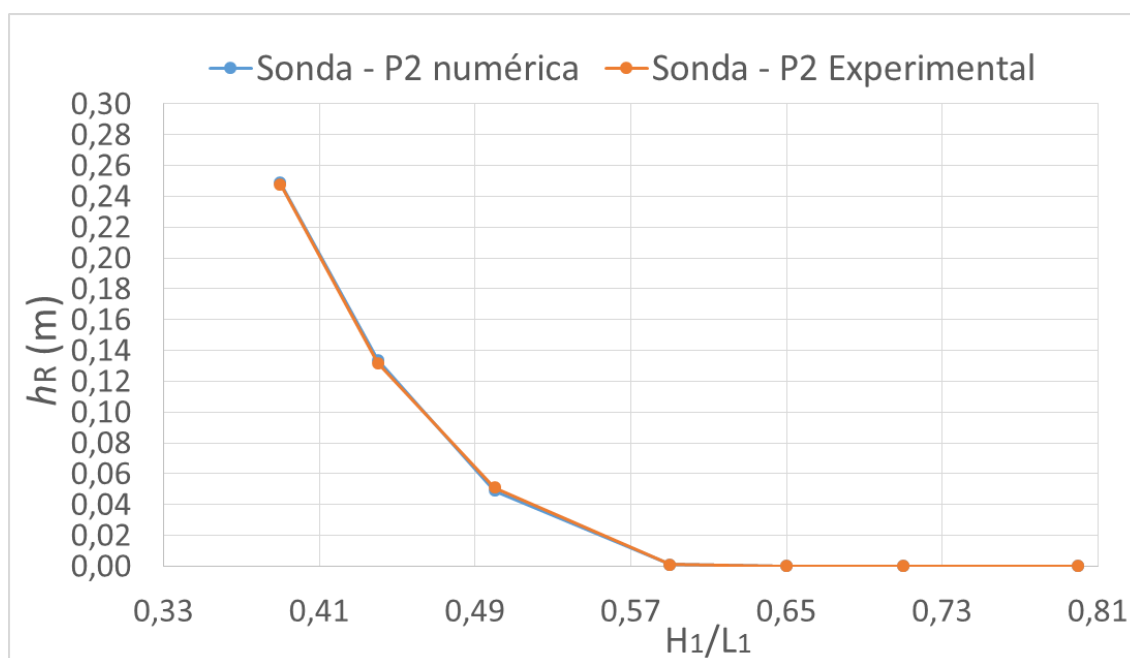


Figura 5.29 - Efeito da razão H_1/L_1 sobre a altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo tempo ($0.00 \text{ s} \leq t \leq 50.00 \text{ s}$).

Na Figura 5.29 observa-se também, que o melhor desempenho sempre foi obtido para as menores relações de H_1/L_1 . Onde a altura da água que entra no reservatório (h_R) uma vez maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_o = 0.39$, foi 5 vezes superior nos resultados numéricos e experimentais à encontrada para a geometria onde a menor altura da água galgada no reservatório (h_R) expressiva ocorreu ($H_1/L_1 = 0,50$) e quando foi considerado o caso com a menor altura da água galgada (1 onda) no reservatório ($H_1/L_1 = 0,59$) foi 124 vezes superior em seu desempenho nos resultados numéricos e experimentais (Tab. 4.1).

5.4. Novas Recomendações Experimentais do Efeito de H_1/L_1 Sobre Altura da Água Galgada no Reservatório Para Diferentes Profundidades de Lâmina de Água

Para concluir o presente estudo, vários experimentos em laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de obter recomendações sobre o efeito de H_1/L_1 sobre h_R para diferentes profundidades de lâmina de água. A Figura 5.30 apresenta o efeito da razão altura/comprimento da rampa (H_1/L_1) sobre altura da água galgada no reservatório (h_R) do dispositivo de galgamento para diferentes profundidades da superfície livre da água (h_1), comparando resultados numéricos e experimentais ao longo do intervalo de

tempo analisado ($0,00 \text{ s} \leq t \leq 50,00 \text{ s}$). Deve-se salientar que somente o caso com $h_1 = 0,392 \text{ m}$ tem comparação numérico-experimental.

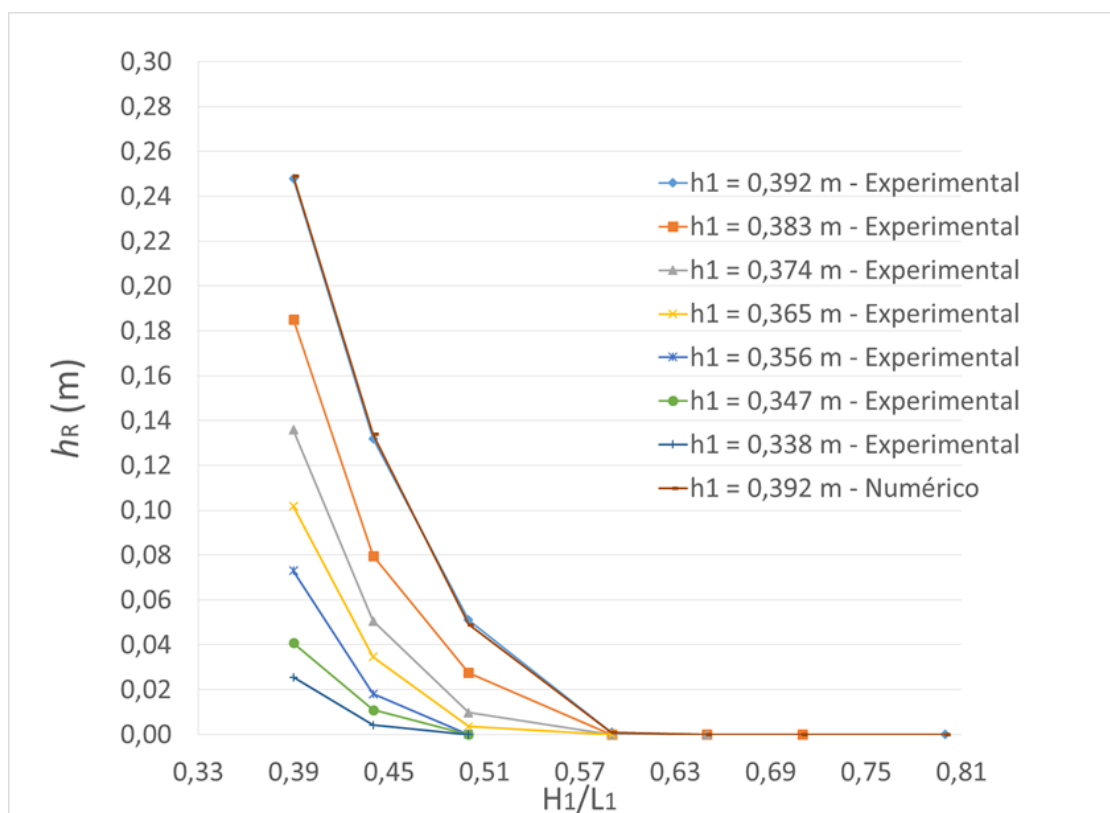


Figura 5.30 - Efeito da razão H_1/L_1 sobre a altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo do tempo para diferentes profundidades da superfície livre da água.

Pode ser observado que para cada altura h_1 diferentes faixas de aplicação do dispositivo são definidas, ou seja, valores para a razão H_1/L_1 onde ocorre galgamento. Por exemplo, para $h_1 = 0,392 \text{ m}$ o galgamento ocorre na faixa $0,39 \leq H_1/L_1 \leq 0,59$ enquanto que para $h_1 = 0,338 \text{ m}$ a ocorrência se deu na faixa $0,39 \leq H_1/L_1 \leq 0,44$.

A máxima altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo do tempo foi obtida para $h_1 = 0,392 \text{ m}$ para razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,39$. A altura da água galgada no reservatório máxima para este caso foi de $h_{Rm} = 0,25 \text{ m}$.

Vale notar que para cada curva h_1 apresentada, as maiores magnitudes foram obtidas no extremo inferior das razões H_1/L_1 avaliadas, sendo essas razões denominadas de uma vez otimizada.

A Figura 5.30 também ilustra que o aumento da razão H_1/L_1 conduz a uma diminuição na altura da água galgada no reservatório (h_R), até um limite inferior onde não

ocorrerá o galgamento. Cabe-se salientar que as comparações na sequência foram consideradas os casos com mínimas descargas do galgamento (Tab. 5.5).

Nesta mesma ótica notou-se que as melhores geometrias para cada altura h_1 conduziram a desempenhos muito superiores aos obtidos para as piores geometrias. A maior melhoria foi observada para $h_1 = 0,392$ m, onde a altura da água galgada no reservatório (h_R) uma vez maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_o = 0,39$, foi 124 vezes superior à encontrada para a geometria onde a menor altura da água galgada no reservatório (h_R) ocorreu ($H_1/L_1 = 0,59$).

A menor melhoria foi notada para a razão superior de $h_1 = 0,347$ m onde a geometria ótima, $(H_1/L_1)_o = 0,39$, foi 4 vezes superior à pior geometria obtida para $H_1/L_1 = 0,44$. Comparando o desempenho entre a melhor e pior geometrias globais, dadas, respectivamente, por ($h_1 = 0,392$ m e $(H_1/L_1)_o = 0,39$) e ($h_1 = 0,347$ m e $H_1/L_1 = 0,44$) obtém-se um desempenho aproximadamente 23 vezes superior.

Tabela 5.5. Valores experimentais da altura da água galgada no reservatório (h_R) ao longo do tempo para diferentes profundidades da superfície livre da água.

Razão	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1	h_R p/ h_1
H_1/L_1	0,392 m	0,383 m	0,374 m	0,365 m	0,356 m	0,347 m	0,338 m
0,39	0,248 m	0,185 m	0,136 m	0,102 m	0,073 m	0,041 m	0,026 m
0,44	0,132 m	0,080 m	0,051 m	0,035 m	0,018 m	0,011 m	0,004 m
0,50	0,051 m	0,027 m	0,010 m	0,004 m	0,000 m	-	-
0,59	0,001 m	0,000 m	0,000 m	0,000 m	-	-	-
0,65	0,000 m	0,000 m	0,000 m	-	-	-	-
0,71	0,000 m	0,000 m	-	-	-	-	-
0,80	0,000 m	-	-	-	-	-	-

No presente trabalho o melhor desempenho sempre foi obtido para as menores relações de H_1/L_1 . Além disso, no presente estudo não foi observado a presença de pontos de máximo local para relações intermediárias de H_1/L_1 , como observado em alguns casos de Machado (2012), Dos Santos *et al.* (2014) e Machado (2016), realizados por análise numérica em dispositivo *offshore*. Contudo, os resultados obtidos aqui foram concordantes com os resultados obtidos por análise numérica apresentados de Goulart (2014), Martins (2016), Martins *et al.* (2018) e Martins (2021), assim como, os estudos

experimentais em escala de laboratório para um dispositivo *onshore* de Kofoed (2002), que também obtiveram melhores resultados para as menores relações entre a altura da rampa do dispositivo pelo seu comprimento.

A Figura 5.31 permite observarmos o efeito da profundidade da lâmina da água h_1 sobre a altura da água galgada no reservatório uma vez maximizada (h_{Rm}), obtidas dos valores máximos apresentados na Fig. 5.30 e Tab. 5.5.

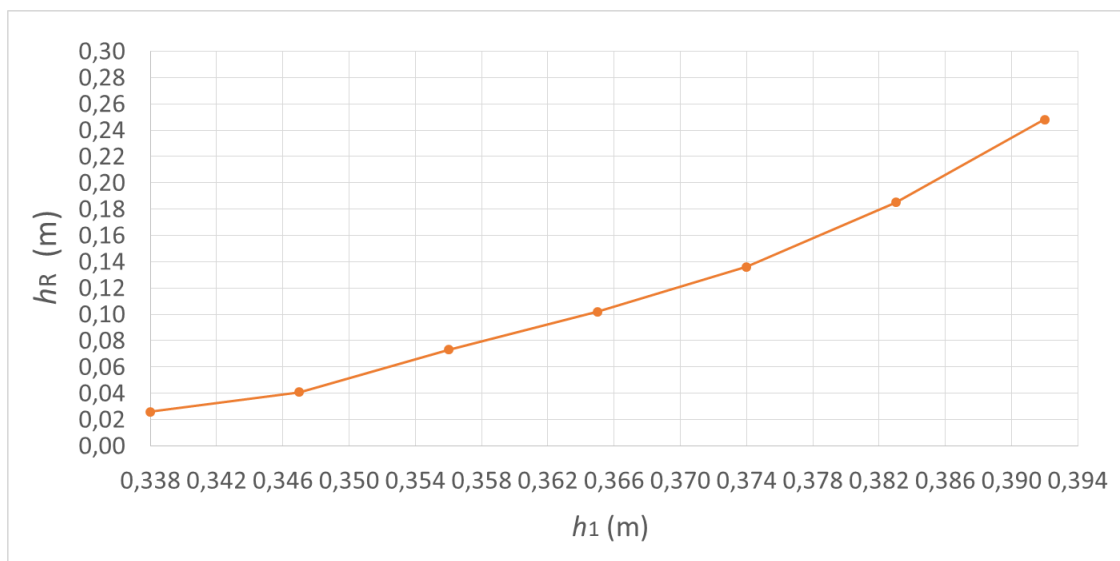


Figura 5.31 – Efeito profundidade da lâmina da água (h_1) sobre a altura da água galgada no reservatório uma vez maximizada (h_{Rm}).

Para as alturas $h_1 = 0,338$ m, $h_1 = 0,347$ m, $h_1 = 0,356$ m, $h_1 = 0,365$ m, $h_1 = 0,374$ m, $h_1 = 0,383$ m e $h_1 = 0,392$ m as alturas da água galgada no reservatório uma vez maximizada para estes casos foram respectivamente: $h_R = 0,026$ m, $h_R = 0,041$ m, $h_R = 0,073$ m, $h_R = 0,102$ m, $h_R = 0,136$ m, $h_R = 0,185$ m e $h_R = 0,248$ m. Assim, se os valores de h_R entre os casos estudados forem comparados, é possível determinar a altura da água galgada no reservatório duas vezes maximizada ($h_{Rmm} = 0,248$ m) para a geometria $h_{1o} = 0,392$ m e $(H_1/L_1)_{oo} = 0.39$. Também pode ser visto a inexistência de pontos de máximo local, ou seja, a geometria conduziu a um desempenho superior como aumento de h_1 , conforme era intuitivamente esperado. Pode ser observado que o Design Construtal permitiu um aumento significativo do desempenho do dispositivo. Por exemplo, se for comparada a altura da água galgada no reservatório uma vez maximizada (h_{Rm}) entre as

alturas $h_1 = 0,356$ m e $h_1 = 0,392$ m, pode-se inferir que a altura da água galgada no reservatório é aproximadamente 30% maior. Vale destacar ainda que, para razões de $h_1 < 0,356$ m a altura da água galgada no reservatório não conduziu a um desempenho satisfatório nas descargas de galgamento. Ocorreu uma piora significativa do desempenho do dispositivo, obtendo-se diferenças de 25,4%, 45,16% e 41,13% entre o melhor h_1 ($h_1 = 0,392$ m) e os casos $h_1 = 0,383$ m, $0,374$ m e $h_1 = 0,365$ m, respectivamente. Consequentemente, se houve variações na maré (profundidade da lâmina da água (h_1)) ou variações construtivas como por exemplo dispositivo de galgamento de múltiplos estágios (SSG), valores inferiores à $h_1 = 0,356$ m podem não ser os mais recomendados. Também se ressalta que a diminuição na profundidade da lâmina da água (h_1) conduz a uma restrição das descargas de galgamento, como considerado no presente estudo.

Finalmente, para descrever o efeito da profundidade da lâmina da água (h_1) sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada foram analisados os resultados de $(H_1/L_1)_o$ para todos os valores de h_1 considerados neste estudo. As geometrias ótimas encontradas para cada profundidade da lâmina da água (h_1) é a mesma para todos os casos analisados $(H_1/L_1)_o = 0.39$, ou seja, a configuração ótima das rampas do dispositivo de galgamento $(H_1/L_1)_o$ não apresentou sensibilidade sobre a profundidade da lâmina da água (h_1). Para valores de h_1 estudados na faixa ($0,338$ m $\leq h_1 \leq 0,392$ m) a variação de $(H_1/L_1)_o$ é constante. A geometria duas vezes otimizada foi obtida para $(h_1)_o = 0,392$ m e $(H_1/L_1)_{oo} = 0.39$, o que representa uma rampa com ângulo de $\alpha = 21,3^\circ$. Dessa forma, a mesma recomendação alcançada nos resultados anteriores é mantida aqui, ou seja, as menores razões de H_1/L_1 para a rampa foram as que conduziram ao melhor desempenho do dispositivo de galgamento.

Para finalizar, para todos os casos, o reservatório no intervalo de tempo (0.00 s $\leq t \leq 50.00$ s) não transbordou. Já para intervalos de tempo superiores a 50 s houve o transbordamento, esses casos não foram contabilizados na comparação de resultados ilustrados apresentados, pois eram restrições geométricas do problema.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico e experimental sobre a validação de um modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal sobre dispositivos de galgamento *onshore* em escala de laboratório, considerando o efeito da geometria sobre o desempenho do dispositivo empregando o método Design Construtal. Para a abordagem numérica dos escoamentos de ondas regulares incompressíveis, laminares em domínio bidimensional, as equações de conservação de massa e balanço da quantidade de movimento foram resolvidas através do MVF com o modelo VOF para abordagem da interface água-ar-estrutura. Mais precisamente, foi empregado o software ANSYS Fluent, v.18. O estudo experimental foi realizado no canal de ondas do IPH-UFRGS. Com relação à investigação geométrica, o problema avaliado possui dois graus de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa e a profundidade da superfície livre da água) e duas restrições geométricas (área ocupada pela rampa no canal de ondas simulado e uma restrição construtiva para o comprimento da rampa). A geometria foi variada visando maximizar a quantidade de água das ondas incidentes que entram no reservatório do dispositivo de galgamento.

O trabalho também comparou o efeito da geometria sobre altura da água galgada no reservatório do dispositivo de galgamento predito com o presente modelo numérico e o obtido com os experimentos em laboratório desenvolvidos no presente trabalho. Dessa forma, validar o modelo numérico para propagação de onda regular bidimensional em um canal de ondas, validar o modelo numérico desenvolvido para escoamentos de ondas em canal e sobre dispositivos de galgamento em escala de laboratório. Além disso, foi realizada uma avaliação geométrica variando a profundidade da superfície livre da água (h) analisando o efeito da maré.

Nas condições estabelecidas e válidas para o presente estudo, os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões a partir de análises numérica e experimental:

- o modelo numérico pode ser considerado validado para a representação do escoamento de ondas no canal estudado, independente da configuração do dispositivo inserido no canal de ondas. Os erros relativos (E_R) nas sondas P_0 e P_1 oscilaram respectivamente entre 0,83% a 2,15% e 2,22% a 2,92%. Para maiores magnitudes da razão H_1/L_1 , houve uma maior influência do efeito de reflexão para os casos numéricos, causando diferenças mais significativas entre os resultados numéricos e experimentais.

Tais diferenças podem estar associadas ao emprego de um modelo computacional com domínio bidimensional, que forçam a reflexão a ocorrer apenas na direção principal do escoamento. Os resultados obtidos aqui foram concordantes com estudos realizados em Goulart *et al.* (2018) com a mesma metodologia, porém sem a presença do dispositivo de galgamento no canal de ondas;

- Os resultados instantâneos de altura da água galgada no reservatório (h_R) em função do tempo e as imagens com o comportamento das ondas incidentes no dispositivo capturadas numericamente e experimentalmente indicaram que o modelo computacional pode ser considerado validado para a reprodução do comportamento físico transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento. Os resultados dos E_R para a predição de h_R apresentaram diferenças máximas entorno de 3,92%, quando analisadas todas as geometrias;

- Com relação à aplicação do método Design Construtal no presente problema, os resultados numéricos e experimentais apresentaram grande concordância para representação do efeito de H_1/L_1 sobre altura da água galgada no reservatório (h_R), mostrando que a abordagem numérica não apenas é capaz de reproduzir o fenômeno físico de um caso de galgamento como também pode ser utilizada, em associação com o Design Construtal, para obter recomendações de design nesse tipo de problema. Além disso, o presente estudo forneceu ainda mais confiabilidade em resultados prévios sobre a investigação geométrica nos dispositivos de galgamento. Os resultados também indicaram que as menores razões de $(H_1/L_1)_o = 0,39$ conduziram à maximização da altura da água galgada no reservatório (h_R) e as maiores razões de H_1/L_1 conduziram aos piores desempenhos para todos os valores de h_I analisados, corroborando observações prévias de dispositivos de galgamento *onshore* investigados nos trabalhos de Goulart *et al.* (2015), Machado (2016), Martins *et al.* (2018) e Martins (2021);

- A aplicação do método Design Construtal permitiu a obtenção de recomendações de design para a rampa que conduziram a desempenhos sensivelmente maiores do que os piores casos. Por exemplo, a maior melhoria foi observada para $h_I = 0,392$ m, onde a h_R uma vez maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_o = 0,39$, foi 124 vezes superior à encontrada para a geometria onde a menor h_R ocorreu ($H_1/L_1 = 0,59$);

- O presente estudo numérico e experimental permitiu a geração de banco de dados que permitirá a validação do modelo computacional em outras profundidades de lâminas de água e o uso do modelo computacional em novas recomendações.

Com relação ao prosseguimento deste trabalho são propostas as seguintes análises:

- Expandir as análises dos resultados dos casos onde não houve o galgamento para obtenção de uma recomendação teórica para construção de quebra-mar, utilizando Design Construtal;

- realizar estudos experimentais em dispositivo de galgamento (*offshore*) para obtenção de parâmetros com a finalidade de validação de modelos numéricos para simulações de dispositivos de galgamento (*offshore*) em escala real;

- desenvolver técnicas que permitam simulação numérica com a utilização da energia potencial armazenada no reservatório, inserindo-se uma turbina no sistema com objetivo de determinar o potencial energético resultante do dispositivo de galgamento em escala real (*onshore* e *offshore*);

- comparar por meio de simulação numérica a eficiência de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante (CAO) em escala de laboratório utilizando Design Construtal (validando a modelagem para outro dispositivo de conversão de energia das ondas). Mantendo-se os mesmos parâmetros de onda e profundidade da lâmina de água.

7. REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS Fluent: Theory Guide**, 2018

Alamian, R., Shafaghat, R., Miri, J., Yazdanshenas, N., Shakeri, M., 2014. **Evaluation of Technologies for Harvesting Wave Energy in Caspian Sea**, Renewable Energy, v. 32, p. 468–476.

Barbosa, D.; Dos Santos, D.; Goulart, M.; Souza, J.; Carvalho, O.; Dos Santos, E.; Isoldi, L., 2015. **Numerical Simulation and Solution Verification of an Overtopping Wave Energy Converter**. In: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro. v. 1.

Barbosa, D. V. E., Souza, J. A., Isoldi, L. A., Martins, J. C. **Numerical Analyses of Openfoam's Overtopping Device Solution**, Revista da Engenharia Térmica, vol. 16, p. 96–103, 2017.

Barbosa, D. Santos, A. L. G., Dos Santos, E.; Souza, J. A., 2019. **Overtopping Device Numerical Study: Openfoam Solution Verification**, International Journal of Heat and Mass Transfer and evaluation of curved ramps performances131: 411 ~ 423.

Beels C., Troch, P., Visch, K. De, Kofoed, J. P. and Backer, G. De., 2010. **"Application of Time-Dependent Mild Slope Equations for the Simulation of Wake Effects in the lee of a Farm of Wave Dragon Wave Energy Converters"**, Renew. Energ. 35: 1644 ~1661.

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

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

Bejan, A. and Zane, P., 2012. **"Design in Nature"**, 1st ed., Doubleday, USA.

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

Bejan, A. e Lorente, S., 2006, "**The Constructal Law**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, pp. 445-445.

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

Bejan, A., 1997, "**Constructal-Theory Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 4, Pp. 799–816.

Bhattacharyya, R. "**Dynamics of Marine Vehicles**". EUA, 1978.

Cabral, T., Clemente, D., Santos, P. R., Pinto, F. T., Morais, T., Belga, F., Cestaro, H. **Performance assessment of a hybrid wave energy converter integrated into a harbor breakwater**. Energies, 13, 236, 2020.

Carneiro, M. L., 2007. "**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, São Paulo - SP.

Carneiro, M. L., 2012. **Desenvolvimento de Sistema de Controle para Geração e Absorção Ativa de Ondas em Tanques de Ensaio de Estruturas Oceânicas**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP

Cerdeira, V. S. R., 2006. "**Estudo Sobre as Características Físicas de um Canal de Ondas**", Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 149 p.

Chakrabarti, S. K., 2005. "**Handbook of Offshore Engineering**". Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos.

Christensen, L., Madensen, E. F., Kofoed, J. P., Tedd, J., **"Worlds Largest Wave Energy Project 2006 in Wales"**, in PoqwerGen 2006 Europe, Conference - Wave Dragon - Germany, 2006.

Clemente, D.S., 2013. **"Energia das Ondas: Metodologia de Ensaio em Modelos Reduzidos"**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá.

Coli, A. B., (2000). **Estudo do Clima Ondulatório em Rio Grande**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 76p.

Cruz, J. M. B. P. e Sarmento, A. J. N. A. **"Energia das Ondas Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais"**, Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.

Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. **"Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists"** – New Jersey, 1992.

Dean, R. G., Dalrymple, R.A. **"Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist"**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p., 1991.

Didier, E., 2017. **Desenvolvimento de um Tanque de Ondas Numérico Rans-vof 3d para Aplicações em Engenharia Costeira e Marítima**, 9ªs jornada portuguesa de engenharia costeira e portuária, LNEC, Lisboa, Portugal.

Dos Santos, E. D.; Machado, B. N.; Zanella, M. M.; Gomes, M. N.; Souza, J. A.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O. 2014, **Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design**. Defect And Diffusion Forum, v. 348, p. 232-244.

Dos Santos, E. D., Machado, B. N., Lopes, N. R., Souza, J. A., Teixeira, P. R. F., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013. **"Constructal Design of Wave Energy**

Converters", In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Org.), *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*, 1st Ed, Springer, pp. 275~294.

Fadaeenejad, M., Shamsipour, R., Rokni, S. D., Gomes, C., 2014. **"New Approaches in Harnessing Wave Energy: with Special Attention to Small Islands"**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 345 – 354.

Falcão, A. F. O., 2010. **"Wave Energy Utilization: A Review of The Technologies"**, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 14: 899~918.

Fagundes, T. M., Yaghoobian, N., Rocha, L. A. O., Ordonez, J. C. **Constructal design of Branched Conductivity Pathways Inserted in a Trapezoidal Body: a Numerical Investigation of the Effect of Body Shape on Optimal Pathway Structure**. *Proceedings of the romanian academy, Series A*, p.297–302, 2018.

Fleming, F. P. **Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Frigaard, P., Tedd, J., Kofoed, J. P., Friis-Madsen, E., 2006. **"3 Years Experience with Energy Production on the Nissum Bredning Wave Dragon Prototype"**. In: CA-OE Workshop. Aalborg University: Lisbon, November 2006.

Gilat, A., Suramanian, V. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas: uma Introdução com Aplicações Usando o MATLAB**. Bookman, Porto Alegre, 2008.

Ghosh, T., Prelas, M. **"Energy Resources and Systems"**. Vol 2: Renewable Resources, Columbia, Missouri, USA. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.

Gomes, A. P., 2018. **Efeito de Ondas em Margens a Jusante de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico**, Tese de Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

Gomes, M. N, 2014. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. 168 f. Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Gomes, M. das N., 2010. **"Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante para a Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica"**. Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

Gomes, M. N., Olinto, C.R., Rocha, L. A. O., Souza, J. A., And Isoldi, L. A. 2009. **"Computational Modeling of A Regular Wave Tank"**, Thermal Engineering 8: 44 ~50.

Goulart, M. M.; Gomes A.P.; Rocha, L.A. O.; Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A.; Martins, J.; Gomes, M. N.; 2018, **Verificação e Validação de um Modelo Numérico para Abordagem do Escoamento em um Canal de Ondas**. Revista Cereus, v. 10, n. 4, p. 226-239.

Goulart, M. M.; Martins, J. C.; Acunha, I. C.; Gomes, M. N.; Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D., 2015. **Constructal Design of an Onshore Overtopping Device in Real Scale for Two Different Depths**. Marine Systems & Ocean Technology, v. 10, p. 120-129.

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

Han, Z., Liu, Z., Shi, H., 2018. **Numerical Study on Overtopping Performance of a Multi-Level Breakwater for Wave Energy Conversion**, Ocean Engineering 150: 94 ~ 101.

Hermann, M. L. V., 2016. **Análise de Modelo Numérico Espectral para Representação de Tanque de Ondas**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Horko, M., 2007. **"CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter"**, School of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Computing and Mathematics, Requirements for the Degree of Master of Engineering Science, The University of Western, Australia, 145 p.

Hughes, S. A., 2005. **Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. V. 7**, World Scientific, EUA, 550 p.

Iahnke, S. L. P. **"Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento"**, Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande, 2010.

Iahnke, S. L. P.; Gomes, M.; Isoldi, L.; Rocha, L., 2009. **Energia das Ondas do Mar: Modelagem Computacional de um Dispositivo de Galgamento**. VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias, v. 19, p. 20 – 36, América do Sul.

Jannuzi, G. M.; Swisher, J. N. P., 1997. **"Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis"**. Campinas, SP: Autores Associados.

Jin, J., Liu, Z., Hong, K. Y., Hyun, B. S. **3D Numerical Investigation on Reservoir System for an Overtopping Wave Energy Converter**. Journal of Korean navigation and port research, v. 36, n. 2, p. 97–103, 2012.

Jungrungruentaworn, S., Thaweewat, N., Hyun, B. S. Three-dimensional effects on the performance of multi-level overtopping wave energy converter. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 1137, Issue 1, p. 012016, 2021.

Jungrungruentaworn, S., Hyun, B. S. **Influence of Slot Width on the Performance of Multi-stage Overtopping Wave Energy Converters**. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, v. 9, n. 6, p. 668–676, 2017.

Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. and Sørensen, H. C., 2006. **"Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon"**, Renew. Energ., 31:181~189.

Kofoed J. P., 2002. **"Wave Overtopping of Marine Structures – Utilization of Wave Energy"**. PhD thesis, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University; 2002.

Lauro, E. D., Maza, M., Lara, J. L., Losada, I. J., Contertabile, P., Vicinanza, D. **Advantages of an Innovative Vertical Breakwater With an Overtopping Wave Energy Converter**. Coastal Engineering, vol. 159, 2020.

Le Méhauté, B., 1976, **An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**, Springer Berlin Heidelberg

Li, Y., Yu, Y.-H., 2012. **"A Synthesis of Numerical Methods for Modeling Wave Energy Converter-point Absorbers"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp. 4352 – 4364.

Ling, L., Yongcan, C. and Yuliang, L., 2001. **"Volume of Fluid (VOF) Method for Curved free Surface Water Flow in Shallow open Channel"**. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.

Liu, Z., Hyun B., Jin, J., 2008. **"Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC"**, Journal Of The Korean Society For Marine Environmental Engineering, Vol. 11, No.1.

Liu, Z., Han, Z., Shi, H., Yang, W., 2019. **Experimental Study on Multi-level Overtopping Wave Energy Convertor Under Regular Wave Conditions**, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 10: 651 ~ 659.

Lopes, N. D. R. **Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2012.

López, I., Andreu, J., Ceballos, S. Alegría, I. M., Kortabarria, I., 2013. **"Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 413 – 434.

Lv, X., Zou, Q. and Reeve, D., 2011. **"Numerical Simulation of Overflow at Vertical Weirs Using a Hybrid Level Set/VOF Method"**, Adv. Water Resour. 34: 1320~1334.

Machado, B. N., 2016. **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.

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.

Machado, B.N., Zanella, M. M., Lopes, N. da R., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., 2011a. **Simulação Numérica de um Dispositivo de Galgamento Tridimensional para Conversão de Energia das Ondas**. XIII ENPOS, Universidade Federal de Pelotas.

Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2011b. **Numerical Analysis of the Ramp Shape Influence in an Overtopping Converter**. XXXII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Ouro Preto.

Margheritini, L., Stratigaki, V., Troch, P. **Geometry Optimization of an Overtopping Wave Energy Device Implemented into the New Breakwater of the Hanstholm Port Expansion**. International Offshore and Polar Engineering Conference, v. 4, p. 593–600, 2012.

Margheritini, L., Vicinanza, D. and Frigaard, P., 2009. **"SSG Wave Energy Converter: Design, Reliability and Hydraulic Performance of an Innovative Overtopping Device"**. Renew. Energ., 34:1371~1380.

Martins, J. C., 2021. **Estudo Numérico com Aplicação de Design Construtal de um Dispositivo de Conversão de Energia das Ondas do Mar do Tipo Galgamento Incorporado ao Molhe Leste de São José do Norte - RS**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Martins, J. C., Goulart, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A., Santos, E. D., 2018. **Geometric Evaluation of the Main Operational Principle of an Overtopping Wave Energy Converter by Means of Constructal Design**. Renewable Energy, V. 118, P. 727 e 741.

Martins, J. C.; Dante, V. E. B.; Goulart, M. M.; Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Gomes, M. N.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D., 2015(a). **Constructal Design of an Onshore Overtopping Device in Real Scale for two Different Ocean Wave Periods and Different Areas of the Ramp**. In: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro. v. 1.

Martins, J. C.; Goulart, M. M.; Souza, J. A.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Gomes, M. N.; Rocha, L. A. O., 2015(b). **Constructal Design of an Onshore Overtopping Device in Real Scale for Different Ramp Construction Areas**. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro. v. 1.

Martins, J. A. de A., 2003. **“Análise de Ondas em Tanque de Dimensões Reduzidas com Vistas à Engenharia Oceânica”**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP-São Paulo 188 p.

Mccormick, M. E., 1973. **“Ocean Engineering Wave Mechanics”**, John Wiley & Sons, Nova York, 179 P.

Miguel, A. F., Rocha, L. A. O. **Tree-Shaped Fluid Flow and Heat Transfer**. Springer International Publishing, 2018.

Miranda, G. B., Gomes, M.N., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O., 2018. **Análise da Influência das Condições de Contorno no Efeito de Reflexão na Simulação Numérica de Ondas Oceânicas**. Revista Científica Interdisciplinar Interlogos, V. 3, P. 1.

Morais, T. A. N. da S., 2009. **"Estudo da Operação de Parques de Sistemas de Conversão de Energia das Ondas em Energia Eléctrica"**. Dissertação (mestrado em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Morais, V. S. **“Previsão de Ondas Geradas por Ventos em Águas Interiores e sua Alteração Devido à Presença de Vegetação Aquática em Margens de Lagos”**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Dezembro, 2009.

Nam, B. W.; Shin, S. H.; Hong, K. Y.; Hong, S. W., 2008. **Numerical Simulation of Wave Flow Over the Spiral-Reef Overtopping Device**. Proceedings of the Eighth (2008) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, p. 262–267.

Norgaard, J. H.; Andersen, T. L., 2012. **Investigation of Wave Transmission from a Floating Wave Dragon**. In proceedings of the Twenty – second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference.

Oliveira, I. O.; Teixeira, P. R. F.; Dos Santos, E. D.; Isoldi, I. A. **Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of the Hydropneumatic Chamber Dimensions of an Oscillating Water Column Wave Energy Device**. In: Proceedings of 11th Ysesm, 2012, Transilvânia - Romênia. Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics - Ysesm, 2012, 2012. v. 1. p. 1-6.

Oliveira, P., Pinto F. T., Moraes, T., Santos, P. R., 2016. **Performance Enhancement of an Overtopping Based Wave Energy Converter**, Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16), Ottawa, Canada.

Pereira, S. R. V. V. da S., 2010. **"Caracterização do Sector dos Recursos Energéticos Marinhos para Portugal Continental"**, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Portugal.

Quadrante, L. A. R., 2011. **Desenvolvimento de um Simulador Simplificado para Estudo de Geração de Ondas em Tanques Dotados de Geradores Segmentados**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Reis, A. H., 2006. **"Constructal Theory: From Engineering to Physics, and How Flow Systems Develop Shape and Structure"**. Applied Mechanics Reviews, Vol. 59.

Rosauro, N.M.L., 2004. **"Teoria e Prática da Geração e Propagação de Ondas Monocromáticas em um Canal de Laboratório"**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 9, Nº 1, Jan/Mar, pp 199-216.

Sales, J. S. J.; (2016). **Análise de Incertezas em Ensaio Hidrodinâmico em Tanque Oceânico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio. Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, (COPPE), Rio de Janeiro, RJ.

Santos, K. G., 2008. **"Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais"**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 110 P.

Schlichting, H. 1979, **"Boundary Layer Theory 7th edn"**. McGraw-Hill, Nova York, Estados Unidos, 817 p.

Strauch, J.C., (1996). **Estudo do Clima Ondulatório**. Anais do XII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia, Curitiba, PR, 51p.

Tolmasquim, M. T. **Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE, Brasília, 2016.

Teixeira, P. R. F., Davyt, D. P., Didier, E., Ramalhais, R., 2013. **Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Device Using a Code Based on Navier-Stokes Equations**, Energy, v.61, pp. 513-530.

Tedd, J., Kofoed, J. P., 2009. **"Measurements of Overtopping Flow Time Series on the Wave Dragon, Wave Energy Converter"**. Renew. Energ., 34:711~717.

Us Army Corps of Engineer. Coastal Engineering Manual. 2008.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., 2007, **“An Introduction to Computational Fluid Dynamics”**, Malaysia : Pearson

Vicinanza, D.; Contestabile, P.; Nørgaard, Q., H., J.; ANDERSEN, T. L., 2014. **Innovative Rubble Mound Breakwaters for Overtopping Wave Energy Conversion**. Coastal Engineering, v. 88, p. 154–170.

Wan, Z., Yao, Z., Song, T., Chen, J. Hydrodynamic characteristics of the multi-level overtopping wave power device. **Journal of Low Frequency, Noise, Vibration and Active Control**, vol. 38, p. 1314-1326, 2019.

Wave Energy (WAVEC), 2004. **"Survey of Energy Resources"**, cap. 15, p. 401 - 417. World Energy Council. Elsevier.

APÊNDICE A - Variações da geometria

Nas tabelas a seguir são apresentados aqui as dimensões geométricas dos dispositivos de galgamento analisados ao longo deste trabalho de acordo com o campo de busca para a geometria de acordo com o método Design Construtal. Assim, chegando-se a um total de 29 casos, considerando-se as diferentes geometrias de H_1/L_1 e as variações de maré representadas pelas variações de h e h_1 .

Tabela A.1. Variações da geometria para $h_1 = 0,338$ m e $h = 0,808$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	38,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447

Tabela A.2. Variações da geometria para $h_1 = 0,347$ m e $h = 0,817$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1,1	38,7	0,44	0,297	0,674	0,737	0,446

Tabela A.3. Variações da geometria para $h_1 = 0,356$ m e $h = 0,826$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	38,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447
2.0	26,6	0,50	0,316	0,632	0,707	0,466

Tabela A.4. Variações da geometria para $h_1 = 0,365$ m e $h = 0,835$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	38,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447
2.0	26,6	0,50	0,316	0,632	0,707	0,466
3,0	30,5	0,59	0,344	0,582	0,676	0,494

Tabela A.5. Variações da geometria para $h_1 = 0,374$ m e $h = 0,844$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	23,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447
2.0	26,6°	0,50	0,316	0,632	0,707	0,466
3.0	30,5°	0,59	0,344	0,582	0,676	0,494
3,1	38,0°	0,65	0,361	0,555	0,662	0,511

Tabela A.6. Variações da geometria para $h_1 = 0,383$ m e $h = 0,853$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	23,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447
2.0	26,6°	0,50	0,316	0,632	0,707	0,466
3.0	30,5°	0,59	0,344	0,582	0,676	0,494
3.1	33,0°	0,65	0,361	0,555	0,662	0,511
4.0	35,4°	0,71	0,377	0,531	0,651	0,527

Tabela A.7. Variações da geometria para $h_1 = 0,392$ m e $h = 0,862$ m.

Caso	Ângulo	H_1/L_1	H_1 (m)	L_1 (m)	C (m)	$S_D + H_1$ (m)
1.0	21,3°	0,39	0,279	0,716	0,769	0,429
1.1	23,7°	0,44	0,297	0,674	0,737	0,447
2.0	26,6°	0,50	0,316	0,632	0,707	0,466
3.0	30,5°	0,59	0,344	0,582	0,676	0,494
3.1	33,0°	0,65	0,361	0,555	0,662	0,511
4.0	35,4°	0,71	0,377	0,531	0,651	0,527
5.0	38,7°	0,80	0,400	0,500	0,640	0,550

APÊNDICE B – Artigo Goulart *et al.* (2018)

Verificação e Validação de um Modelo Numérico para Abordagem do Escoamento em um Canal de Ondas

Verification and Validation of a Numerical Model for Approach to Flow in a Wave Channel

Marcelo Moraes Goulart¹, Ana Paula Gomes², Luiz Alberto Oliveira Rocha³, Elizaldo Domingues dos Santos⁴, Liércio André Isoldi⁵, Jaifer Corrêa Martins⁶, Mateus das Neves Gomes⁷

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico baseado no Método de volumes Finitos (MVF) para simular a propagação de ondas regulares bidimensional em um canal de ondas e comparar com aos resultados de um modelo físico desenvolvido na literatura. Do ponto de vista qualitativo, foi observado que o modelo numérico reproduziu adequadamente o comportamento da onda, de forma semelhante ao obtido nos resultados experimentais. As comparações do modelo numérico com os resultados experimentais e analíticos conduzem a resultados satisfatórios, ficando de uma forma geral mais próximos aos experimentais. Nas presentes simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é empregado. De uma forma geral, os resultados indicam que a metodologia VOF pode ser considerada válida para este tipo de análise de geração numérica de ondas em canal, ficando o MAE (erro absoluto médio) e o RMSE (erro médio quadrático) com diferenças de aproximadamente 2% e 3 % na comparação entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

Palavras-chave: Simulação Numérica Canal de Ondas. Volume of Fluid. Energia das Ondas mar. Verificação e Validação.

ABSTRACT

In this work a numerical study was performed based on the Finite Volume Method (MVF) to simulate the propagation of regular two-dimensional waves in channel. The present results are compared with those of a physical model developed in the literature. From the qualitative point of view, it was observed that the numerical model adequately reproduced the behavior of the wave, similar to that obtained in the experimental results. The comparisons of the numerical model with the experimental and analytical approaches lead to satisfactory results, being generally closer to the experimental ones. In the present simulations, the conservation equations of mass, momentum and one equation for the transport of the volumetric fraction are solved with the finite volume method (MVF). To address the water and air mixture, the Multiphase Volume of Fluid (VOF) model is employed. In general, results indicated that the VOF methodology can be considered valid for this type of channel wave generation, with the MAE (mean absolute error) and the RMSE (mean square error) with differences of approximately 2 % and 3% in the comparison between the numerical and experimental results.

Keywords: Numerical Simulation Wave Channel. Volume of Fluid. Energy of the sea waves. Verification and Validation.

¹ Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Rio Grande/RS.

E-mail:

moraesgoulart@yahoo.com.br

² Doutora em Engenharia Civil. Professora da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Rio Grande/RS.

³ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) - São Leopoldo/RS.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Rio Grande/RS.

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Rio Grande/RS.

⁶ Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre/RS.

⁷ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Instituto Federal do Paraná (IFPR) - Paranaguá/PR.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de tanques de prova para obtenção de características hidrodinâmicas de sistemas flutuantes é realizado a centenas de anos. Como um dos pioneiros, pode-se citar o tanque de Dr. William Froude (1810-1879), no qual eram executados ensaios com embarcações em escala reduzida para, através de medidas de sua resistência ao avanço, estabelecer previsões para força de resistência experimentada pelas embarcações. Com o aumento da demanda do conhecimento da performance de embarcações sob a ação de ondas, gradualmente os tanques foram equipados com geradores de ondas (Quadrante, 2011).

Segundo Dean e Dalrymple (1991) a maioria dos testes em laboratório, de estruturas fixas ou flutuantes, estudo dos perfis das praias e outros fenômenos relacionados tem utilizado um tanque de ondas, que são compartimentos longos e estreitos com um gerador de ondas em uma das extremidades do tanque.

Além da modelação física da propagação de ondas existem outras abordagens que pode ser dada a este tipo de problema, uma delas e por meio da simulação numérica. Com a utilização desta ferramenta podem ser reproduzidos modelos do comportamento de ondas oceânicas em tanque.

Consequentemente é possível encontrar na literatura diversos trabalhos como por exemplo: O trabalho de Muller e Puhl (2016) que realizou uma análise comparativa entre o uso de modelo numérico e experimentos em modelo físico, simulando a propagação de ondas monocromáticas incidentes em perfis de enrocamento. A ferramenta computacional Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC) foi utilizada para modelagem numérica do modelo físico canal de ondas. Outro exemplo é o trabalho de Miranda et al. (2018) que apresenta um estudo numérico da propagação de ondas oceânicas em tanques. Com a finalidade de analisar a influência da utilização de diferentes condições de contorno, considerando diferentes geometrias e malhas, no efeito de reflexão de ondas.

Neste contexto o objetivo do presente trabalho é simular a propagação de ondas regulares bidimensional em um canal de ondas e comparar com aos resultados do modelo físico obtidos nos estudos experimentais de Gomes (2018). Com objetivo de verificação e validação da aplicação do modelo VOF em canal de ondas.

2. MODELO FÍSICO

No canal ondas, instalado no Pavilhão Fluvial (IPH/UFRGS), conforme desenho esquemático Figura 1, Gomes (2018) reproduziu uma serie de ensaios com as características das ondas descritas (vide Tabela 1). Desta forma, foi possível avaliar o efeito da ação das ondas sobre taludes com diferentes inclinações e granulometrias de material de proteção.

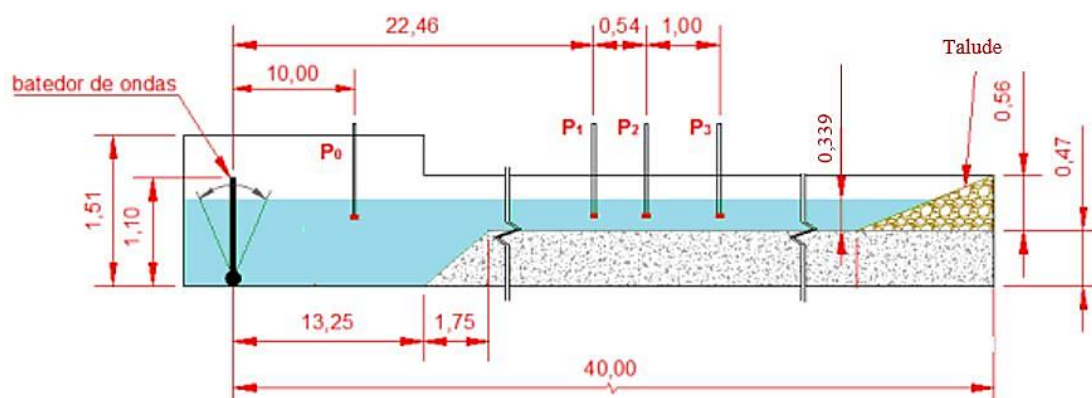


Figura 1. Esquema de posição das sondas (Fonte: adaptado de (Gomes, 2018)).

Foram utilizados quatro medidores de altura no experimento. Na Figura 1 apresentam as posições das sondas de nível P0, P1, P2 e P3, situadas respectivamente a 10,00 m, 22,46 m, 23,00 m e 24,00 m do bater de ondas. Estas mesmas posições foram adotadas no modelo numérico para linhas de monitoramento.

Tabela 1. Características da onda empregada por Gomes (2018).

Características	Valores
Período (T)	1,718 s
Altura (H)	0,075 m
Comprimento 1° trecho (λ_1)	3,950 m
Profundidade 1° trecho (h_1)	0,809 m
Comprimento 2° trecho (λ_2)	2,900 m
Profundidade 2° trecho (h_2)	0,339 m

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema proposto consiste em analisar numericamente a propagação de uma onda regular bidimensional em um canal de ondas e comparar com os resultados do modelo físico obtidos nos estudos experimentais que foram realizados por Gomes (2018) no Pavilhão Fluvial do IPH/UFRGS no canal de ondas. A realização da simulação numérica de

um canal de ondas requer essencialmente o conhecimento das características da onda a ser gerada, pois assim é possível dimensionar o domínio computacional. Posteriormente, é possível discretizar o domínio computacional e, assim, com a aplicação de condições de contorno resolver as equações do modelo numérico.

A metodologia utilizada neste estudo é conhecida na literatura como dinâmica dos fluidos computacional (CFD – do inglês: *Computational Fluid Dynamics*). Essa ferramenta se baseia na discretização do domínio computacional em um número finito de elementos e a aplicação de um método numérico adequado para a solução do problema. (Versteeg e Malalasekera, 2007). No presente trabalho é utilizado o pacote de software ANSYS, recorrendo ao solver FLUENT, que é baseado no Método de volumes Finitos (MVF) para simular a propagação de ondas.

3.1 Geração da Onda e Condições de Contorno

Como é possível observar na Figura 2, a geração de ondas ocorre no lado esquerdo do canal de ondas. Para a geração de ondas regulares, com características constantes, é imposto um perfil velocidades. Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (w) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita) no modelo computacional. Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas na superfície de entrada são dadas por Dean e Dalrymple (1991); Chakrabarti (2005):

$$u = \frac{H}{2} g k \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$w = \frac{H}{2} g k \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

onde: H é a altura da onda (m); g a aceleração da gravidade (m/s²); λ é o comprimento da onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m⁻¹); h é a profundidade (m); T é o período da onda (s); ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (Hz); x é a posição espacial (m); t é o tempo (s) e z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

É possível determinar a elevação da superfície livre utilizando-se a equação apresentada em Dean e Dalrymple (1991), definida por:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2 k}{16} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2(kh)) \cos 2(kx - \omega t) \quad (3)$$

Com relação as demais condições de contorno, a parte superior da superfície superior do canal, é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide linha verde tracejada na Figura 2). Nas demais superfícies do canal de ondas (paredes): superfície inferior e superfície lateral direita é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h_1 = 0,809$ m no 1° trecho e $h_2 = 0,339$ m no 2° trecho.

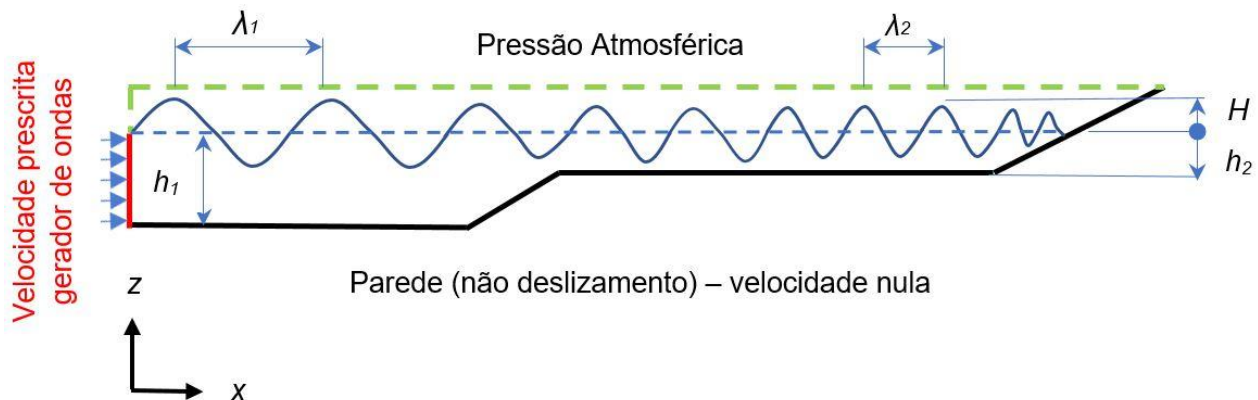


Figura 2. Representação esquemática do canal de ondas.

4. MODELO COMPUTACIONAL

4.1 Modelo Multifásico Volume of Fluid (VOF)

Para representar o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF) (Hirt e Nichols, 1981). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Esta metodologia foi empregada anteriormente nos trabalhos de Gomes (2010), Dos Santos et al. (2013) e Goulart (2014). e Martins et al. (2018).

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e $\vec{v}$ é o vetor de velocidade do escoamento (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

onde p é a pressão (N/m^2), $\rho \vec{v}$ e $\vec{F}$ são as forças de campo e forças externas ao corpo (N/m^3), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, consequentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \cdot \vec{v} + \Delta \cdot \vec{v}^T)] \quad (6)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)).

Nas simulações deste estudo, são consideradas duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Consequentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária:

$$\frac{\partial (\rho \alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Vale ressaltar que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (8)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (9)$$

4.2 Procedimentos Numéricos

O solver empregado é baseado na pressão e as simulações foram realizadas com esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e PRESTO (*Pressure Staggering Option*)

para as discretizações espaciais do termo advectivo da equação da conservação da quantidade de movimento e pressão, respectivamente. O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método PISO (Versteeg e Malalasekera, 2007). Para a determinação da superfície ocupada pela água é empregado o método *Geo-reconstruction*. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 foram impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. As soluções obtidas aqui foram consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y foram inferiores a 10^{-6} . Todas as simulações foram realizadas usando um computador Intel Core i7-5500U com clock de 2.4 GHz de 2 núcleos e 8 GB de memória RAM. Emprega-se uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: Message Passing Interface) para paralelização. O tempo de processamento de simulação numérica é variável de acordo com o número de volumes podendo nos casos com malhas mais grosseiras durar 1 h ou então 3 h nos casos com malhas mais refinadas (Tabela 2)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teste de sensibilidade de malha

Na Tabela 2 é apresentado o teste de malha que consiste em comparar a elevação da superfície livre de água obtida analiticamente a partir da Eq. (3) e a solução obtida numericamente para onda regular num dado ponto do canal de ondas (sonda P0 (vide Figura 1)) e também a elevação da superfície livre de água obtida experimentalmente por Gomes (2018) e a numericamente obtida, com três tipos de malha diferentes. A onda utilizada nas simulações tem as mesmas características anteriormente mencionada. Cabe salientar que somente foram observadas as séries espaciais, pois, o avanço do passo de tempo foi mantido constante em 0,02 s por ser o mesmo critério adotado nos experimentos de Gomes (2018).

Tabela 2. Análise de simulações com diferentes malhas.

Dimensões da Malha (m)	Número de volumes	Tempo de processamento (h)	Erro relativo Ana x Num (%)	Erro relativo Exp x Num (%)
0,100 x 0,100	2.641	1,00	3,32	2,23
0,050 x 0,050	11.401	1,25	3,22	2,18
0,025 x 0,025	45.569	3,00	3,38	2,39

Para quantificar a diferença entre a solução numérica e soluções analítica e experimental para a variação da superfície livre em um dado ponto é utilizado como critério o erro relativo. A expressão utilizada para o cálculo desse erro pode ser encontrada em diversas referências de métodos numéricos, por exemplo em Gilat e Subramaniam (2008), onde o erro relativo é definido da seguinte forma:

$$E_R = \left| \frac{x - x_n}{x_n} \right| 100\% \quad (10)$$

onde x é o valor exato a variável em questão (referência) e x_n é o valor obtido pela aproximação numérica. Na Tabela 2 são informados os erros relativos (analítico x numérico e experimental x numérico) encontrados nas comparações realizadas. São apresentados os erros médios, que são obtidos através de uma média aritmética do erro calculado em cada instante de tempo ao longo dos 50 s analisados das soluções encontradas. É importante destacar-se que a referência nesses cálculos de erro é a solução analítica e a solução experimental.

Na Figura 3 é possível observar a comparação da elevação da superfície livre obtida analiticamente (através da Eq. (3)) e numericamente, respectivamente, na sonda P0, situada a 10 m do bater de ondas (vide Figura 2). Os resultados são analisados no intervalo de tempo total ($0 \text{ s} \leq t \leq 50 \text{ s}$). Nesta faixa de tempo, é observada uma diferença, calculada pela Eq. (10), é de aproximadamente 3,22 %.

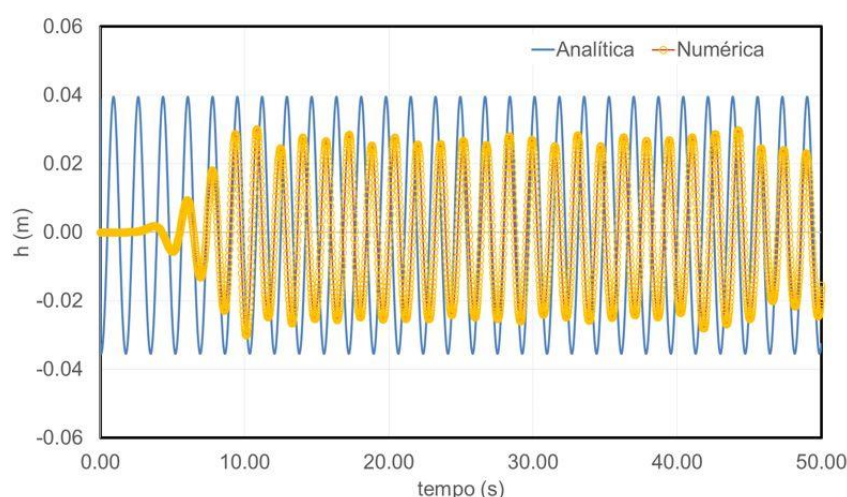


Figura 3. Comparação dos resultados analítico e numérico.

Na Figura 4 é apresentada a comparação da onda do modelo físico utilizado por Gomes (2018) e a do modelo numérico do presente trabalho. Neste caso é observada uma diferença, calculada pela Eq. (10), de aproximadamente 2,18 %.

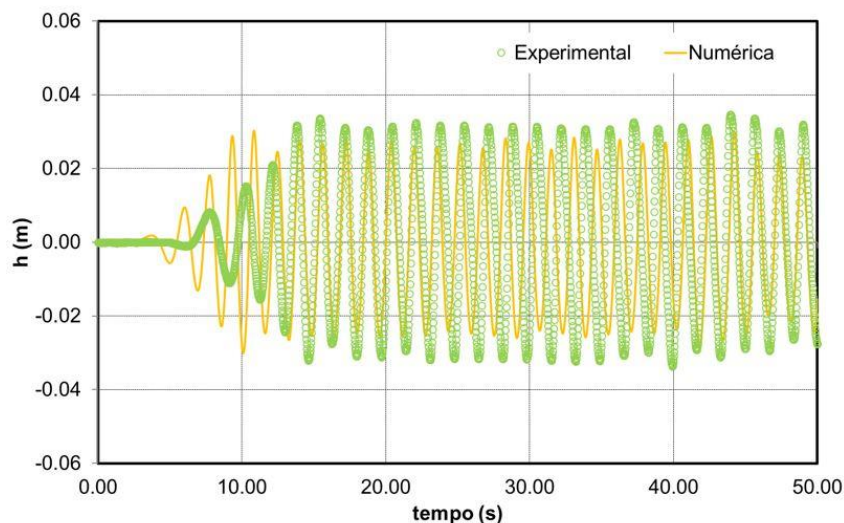


Figura 4. Comparação dos resultados experimental e numérico.

A Figura 5 apresenta a elevação da superfície livre na sonda P0, considerando a solução analítica através da Eq. (3) e a onda do modelo físico utilizado por Gomes (2018), respectivamente. A diferença calculada pela Eq. (10), é em torno de 4,06 %.

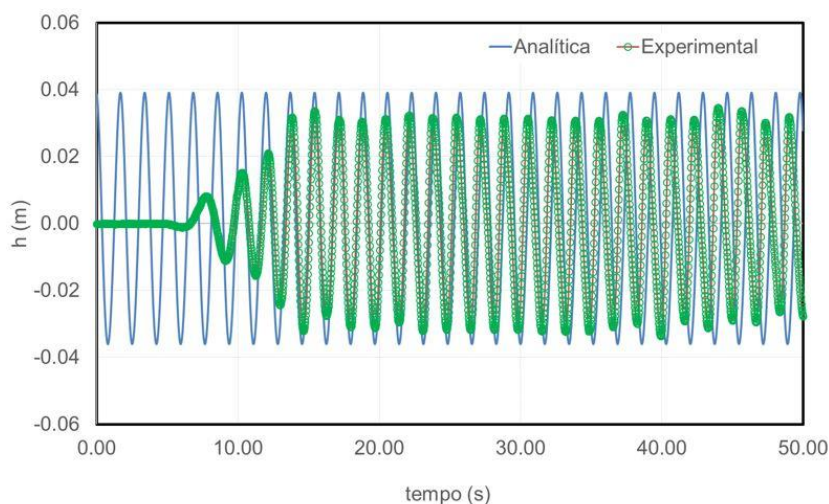


Figura 5. Comparação dos resultados analítico e experimental.

A escolha da malha com as características desejadas deu-se com base na análise de dois fatores da Tabela 2, através da análise dos valores encontrados para os erros relativos apresentado conforme a Eq. (10) e do custo computacional. Na Tabela 2 também são

apresentadas as dimensões das malhas estruturadas utilizadas em cada um dos três casos bem como o número de volumes gerados em cada malha. A Figura 6 ilustra a malha utilizada no presente trabalho, com quadriláteros de dimensões 0,050 x 0,050 m.

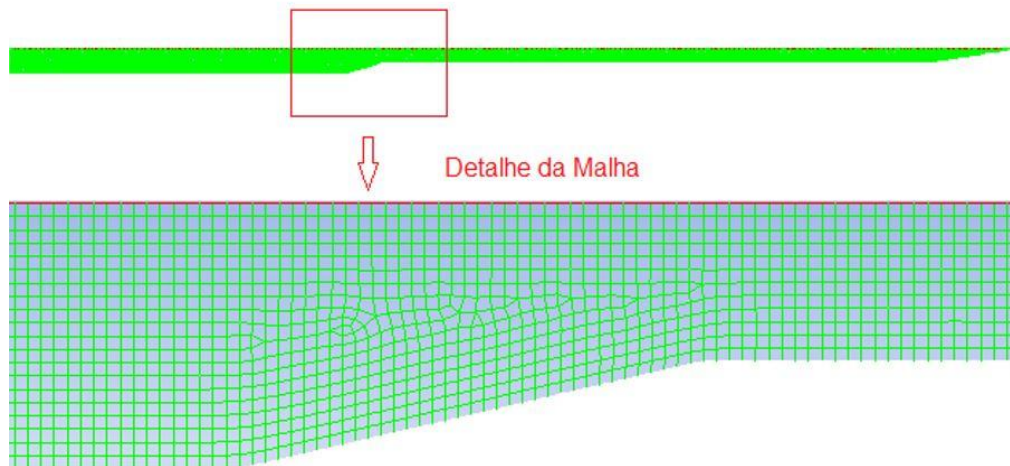


Figura 6. Discretização espacial do canal de ondas.

5.2 Verificação e validação do modelo numérico

Conforme Versteeg e Malalasekera (2007) verificação é o processo usado para quantificar o erro numérico. Ele mede o quão bem o modelo matemático é resolvido numericamente. Não tem como objetivo o fenômeno real. É um processo puramente matemático já a validação é o processo para quantificar o erro de modelagem. Ele mede o quão bem o modelo matemático representa a realidade. É um processo puramente físico.

O erro modelagem (E_M) é a diferença entre o valor verdadeiro (R) e uma variável de interesse (experimental) e a sua solução analítica exata (Φ):

$$E_M(\Phi) = R - \Phi \quad (11)$$

Já o erro numérico (E_N) é a diferença entre a solução analítica exata (Φ) de uma variável de interesse e a sua solução numérica (ϕ), ou seja (Ferziger e Peric, 1999):

$$E_N = \Phi - \phi \quad (12)$$

Para verificar a metodologia empregada neste estudo foi utilizada a estratégia de comparação, entre a solução analítica, dada pela Eq. (3), e a solução numérica, que consiste em gerar a onda em um canal de ondas e observar a variação na superfície livre

da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do canal de ondas. A onda gerada para essa verificação tem suas características descritas na Tabela 1.

Vale também destacar que para o intervalo de tempo $20 \text{ s} \leq t \leq 40 \text{ s}$ todos os erros analisados reduzem se comparados com todo intervalo de tempo analisado ($0 \text{ s} \leq t \leq 50 \text{ s}$) conforme pode ser observado na Tabela 3 devido ao fato das ondas no tempo de 20 s encontrarem-se estabilizados.

Deve-se também ser considerado que no tempo de 40 s apesar do fenômeno de reflexão das ondas que retornam do fundo do canal já possa ser observado interfere menos nos resultados das análises do que se fosse considerado o tempo total de simulação (50 s).

Na Tabela 3 também são apresentados, os demais erros analisados em todas as sondas: a média do erro absoluto (MAE), o desvio do erro (RMSE), a norma l_∞ para as soluções experimentais e analíticas.

Para comparar a elevação das superfícies livres, da solução analítica e numérica, foi utilizada a média do erro absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*), dada por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{num,i} - x_{exp,i}| \quad (13)$$

onde n é o número de amostras analisadas, i é o número da amostra analisada, $x_{num,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida numericamente e $x_{exp,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida experimentalmente. Ainda foi utilizada a média RMSE (*Root Mean Square Error*) para analisar o desvio, dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{num,i} - x_{exp,i})^2}{n}} \quad (14)$$

Para comparar as alturas significativas, da solução experimental e analítica, pode-se utilizar a norma l_∞ , dada por:

$$\|x\|_\infty = \max_j |x_j| \quad (15)$$

onde x_j representa a variável em consideração instantânea.

Como pode ser observado na Tabela 3 é possível verificar média do erro absoluto em todas as sondas tendo um erro médio não superior a 2,7 % e com desvios inferiores a 3,2

%, além disso a diferenças entre os picos é inferior a 0,006 m em um escoamento cuja altura de onda é $H = 0,075$ m.

Tabela 3. Análise dos erros em diferentes sondas no intervalo de tempo $20 \text{ s} \leq t \leq 40 \text{ s}$.

Erros (20 a 40 s)	Sonda P0	Sonda P1	Sonda P2	Sonda P3
MAE (Experimental)	0,02790	0,02403	0,02546	0,02462
MAE (Analítica)	0,02610	0,02678	0,02633	0,02666
RMSE (Experimental)	0,03235	0,02960	0,03069	0,02989
RMSE (Analítica)	0,03156	0,03237	0,03178	0,03226
Norma l_{∞} (Experimental)	-0,00536	-0,01450	-0,01174	-0,01022
Norma l_{∞} (Analítica)	-0,01123	-0,01675	-0,01610	-0,01666
RMS do erro de modelagem	0,02600	0,01426	0,014729	0,01606
RMS do erro numérico	0,03156	0,03237	0,031781	0,03226

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico baseado no Método de volumes Finitos (MVF) para simular a propagação de ondas regulares bidimensional em um canal de ondas e comparar com aos resultados do modelo físico obtidos nos estudos experimentais de Gomes (2018).

Do ponto de vista qualitativo, foi observado que o modelo numérico reproduziu adequadamente o comportamento da onda, de forma semelhante ao obtido nos resultados experimentais. Por exemplo, os resultados indicaram uma diminuição do comprimento da onda com a diminuição da profundidade do canal.

Conclui-se que as comparações do modelo numérico com os resultados experimentais e analíticos conduzem a resultados satisfatórios, ficando de uma forma geral mais próximos aos experimentais. Algumas das causas prováveis para as diferenças verificadas pode ser atribuída a dificuldades de reprodução do experimento realizado, principalmente na geração e absorção das ondas. De uma forma geral, os resultados indicam que (apesar de pequenas diferenças observadas) a metodologia VOF pode ser considerada válida para este tipo de análise de geração numérica de ondas em canal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Instituto Federal do Paraná

(IFPR) e a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ANSYS, **Theory Guide FLUENT 2014**, 2014.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 1991.

DOS SANTOS, E. D., MACHADO, B. N., LOPES, N. R., SOUZA, J. A., TEIXEIRA, P. R. F., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O. **Constructal Design of Wave Energy Converters**, In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Org.), *Constructal law and the unifying principle of design*, 1st Ed, Springer, p. 275-294, 2013.

FERZIGER, J. H., PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**, Springer, Berlim, 364 p., 1999.

GILAT, A., SUBRAMANIAM, V. **Métodos numéricos para engenheiros e cientistas: Uma introdução com aplicações usando o MATLAB**, Bookman, Porto Alegre, 479 p., 2008.

GOMES, M. DAS N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna da Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, 2010.

GOMES, A. P. **Efeito de ondas em margens a jusante de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**, Tese de Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2018.

GOULART, M. M. **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design**, Dissertação de Mestrado, Fundação Universidade do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, 2014.

HIRT, C.W., 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.

MARTINS, J. C., GOULART, M. M., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., ROCHA, L. A. O., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D. **Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design**. *Renewable Energy*, V. 118, P. 727 e 741, 2018.

MIRANDA, G. B., GOMES, M.N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. **Análise da influência das condições de contorno no efeito de reflexão na simulação numérica de ondas oceânicas**. *Revista científica interdisciplinar interlogos*, v. 3, p. 1, 2018.

MULLER, Y. T., PUHL, E. **Avaliação comparativa entre modelo numérico e ensaios em laboratório de propagação de ondas regulares**. In: VII Seminário e workshop em engenharia oceânica (SEMENGO)), Rio Grande, RS. Anais do VII SEMENGO seminário e workshop em engenharia oceânica. Rio Grande, RS: Universidade Federal do Rio Grande, v. 1. p. 76-81, 2016.

QUADRANTE, L. A. R. **Desenvolvimento de um simulador simplificado para estudo de geração de ondas em tanques dotados de geradores segmentados**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Malaysia : Pearson, 2007.