

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

ESTUDO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO  
PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA  
APLICANDO O MÉTODO *CONSTRUCTAL DESIGN*

por

Bianca Neves Machado

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, junho de 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*

por

Bianca Neves Machado  
Mestre em Modelagem Computacional

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

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovado por:

Prof. Dr. Liércio André Isoldi, EE/FURG

Prof. Dr. Luiz Endres, IPH/UFRGS

Prof. Dra. Adriane Prisco Petry, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, EE/FURG

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de junho de 2016.

*Dedico este trabalho à todos que se fizeram presentes ao longo desta jornada,  
especialmente à minha família e amigos!*

*“Disse a flor ao Pequeno Príncipe:  
É preciso que eu suporte duas ou três larvas  
se quiser conhecer as borboletas.  
Dizem que são tão belas!”*

*O Pequeno Príncipe (Antoine de Saint-Exupéry)*

## AGRADECIMENTOS

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta longa caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço, primeiramente, a Deus pela conclusão de mais uma jornada.

Aos meus pais, Roselaine e Adão, pelo exemplo de vida e inspiração, por acreditarem em mim e não permitirem-me desistir ao longo desta jornada de formação.

Ao meu noivo Leonardo, agradeço pelo amor incondicional, pelo incentivo, companheirismo e coragem que sempre me transmitiu.

Ao meu irmão Pablo e a minha cunhada Alexandra, os quais, sempre que possível estiveram ao meu lado com palavras de incentivo e afeto.

Aos meus sogros, Cristiane e Maxwel.

À minha amiga Crissiane Ancines e a sua família, pelo companheirismo, carinho, apoio e pernoites ao longo desta jornada. E agradeço, principalmente, sua amizade.

Aos colegas de LAMAC pela amizade e ensinamentos.

Agradeço aos meus amigos, especialmente aos da Familiaridade, que se fizeram presente ao longo desta jornada, demonstrando apoio, incentivo e afeto.

Ao Professor Doutor Luiz Alberto Oliveira Rocha, o meu agradecimento por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio incondicional e compreensão que sempre manifestou.

Aos Professores, Doutor Liércio André Isoldi e Doutor Elizaldo Domingues dos Santos, pelas inúmeras orientações e ensinamentos transmitidos ao longo destes anos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro.

A todos, o meu Eterno Obrigado.

## RESUMO

O princípio operacional do dispositivo de galgamento consiste de uma estrutura que utiliza uma rampa para direcionar as ondas incidentes para o reservatório. A água armazenada retorna para o oceano após a passagem por uma turbina que está acoplada a um gerador de energia elétrica. O presente trabalho propõe dois estudos numéricos a respeito de um conversor de energia das ondas do mar do tipo galgamento. Para ambos os casos, o objetivo do estudo é a aplicação do método Design Construtal na definição da melhor forma para a rampa de modo a maximizar a massa de água que entra no reservatório, conduzindo a uma maior geração de energia elétrica. 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 fixos a área total do tanque 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), gerado através do software GAMBIT, onde o conversor é acoplado a um tanque de ondas regulares. A solução das equações de conservação e a equação do transporte da fração volumétrica foi realizada com o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional FLUENT, que é baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). Aplica-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) no tratamento da interação água-ar. Para o primeiro estudo, as características da onda regular empregada estavam em escala de laboratório. Os resultados mostraram que houve uma razão ótima  $(b/B)_o = 0.43$ , que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório para o caso estudado. Para o segundo estudo, as características da onda regular empregada estavam em escala real e os resultados mostraram que houve uma razão ótima  $(b/B)_o = 0.38$ , que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório para o caso estudado. 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 admitida no reservatório e, por consequente, um maior aproveitamento das ondas incidentes.

Palavras-chave: Design Construtal; Energia das Ondas; Galgamento; Otimização Geométrica; Método dos Volumes Finitos (MVF).

## ABSTRACT

The operational principle of an overtopping device consists of a structure which utilizes a ramp to direct incident waves to the reservoir. The stored water returns to the ocean after passing through a turbine that is coupled to an electric generator. This work proposes two numerical studies of a WEC of sea waves of the type overtopping. In both cases, the objective of the study is the application of Constructal Design method to define the best geometry of the ramp which maximizes the mass of water entering the reservoir, leading to increase the generation of electricity. The degree of freedom  $b/B$ , that is, the ratio between the upper base and the lower base of the trapezoidal ramp, has been optimized, keeping fixed the total area of the wave tank, the area of the ramp and the wave characteristics. For the numerical analysis of the working principle of this device it was used a three-dimensional computational domain (3D) generated by GAMBIT software where the device is inserted to a tank of regular waves. The solution of conservation equations and equation of transport of the volumetric fraction was carried out with the Commercial Code of Computational Fluid Dynamics FLUENT, which is based on Finite Volume Method (FVM). It was applied the multiphase model Volume of Fluid (VOF) in the treatment of the interaction water-air. For the first study, the characteristics of the employed regular wave were on a laboratory scale. The results showed that there were an optimal ratio  $(b/B)_o = 0.43$ , which maximizes the amount of water entering the reservoir for the case study. For the second study, the characteristics of the regular wave were employed at actual scale and the results showed that there was an optimum ratio  $(b/B)_o = 0.38$ , which maximizes the amount of water entering the reservoir for the case study. In both cases, the optimum ratio is found for the extreme lower of freedom of degree and the results showed a significant increase in the mass allowed in the reservoir and, consequently, larger use of the incident waves.

Keywords: Constructal Design; Wave Energy; Overtopping; Geometric Optimization; Finite Volume Method (FVM).

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação.....	3
1.2	Estado da arte.....	6
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo Geral.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos.....	20
1.4	Metodologia.....	21
1.5	Organização do Trabalho.....	21
<b>2</b>	<b>ENERGIA DAS ONDAS.....</b>	<b>24</b>
2.1	Tecnologias para Conversão da Energia das Ondas.....	25
2.1.1	Galgamento.....	28
2.1.1.1	Wave Dragon.....	30
2.1.1.2	Wave Plane.....	32
2.1.1.3	Seawave Slot-Cone Generator - SSG.....	33
2.2	Possíveis Impactos Causados pela Utilização da Energia Proveniente das Ondas do Mar.....	34
2.3	Energia das Ondas no Brasil.....	36
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS DE TEORIA DAS ONDAS.....</b>	<b>43</b>
3.1	Teoria Linear de Ondas.....	48
3.2	Teoria de Stokes de 2ª Ordem.....	51
<b>4</b>	<b>TEORIA <i>CONSTRUTAL</i>.....</b>	<b>53</b>



<b>5</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA.....</b>	<b>59</b>
5.1	<i>Volume of Fluid – VOF.....</i>	<b>59</b>
5.2	Descrição dos Problemas.....	<b>61</b>
5.2.1	Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório.....	<b>62</b>
5.2.2	Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real.....	<b>66</b>
5.3	Funções definidas para Geração de Ondas.....	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA.....</b>	<b>73</b>
6.1	Modelos Numéricos Empregados.....	<b>75</b>
6.1.1	GAMBIT (Pré Processamento) .....	<b>75</b>
6.1.2	FLUENT (Processamento e Pós Processamento) .....	<b>75</b>
6.2	Método dos Volumes Finitos – MVF.....	<b>75</b>
6.3	Procedimentos Numéricos.....	<b>79</b>
6.3.1	Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação..	<b>81</b>
6.3.2	Acoplamento Pressão-Velocidade.....	<b>82</b>
6.3.3	Discretização Temporal das Equações de Conservação.....	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
7.1	Verificação do Modelo Numérico.....	<b>86</b>
7.2	Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório.....	<b>87</b>
7.3	Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real.....	<b>97</b>
7.3.1	Estudo de Qualidade de Malha.....	<b>97</b>
7.3.2	Estudo de Influência do Passo de Tempo.....	<b>99</b>
7.3.3	Resultados da Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento <i>Onshore</i> em Escala Real.....	<b>100</b>

<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>121</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Distribuição do fluxo médio da energia das ondas em kW/m.....	5
Figura 1.2	<i>Wave Dragon</i> .....	7
Figura 1.3	Dispositivo <i>Wave Plane</i> .....	8
Figura 1.4	Dispositivo <i>Seawave Slot-Cone Generator</i> .....	8
Figura 1.5	Disposição ótima dos dispositivos simulados no trabalho de Beelset al. (2010).....	10
Figura 1.6	Geometria ótima encontrada por Iahnke (2010): $t = 75$ s e ângulo de inclinação de aproximadamente $30^\circ$ .....	11
Figura 1.7	Ilustração do domínio computacional utilizado em Machado et al.(2011b).....	12
Figura 1.8	Ilustração do domínio computacional utilizado em Machado (2012), onde $H_1$ é a altura da rampa do dispositivo e $L_1$ o comprimento da mesma.....	14
Figura 1.9	Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento no estudo de Martins et all, 2015(a).....	17
Figura 1.10	Ilustração do processo de otimização realizado no estudo de Martins et all, 2015(b).....	18
Figura 1.11	Figura 1.11: O domínio dispositivo de galgamento estudado por Barbosa et all., 2015, com as suas dimensões gerais.....	19
Figura 1.12	Porto de Sines, localizado na costa sudeste de Portugal.....	20
Figura 2.1	Classificação com relação à localização dos dispositivos de conversão da energia das ondas.....	27
Figura 2.2	Classificação dos dispositivos quanto ao princípio de funcionamento: a) Coluna de Água Oscilante; b) Galgamento; c) Corpos Oscilantes – Submerso; d) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual; e) Corpos Oscilantes – Conversor Oscilante de Translação das Ondas; f) Corpos Oscilantes – Progressivos.....	28
Figura 2.3	Primeiros Esboços do Projeto Wave Dragon.....	29

Figura 2.4	Princípio de Funcionamento do Galgamento.....	30
Figura 2.5	<i>Wave Dragon</i> : (a) Protótipo em testes no laboratório; (b) Protótipo em testes no mar.....	31
Figura 2.6	Desenho esquemático para fabricação do <i>Wave Plane</i> .....	32
Figura 2.7	Dispositivo <i>Wave Plane</i> .....	33
Figura 2.8	<i>Seawave Slot-Cone Generator</i> – SSG: Princípio de funcionamento....	33
Figura 2.9	Dispositivo Seawave Slot-Cone Generator.....	34
Figura 2.10	Princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas desenvolvido pelo LTS.....	40
Figura 2.11	Modelo na escala 1:6.5 em teste no Tanque Oceânico: (a) Unidades de bombeamento e Câmara hiperbárica; (b) Turbina hidráulica em operação.....	41
Figura 2.12	Dispositivo elaborado pela COPPE: (a) Vista superior; (b) Vista aproximada da tecnologia.....	42
Figura 3.1	Características de uma onda [Carneiro, 2007].....	44
Figura 3.2	Teoria das Ondas [Carneiro, 2007].....	46
Figura 3.3	Regiões de Aplicabilidade das Teorias de Ondas [Carneiro, 2007].....	47
Figura 4.1	Exemplos de aplicação da Lei Construtal: a) rios; b) árvores; c) floco de neve; d) animais; e) pulmão.....	54
Figura 4.2	Geometria da cavidade em Y (Adaptado de Lorenzini et al., 2011)....	56
Figura 4.3	Variações da geometria abordadas por Grimmler, 2013, em seu estudo tridimensional.....	58
Figura 5.1	Ilustração do domínio computacional 3D: a) vista lateral, b) vista superior.....	63
Figura 5.2	Variações sofridas pela geometria do dispositivo de galgamento ao longo do processo de otimização geométrica.....	64
Figura 5.3	Divisão do domínio computacional em três regiões distintas com ilustração da malha aplicada em cada região.....	65
Figura 5.4	Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real – vista lateral (Adaptado de Goulart, 2014).....	67
Figura 5.5	Dimensões do dispositivo simulado por Beels et al., 2010.....	68
Figura 5.6	Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala	

	real – vista superior.....	68
Figura 5.7	Divisão do domínio computacional em duas regiões distintas com ilustração da malha aplicada em cada região.....	70
Figura 5.8	Aplicabilidade das teorias de ondas (Adaptado de Chakrabarti, 2005).	72
Figura 6.1	Função do Método Numérico [Maliska, 2004] .....	76
Figura 6.2	Volume elementar para os balanços de conservação [Maliska, 2004]..	77
Figura 6.3	Obtenção de $\phi_f$ em uma face do volume de controle usando o esquema <i>upwind</i> [Dos Santos, 2011] .....	84
Figura 7.1	Validação da Onda Numérica.....	87
Figura 7.2	Vazão mássica total em função da razão $b/B$ .....	89
Figura 7.3	Vazão mássica instantânea em função do tempo para alguns casos simulados ( $(b/B)_o = 0.43$ , $b/B = 0.86$ e $b/B = 3.00$ ).....	90
Figura 7.4	Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $b/B = 0.43$ para os seguintes instantes de tempo: a) $t = 1.00$ s; b) $t = 2.00$ s; c) $t = 3.00$ s; d) $t = 4.00$ s; e) $t = 5.00$ s; f) $t = 6.00$ s; g) $t = 7.00$ s; h) $t = 8.00$ s.....	92
Figura 7.5	Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $b/B = 0.86$ para os seguintes instantes de tempo: a) $t = 1.00$ s; b) $t = 2.00$ s; c) $t = 3.00$ s; d) $t = 4.00$ s; e) $t = 5.00$ s; f) $t = 6.00$ s; g) $t = 7.00$ s; h) $t = 8.00$ s.....	94
Figura 7.6	Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $b/B = 3.00$ para os seguintes instantes de tempo: a) $t = 1.00$ s; b) $t = 2.00$ s; c) $t = 3.00$ s; d) $t = 4.00$ s; e) $t = 5.00$ s; f) $t = 6.00$ s; g) $t = 7.00$ s; h) $t = 8.00$ s.....	96
Figura 7.7	Teste de Independência de Malha: comparação da onda gerada analiticamente com a onda gerada com as malhas de dimensões $\Delta x =$ $1.00$ m, $\Delta x = 1.30$ m e $\Delta x = 1.60$ m.....	99
Figura 7.8	Vazão mássica total em função da razão $b/B$ .....	101
Figura 7.9	Vazão mássica instantânea em função do tempo para alguns casos simulados ( $(b/B)_o = 0.38$ , $b/B = 1.00$ e $b/B = 3.00$ ).....	103
Figura 7.10	Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão $b/B = 0.38$ para os	

seguintes instantes de tempo: a)  $t = 10.00$  s; b)  $t = 20.00$  s; c)  $t = 30.00$  s; d)  $t = 40.00$  s; e)  $t = 50.00$  s; f)  $t = 60.00$  s; g)  $t = 70.00$  s; h)  $t = 80.00$  s; i)  $t = 90.00$  s; j)  $t = 100.00$  s..... 105

Figura 7.11 Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $b/B = 0.38$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 10.00$  s; b)  $t = 20.00$  s; c)  $t = 30.00$  s; d)  $t = 40.00$  s; e)  $t = 50.00$  s; f)  $t = 60.00$  s; g)  $t = 70.00$  s; h)  $t = 80.00$  s; i)  $t = 90.00$  s; j)  $t = 100.00$  s..... 107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Classificação das ondas a partir da relação $h/L$ .....	51
Tabela 5.1	Variações das geometrias simuladas no processo de otimização geométrica.....	64
Tabela 5.2	Características da onda empregada no problema.....	65
Tabela 5.3	Variações das geometrias simuladas no processo de otimização geométrica.....	69
Tabela 5.4	Características da onda empregada no problema.....	71
Tabela 7.1	Comparação dos quatro passos de tempo estudados.....	100
Tabela A.1	Possíveis impactos ambientais provocados pela construção e instalação de um dispositivo de conversão de energia das ondas.....	121
Tabela A.2	Possíveis impactos ambientais provocados pela operação e manutenção de um dispositivo de conversão de energia das ondas.....	122
Tabela A.3	Possíveis impactos ambientais provocados pelo desmatelamento de um dispositivo de conversão de energia das ondas.....	124

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
CAO	Coluna D'Água Oscilante
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
EDP	Equação Diferencial Parcial
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
IST	Instituto Superior Técnico
LIMPET	<i>Land Installed Marine Power Energy Transmitter</i>
LTS	Laboratório de Tecnologia Submarina
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NMA	Nível Médio da Água
OWC	Coluna D'Água Oscilante
OWSC	<i>Oscillating Wave Surge Converters</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SSG	Seawave Slot-Cone Generator
UDF	<i>User Defined Function</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VOF	<i>Volume of Fluid</i>



WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Amplitude da onda	[m]
$A$	Área total do tanque de ondas	[m <sup>2</sup> ]
$A_r$	Área da rampa	[m <sup>2</sup> ]
$b$	Base superior do trapézio que define a rampa	[m]
$B$	Base inferior do trapézio que define a rampa	[m]
$C$	Celeridade	[m.s <sup>-1</sup> ]
$e$	<i>East</i>	
$f$	Frequência	[s <sup>-1</sup> ]
$\bar{F}$	Forças externas	[N.m <sup>-3</sup> ]
$\bar{g}$	Aceleração gravitacional	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h$	Altura ou distância entre os lados do trapézio	[m]
$h$	Profundidade	[m]
$H$	Altura da onda	[m]
$H_T$	Altura do tanque de ondas	[m]
$H_1$	Altura da rampa	[m]
$k$	Número de onda	[m <sup>-1</sup> ]
$L$	Comprimento de onda	[m]
$L_D$	Largura do dispositivo	[m]
$L_T$	Comprimento do tanque de ondas	[m]
$L_t$	Largura do tanque de ondas	[m]
$L_R$	Comprimento do reservatório	[m]
$L_r$	Comprimento da rampa	[m]
$L_1$	Largura da rampa	[m]
$L_2$	Altura do reservatório	[m]
$\dot{m}$	Fluxo de massa	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$n$	<i>North</i>	

$P$	Pressão estática	[Pa]
$S$	Submersão do dispositivo	[m]
$s$	<i>South</i>	
$S_{\alpha_q}$	Fonte de massa	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Período	[s]
$u$	Componente da velocidade na direção $x$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$u_x$	Componente da velocidade na direção $x$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$u_z$	Componente da velocidade nas direções $z$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_r$	Número de Ursell	
$w$	<i>West</i>	
$v$	Componente da velocidade na direção $y$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\vec{v}$	Vetor do campo de velocidades	[m.s <sup>-1</sup> ]
$x, y, z$	Coordenadas do plano cartesiano	

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo de abertura da rampa	[°]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[kg/ms]
$\alpha_q$	Fração volumétrica das duas fases (ar e água)	
$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica da fase água	
$\alpha_{\text{ar}}$	Fração volumétrica da fase ar	
$\eta$	Elevação da superfície livre	[m]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	Potencial de velocidade	[m <sup>2</sup> /s]
$\sigma$	Frequência da onda	[s <sup>-1</sup> ]
$\bar{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta t$	Intervalo de tempo	[s]
$\Delta x$	Dimensão da malha	[m]

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente tem-se a necessidade de suprir uma imensa demanda energética mundial. O aumento desta demanda de energia e o acordo de Kyoto, o qual visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa, têm aumentado o interesse pelo estudo das energias renováveis [Beels et al., 2010]. Outros benefícios do emprego deste tipo de energia podem ser mencionados, por exemplo, a minimização da exploração de depósitos de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais associados [Tolmasquim, 2003].

A principal causa dos impactos ambientais está relacionada ao uso indiscriminado dos combustíveis fósseis. Independentemente do grau de desenvolvimento do país, o uso destes combustíveis, seja para geração de energia elétrica, produção de calor ou força mecânica, ainda era dominante na matriz energética da maioria das nações na década passada [Garcia, 2004]. Desta forma, uma maior utilização das energias renováveis proporciona grandes benefícios ambientais, abrindo espaço, para o desenvolvimento tecnológico e a produção de novos conhecimentos na área energética [Santos et al., 2006].

Tem-se então, a necessidade de uma definição de energias renováveis. Segundo Assis, 2010, energia renovável é aquela obtida a partir de fontes naturais, estando disponível de forma cíclica.

O Brasil apresenta expressiva participação das fontes renováveis na matriz energética, obtendo larga vantagem em relação aos países desenvolvidos. Enquanto, nos países industrializados, a participação da energia renovável atinge 6%, no Brasil o percentual alcança 46,9%. Tal fato decorre, dentre outros fatores, da pequena utilização da energia nuclear e da significativa participação da biomassa e a hidroeletricidade na oferta total de energia no país [Assis, 2010].

Nos últimos 25 anos, 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 têm 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. De 2009 até os dias de hoje, diversos tipos de dispositivos foram desenvolvidos para extração das energias das ondas [Falcão, 2010].

Conforme Cruz e Sarmiento, 2004, os dispositivos atualmente existentes podem ser classificados de acordo com o princípio de conversão de energia das ondas em energia elétrica: dispositivos Coluna de Água Oscilante, CAO (do inglês: OWC – *Oscillating Water Column*); dispositivos Corpos Flutuantes, podendo ser de Absorção Pontual (*Point Absorbers*) ou Progressivos (*Surging Devices*) ou dispositivos de Galgamento (*Overtopping Devices*). Podem, também, ser classificados de acordo com sua localização e são agrupados em: dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*).

O presente trabalho aborda o dispositivo de galgamento, cujo princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada quando devolvida ao mar aciona turbinas hidráulicas de baixa queda que estão acopladas a geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado dá-se através do galgamento de uma rampa inclinada pela onda [Relatório WavEC, 2004].

A Teoria Construtal, tem sido usada para explicar deterministicamente a geração da forma de estruturas de fluxo na natureza, tais como: bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, formas de animais, tecidos vascularizados, entre outros, com base em um princípio evolutivo de fluxo no tempo. Este princípio é a Lei Construtal do Design e Evolução: “Para um sistema de dimensões finitas, onde existe escoamento, persistir no tempo (sobreviver) ele deve evoluir de uma maneira que propicie o mais fácil acesso possível às correntes que escoam através dele” [Bejan e Lorente, 2004]. Este princípio é utilizado para desenvolvimento de projetos novos em diversas áreas, entre outras, eletrônica e células de combustível [Bejan e Lorente, 2006]. A lei Construtal é aplicada através do Design Construtal que é um método de avaliação geométrica empregado neste trabalho para a determinação da geometria ótima do dispositivo de galgamento.

Além disso, o presente estudo é desenvolvido através da modelagem computacional, a qual emprega a simulação numérica de soluções para problemas científicos, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição e elaborando códigos computacionais para obtenção destas soluções. Define-se simulação numérica como um

processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir análises com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação [Pegden, 1990].

## **1.1 Motivação**

O grande desenvolvimento de produtos tecnológicos nos dias atuais fez a energia tornar-se um bem indispensável a vida na sociedade e para o desenvolvimento das regiões. Esses bens, hoje indispensáveis, se utilizam de energia elétrica de forma a gerar, para a população, conforto e acesso à informação, ou seja, possibilitar uma maior qualidade de vida. Quanto maior o desenvolvimento da região, maior a quantidade de aparelhos eletrônicos da população. Alguns destes itens são praticamente indispensáveis na vida moderna, tais como: refrigeração, eletrodomésticos, computadores, etc. Tendo em vista esses fatores, este trabalho busca contribuir com a sociedade, apresentando recomendações teóricas a respeito de um conversor que visa a obtenção de energia elétrica através de uma fonte renovável de energia, a energia contida nas ondas do mar.

A utilização de fontes renováveis para a produção de energia elétrica representa uma alternativa viável à crescente demanda de energia e à necessidade de redução de emissões globais de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) ocasionadas, entre outros motivos, pelo uso de combustíveis fósseis nos meios de produção tradicionais [Tolmasquim, 2003]. Cada vez mais somos confrontados com a exigência de encontrar nas energias renováveis uma alternativa real e viável às formas convencionais de produção de energia elétrica, responsáveis por sérias ameaças ao meio ambiente. As obrigações legais impostas pela comunidade e pelo protocolo de Kyoto apenas reforçam esta necessidade.

Apesar do consumo de combustíveis fósseis ser considerado, ainda hoje, uma inevitabilidade inerente ao progresso humano, tem havido uma tomada de consciência crescente da necessidade de tornar esse progresso ecologicamente sustentável. Os recursos naturais estão longe de ser inesgotáveis e o impacto do crescimento populacional humano, no planeta Terra, começa a tomar proporções alarmantes. O consumo de energia é um dos principais motivos de preocupação, atualmente, devido à crescente escassez de recursos não renováveis e à incessante demanda por novas fontes de energia. Atualmente, os combustíveis

fósseis, petróleo, carvão e gás natural, são as principais fontes primárias de energia, representando uma cota elevada na produção de energia elétrica mundial. O restante da cota é preenchido pela produção em centrais hidrelétricas, nucleares, geotérmicas e de biomassa, bem como em parques eólicos, solares e de ondas [Henriques, 2009].

Para a sustentabilidade da Terra torna-se necessário e urgente que, face às exigências e consumos energéticos atuais, se recorra, cada vez mais, a energias limpas e renováveis [Lima, 2010]. Conforme Cruz e Sarmiento, 2004, o oceano contém o maior de todos os recursos naturais e possui um potencial energético enorme, podendo contribuir de forma significativa na crescente necessidade global de energia.

Porém, as fontes de energia renováveis apresentam algumas limitações de caráter tecnológico, econômico ou de disponibilidade. Este fato torna significativa a necessidade do desenvolvimento científico e tecnológico de dispositivos que viabilizem a comercialização de energia em larga escala, garantindo uma oferta de energia suficiente para as demandas atuais.

O oceano apresenta-se como uma fonte inesgotável de energia limpa e renovável, que se concentra, essencialmente, sob a forma de ondas oceânicas, geradas pela ação dos ventos sobre a superfície do oceano, e de correntes marinhas, causadas pelo efeito das marés e pelas variações de salinidade e temperatura. Existe, atualmente, uma procura crescente a nível mundial por recursos energéticos, que se revelem alternativas aos recursos existentes, extremamente poluentes e de disponibilidade limitada. Como resultado, há de se criar condições para sua exploração de forma sustentável [Lima, 2010].

Outro aspecto destacado por Lima, 2010, é o fato das ondas oceânicas percorrem grandes distâncias, após a área de geração, sem perdas de energia significativas, exceto quando expostas a ventos de sentido contrário. Com a aproximação da costa, sofrem amortecimento devido à interação com zonas de menores profundidades.

Estimativas recentes indicam que a energia contida nas ondas do mar é cerca de 10TW, equivalente a todo o consumo de eletricidade do planeta. Existem restrições quanto ao uso de grandes áreas dos oceanos, devido às rotas de navegação, regiões turísticas e de lazer, assim como pelos decréscimos associados ao rendimento dos conversores. Contudo, ainda revela-se significativa a quantidade de energia dos oceanos a ser convertida em eletricidade. O percentual de 10% de aproveitamento do potencial energético total das ondas, considerado realístico para as próximas décadas, representaria acréscimo de ordem de 1000GW na matriz energética mundial [Estefen, 2006].

A pesquisa relativa à energia das ondas teve início na década de 70, incentivada pela crise petrolífera. Desde então têm sido propostos diversos dispositivos para o aproveitamento deste recurso, apesar de apenas um reduzido número destes terem sido estudados e aplicados em larga escala. Devido à complexidade das características das ondas oceânicas e da hidrodinâmica associada à extração da energia a partir delas, o desenvolvimento de tecnologias que tirem partido deste recurso necessita de uma pesquisa bastante aprofundada [Lima, 2010].

Assim como as outras fontes de energia renovável, a energia das ondas está distribuída pelo planeta de forma desigual (vide Fig. 1.1). Conforme Lima, 2010, os climas mais propícios para exploração da energia das ondas, com níveis de potência médios, situados entre os 20 – 70 kW/m ou superiores, encontram-se em zonas temperadas (entre 30° e 60° de latitude), onde ocorrem maiores tempestades. Existem também zonas em aproximadamente 30° de latitude, onde sopram ventos regulares que compensam os menores níveis de picos de potência através da menor variação da potência das ondas.

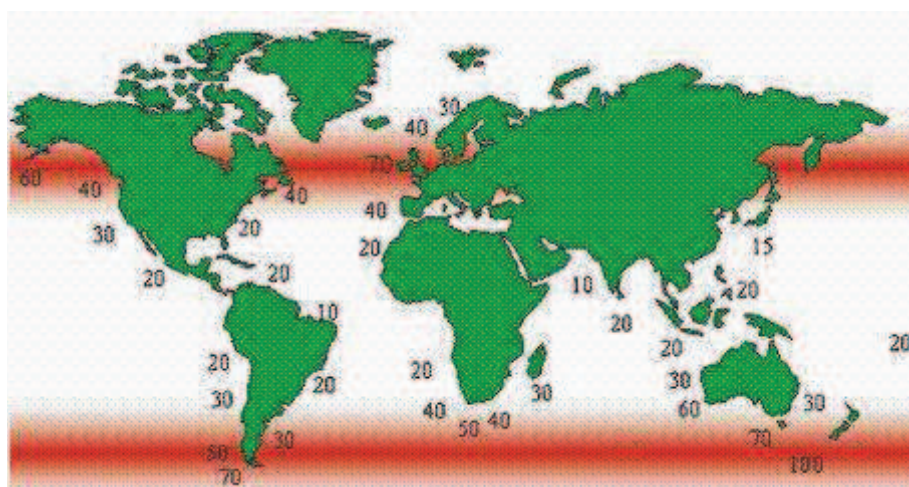


Figura 1.1- Distribuição do fluxo médio da energia das ondas em kW/m.<sup>1</sup>

No caso do Brasil, embora as alturas de ondas típicas não apresentem valores energéticos dos mais elevados, sua regularidade e pouca ocorrência de fenômenos ambientais, com capacidade de destruição dos equipamentos de conversão indicam a possibilidade de um aproveitamento economicamente viável, dependendo da tecnologia utilizada. Portanto, com

---

<sup>1</sup> A Figura 1.1 foi extraída de [Center For Renewable Energy Sources, 2002].



investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento, essa fonte de energia pode representar uma grande contribuição ao mercado de eletricidade [Rosa, 2008].

No Brasil, a utilização de novas fontes renováveis apresenta uma oportunidade de maior diversificação da matriz energética, minimizando os efeitos da elevada dependência hidrológica na geração de energia elétrica. A matriz energética corresponde à soma de todas as formas de energia produzidas pela sociedade, incluindo a energia elétrica, combustíveis para transporte, entre outros, enquanto a matriz elétrica é composta pelas fontes de geração de energia elétrica utilizadas [Rosa, 2008].

Atualmente, a capacidade dos modelos existentes e das tecnologias de geração de eletricidade é limitada, quando é necessário atingir os consumidores isolados e dispersos, principalmente, nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Deste modo, o aproveitamento de novas fontes renováveis de energia pode apresentar soluções adequadas e competitivas para locais isolados onde a única alternativa, quando possível, são os grupos geradores a diesel, que são amplamente conhecidos pelo alto custo de operação, manutenção e pela poluição produzida [Tolmasquim, 2003].

A expansão do uso de energias renováveis pode ajudar a diversificar os suprimentos de energia, estimular novos negócios e contribuir para o desenvolvimento econômico e social das diversas regiões do Brasil, além de proporcionar uma melhora da qualidade atmosférica e da saúde pública, oferecendo diversas vantagens ambientais quando comparadas às fontes tradicionais de geração de energia [Geller, 2003].

Sob estas perspectivas ambientais, econômicas e de saúde pública, as usinas a partir de ondas oceânicas podem contribuir no atendimento das necessidades energéticas causando poucos impactos ambientais, sem poluição externa e interna do ar, com capitais de implantação, manutenção e operação competitivos quando comparados aos mais caros projetos de centrais eólicas [Cruz e Sarmiento, 2004].

## **1.2 Estado da Arte**

Para melhor entendimento do leitor, o estado da arte foi subdividido em diferentes estudos. Primeiramente, apresentam-se estudos experimentais; no seguimento, estudos numéricos e, para finalizar, estudos numéricos com a aplicação do Design Construtal.

De acordo com Iahnke, 2010, entre os equipamentos que se encontram em testes em alto mar, da indústria *offshore*, destaca-se o *Wave Dragon* (WD). Esse dispositivo possui grande importância, não apenas por ter sido o primeiro a ser ligado a uma rede elétrica, mas, também, pela potência nominal que cada unidade pode apresentar, a qual varia em razão do clima de ondas e do local da instalação (de 4 até 11 MW). Verifica-se, ainda, que os ensaios com o protótipo dessa tecnologia demonstraram que o WD é resistente às condições reais do mar.

Na Fig. 1.2, é possível observar o protótipo do WD em fase de testes em alto mar [Kofoed et al., 2006].



Figura 1.2- *Wave Dragon*<sup>2</sup>.

Outro dispositivo que também que tem sido testado é o *Wave Plane* (Dinamarca), Fig. 1.3. Este dispositivo pode ser instalado em regiões próximas ou distantes da costa. Além disso, o projeto possui uma construção simétrica, onde sua frente fica abaixo da linha da superfície, de modo a 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 [Iahnke, 2010].

---

<sup>2</sup> A Figura 1.2 foi extraída de: [http://www.wavedragon.net/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=15&Itemid=28](http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=15&Itemid=28)>. Acesso em 12/12/2013.



Figura 1.3 - Dispositivo *Wave Plane*.<sup>3</sup>

Para aplicações *onshore*, um dispositivo denominado *Seawave Slot-Cone Generator* (SSG) foi desenvolvido pela empresa *Wave Energy* na Noruega. O dispositivo consiste de uma estrutura de concreto com uma turbina de eixo de múltiplo estágio possuindo três reservatórios, um acima do outro. Dessa forma, é possível a operar sob diferentes condições de ondas, permitindo uma vazão ininterrupta de água para a operação da turbina e tornando o dispositivo mais eficiente em relação às estruturas com apenas um reservatório. Este projeto permite a extração de uma potência aproximada de 150 kW em 10 m de largura, num clima de ondas de 19 kW/m [Iahnke, 2010; Margheritini et al, 2009].

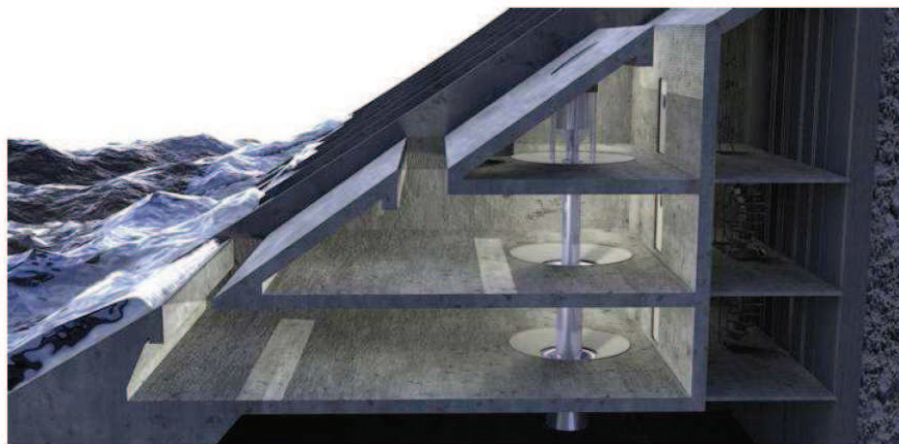


Figura 1.4 - Dispositivo *Seawave Slot-Cone Generator*.<sup>4</sup>

<sup>3</sup> A Figura 1.3 foi extraída de: <http://www.waveplane.com>. Acesso em 18/01/2011.

<sup>4</sup> A Figura 1.4 foi extraída de: < [http://waveenergy.no/technology\\_innovation/](http://waveenergy.no/technology_innovation/) >. Acesso em 27/02/2014.

Maiores detalhes a respeito das tecnologias citadas anteriormente podem ser encontrados na seção de Energia das Ondas (Capítulo 2 do presente trabalho).

Continuando com estudos experimentais, entre outros autores, Kofoed et al., 2006, realizaram diversos testes, entre estes: produção de energia para diversos clima de ondas, em um protótipo *Wave Dragon* para implantação de uma unidade com 4 MW de potência. Tedd e Kofoed, 2009, também analisaram o *Wave Dragon* e realizaram testes com um modelo numérico para comparação entre os fluxos de galgamento. Margheritini et al., 2009, estudaram uma planta piloto, ou seja, um módulo *onshore* de grande escala em três níveis e obtiveram resultados experimentais finalizando uma melhoria do conhecimento sobre as características do SSG.

Com relação aos estudos numéricos de dispositivos de galgamento para conversão de energia das ondas, destaca-se:

Liu et al., 2008a, apresentaram um estudo numérico, através do código comercial de CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) - (FLUENT) - de um tanque de ondas 2D utilizando o modelo bifásico VOF (*Volume of Fluid*), o qual representa a interação entre ar e água, para o estudo das características do galgamento e descargas para o dispositivo de conversão. As ondas geradas eram regulares, mostrando a concordância com as soluções lineares analíticas. Foi realizada, também, a validação do modelo VOF através de dados experimentais. Vários parâmetros de forma e as condições de onda incidente foram testados. Quanto aos parâmetros de forma, este estudo apresenta diversas variações da razão entre a altura e comprimento da rampa de um dispositivo de galgamento. Concluiu-se que, quanto menor a relação citada anteriormente, maior a descarga de galgamento.

Iahnke, 2009, apresenta um breve estudo sobre energia das ondas do mar bem como a modelagem computacional de um dispositivo do tipo galgamento. A simulação foi realizada através do software de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), FLUENT, que utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF) para discretizar a equação da massa e da quantidade de movimento na forma diferencial para todos os pontos do volume de controle. Empregou-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), para representar adequadamente a interação entre água e ar. Neste trabalho, validou-se a metodologia empregada através da comparação dos resultados obtidos por Liu et al., 2008a. Observou-se, também, que o conhecimento da altura da onda, aliado ao projeto adequado da rampa, são fatores que determinam a ocorrência do galgamento.

Tedd e Kofoed, 2009, realizaram um estudo objetivando preencher uma lacuna na literatura a respeito de séries temporais de fluxo de galgamento sobre estruturas. Justifica-se a necessidade do estudo do fluxo de galgamento para que, assim, realize-se a otimização do projeto e das turbinas alojadas dentro do reservatório. Foram realizados testes durante uma tempestade e o dispositivo foi regulado para uma baixa flutuabilidade, finalizando a obtenção de um melhor teste de fluxo de galgamento, sabendo-se que essa condição não é indicada para um melhor aproveitamento de energia. Os autores compararam medições realizadas através de transdutores de pressão no dispositivo com simulações realizadas através de um algoritmo. Para realização destas simulações numéricas foram calculados fatores como: probabilidade de ocorrência do galgamento, volume provável de galgamento, entre outros. Comparações foram realizadas com a finalidade de comprovar a eficiência do algoritmo testado, fato que validou o mesmo.

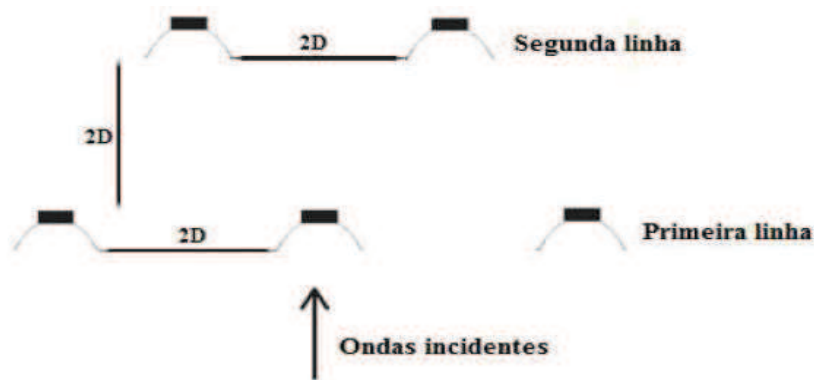


Figura 1.5 - Disposição ótima dos dispositivos simulados no trabalho de Beels et al. (2010).

Beels et al., 2010, realizaram estudos numéricos onde refletores e o corpo principal (rampa e reservatório) foram simulados a fim de estudar efeitos de esteira atrás de um único dispositivo (vide Fig. 1.5). Estes estudos foram realizados para ondas uni e multidirecionais. Também, investigaram a esteira que se forma a sota-vento de uma “fazenda” com cinco Wave Dragon instalados em fileiras distintas (três WEC’s (Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas) na primeira fila e 2WEC’s na segunda). Este cálculo foi realizado para três distâncias distintas entre os dispositivos, respectivamente,  $D$ ,  $2D$  e  $3D$ , onde  $D$  é definido como a distância entre as pontas dos refletores de onda de um único WEC. As simulações das ondas foram realizadas através do modelo MILDwave, o qual simula processos de

transformação de ondas como: refração, difração, empolamento e reflexão, intrinsecamente. A dissipação de energia por atrito no fundo e a quebra das ondas não foram consideradas. Concluiu-se que, cinco dispositivos instalados deslocados entre eles  $2D$  (distância apontada pelos resultados como de menor influência dos efeitos de esteira causados pelos dispositivos vizinhos) produzirão cinco vezes mais do que um único WD para o clima de ondas do Mar do Norte, tendo em vista que também foi verificado que a energia das ondas incidentes nos dispositivos localizados na segunda linha não é afetada pelos dispositivos localizados na linha antecedente.



Figura 1.6 - Geometria ótima encontrada por Iahnke (2010):  $t = 75$  s e ângulo de inclinação de aproximadamente  $30^\circ$ .

Iahnke, 2010, como continuação do estudo citado anteriormente, avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento para um fluxo bidimensional (vide Fig. 1.6). Considerou-se um clima de ondas semelhante ao encontrado na parte sul do Brasil (cidade de Rio Grande, localizada a cerca de  $32^\circ$  S e  $52^\circ$  W). Neste trabalho, a melhor geometria foi obtida para um ângulo de  $30^\circ$ .

Machado et al., 2011a, apresentam 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 Método dos Volumes Finitos (MVF), FLUENT. E, para a abordagem da interação entre as fases ar e água empregou-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). De forma geral foi observada a eficiência do modelo numérico (FVM e VOF) para a predição dos escoamentos transientes de ondas sobre um dispositivo de galgamento.

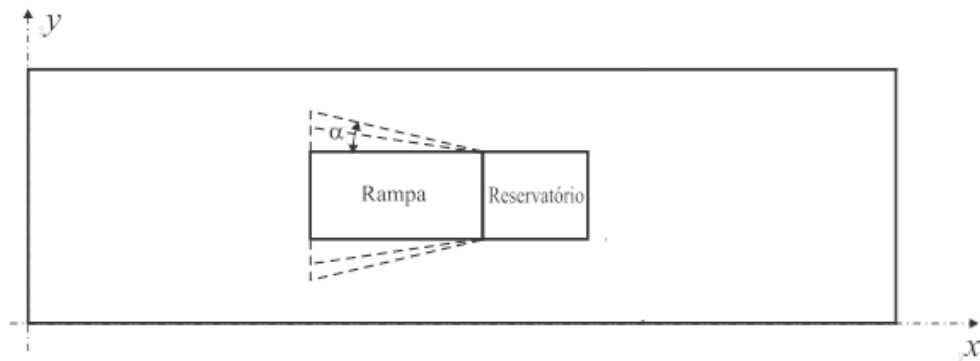


Figura 1.7 - Ilustração do domínio computacional utilizado em Machado et al.(2011b).

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 (vide Fig. 1.7). Para tal investigação, foram avaliadas três rampas tridimensionais, com diferentes ângulos de abertura da rampa ( $\alpha = 0^\circ$ ;  $9.46^\circ$  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) foram realizados conforme verificado 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 de um único Wave Dragon (WD) e de uma fazenda com vários WD 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.

Não se poderia deixar de fazer alusão aos estudos de otimização numérica de dispositivos de galgamento para conversão de energia das ondas, através da Teoria Construtal.

Machado et al., 2011c, realizaram um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento por meio de Design Construtal. O problema de otimização bidimensional consistiu em encontrar a melhor combinação para várias geometrias (variando dimensões de rampa e reservatório) para dispositivos de galgamento, objetivando encontrar a geometria ótima que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo. As geometrias foram inseridas em um tanque de ondas regulares. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte de fração volumétrica foram resolvidas no código comercial FLUENT, baseado em MVF. Aplicou-se o VOF para a interação entre ar, água e o dispositivo. A estrutura foi submetida a duas restrições: o volume total do tanque e a fração de volume do dispositivo. A razão entre a área da rampa do dispositivo e a área total do tanque foi mantida constante. Além disso, o problema apresentou outros parâmetros fixos de concepção, como a razão entre a altura e o comprimento de onda, também conhecida como a inclinação da onda, a relação entre a profundidade e comprimento de onda, a profundidade relativa e a relação entre a altura da onda e a profundidade (altura relativa da onda). O objetivo foi maximizar a vazão mássica de água que galgou a rampa. Como resultado desse estudo, foi obtida a inclinação da rampa que melhor explorou a energia da onda incidente e, portanto, produziria uma quantidade maior de energia elétrica. Os resultados mostraram que havia uma proporção ideal que maximizou a massa de água no reservatório (objetivo). Além disso, o galgamento não ocorreu para as relações extremas, comprovando a aplicabilidade do Design Construtal para a otimização de dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em elétrica.

Dos Santos et al., 2013, fizeram uma avaliação numérica da geometria de dispositivos de OWC e de galgamento por meio do Design Construtal. Para ambos dispositivos foram realizados estudos de otimização. Para o conversor de energia do tipo galgamento, o objetivo foi de maximizar a massa de água que galgou a rampa. Os resultados numéricos apresentados neste trabalho ilustraram a aplicabilidade do Design Construtal para a otimização de WEC's. Observou-se, também, que a forma que leva a melhor conversão de energia é a mesma que minimiza as resistências do fluxo



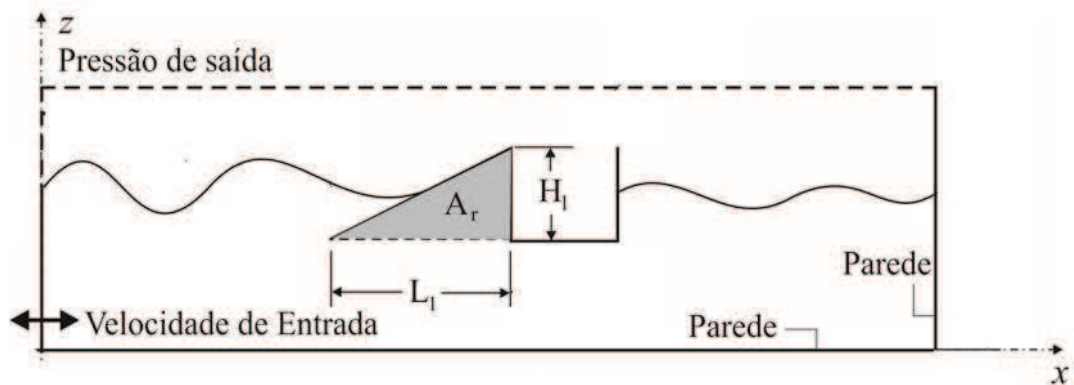


Figura 1.8 - Ilustração do domínio computacional utilizado em Machado (2012), onde  $H_1$  é a altura da rampa do dispositivo e  $L_1$  o comprimento da mesma.

Machado, 2012, realizou um estudo numérico cujo principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica por meio do Design Construtal para a geometria da rampa, visando aumentar a quantidade de água incidente no reservatório. Para tal estudo foram utilizadas a mesma metodologia numérica empregada em Machado et al., 2011c. Realizou-se um estudo numérico bidimensional visando a otimização geométrica de um dispositivo de galgamento inserido em um clima de ondas com profundidade relativa  $h/\lambda = 0.50$  (apresentado em Machado e al., 2011) e  $h/\lambda = 0.62$ , empregando o método Design Construtal. O primeiro caso,  $h/\lambda = 0.50$ , descreve uma zona de transição entre um clima de águas intermediárias e um clima de águas profundas. Enquanto o segundo caso,  $h/\lambda = 0.62$ , apresenta um clima de águas profundas. Os resultados mostraram que a geometria ótima do dispositivo ( $H_1/L_1$  - razão entre altura e comprimento da rampa do dispositivo) sofreu influência do clima de ondas, ou seja, do parâmetro  $h/\lambda$ . Porém, os resultados encontrados para os dois casos foram muito semelhantes; ambos os extremos inferior e superior da relação  $H_1/L_1$  conduziram aos piores desempenhos e, também, observou-se, em ambos, a existência de um ponto de máximo local para a mesma razão  $H_1/L_1 = 1.00$ .

Dos Santos et al., 2014, apresentaram um estudo ampliando os trabalhos apresentados em Machado et al., 2011 e Machado, 2012. Para tal, realizaram um estudo numérico de otimização geométrica de um conversor tipo galgamento para várias profundidades relativas:  $h/\lambda = 0.30$ ,  $0.50$  e  $0.62$ , por meio do Design Construtal. O objetivo foi a avaliação da influência da profundidade relativa sobre o desenho da geometria da rampa (razão  $H_1/L_1$ ) que leva a uma maior quantidade de água que entra para o reservatório. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração

volumétrica foram resolvidas com o Método dos Volumes Finitos (FVM) e o *Volume of Fluid* (VOF) foi usado para interação adequada com a mistura de água e ar. Os resultados mostraram que o Design Construtal conduziu a um aumento significativo do desempenho do dispositivo em todas as profundidades relativas investigadas. Também se pode observar que a forma otimizada da rampa tem uma forte dependência da profundidade relativa, isto é, não há uma forma universal que conduz ao melhor desempenho do dispositivo para as condições de ondas avaliadas no presente trabalho. Outra observação importante foi a ausência de ponto local máximo para este novo caso estudado, diferentemente do que ocorreu com os casos anteriores ( $h/\lambda = 0.50$  e  $0.62$ ), o qual comprova que o comportamento dinâmico da onda não depende somente da relação  $H_1/L_1$ , mas também do clima de ondas.

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 aqui é verificar 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, é avaliado apenas o princípio físico de funcionamento do dispositivo. Nas simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é empregado. O emprego do Design Construtal permitiu aumentar significativamente o desempenho fluidodinâmico do dispositivo para todas as profundidades analisadas. Os resultados mostraram que as melhores geometrias são obtidas para as menores razões de  $H_1/L_1$  para todas as profundidades analisadas, contrariamente ao que foi observado em estudos preliminares da literatura para um dispositivo no meio do canal em escala de laboratório que simulava um dispositivo de galgamento do tipo *offshore*. Também foi observado que não há uma geometria universal ótima que conduz a maior massa de água que entra no reservatório para as várias profundidades estudadas. Neste estudo, 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.

Goulart et al., 2015, realizaram um estudo numérico bidimensional a fim de avaliar o efeito geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real empregando o Design Construtal. Foi avaliado o efeito da relação entre a altura

e o comprimento da rampa de um dispositivo de galgamento sobre a massa de água incidente no reservatório do mesmo. Este estudo foi realizado para duas profundidades diferentes (5,0 m e 6,0 m). As áreas do dispositivo e da rampa foram mantidas constantes. Utilizou-se um modelo computacional baseado no método de volumes finitos e o modelo *Volume of Fluid* para tratar adequadamente a mistura de água/ar. Os resultados indicaram que a massa de água incidente no reservatório do dispositivo aumentou com o aumento da profundidade. Porém, as melhores geometrias sofreram alterações de acordo com a profundidade dispositivo, mostrando que não há forma universal que maximiza o rendimento do dispositivo conversor de energia das ondas.

Martins et al., 2015(a), 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  $\phi$ , 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  $\phi$  foram utilizados:  $\phi = 0,006$ ,  $\phi = 0,012$  e  $\phi = 0,024$  (vide Fig. 1.9). Para todos os casos estudados, a conservação equações de massa, momento e uma equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidos com o método de volumes finitos (FVM). Para tratamento adequado da mistura de ar e água, o modelo de Volume of Fluid (VOF) foi usado. Os resultados mostraram que 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  $\phi$  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.

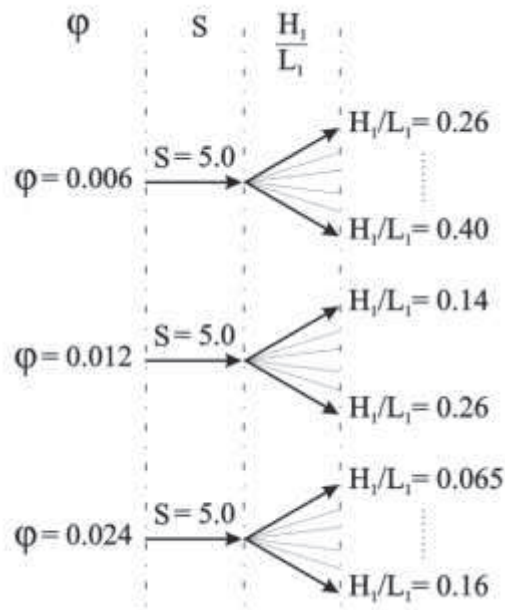


Figura: 1.9 - Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento no estudo de Martins et al., 2015(a).

Martins et al., 2015(b), 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 tanque para o fundo do dispositivo de  $S = 6,0$  m e para três diferentes proporções entre as áreas da rampa e do tanque:  $\phi = 0,006$ ,  $0,012$  e  $0,024$ . A Fig. 1.10 ilustra este processo de otimização. 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 volumes finitos (FVM). Para o tratamento adequado da mistura de água-ar, o modelo multifásico Volume of Fluid (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  $\phi$ . 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  $\phi$  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.

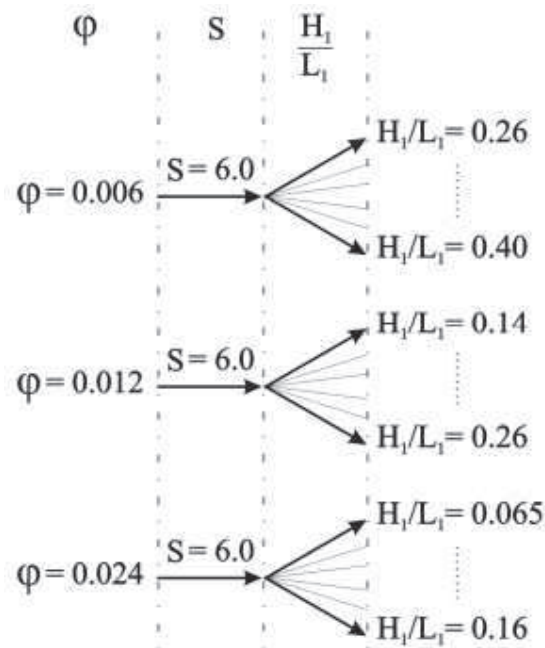


Figura 1.10 - Ilustração do processo de otimização realizado no estudo de Martins et al., 2015(b).

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 *Constructal Design*. Estudaram-se sete configurações de rampa diferentes ( $H/L = 0,22; 0,24; 0,26; 0,28; 0,30; 0,32, \text{ e } 0,34$ ), mantendo-se constante a sua área. Maiores detalhes podem ser observados na Fig. 1.11. 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.

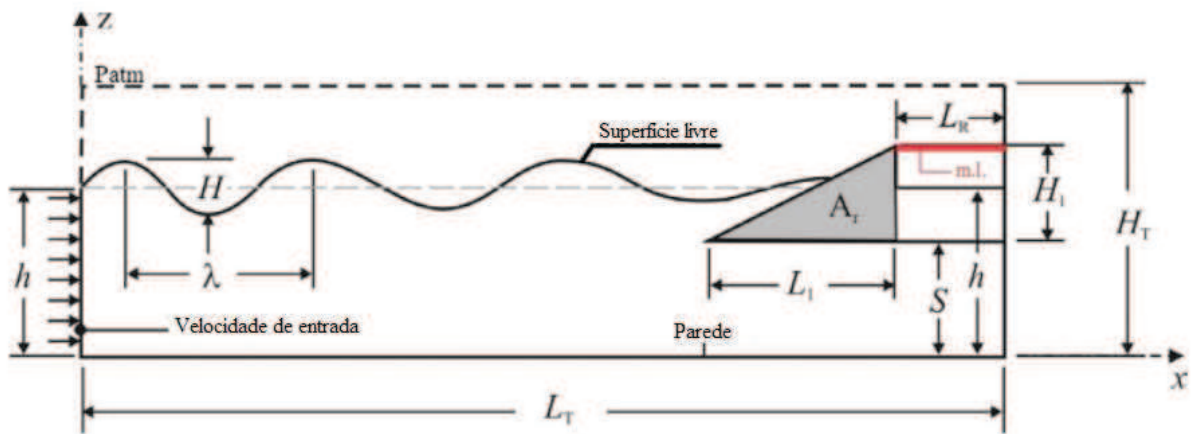


Figura 1.11 - O domínio dispositivo de galgamento adaptado de Barbosa et al., 2015, com as suas dimensões gerais.

Deu-se destaque nesta seção aos estudos numéricos de dispositivos de galgamento e aos estudos de otimização numérica por meio do Design Construtal tendo em vista a semelhança de alguns destes com o presente estudo. Porém, vale destacar, que o tema em estudo é extenso, o que permite uma diversidade de aplicações e/ou estudos, como, por exemplo, os que serão abordados a seguir.

Muitos trabalhos abordam a aplicação do galgamento em estruturas de defesa costeiras, denominadas quebra-mar. Muitos estudos com esta aplicação são encontrados na literatura. Este aproveitamento justifica-se pelas consequências que determinadas regiões sofrem na ocorrência de temporais, quando a rebentação torna-se mais violenta e ocorrem elevações sobre o nível do mar. Podendo assim, devastar povoados e regiões. Entre estes, cita-se o trabalho de Brito, 2007, onde é apresentado um estudo para reabilitação no molhe sul do porto de Póvoa Varzim (Portugal), através do qual, pretende-se melhorar aspectos estruturais, diminuindo os galgamentos. Este trabalho comparou resultados numéricos com ensaios em modelo físico. Reis e Neves, 2011, apresentaram estudos para recuperação do molhe Oeste do Porto de Sines que, em decorrência de várias tempestades, sofreu grandes estragos. Destaca-se a importância da aplicação destes dispositivos devido à importância de regiões como a citada acima, O Porto de Sines (vide Fig. 1.12), localizado na costa sudeste de Portugal, é uma das principais entradas comerciais e econômicas da Península Ibérica, sendo considerado um porto de extrema importância geograficamente e estrategicamente para Portugal e Espanha. Entre outros estudos, Shankar e Jayaratne, 2001, Losada et al., 2008, e Reeve et al., 2008, apresentaram abordagens numéricas do galgamento em dispositivos de quebra mar.



Figura 1.12 - Porto de Sines, localizado na costa sudeste de Portugal.<sup>4</sup>

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo Geral

No presente trabalho é realizada uma abordagem numérica do princípio de funcionamento de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo de galgamento. Para isso, foram realizadas diversas simulações, empregando um modelo numérico tridimensional. Tem-se como objetivo, por meio do Design Construtal associado à busca exaustiva, otimizar a geometria da rampa de um dispositivo do tipo galgamento visando maximizar a vazão mássica de água que entra no reservatório

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

O trabalho tem como objetivos específicos:

- Desenvolver e verificar um modelo numérico tridimensional para simular um dispositivo de galgamento.

---

<sup>4</sup> Figura 1.12 foi extraída de [Reis e Neves, 2011].

- Simular numericamente um dispositivo de galgamento utilizando o modelo numérico desenvolvido.
- Analisar o efeito da razão  $b/B$  sobre a quantidade de massa que entra no reservatório de um dispositivo de galgamento em escala de laboratório através do Design Construtal.
- Analisar o efeito da razão  $b/B$  sobre a quantidade de massa que entra no reservatório de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real através do Design Construtal.

#### 1.4 Metodologia

Ambos os problemas de otimização propostos consistem em encontrar numericamente a solução para várias geometrias tridimensionais do dispositivo de galgamento (rampa e reservatório) inserido em um tanque de ondas regulares: o primeiro estudo é realizado considerando uma escala de laboratório e, o segundo, considerando uma escala real. Através do Design Construtal, define-se um espaço de busca submetendo a geometria a restrições e fornecendo graus de liberdade para alcançar a função objetivo, que neste caso é a maximização da vazão mássica de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento. Para tal, em ambos os casos, optou-se em trabalhar com a geometria da rampa do dispositivo de galgamento, que possui formato trapezoidal, variando o comprimento das bases da mesma. A geometria da rampa do dispositivo foi submetida a duas restrições: área e altura da rampa constante, e também, possui um grau de liberdade:  $b/B$  (a razão entre base menor e base maior). Vale destacar que neste trabalho foi investigado somente o princípio de funcionamento dos dispositivos de galgamento. Portanto, este estudo foi baseado em prova de conceito, ou seja, se a metodologia de otimização se aplicar para o princípio de funcionamento, certamente se aplicará para um dispositivo real.

#### 1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi disposto na seguinte maneira:



## **Capítulo 2: Energia das Ondas**

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre a Energia das Ondas do Mar. Também apresenta uma revisão bibliográfica a respeito das diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, bem como os diferentes princípios de funcionamento destes conversores. Citam-se alguns dispositivos aplicados em condições reais. Apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos benefícios da utilização da energia proveniente das ondas do mar e da atual situação das pesquisas no Brasil referentes à exploração da energia proveniente das ondas do mar. Porém é dado destaque ao dispositivo para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica com o princípio de funcionamento de galgamento, objeto de estudo deste trabalho.

## **Capítulo 3: Fundamentos de Teoria das Ondas**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre teoria de ondas oceânicas, onde são apresentados os fundamentos da teoria das ondas, os elementos de uma onda, assim como a teoria Linear de Ondas e a teoria de Stokes de 2ª ordem.

## **Capítulo 4: Fundamentos da Teoria Construtal**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre fundamentos da Teoria Construtal, onde se abordam aspectos básicos encontrados na bibliografia, considerações teóricas e a aplicação do método Design Construtal em problemas de engenharia.

## **Capítulo 5: Modelagem Matemática**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF), utilizado para a abordagem do escoamento bifásico de água e ar, além da interação desse fluido com a rampa do dispositivo. São apresentados, ainda, a descrição dos problemas analisados, a aplicação do Design Construtal no dispositivo de galgamento, especificando os parâmetros fixos empregados e a restrição imposta para a otimização do dispositivo, os parâmetros das geometrias simuladas, a descrição do domínio computacional do tanque de ondas e as respectivas condições de contorno impostas ao problema. Por fim, são apresentadas as equações impostas na função definida para a geração das ondas.

## **Capítulo 6: Modelagem Numérica**

É apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre modelagem numérica. São apresentados os Modelos Numéricos utilizados no trabalho. De forma sucinta, foram apresentados aspectos relacionados à modelagem numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento empregando o Método de Volumes Finitos (MVF). Também são apresentados os procedimentos numéricos empregados para as simulações numéricas realizadas.

## **Capítulo 7: Resultados**

Neste capítulo é apresentada a verificação do modelo numérico, bem como, são apresentados e discutidos os resultados referentes à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento, utilizando Design Construtal, em escala de laboratório. No segmento são apresentados resultados referentes à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento *onshore*, utilizando Design Construtal, em escala real. Além disto, apresentam-se estudos de independência de malha e passo de tempo. O grau de liberdade  $b/B$  foi otimizado para maximizar a massa de água que entra no reservatório de um dispositivo de galgamento, mantendo-se fixos a área total do tanque de ondas, a área da rampa e as características da onda.

## **Capítulo 8: Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões a respeito dos dois estudos realizados neste trabalho e algumas propostas de continuidade de pesquisas a respeito de dispositivos para conversão da energia das ondas do mar em elétrica do tipo galgamento.

## 2 ENERGIA DAS ONDAS

As massas de água, que cobrem cerca de dois terços do planeta, constituem o maior coletor de energia solar. Os raios solares aquecem não apenas a água, como também toda a superfície terrestre, originando diferenças de pressão. Essas diferenças de pressão dão origem aos ventos, que por sua vez produzem as chamadas ondas de superfície. Finalmente, as marés, originadas, entre outros motivos, pela atração lunar, também representam uma fonte energética. Em conjunto, a temperatura dos oceanos, as ondas e as marés poderiam proporcionar muito mais energia do que a humanidade seria capaz de gastar hoje ou no futuro, mesmo considerando um aumento significativo do consumo global [Schmidt, 2011].

Tendo em vista este potencial energético contido nas ondas oceânicas, deu-se início aos estudos de criação de dispositivos específicos para conversão da energia contida nestas em energia elétrica. De acordo com Rosa, 2008, a primeira patente de conversão de energia das ondas em outras formas de energia data de 1799, concedida aos franceses Girard&Son, onde a energia produzida era empregada diretamente no acionamento de bombas, moinhos e outros equipamentos pesados. A pesquisa iniciou-se com maior intensidade após a crise petrolífera em 1973. Desde então, foram propostos diversos recursos para o aproveitamento desta energia.

De acordo com Fleming, 2012, esta diversidade se deve principalmente à variedade de princípios tecnológicos empregados e às características do mar para o qual o dispositivo foi desenvolvido. Como o clima de ondas e a altura de onda média variam muito ao redor do globo, é pouco provável que os dispositivos convirjam para uma única forma, apesar de alguns dispositivos poderem ser utilizados em climas de ondas distintos. Devido a esta grande variedade, existem diversas formas de classificar estes dispositivos, sendo as duas principais: de acordo com a profundidade da coluna d'água para qual o equipamento foi projetado e de acordo com o princípio de funcionamento.

## 2.1 Tecnologias para Conversão da Energia das Ondas

Após décadas de pesquisa e desenvolvimento, existem atualmente diferentes soluções que respondem ao desafio tecnológico apresentado na extração de energia das ondas. Observa-se que estas tecnologias se encontram em estágios diferentes de desenvolvimento e apresentam, muitas vezes, concepções e princípios diferentes. Logo, é fundamental estabelecer critérios para classificá-las apontando suas diferenças e similaridades [Cruz e Sarmiento, 2004].

Com isso, classificam-se os dispositivos de conversão de energia das ondas de acordo com a distância de sua localização em relação à costa e quanto ao tipo de dispositivo, ou seja, a maneira como converte a energia das ondas em energia elétrica [Relatório WavEC, 2004].

Na classificação quanto à localização, os dispositivos podem ser instalados na costa, em águas pouco profundas ou mais afastados da costa, em águas profundas. De acordo com o Relatório WavEC, 2004, os dispositivos podem ser classificados em:

- **Onshore:** dispositivos com acesso por terra, também conhecidos como dispositivos costeiros ou dispositivos de primeira geração.

Os dispositivos costeiros são aqueles que se encontram fixos ou que são construídos na orla costeira. Esta proximidade confere-lhes vantagens imediatas, tais como uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos [Cruz e Sarmiento, 2004].

Entretanto, apresentam alguns inconvenientes, como restrições quanto a sua localização, associados a requisitos de profundidade de água e exposição, maior impacto ambiental, sobretudo visual, e um nível de potência média das ondas reduzido, devido aos efeitos dissipativos de energia por rebentação e atrito no fundo. Isso pode ser parcialmente compensado instalando os aparelhos em localizações de concentração natural de energia [Rhinefrank et al., 2006].

- **Nearshore:** dispositivos instalados próximos da costa, com profundidade variando entre 8 e 20 m.

Os sistemas *nearshore* são montados no oceano numa posição entre os sistemas costeiros (*onshore*) e os sistemas distantes da costa (*offshore*). Estes sistemas são caracterizados por serem usados para extrair a potência diretamente a partir da zona de rebentação. Quando existem objetivos ambientais, os aparelhos *nearshore* podem promover soluções alternativas aos aparelhos *onshore* [Rhinefrank et al., 2006].

- **Offshore:** dispositivos instalados afastados da costa, com profundidade maior do que 20 m.

Esta classe de dispositivos de conversão de energia das ondas é mais recente e, por isso, esses dispositivos são, muitas vezes, mencionados como dispositivos de terceira geração. Estão localizados em zonas de profundidade elevada e, assim, beneficiam-se de regimes de onda mais energéticos comparando com os casos anteriores e apresentam menor impacto visual. Para isso requerem sistemas de amarração com o fundo do mar, flexíveis ou rígidos, e cabos submersos para a transferência da energia elétrica produzida, elevando custos e perdas associadas [ETSU, 2001].

Esses custos e perdas associados a essa transferência são suplantados por uma maior produção de energia, aumentando desta forma a relação Energia Produzida/Custos associados. O conceito generalizado na atualidade passa pela implementação de parques de diversos dispositivos quando o objetivo é a produção de energia elétrica em larga escala [Cruz e Sarmiento, 2004].

Veja a seguir na Fig. 2.1 a classificação adequada, de acordo com o Relatório WavEC, 2004.

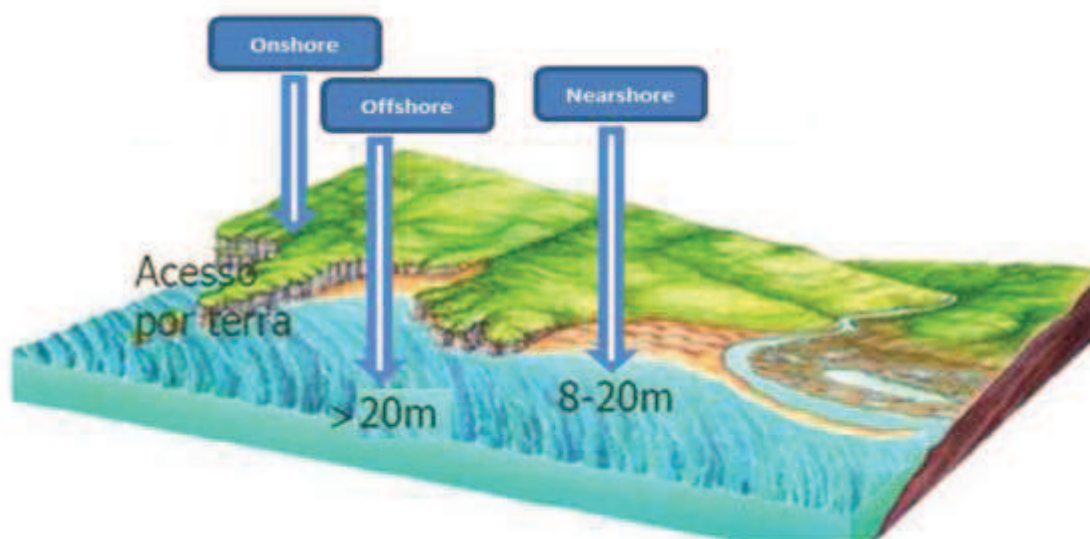


Figura 2.1 - Classificação com relação à localização dos dispositivos de conversão da energia das ondas.<sup>6</sup>

Em contraste com outras fontes de energia renováveis, existe uma grande variedade de sistemas de conversão para energia das ondas. Apesar de existirem várias técnicas de conversão patenteadas, o aparente grande número de conceitos para conversores de energia das ondas, pode ser dividido em alguns tipos distintos, consoantes seu princípio de funcionamento [Lima, 2010]. De acordo com esta classificação, existem três classes de dispositivos de conversão de energia das ondas (vide Fig. 2.2):

- **Coluna de Água Oscilante** – CAO (*Oscillating Water Column* - OWC), vide Fig. 2.2 (a).
- **Corpos Oscilantes**, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging Devices*), vide Fig. 2.2 (c) - (f).
- **Galgamento** (*Overtopping Devices*), vide Fig. 2.2(b)

<sup>6</sup> A Figura 2.1 foi adaptada de <http://eupossoajudarfazendominhaparte.blogspot.com/2011/01/energia-das-ondas.html> >. Acesso em 26/01/2011.

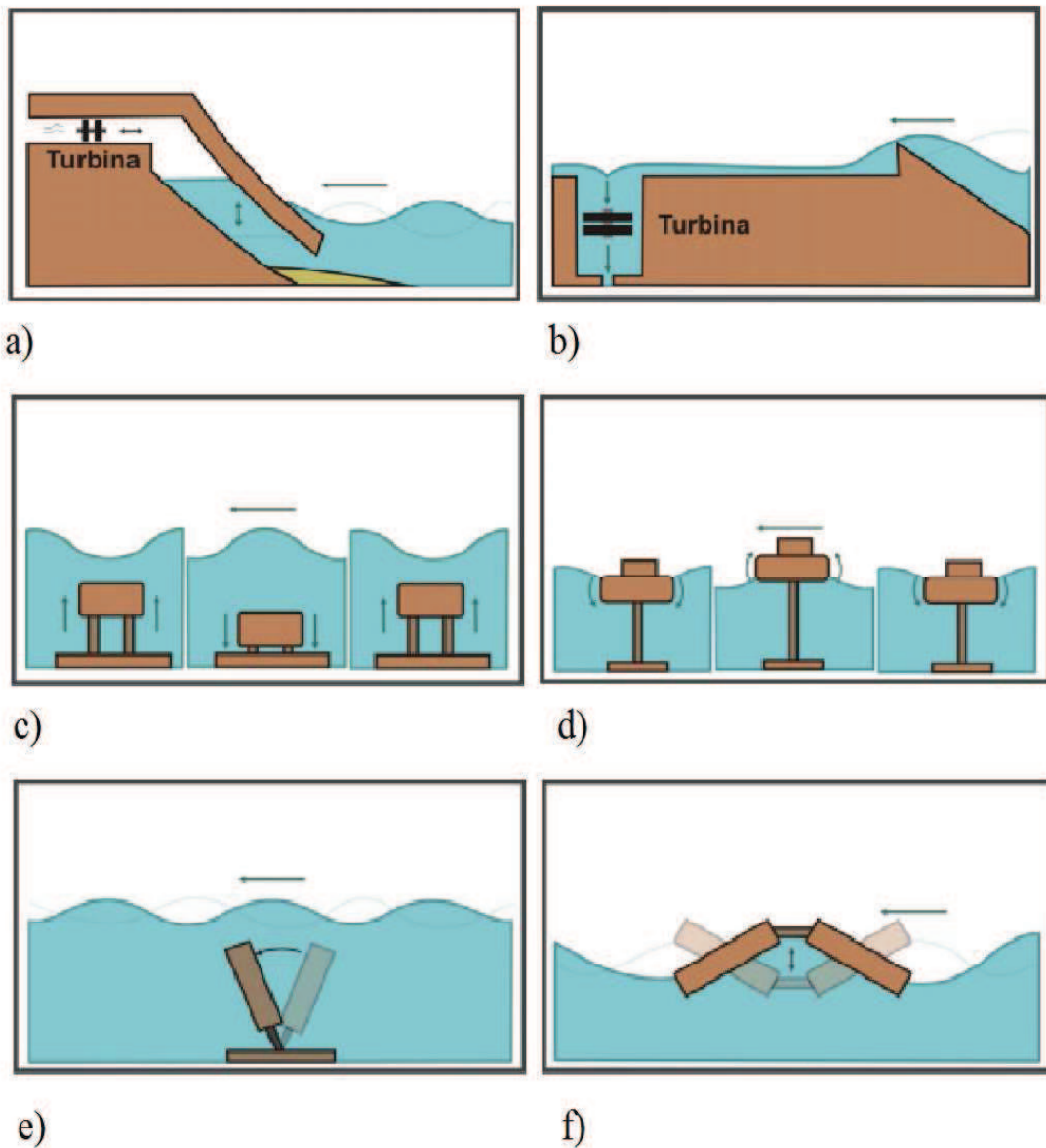


Figura 2.2 - Classificação dos dispositivos quanto ao princípio de funcionamento: a) Coluna de Água Oscilante; b) Galgamento; c) Corpos Oscilantes – Submerso; d) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual; e) Corpos Oscilantes – Conversor Oscilante de Translação das Ondas; f) Corpos Oscilantes – Progressivos.<sup>7</sup>

### 2.1.1 Galgamento

O conceito de criação dos dispositivos de Galgamento, escopo do presente trabalho, surgiu enquanto Eric Friis-Madsen observava as ondas do mar em 1986 e teve a inspiração de

<sup>7</sup> A Figura 2.2 foi adaptada de <http://www.emec.org.uk/>. Acesso em 19/11/2012.

criar uma tecnologia capaz de extrair energia elétrica das mesmas. A partir disto, começaram a realizar testes a fim de comprovar a eficiência energética do projeto, na Fig. 2.3 é possível visualizar os primeiros esboços do projeto, basicamente um grande atol flutuante com uma turbina no centro.<sup>8</sup>



Figura 2.3 - Primeiros Esboços do Projeto Wave Dragon<sup>8</sup>.

O projeto do dispositivo Wave Dragon foi dividido em quatro fases:

1ª fase (1987 - 1996): Formulação da ideia/conceito, estudo com relação à energia, considerações quanto à viabilidade econômica e pedido de patente.

2ª fase (1997 - 1999): Primeiro ensaio em um tanque de ondas de um modelo simples em escala 1:45, estabelecimento de estudo básicos quanto a refletores, rampa, eficiência energética e pesquisas relacionadas e viabilidade. Estabelecimento e testes de um modelo em escala 1:50. Estes testes foram capazes de determinar características quanto a ondas de diferentes alturas, magnitude de forças do sistema de amarração e eficiência energética.

3ª fase (1999 - 2001): Realização de mais testes com a escala 1:50, onde foram estabelecidos fluxo nas turbinas, a estratégia de escolha das turbinas, otimização de turbinas, conexões de cabos, reservatórios e geradores. Logo após, foram realizados testes com uma turbina axial com velocidade variável.

---

<sup>8</sup> A Figura 2.3 foi extraída do site <http://www.wavedragon.net>. Acesso em 23/04/2011.



4ª fase (2001 - 2004): Projetou-se o protótipo que foi instalado na pequena enseada dinamarquesa Nissum Bredning.

Os dispositivos de galgamento são tecnologias flutuantes ou fixas, para aplicação, respectivamente, em alto mar 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 é devolvida ao mar passando através de turbinas hidráulicas de baixa queda que acionam geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado produz-se através do galgamento pela onda de uma rampa inclinada [Relatório WavEC, 2004].

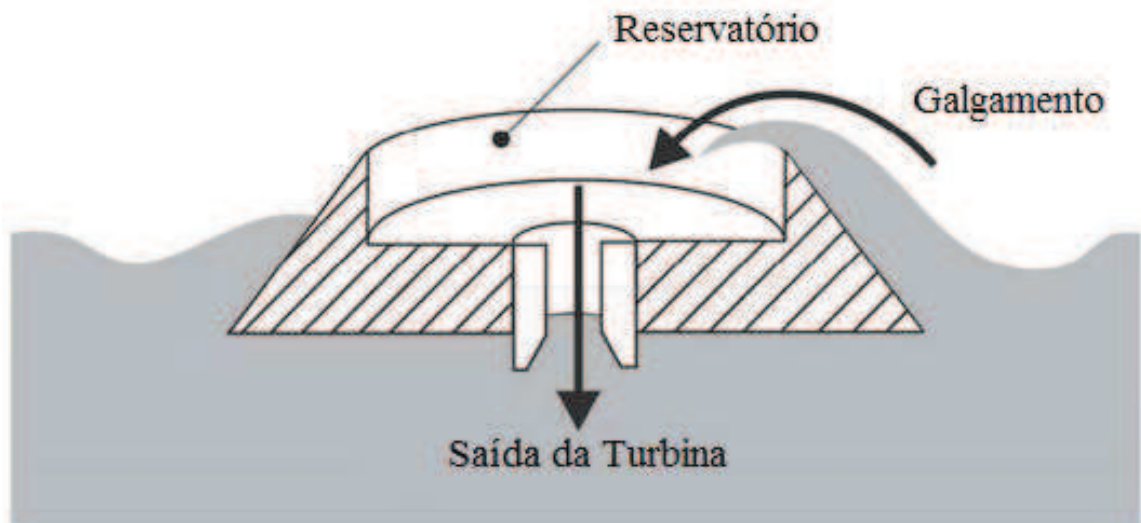


Figura 2.4 - Princípio de Funcionamento do Galgamento.

Desde Maio de 2003 uma central piloto de 20 kW de potência máxima está funcionando em Nissum Bredning, Dinamarca, uma zona marítima protegida no mar do Norte, a uma profundidade de 6 m [Relatório WavEC, 2004].

#### 2.1.1.1 *Wave Dragon*

O *Wave Dragon* é um dispositivo flutuante para aplicação em alto mar. Seu sistema foi desenvolvido pela *Wave Dragon ApS*, um consórcio internacional de empresas e

instituições da Dinamarca, Reino Unido, Irlanda, Suécia, Áustria e Alemanha. Consiste, basicamente, de dois refletores parabólicos que concentram e elevam a altura das ondas, canalizando-as em uma rampa para o interior de um reservatório (vide Fig. 2.5). A água, contida temporariamente neste reservatório, desce pela ação da gravidade, passando por turbinas hidráulicas de baixa queda, tipo *Kaplan*, situadas na sua região central, para a produção de energia elétrica [Rosa, 2008].

Um dispositivo *Wave Dragon* é projetado para, em escala real, atingir uma potência nominal de 7 MW, num intervalo que pode variar entre 4 e 11 MW, de acordo com o clima médio de ondas do Atlântico (36 a 40 kW/m). Este sistema foi o primeiro a introduzir eletricidade em uma rede elétrica, em Nissung, Dinamarca [Cruz e Sarmiento, 2004].

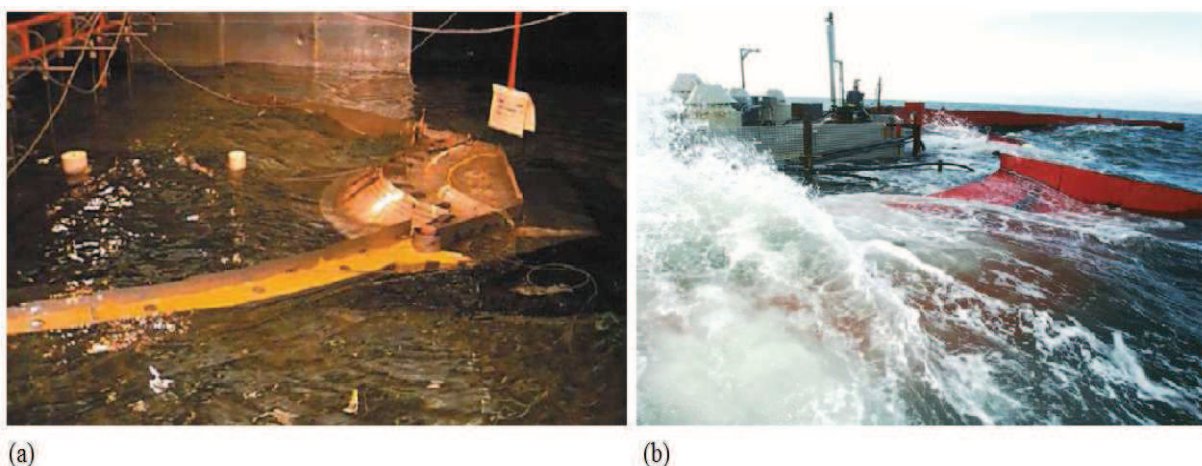


Figura 2.5 - *Wave Dragon*: (a) Protótipo em testes no laboratório<sup>9</sup>; (b) Protótipo em testes no mar<sup>10</sup>.

Sua fixação é feita através de amarras em dois blocos posicionados no fundo do mar. Foi instalado no mar, em março de 2003, inicialmente, na Estação de Testes de Energia das ondas da Dinamarca, em *Nissum Bredning*. Após calibragem e simulações iniciais, foi deslocado e reinstalado, no mês de agosto/2003, no local definitivo para os testes. Sua construção consumiu um total de 150 t de aço. Para obter-se o peso desejado são acrescentadas mais 87 t de água como lastro, perfazendo um total de 237 t. O reservatório principal tem a capacidade de armazenamento de 55 m<sup>3</sup> de água [Costa, 2004].

<sup>9</sup> A Figura 2.5 (a) foi extraída de [www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net). Acesso em 12/11/2013.

<sup>10</sup> A Figura 2.5 (b) foi extraída de <http://s4gfkmdm.edu.glogster.com/hydro-electric-energy>. Acesso em 11/11/2013.

### 2.1.1.2 *Wave Plane*

O *Wave Plane*, vide Fig. 2.6, é outro dispositivo com o princípio de funcionamento do tipo galgamento que surgiu na Dinamarca. Este dispositivo pode ser instalado em regiões próximas ou distantes da costa. É um dispositivo simples, capaz de converter energia das ondas em eletricidade e composto por bombas sem partes móveis.<sup>11</sup>

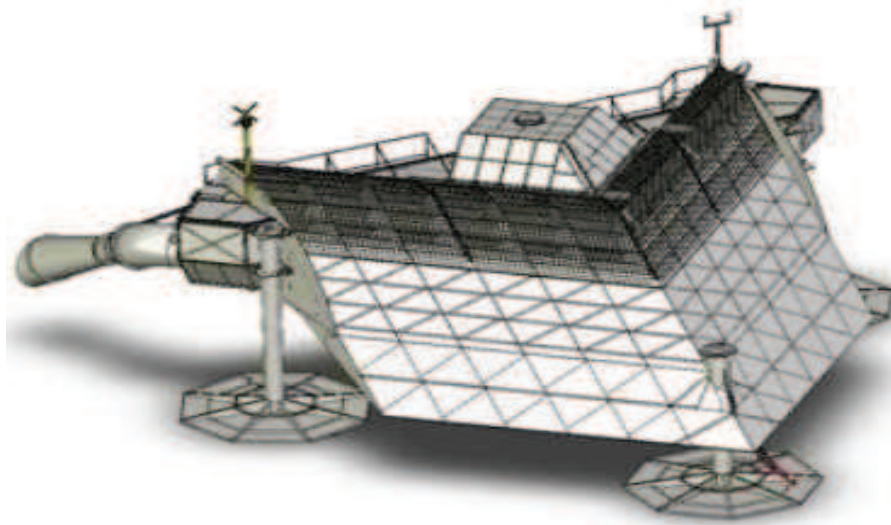


Figura 2.6 - Desenho esquemático para fabricação do *Wave Plane*.<sup>12</sup>

Desde 1990, quando seu conceito foi criado por seu inventor Erik Skaarup, o *Wave Plane*, vide Fig. 2.7, tem sido desenvolvido. O primeiro teste oficial ocorreu na Irlanda em 1996, na *University College Cork*. Já o seu primeiro protótipo, localizado no *Grenaa Pier*, ficou pronto em 2008.

---

<sup>11</sup> Disponível em: <http://www.waveplane.com>. Acesso em 14/01/2014.

<sup>12</sup> A Figura 2.6 foi extraída de [Iahnke, 2010].



Figura 2.7 - Dispositivo *Wave Plane*<sup>13</sup>.

### 2.1.1.3 *Seawave Slot-Cone Generator - SSG*

O *Seawave Slot-Cone Generator (SSG)*, Fig. 2.8, é um conversor do tipo galgamento desenvolvido pela *Wave Energy*, na Noruega. Este dispositivo tem a vantagem de instalação em qualquer localização (*onshore, nearshore* ou *offshore*). No caso de aplicação em terra, ele atua também como um dispositivo quebra-mar.

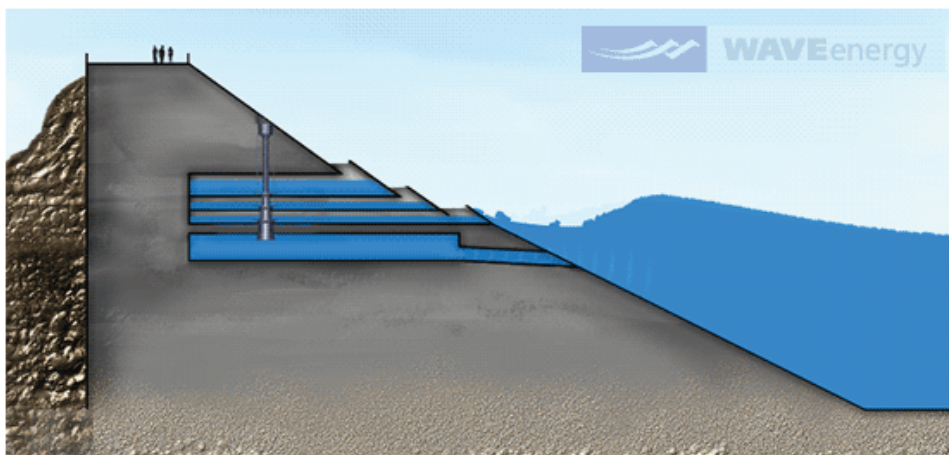


Figura 2.8 - *Seawave Slot-Cone Generator* – SSG: Princípio de funcionamento<sup>5</sup>.

<sup>13</sup> A Figura 2.7 foi extraída de [Iahnke, 2010].

<sup>14</sup> A Figura 2.8 foi extraída de: <http://tpevague.e-monsite.com/pages/partie-3/3-techniques-existantes.html>. Acesso 14/12/2013.

O SSG, Fig. 2.9, é formado por uma estrutura de concreto que contém três reservatórios de água em níveis e uma turbina de múltiplos estágios. Quando há passagem da onda, a água sobe a estrutura e é armazenada temporariamente nestes reservatórios, o que significa que a energia potencial da onda é armazenada. A partir disto, a turbina é acionada. Segundo Margueritini e Frigaard, 2007, a presença de uma turbina de múltiplos estágios é justificada pelo fato da mesma ter uma maior eficiência quando comparada a uma turbina de único estágio. Uma grande vantagem deste conversor, além do fato do mesmo ser extremamente robusto e também possuir apenas uma turbina como parte móvel, é o fato de que a maior parte da estrutura fica submersa. Isto significa que o equipamento possui um grande nível de sobrevivência em mau tempo, já que em caso de grandes ondas, as mesmas devem passar por cima do conversor, não causando estragos.



Figura 2.9 - Dispositivo Seawave Slot-Cone Generator.<sup>15</sup>

## 2.2 Possíveis Impactos Causados pela Utilização da Energia Proveniente das Ondas do Mar

De acordo com WAVEPLAN, 2009, é um fato consolidado que a energia das ondas, bem como de outras fontes renováveis de energia, reduzem a dependência dos países em relação aos combustíveis fósseis e consequentes emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, causa do efeito estufa e relacionadas com o aquecimento global. Na sua essência, a energia das ondas pode ser uma forma de lutar contra as alterações climáticas e as ameaças que coloca à biodiversidade. Contudo, podem ser ocasionados alguns impactos ambientais dependendo do ambiente onde ocorrerá sua instalação. Uma escolha sensível de local, evitando áreas

---

<sup>15</sup> A Figura 2.9 foi adaptada de: <http://www.dailykos.com/story/2005/11/18/166042/-Cowabunga-Dudes-Energy-s-Up#>. Acesso em 29/11/2013.

protegidas ou especialmente sensíveis, levará a impactos menores e a uma maior probabilidade do sucesso do projeto.

Vejamos algumas considerações mais específicas a respeito destes possíveis impactos ambientais que podem ser ocasionados pelos sistemas de energia das ondas [Relatório WavEC, 2004]:

- **Efeito visual:**

Do ponto de vista paisagístico os sistemas de energia das ondas são elementos de apreciação subjetiva e seu impacto dependerá, em grande parte, da sua visibilidade, da dimensão do parque e da altura do dispositivo acima do nível médio da água. Enfim, não se espera que o impacto visual em sistemas *offshore* possa interferir em projetos futuros para parques de energia das ondas.

- **Ruído**

O ruído originado pelo funcionamento dos dispositivos de energia das ondas resulta, em grande parte, do movimento dos componentes mecânicos e do equipamento de produção de energia. A intensidade deste ruído varia de acordo com a tecnologia instalada. O ruído poderá, teoricamente, influenciar no afastamento das aves, produzir perda de habitat de espécies marinhas e, se audível pela população, poderá reduzir a aceitação pública do projeto, com exceção de projetos *offshore*, dada a distância destes à costa. Contudo, não são conhecidos impactos significativos dos ruídos produzidos por navios em movimento e, se espera que o ruído produzido por centrais de energia das ondas seja menos significativo que o produzido por estas embarcações.

- **Acidentes:**

Da colisão de grandes embarcações com dispositivos de energia das ondas devem resultar apenas danos ao dispositivo e, não necessariamente, o derrame de quantidades significativas de poluentes, uma vez que os sistemas de energia das ondas poderão conter apenas uma pequena quantidade de óleo de lubrificação. Como medida para evitar tal situação, sugere-se uma sinalização correta dos parques ou dispositivos, proteção dos cabos e desenvolvimento de procedimentos de emergência.

- **Emissões:**

Ao contrário das tecnologias fósseis convencionais, a energia das ondas não produz gases de efeito estufa ou qualquer outro poluente atmosférico. Neste caso, poderão existir algumas emissões durante os processos necessários para fabricação, transporte, construção e instalação das centrais de energia das ondas e do equipamento de transmissão. Contudo, essas emissões são muito inferiores às das tecnologias fósseis convencionais e dependem muito das práticas industriais utilizadas no processo acima citado.

No Apêndice se encontra uma síntese dos possíveis impactos ambientais provocados pela implementação, operação e manutenção de dispositivos de conversão de energia das ondas e perspectivas medidas de mitigação.

Conclui-se que os impactos causados por um parque de energia das ondas podem sempre sofrer reduções, tornando, assim, esta maneira de obtenção de energia elétrica, mesmo que com seus impactos, uma fonte muito promissora.

### **2.3 Energia das Ondas no Brasil**

O crescente interesse pelas energias renováveis relaciona-se ao tema mais amplo do desenvolvimento sustentável, em seus três pilares: econômico, social e ambiental. Nesse sentido, a busca por fontes renováveis e sustentáveis de energia tem estado no centro do debate internacional contemporâneo. Trata-se, em última análise, de garantir a democratização do acesso à energia, condição básica da vida moderna, de maneira limpa e sustentável.<sup>16</sup>

Embora seja um tipo de recurso ainda incipiente em sua utilização no mundo, o potencial energético contido nos oceanos apresenta-se como uma alternativa promissora para geração de energia elétrica, o que justifica a necessidade de estudos sobre o aproveitamento desse recurso, especialmente na costa brasileira [Gonçalves et al., 2008].

Gonçalves et al., 2008, concluíram que a potência das ondas na costa brasileira aumenta de acordo com a latitude, até atingir 32,5 kW/h no extremo sul do país, compreendendo um recurso total de aproximadamente 40 GW. Estefen et al., 2003, admitem

---

<sup>16</sup> Extraído de: <http://www.itamaraty.gov.br/temas/temas-multilaterais/energiaebiocombustiveis/recursos-renovaveis>. Acesso em 23/11/2013.

uma capacidade máxima de aproveitamento do recurso das ondas entre 10% e 15% do total disponível. Portanto, prevê-se um aproveitamento anual equivalente a 50 TWh para esta a região sul do país.

Conforme Cruz e Sarmiento, 2004, dá-se preferência a região de Rio Grande e a utilização de dispositivos *onshore* devido à existência dos molhes da Barra do Rio Grande, que poderiam ser aproveitados para fixação dos aparelhos. Esta estrutura existente confere vantagens imediatas, tais como: maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos, ou seja, redução significativa no investimento devido ao aproveitamento da estrutura existente.

Salienta-se também, que a energia das ondas em Rio Grande pode ser utilizada para apoiar o Plano Estratégico de Desenvolvimento Local e sustentável do município, o qual prevê um elevado crescimento econômico para a região. Para viabilizar este crescimento a médio e longo prazo é inevitável que haja um incremento na oferta de eletricidade local para atender a crescente demanda por energia. Neste sentido, a energia gerada pelas ondas do mar constitui-se uma alternativa para suprir parte desta crescente demanda, diversificando a matriz energética e auxiliando no cumprimento do plano estratégico da região, promovendo um desenvolvimento sustentável com reduzido impacto ambiental [Assis, 2010].

Assim, ao pensar em um futuro baseado em energia limpa, o Brasil não pode descartar a possibilidade de aproveitar seu potencial energético dessa fonte renovável. Para isso, é imprescindível a pesquisa para prévia análise das melhores características a serem utilizadas no desenvolvimento de uma tecnologia para converter a energia das ondas do mar em energia elétrica. Pesquisas nesse sentido já vem sendo realizadas em fase avançada na Europa e em outros países [Lopes, 2012].

No Brasil, esta tecnologia ainda está sendo pouco pesquisada. São realizados estudos de conversores de energia das ondas em algumas universidades, tais como: Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade de São Paulo (USP).



A FURG vem estudando conversores de energia das ondas do mar desde 2008, citam-se algumas pesquisas relacionadas ao tema, entre elas:

- “Modelagem computacional de um dispositivo de coluna de água oscilante para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica” [Gomes, 2010] - dissertação de mestrado.
- “Energia das ondas: Estado da arte e desenvolvimento de um modelo de simulação numérica para o princípio de galgamento” [Iahnke, 2010] – dissertação de mestrado.
- “Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Dispositivo de Galgamento para a Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica” [Machado, 2012] – dissertação de mestrado.
- “Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante” [Lopes, 2012] – dissertação de mestrado.
- “Conversor de Energia das Ondas em Energia Elétrica com Dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e Estudo Geométrico” [Grimmler, 2013] – dissertação de mestrado.
- “Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil” [Gonçalves et al., 2008].
- “Escolha de Tecnologia de Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica” [Souza, 2011] – dissertação de mestrado.
- “Simulação numérica da ação de ondas sobre um dispositivo de captação de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante” [Davyt et al., 2012] – artigo submetido a evento.
- “Análise Numérica de uma Placa Submersa como Quebra Mar e Conversor de Energia das Ondas” [Seibt et al., 2013].
- “Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento *Onshore* em Escala Real Empregando *Constructal Design*”. [Goulart, 2014] - dissertação de mestrado.
- “Análise numérica do princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo placa submersa”. [Seibt, 2014] – dissertação de mestrado.

A UFRGS começou a trabalhar com o tema mais recentemente, mas podem ser encontradas publicações referentes ao assunto, entre elas, destacam-se:

- “Classificação das Tecnologias para Conversão de Energia das Ondas” [Ronchi e Schaeffer, 2013].
- “Análise Computacional e Otimização Geométrica de um Dispositivo Conversor da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante” [Schäfer, 2012].
- “Modelagem Computacional e Otimização Geométrica 2D com Constructal Design de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante em escala real – comparação onshore e offshore” [Gomes et al., 2013].
- “Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante” [Gomes, 2014] – tese de doutorado.
- “Análise Numérica da Geometria da Rampa de um Dispositivo de Galgamento Aplicando Constructal Design” [Machado et al., 2014].

A UFRJ possui um protótipo em fase de testes. Devido a este fato aprofundou-se uma coleta de informações, apresentadas no tópico posterior, afim do conhecimento de detalhes relativos à pesquisa.

- **Dispositivo desenvolvido pelo COPPE/UFRJ**

A fim de contribuir para avaliação dos conceitos básicos de uma usina para geração de energia elétrica pelas ondas do mar o Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), pertencente ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desenvolveu uma tecnologia de conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica a partir da experiência dos pesquisadores em tecnologia de águas profundas para produção de óleo e gás, utilizando-se câmaras hiperbáricas para simular o ambiente submarino. Segundo Estefen et al., 2007, o conceito é baseado no bombeamento de água, realizado pela ação das ondas em flutuantes, associada a uma câmara hiperbárica, uma turbina hidráulica e um gerador elétrico.

O modelo desenvolvido está esquematicamente representado na Fig. 2.10. Note que, para facilitar a apresentação deste trabalho, o modelo foi dividido em duas unidades: unidade de conversão primária, que é constituída de unidade de bombeamento onde a energia das ondas é utilizada no movimento alternado das bombas, e unidade de geração elétrica [Rosa, 2008].

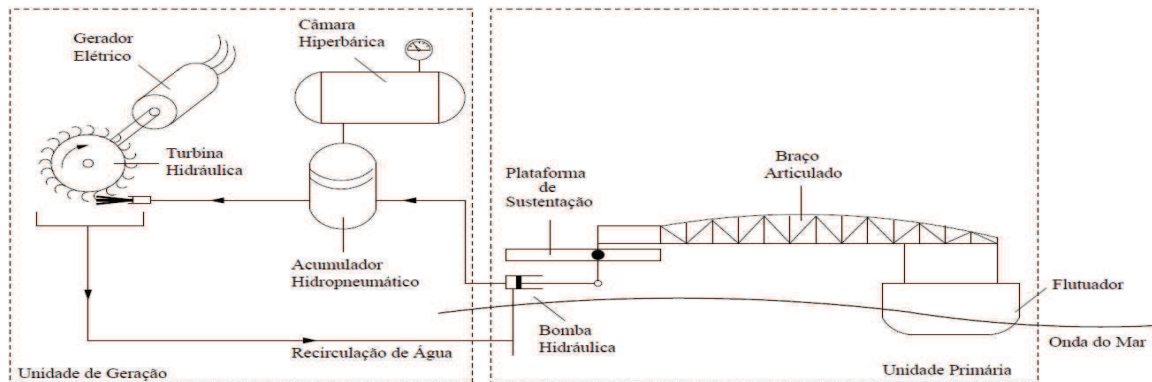


Figura 2.10 - Princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas desenvolvido pelo LTS.<sup>17</sup>

O princípio de funcionamento do sistema consiste na movimentação dos flutuadores através da ação das ondas, flutuadores estes, fixados em estruturas horizontais articuladas se movimentam atuando como braços de alavanca. Estes braços de alavanca, numa certa relação, multiplicam as forças oriundas do flutuador para acionar bombas hidráulicas de movimentos alternados. Estas bombas, succionam e comprimem o fluido durante a movimentação dos flutuadores para abastecer e manter elevada a pressão da câmara hiperbárica. A câmara hiperbárica é previamente pressurizada com gás nitrogênio, contendo certa proporção de volume de água, caracterizando um acumulador hidráulico. A água, que abastece a câmara hiperbárica, é então liberada na forma de jato, para acionar uma turbina *Pelton* numa vazão igual ou menor àquela enviada pelas bombas, através de uma válvula controladora de vazão. A rotação obtida no eixo da turbina é transmitida a um gerador elétrico para a conversão da energia mecânica em eletricidade [Costa, 2004].

Os testes iniciais com um protótipo foram realizados no canal de ondas do Laboratório de Hidrodinâmica (canal com 1 m de largura, 1 m de profundidade e 32 m de comprimento). Posteriormente, foram utilizadas as instalações do LabOceano, COPPE/UFRJ, (tanque

<sup>17</sup> A Figura 2.10 foi extraída de [Rosa, 2008].

oceânico com 30 m de largura, 25 m de profundidade e 40 m de comprimento). Foram testados dois modelos: o primeiro na escala 1:10 e o segundo na escala 1:6.5 com quatro unidades de bombeamento. Cada unidade de bombeamento dos modelos testados possui flutuador, braço, estrutura de fixação e bomba e é interligada a uma câmara hiperbárica (vide Fig. 2.11). A câmara hiperbárica é previamente pressurizada com gás nitrogênio, contendo certa proporção de volume de água, caracterizando um acumulador hidráulico [Costa, 2004].

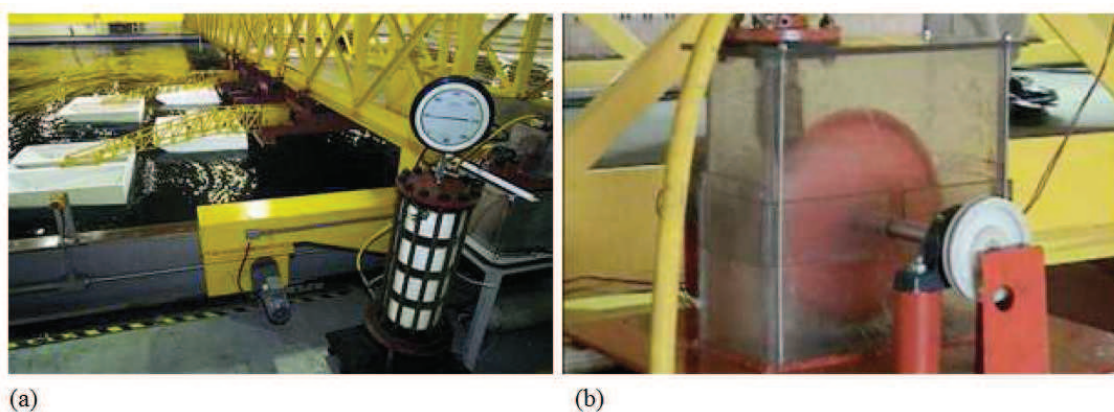


Figura 2.11 - Modelo na escala 1:6.5 em teste no Tanque Oceânico: (a) Unidades de bombeamento e Câmara hiperbárica; (b) Turbina hidráulica em operação.<sup>18</sup>

Nos testes realizados utilizando o modelo reduzido do sistema de geração, na escala 1:6.5, quanto aos ensaios feitos com ondas monocromáticas, o modelo demonstrou a capacidade de conversão de 35% do potencial energético da onda, percentual equivalente aos melhores desempenhos alcançados até o momento por tecnologias de aproveitamento da mesma fonte. Uma vantagem do sistema é sua característica modular, que possibilita alternativas de formas geométricas para o flutuador. Além do formato retangular, também foi testado um flutuador de desenho circular, que permite igual absorção de energia para diferentes direções de propagação das ondas [Assis, 2010].

Estudos feitos pela COPPE analisaram o desempenho do modelo para condições de mar próximo ao Porto de Pecém, litoral do Estado do Ceará. Para tal, foram avaliadas as características das ondas e mais tarde simuladas em escala no Tanque Oceânico para testar a capacidade de geração da tecnologia nas condições específicas do local onde será instalada a usina. Logo após estes testes, foi construída a primeira usina de conversão de energia das

---

<sup>18</sup> A Figura 2.11 foi adaptada de [Rosa, 2008].

ondas do mar em energia elétrica do Brasil (Fig. 2.12). Segundo o Diário do Nordeste<sup>19</sup>, o potencial brasileiro é considerado altamente favorável: afinal, são 8 mil quilômetros de extensão de litoral, território que seria capaz de receber usinas de ondas capazes de produzir 87 GW.

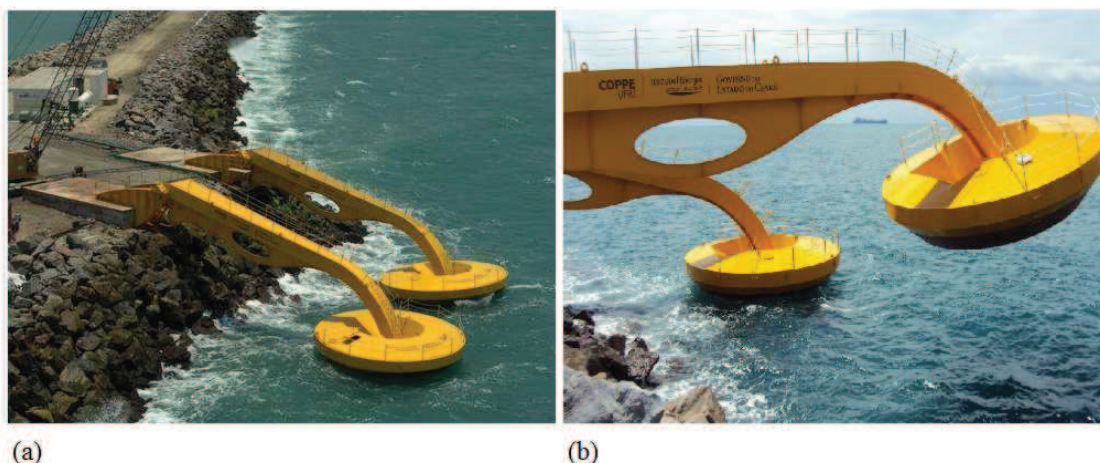


Figura 2.12 - Dispositivo elaborado pela COPPE: (a) Vista superior<sup>20</sup>; (b) Vista aproximada da tecnologia<sup>21</sup>.

Ainda, segundo a mesma fonte, o Ceará foi escolhido para esta grande experiência porque tem os chamados ventos alísios, resultado do movimento de rotação da Terra, o que garante que tenhamos ondas regulares no mar brasileiro na maior parte do ano: “Nossas ondas batem de forma constante em mais do que 70% do ano”, afirma Estefen. O projeto é financiado pela Tractebel Energia por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica, com o apoio do governo do Ceará. Atualmente, a usina encontra-se em fora de operação devido a questões contratuais. Mas, segundo o site Construindo<sup>22</sup>, os pesquisadores garantiram que os resultados foram significativos e o projeto foi considerado de sucesso.

<sup>19</sup> Diário do Nordeste, entrevista disponível em: <http://eolicastrairi.com.br/2012/06/brasil-comeca-a-explorar-energia-limpa-das-ondas/>. Acesso: 14/12/2013.

<sup>20</sup> A Figura 2.12 (a) foi extraída de: <http://eolicastrairi.com.br/2012/06/brasil-comeca-a-explorar-energia-limpa-das-ondas/>. Acesso em 15/12/2013.

<sup>21</sup> A Figura 2.12 (b) foi extraída de: <http://news.seadiscovery.com/?tag=/rio>. Acesso em 15/12/2013.

<sup>22</sup> Reportagem disponível em <http://www.construindo.com/noticia/energia-e-barragens/usina-de-ondas-de-pecem/131>. Acesso: 22/05/2016.

### 3 FUNDAMENTOS DE TEORIA DAS ONDAS

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes. As mais relevantes são as energias 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. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia [Cruz e Sarmiento, 2004].

As ondas podem ser consideradas uma manifestação das forças que atuam sobre o fluido e tendem a deformá-lo contra a ação da gravidade e da tensão superficial, que agem em conjunto para manter o nível da superfície do fluido. Sendo assim, requer uma força de algum tipo, como a causada por uma rajada de vento ou um objeto impactando sobre a água, criando assim as ondas. Uma vez criadas, as forças gravitacionais e a tensão superficial se ativam e permitem que as ondas se propaguem [Dean e Dalrymple, 1991].

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas da dimensão da zona onde este atua, que se designa por *fetch* ou comprimento de geração. Em cada uma destas ocorre concentração de energia de modo que níveis de potência solar da ordem de  $100 \text{ W/m}^2$  podem, eventualmente, se transformar em ondas com níveis de potência acima de  $1000 \text{ W/m}$  de comprimento de onda [Thorpe, 1999].

As ondas do mar podem ser classificadas por diversos critérios, de acordo com o período ou frequência, com as forças perturbadoras e com as forças restauradoras. As ondas de menor período têm como principal força perturbadora o vento, que atua na interface atmosfera/oceano. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície do oceano, que é denominado por agitação marítima. Neste processo, a gravidade atua como força restauradora, para recuperar a condição de equilíbrio [Assis, 2010].

As ondas de maior período têm como principais forças perturbadoras os sistemas de tempestades e tsunamis, bem como o movimento da terra na órbita do sol e o movimento da lua na órbita da terra. A força que age como restauradora primária possui o nome de Força de Coriolis. *Tsunami* é uma palavra japonesa que designa ondas geradas em oceanos, mares, baías, lagos, a partir de movimentos sísmicos, vulcanismo, deslizamento submarino de terra, impacto de meteorito ou até de fenômenos meteorológicos [Bryant, 2001].

Estes modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. Esta classificação também é conhecida como ondas determinísticas ou 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 ondas irregulares. Entre os modelos existentes, os de ondas irregulares são os que melhor representam o real estado do mar nos ambientes oceânicos, sendo formados pela soma de pequenas ondas regulares com altura e períodos diferentes. [Gomes, 2010]. Porém, ao longo deste trabalho, utilizam-se ondas regulares para os estudos numérico dos conversores de energia do tipo galgamento.

As principais características de uma onda oceânica são listadas a seguir e ilustradas na Fig. 3.1.

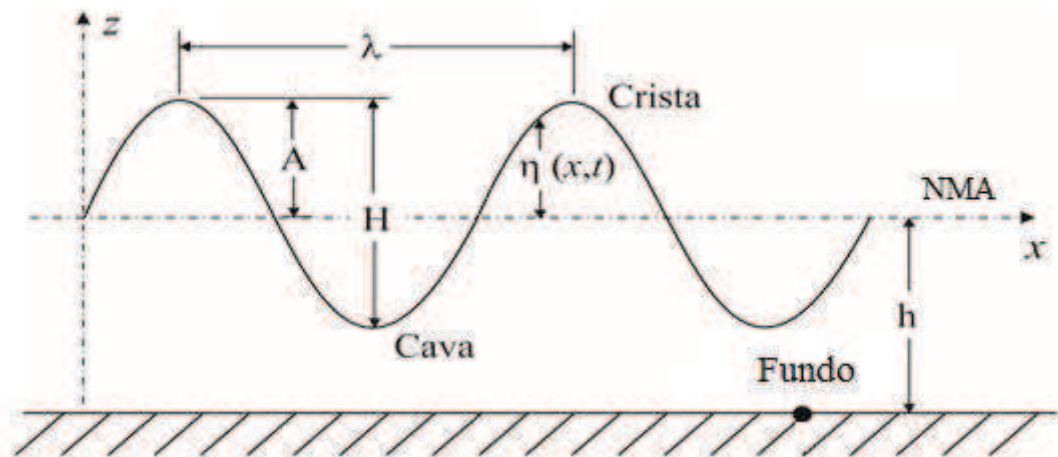


Figura 3.1 - Características de uma onda [Carneiro, 2007].

- **NMA:** Nível estático ou nível médio da água (superfície livre).

- **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 ( $f$ ):** é o número de oscilações da superfície que ocorrem na unidade de tempo.
- **Amplitude ( $A$ ):** é a distância entre a crista e a superfície livre (nível da água) ou a distância entre a cava e a superfície livre da água.
- **Comprimento de Onda ( $\lambda$ ):** é a distância entre duas cristas consecutivas ou duas cavas consecutivas.
- **Celeridade ( $C$ ):** representa a velocidade de propagação da onda.
- **Altura ( $H$ ):** é a distância entre as cristas e as cavas sucessivas.
- **Elevação da Superfície Livre ( $\eta$ ):** representa a distância 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 de onda  $H$ ,



o comprimento da onda  $\lambda$  e a profundidade da água  $h$ . Esses fatores são comumente compostos nos seguintes parâmetros adimensionais:

- Declividade  $\left(\frac{H}{\lambda}\right)$
- Profundidade relativa  $\left(\frac{h}{\lambda}\right)$
- Altura de onda relativa  $\left(\frac{H}{h}\right)$
- Número de Ursell  $U_r = \left(\frac{\lambda^2 H}{h^3}\right)$

De acordo com 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 destas teorias pode ser observada na Fig. 3.2.

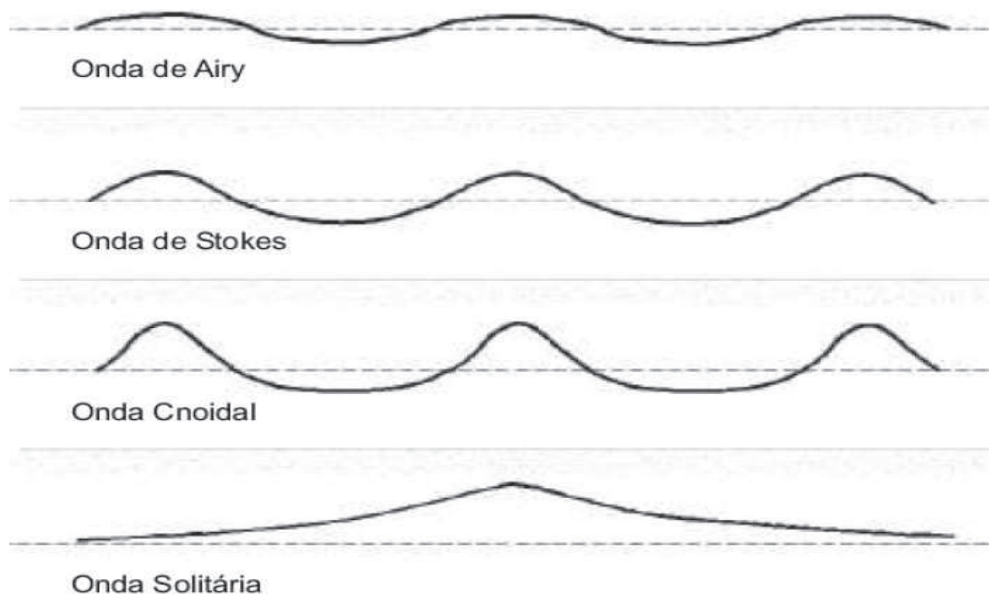


Figura 3.2 - Teoria das Ondas – Classificação das Ondas [Carneiro, 2007].

A abordagem mais elementar da teoria de ondas superficiais de gravidade é conhecida como teoria linear ou teoria de pequena amplitude, desenvolvida por Airy em 1845. Essa teoria é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda são pequenas, portanto, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades [Dean e Dalrymple, 1991]. A teoria de Stokes, por sua vez, se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. [Carneiro, 2007].

Através da Fig. 3.2, pode-se notar a existência de outras teorias que procuram representar matematicamente a forma da onda, velocidade, entre outros. Conforme Martinez, 2012, existe desde a teoria mais simples (Teoria de Airy) até teorias mais complexas onde várias hipóteses simplificadoras são abandonadas, tais como: fluido homogêneo e incompressível, tensão superficial desprezível, fluido ideal ou invíscido. Na Fig. 3.3 apresenta-se um guia para escolha da teoria mais apropriada.

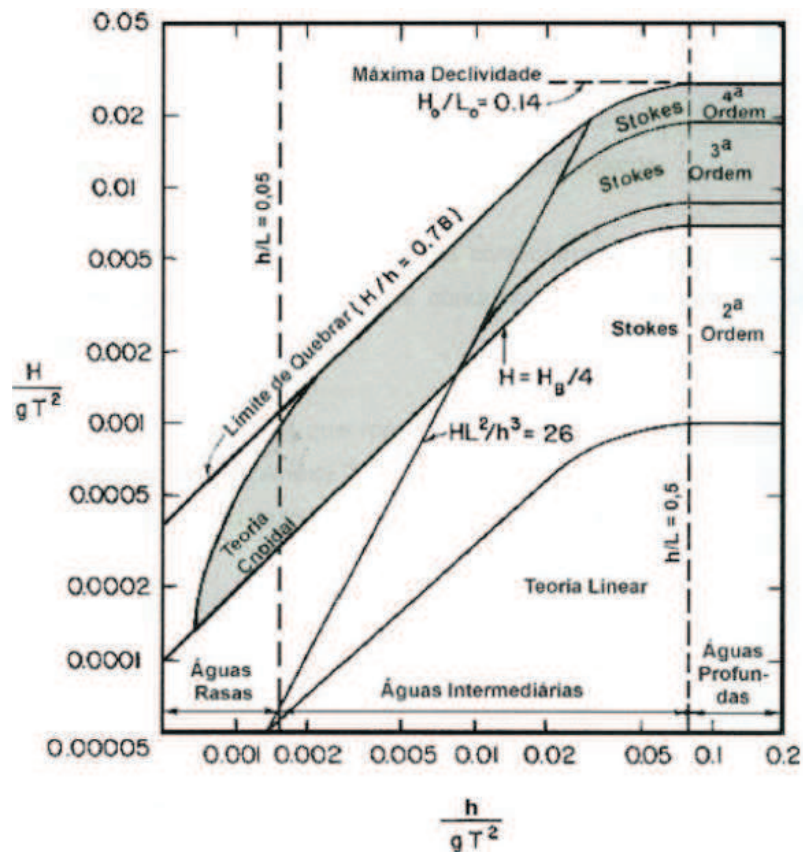


Figura 3.3 - Regiões de Aplicabilidade das Teorias de Ondas [Carneiro, 2007].

### 3.1 Teoria Linear de Ondas

Conforme mencionado anteriormente, a teoria Linear é válida quando declividade, profundidade relativa e altura de onda são pequenas. Portanto, esta teoria é aplicada para ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades [Dean e Dalrymple, 1991].

A teoria linear das ondas pode ser aplicada a um conjunto muito particular de ondas que não existem na natureza, porém, este modelo é útil para a compreensão de muitos fenômenos e na solução de um grande número de problemas reais [Carneiro, 2007].

Na teoria Linear de ondas as seguintes simplificações são realizadas:

- fluido incompressível, portanto, a massa específica da água será considerada constante;
- altura da onda considerada pequena quando comparada ao seu comprimento e à profundidade da água;
- profundidade da água constante;
- desconsideração dos efeitos da turbulência, viscosidade e tensão superficial;
- escoamento bidimensional e irrotacional (vorticidade nula).

Serão estudadas as equações que modelam o problema de acordo com Holthuijsen (2007), sendo a equação da continuidade:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.3)$$

Substituindo a Eq. (3.2) e a Eq. (3.3) na Eq. (3.1), podemos representá-la pela equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.4)$$

onde  $u_x$  e  $u_z$  representam a velocidade nas direções  $x$  e  $z$ , respectivamente;  $\phi$  o potencial de velocidade;  $x$  e  $z$  as coordenadas do plano cartesiano.

Na Eq. (3.4) as seguintes condições de contorno são assumidas:

- Condição de contorno cinemática na superfície de fundo, considerando-a rígida e impermeável:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ em } z = -h \quad (3.5)$$

- Condição de contorno cinemática na superfície livre:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \text{ em } z = 0 \quad (3.6)$$

- Condição de contorno dinâmica na superfície livre:

$$p = 0, \text{ em } z = 0 \quad (3.7)$$

onde  $p$  representa a pressão na superfície da água. A equação de Bernoulli na superfície  $z = \eta$  é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, \text{ em } z = 0 \quad (3.8)$$

onde  $g$  representa a aceleração da gravidade.

Portanto, segundo Massel (1999), a solução é encontrada através da equação:

$$\phi(x, z, t) = \frac{H}{2} \cdot \frac{g}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (3.9)$$

onde  $H$  representa a altura da onda,  $t$  o tempo,  $h$  a profundidade e  $k$  representa o número de onda e é dado por

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.10)$$

onde  $L$  representa o comprimento de onda e  $\sigma$  representa a frequência da onda que pode ser calculada por

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3.11)$$

onde  $T$  representa o período de onda.

Das Eqs. (3.8) e (3.9) é obtida a equação da elevação da superfície do mar:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.12)$$

Das Eqs. (3.6), (3.9) e (3.12) a seguinte equação é obtida:

$$\tanh kh = \frac{\sigma^2}{gk} \quad (3.13)$$

Então, substituindo as Eqs. (3.10) e (3.11) na Eq. (3.13), obtém-se:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (3.14)$$

As ondas são normalmente classificadas a partir da relação  $h/L$  permitindo assim, que se obtenha a simplificação da expressão (3.14) de acordo com a Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das ondas a partir da relação  $h/L$ .

<b>Critério</b>	<b>Profundidade</b>	$\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$
$h/L \geq 1/2$	Águas profundas	$\approx 1$
$h/L \leq 1/20$	Águas rasas	$\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$
$1/20 < h/L < 1/2$	Águas intermediárias	$\approx \frac{2\pi h}{L}$

Assim, em águas profundas ( $L < 2h$ ),  $kh$  é grande e  $\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) = 1$ . Assim, é possível calcular o comprimento de onda por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.15)$$

### 3.2 Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Conforme McCormick, 2010, em 1847, a teoria de Stokes proposta foi desenvolvida para modelar ondas não-lineares. Para obtenção das equações resultantes dessa teoria, o escoamento é considerado irrotacional e incompressível. Admitindo-se que as propriedades da onda podem ser representadas por uma série de perturbações, admite-se que uma onda não-linear seja composta pela superposição de ondas lineares. Portanto, quanto maior for o número de termos incluídos na série, melhor será a aproximação das propriedades da onda. Para esta teoria, as expressões do potencial de velocidade e a elevação da superfície livre são informadas, respectivamente, conforme Dean e Dalrymple, 1991:

$$\phi = \frac{H}{2} c \frac{\cosh(kh + kz)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{3\pi c}{4L} \omega k \frac{\cosh(2kh + 2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx - 2\omega t) \quad (3.16)$$

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3.17)$$

Derivando-se a Eq. (3.16), em relação a  $u$  e  $w$ , é possível encontrar as componentes de velocidade de propagação da onda, respectivamente, como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$u = \frac{H}{2} g k \frac{\cosh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.18)$$

$$w = \frac{H}{2} g k \frac{\sinh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.19)$$

De acordo com esta teoria, a expressão da celeridade pode ser expressa por:

$$c = \left[ \frac{g}{k} \tanh(kh) \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

## 4 TEORIA CONSTRUTAL

Adrian Bejan [2000] iniciou, em meados da década de 90, estudos sobre uma lei da física a qual descreve que os sistemas de fluxo da natureza seguem certos critérios na geração de suas configurações. Surgiu, assim, a Teoria Construtal.

Uma lei da Física é uma declaração concisa que resume um fenômeno que ocorre na natureza. O campo da Lei Construtal iniciou a partir da constatação de que o "*Design*" é um fenômeno físico universal. Ela une o animado com o inanimado, através de uma ampla gama de escalas: do *design* em árvore e flocos de neve ao *design* animal e ao *design* em árvore da bacia do rio Amazonas [Bejan e Lorente, 2013].

Palavras comuns eram usadas para descrever sua descoberta, algumas como: evolução, direção, propósito e projeto. O significado da palavra *design* é simples, é a configuração de transformação ou um conjunto de materiais com uma finalidade específica. Milhões de pessoas se sustentam através da criação de projeto, como por exemplo: roupas no corpo, arte nas paredes, aparelhos [Bejan e Zane, 2012].

A Lei Construtal identifica um fenômeno tão antigo quanto o próprio universo, mas ainda não reconhecido. Ela não permite apenas descrever, mas também prever a evolução de todos os sistemas de fluxo. Pode-se usar esta lei para imaginar os motivos que levam estruturas como pulmões, vasos sanguíneos, árvores, rios ou relâmpagos a liberdade de mudar ao longo do tempo e fluir com maior facilidade.

De acordo com a Lei Construtal um sistema vivo possui duas características universais: ele flui (é um sistema em desequilíbrio termodinâmico), que se transforma livremente para configurações que permitem que todas as suas correntes escoem mais facilmente ao longo do tempo. A vida e a evolução são fenômenos físicos e pertencem à física [Bejan, 1997; Basak, 2011].

A Teoria Construtal foi desenvolvida por Adrian Bejan [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008]. Ela explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo 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 de acesso aos fluxos no tempo. Este princípio é a Lei Construtal, que afirma que para



um determinado sistema finito persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através deste sistema [Bejan, 2000].

Se for realizada uma análise global dos escoamentos que ocorrem na natureza, observa-se que todos apresentam o mesmo formato estrutural. Eles são parecidos porque apresentam a tendência universal de sistemas abertos, melhorar ou maximizar os acessos ou diminuir as resistências ao escoamento. Por exemplo, os rios visam atingir o oceano, as veias visam atingir o coração e as pessoas querem sair de casa e se deslocar para seus locais de trabalho [Pepe, 2008] (alguns destes exemplos podem ser observados na Fig. 4.1). O responsável por apresentar esta tendência da natureza é a Lei Construtal e, com isso, permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei podemos projetar processos de forma organizada e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados [Bejan e Zane, 2012].

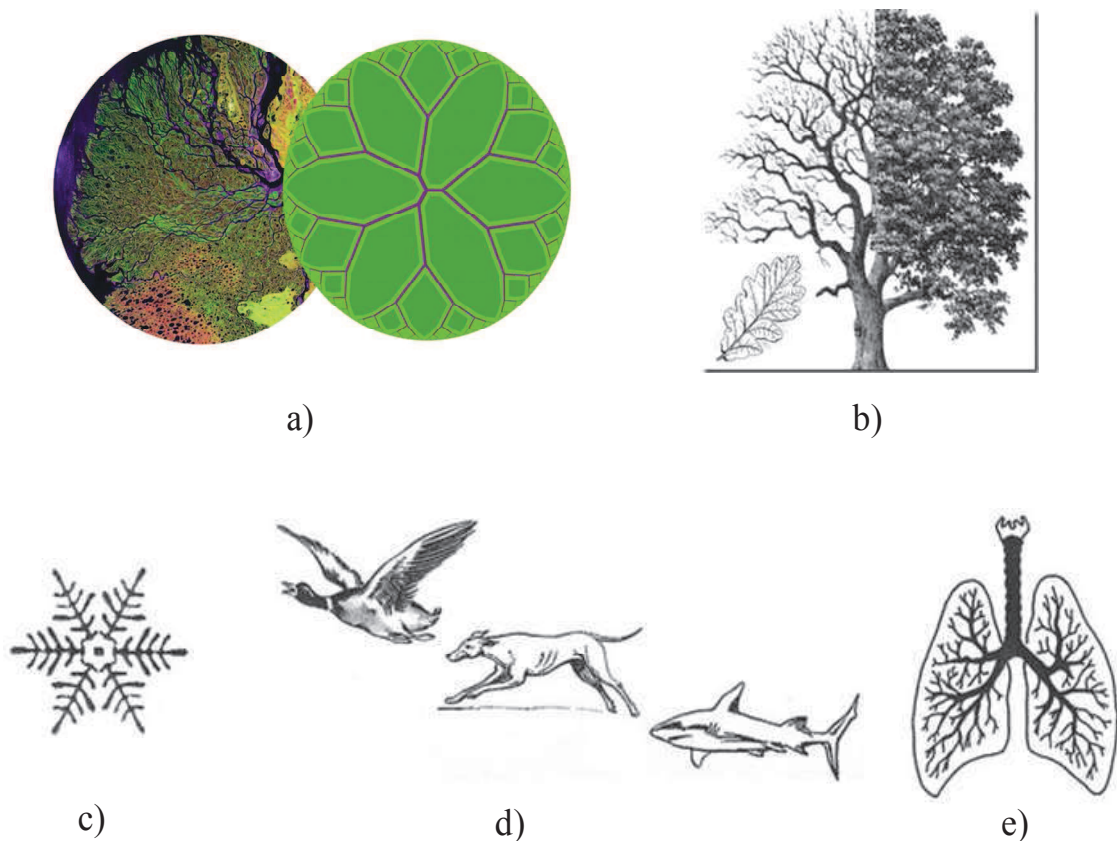


Figura 4.1 - Exemplos de aplicação da Lei Construtal: a) rios; b) árvores; c) floco de neve; d) animais; e) pulmão.

Segundo Bejan e Lorente, 2004, a Teoria Construtal trata da geração de arquitetura em sistemas termodinâmicos que não estão em equilíbrio, isto é, sistemas onde existe escoamento. Exposta de uma maneira simples, a Lei Construtal proclama a tendência de maximizar o acesso ao escoamento (fluido, massa, energia e etc.) no tempo.

Conforme Bejan [2000], a Lei Construtal é aplicada utilizando-se o método Design Construtal. Para isto, neste método, o fluxo é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho de todas as variáveis analisadas. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade. Para aplicar o Design Construtal na otimização geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, determinar um objetivo final (uma grandeza a ser maximizada ou minimizada: vazão mássica, potência, energia, entre outros), graus de liberdade (parâmetros geométricos que sofrerão variações durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização).

A Teoria Construtal tem implicações em diversas áreas científicas, como na engenharia, na biologia, na física, na economia, nas ciências naturais, nas ciências ambientais e na dinâmica social [Horta, 2007; Bejan e Marden, 2005; Bejan e Merks, 2007]. Os processos de otimização multi-objetivo tem sido tema de grande preocupação da comunidade científica, por isso, citam-se alguns trabalhos importantes sobre o tema.

Segundo Bejan, 2000, e Bejan e Lorente, 2004, os primeiros estudos sobre aplicações do princípio Construtal foi a otimização de geometrias onde há geração de calor, sendo o objetivo melhorar e remoção de energia de circuitos eletrônicos através do uso de materiais com elevada condutividade para a dissipação da energia gerada nesses circuitos. Quando se tinha um ponto sorvedouro de energia, ou seja, um fluxo de energia de um volume para um ponto, a configuração do material de alta condutividade que melhor se apresentava para a remoção de energia ocorria em forma de árvore, mantendo-se uma mesma quantidade de material em todos os casos estudados. Esse comportamento foi denominado Vascularização. Vale observar que o princípio inverso também é válido: quando o fluxo ocorre de um ponto para um volume, a melhor distribuição geométrica também ocorre na forma de árvore [Bejan, 2000; Lee et al., 2008].

A Teoria Construtal tem sido utilizada para otimizar a configuração da geometria de dissipadores de calor, canais de refrigeração e micro-canais, vide estudos de Bello-Ochende et al., 2007a, Bello-Ochende et al., 2007b, bem como na otimização do escoamento em canais compostos, vide estudo de Machado, 2010. O objetivo do estudo apresentado por Bello-

Ochende et al., 2007a, foi primeiro a maximização da condutância térmica global, ou a minimização de resistência térmica. Para atingir este objetivo, a configuração da geometria foi submetida às seguintes restrições globais: volume fixo do dissipador de calor de resfriamento de canal e volume fixo do sólido condutor. No segundo trabalho, um estudo semelhante foi realizado. No entanto, outras restrições globais foram avaliadas para otimização da geometria: um volume fixo de elementos e um comprimento axial fixo do dissipador de calor do microcanal. Em ambos os casos, o Design Construtal levou à melhor configuração da geometria. A Teoria Construtal tem sido empregada para determinar a configuração geométrica que leva à maximização da taxa de transferência de calor em dutos e escoamentos cruzados sobre feixes de tubos [Bello-Ochende e Bejan, 2005]. O Design Construtal também tem sido utilizado para a otimização da transferência de calor em aletas em forma de T, T-Y [Bejan e Almogbel, 2000; Lorenzini e Rocha, 2006] e T-Y com cavidades, vide Fig. 4.2 [Lorenzini et al., 2011], bem como para minimização da resistência térmica global de corpos submetidos à geração de energia com remoção desta através do uso de cavidades ou aletas invertidas [Biserni et al., 2004]. Vale destacar que este método aplicado em problemas de engenharia, que emprega uma função objetivo, restrições e estuda o efeito dos graus de liberdade na função objetivo, é denominado Design Construtal.

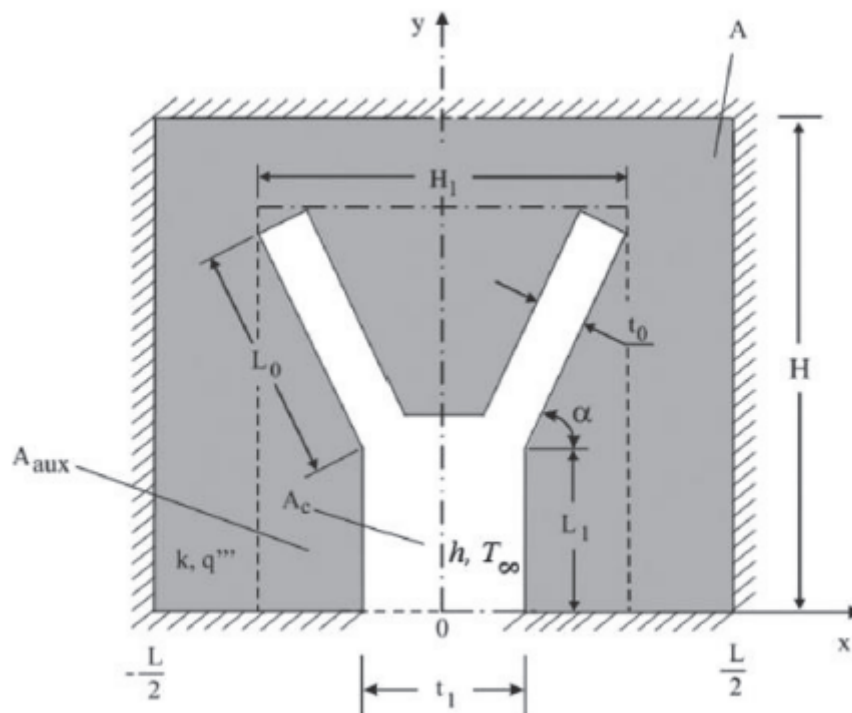


Figura 4.2 - Geometria da cavidade em Y (Adaptado de Lorenzini et al., 2011).

Com relação à aplicação da Teoria Construtal na otimização de dispositivos para conversão da energia das ondas em energia elétrica do tipo galgamento fez-se alusão, no Capítulo 1 do presente trabalho, nos estudos de Machado et al., 2011, Dos Santos et al., 2013, Machado, 2012, Dos Santos et al., 2014, entre outros. Além destes, outros trabalhos relacionados à otimização de dispositivos conversores de energia das ondas em energia elétrica aplicam a Teoria Construtal no processo de otimização geométrica, entre eles destacam-se:

Lopes et al., 2011, otimizou a geometria de um conversor de energia de água coluna d'água oscilante (OWC), por meio do Design Construtal. O grau de liberdade que expressa a razão entre a chaminé e o comprimento de câmara foi otimizado, enquanto outro grau de liberdade, a relação entre a altura e comprimento da câmara de OWC foi mantido fixo. Foram mantidos constantes: o volume total do dispositivo OWC, a razão entre o volume da chaminé e o volume total, o comprimento da câmara do dispositivo e o comprimento de onda, bem como a relação entre a profundidade e o comprimento de onda com a profundidade relativa. O objetivo foi de maximização da vazão mássica que atravessava a chaminé do dispositivo. A geometria dita como ótima foi obtida com base com o conceito de Construtal Design, definida como sendo aquela capaz de absorver uma quantidade maior de energia das ondas, em comparação com os outros casos.

Grimmler, 2013, simulou o princípio de funcionamento do conversor do tipo Coluna de Água Oscilante, o objetivo do presente estudo foi investigar a influência de diferentes formas geométricas da câmara sobre o fluxo resultante de ar que passa pela turbina, que influencia no desempenho do dispositivo. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D e 3D, como é possível observar na Fig. 4.3. Os resultados indicaram que a forma geométrica da câmara influencia na transformação da energia das ondas em energia elétrica. As geometrias das câmaras analisadas que apresentaram maior área da face de incidência das ondas (sendo altura constante) apresentaram também maior desempenho do conversor OWC. A melhor geometria, entre os casos desse estudo, ofereceu um ganho no desempenho do dispositivo em torno de 30% maior.

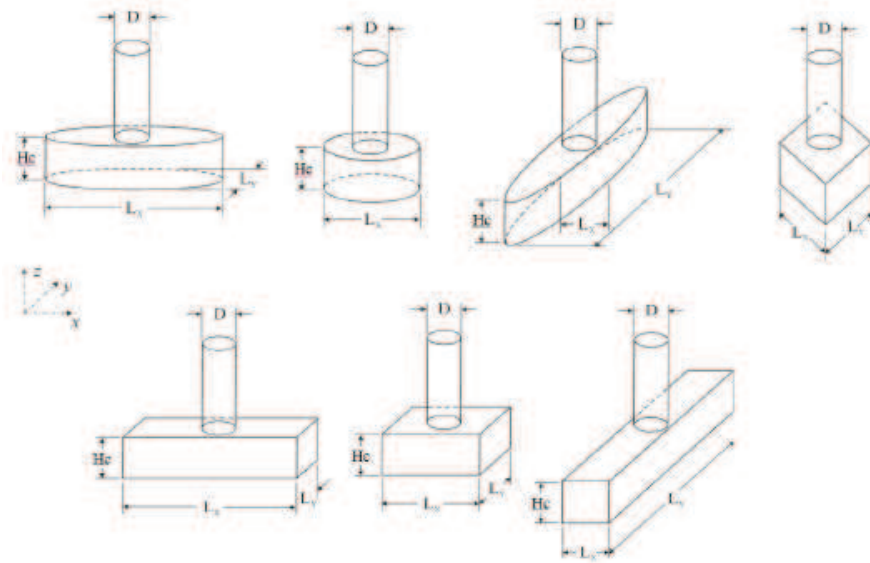


Figura 4.3 - Variações da geometria abordadas por Grimmeler, 2013, em seu estudo tridimensional.

Em Gomes, 2014, o objetivo principal é, através da modelagem computacional de um dispositivo cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO) e do emprego de Design Construtal, maximizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. Os graus de liberdade empregados foram:  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO), enquanto o outro grau de liberdade,  $H_2/l$  (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantido fixo. Foram realizados estudos considerando uma onda em escala de laboratório e um espectro de ondas real. Foi também realizado um estudo sobre a influência da perda de carga da turbina através de uma restrição física. Os resultados obtidos mostram que é possível estabelecer uma razão de  $H_1/L$  ótimo, conhecendo-se o clima de ondas, ou seja, o recomendável é que esta razão seja igual a quatro vezes a altura da onda incidente dividido pelo comprimento da onda incidente.

Vale destacar ainda que, outros estudos relacionados à otimização de dispositivos de galgamento empregando Design Construtal e modelo numérico tridimensional não foram encontrados na literatura, destacando a contribuição do presente estudo.

## 5 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 5.1 *Volume of Fluid – VOF*

O método *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols [1981], tem sido empregado na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Este modelo é indicado para escoamentos multifásicos, ou seja, escoamentos nos quais existe uma interface bem definida entre dois ou mais fluidos imiscíveis, que neste caso são a água e o ar. O modelo VOF consiste basicamente na solução das equações de Navier-Stokes e uma equação da conservação da massa com termo fonte (transporte da fração volumétrica). Existem estudos relacionados à aplicação desse método na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, onde as equações governantes são resolvidas através do Método dos Volumes Finitos - MVF, Versteeg e Malalasekera [1995], mais especificamente, utilizando o código comercial FLUENT [Gomes, 2014].

Considerando um escoamento isotérmico, laminar e incompressível, a equação da conservação da massa para a mistura ar e água para este é dada por [Schlichting, 1979; Dos Santos et al., 2014; Goulart, 2014]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.1)$$

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5.2)$$

onde:  $t$  é o tempo (s),  $p$  é a pressão estática (Pa),  $\mu$  é a viscosidade (kg/ms), e  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ). O termo  $\vec{\tau}$  é o tensor taxa de deformação ( $N/m^2$ ), o qual para um fluido Newtoniano é dado por:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right) \right] \quad (5.3)$$

onde  $I$  é um tensor unitário. O segundo termo do lado direito da Eq. (5.3) descreve as tensões desviadoras e está relacionado com a deformação volumétrica em escoamentos compressíveis. Como as velocidades obtidas no escoamento da onda (tanto na região do ar quanto da água) são baixas (número de Mach  $< 0,3$ ), será considerado um escoamento incompressível e o termo de tensões desviadoras não levado em consideração na solução deste problema.

Conforme mencionado anteriormente, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é utilizado para tratar adequadamente do escoamento de uma mistura ar e água e, neste caso, também avaliar sua interação com o dispositivo. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase [Ling et al., 2001; Lv et al., 2011].

Neste estudo foram consideradas duas fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume ( $\alpha_q$ ) 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, 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 adicional para o transporte para cada uma das fases é necessária [Ling et al., 2001; Lv et al., 2011; Gomes, 2010]:

$$\frac{\partial (\rho \alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (5.4)$$

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 escritos como:

$$\rho = \alpha_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (5.5)$$

$$\mu = \alpha_{\text{agua}} \mu_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (5.6)$$

Pode-se encontrar validações e verificações do método de *Volume of Fluid* (VOF), aplicadas à energia das ondas do mar nos seguintes trabalhos: Horko (2007), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et al. (2011) e Gomes et al. (2012b).

## 5.2 Descrição dos Problemas

O presente trabalho apresenta dois estudos referentes ao dispositivo do tipo de galgamento, utilizados para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, com domínios computacionais tridimensionais. Domínios estes que consistem, basicamente, em um dispositivo do tipo galgamento situado no centro de um tanque de ondas. A principal diferença entre os estudo é a escala: no primeiro estudo é abordado um modelo numérico em escala de laboratório, enquanto no segundo, apresenta-se um modelo numérico em escala real.

Vale destacar que, para ambos os casos, a rampa do dispositivo de galgamento possui um anteparo lateral, impedindo assim, que a onda transborde pelas laterais da rampa. Além disso, foi considerado que o escoamento é transiente e ocorre no regime laminar. O movimento da onda foi gerado através da imposição de um campo de velocidades na entrada do tanque de ondas, ou seja, as componentes da velocidade na direção  $x$  e  $z$  são condições de contorno definidas pelo usuário e a componente da velocidade na direção  $y$  é mantida constante.

A análise consiste em encontrar a solução do escoamento de uma mistura de ar e água para diversas geometrias de rampa. Quanto às condições de contorno, tem-se a velocidade de entrada gerada pela imposição de um campo de velocidades na parede esquerda do tanque de ondas. Com relação às outras condições de contorno, a região superior da superfície esquerda do tanque de ondas, bem como a superfície superior deste, possuem pressão atmosférica prescrita (superfícies tracejadas na Fig. 5.1). Nas outras superfícies do tanque (superfície inferior e direita) e nas superfícies do dispositivo de galgamento, as velocidades são prescritas como nulas, ou seja, foi adotada a condição de contorno de não deslizamento ou



impermeabilidade. No que tange às condições iniciais, considera-se que o fluido está em repouso.

O objetivo da análise foi determinar a geometria ideal que maximiza a vazão mássica de água incidente no reservatório do dispositivo. Para isto, o grau de liberdade  $b/B$  é otimizado, mantendo-se fixos os demais parâmetros (nas Tab. 5.2 e Tab. 5.4 são apresentadas as características de cada onda simulada).

### 5.2.1 Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório

Neste estudo apresenta-se um modelo numérico tridimensional de um dispositivo de galgamento, utilizado para conversão da energia das ondas em energia elétrica em escala de laboratório. O princípio operacional do dispositivo de galgamento consiste em uma estrutura que direciona as ondas incidentes para o reservatório. Como citado anteriormente, o objetivo principal deste estudo é maximizar a vazão mássica incidente no reservatório e, para tal, faz-se o uso do Design Construtal para definição da melhor geometria da rampa, ou seja, a forma da rampa que conduzirá a uma maior vazão mássica.

Para realização do objetivo, utilizaram-se as seguintes dimensões e parâmetros: comprimento total do tanque de ondas,  $L_T = 6.00$  m; comprimento da rampa do dispositivo de galgamento,  $L_R = 0.67$  m; distância do início da rampa do dispositivo ao reservatório do mesmo,  $L_1 = 0.60$  m; altura do reservatório,  $L_2 = 0.32$  m; altura da onda,  $H = 0.18$  m, altura do tanque de ondas,  $H_T = 1.00$  m e profundidade do tanque de ondas,  $h = 0.60$  m. Percebe-se também, através das Figs. 5.1 (a) e 5.1 (b), que a distância entre o início do tanque de ondas até o reservatório do dispositivo de galgamento é de 3 m, a profundidade do dispositivo de galgamento (distância do fundo do tanque de ondas ao fundo de reservatório do dispositivo) é de 0.45 m e, como mencionado anteriormente, o dispositivo de galgamento encontra-se centralizado em relação ao tanque de ondas.

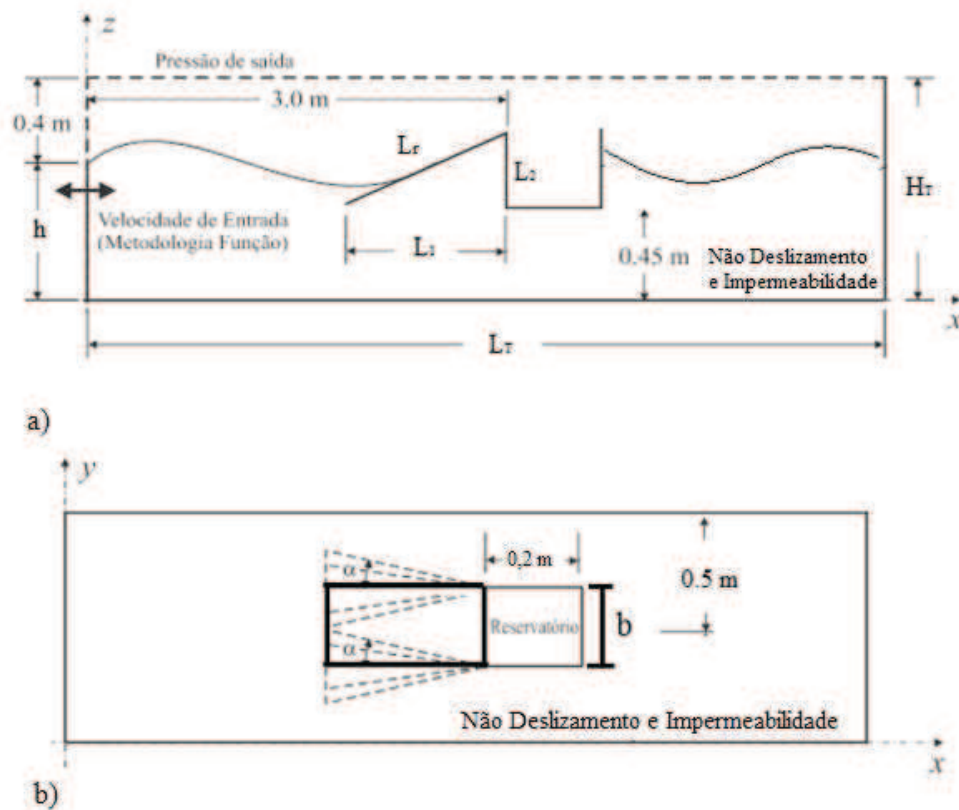


Figura 5.1 - Ilustração do domínio computacional 3D: a) vista lateral, b) vista superior.

No âmbito do Design Construtural a otimização do problema está sujeita a duas restrições, ou seja, a restrição da área total do tanque de ondas:

$$A = H_T L_T = 6 \text{ m} \quad (5.7)$$

e a restrição da área da rampa:

$$A_r = \frac{(B+b)L_r}{2} = 0.134 \text{ m} \quad (5.8)$$

onde  $B$  é a base inferior do trapézio formado pela rampa,  $b$  é a base superior do trapézio formado pela rampa,  $L_r$  é a altura ou distância entre as bases do trapézio (mantida constante).

Na Figura 5.2 é possível observar as formas que a geometria do dispositivo recebe conforme as variações de  $b/B$ . Na Tab. 5.1 observam-se os valores atribuídos individualmente às variáveis que compõe o grau de liberdade investigado  $b/B$ . Vale destacar que as geometrias

apresentadas na Fig. 5.2 elucidam a transformação sofrida pela geometria ao longo do processo de otimização geométrica. A rampa sofre variação no tamanho de suas bases, fazendo com que o restante do dispositivo sofra variações de modo a se adaptar ao tamanho das bases.

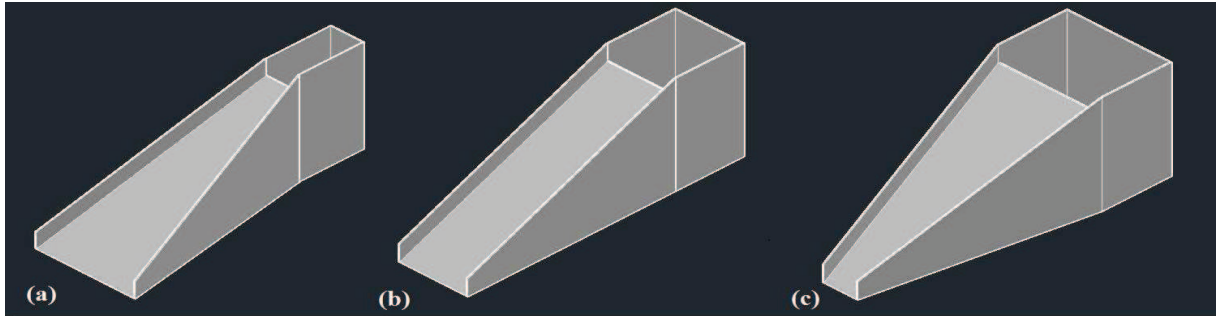


Figura 5.2 - Ilustração das variações sofridas pela geometria do dispositivo de galgamento ao longo do processo de otimização geométrica: (a)  $b/B < 1$ ; (b)  $b/B = 1$ , (c)  $b/B > 1$ .

Na Tab. 5.1 é possível observar os valores da geometria atribuídos ao longo da cada simulação. Vale destacar que, conforme mencionado anteriormente, para obtenção destes valores, aplicaram-se as duas restrições mencionadas anteriormente. Ou seja, foram mantidas constantes a área total do tanque de ondas e a área da rampa.

Tabela 5.1 – Variações das geometrias simuladas no processo de otimização geométrica.

$b/B$	$B$	$b$
3.00	0.10	0.30
2.33	0.12	0.28
1.86	0.14	0.26
1.50	0.16	0.24
1.22	0.18	0.22
1.00	0.20	0.20
0.86	0.22	0.18
0.67	0.24	0.16
0.54	0.26	0.14
0.43	0.28	0.12
0.33	0.30	0.10

Conforme se pode verificar na Fig. 5.3, para realização das simulações, o domínio computacional foi subdividido em três regiões. A primeira região é constituída pelo volume à montante do tanque de ondas, ou seja, na faixa  $0.00 \text{ m} \leq x \leq 2.30 \text{ m}$ . A segunda região é o volume onde se encontra o dispositivo de galgamento ( $2.30 \text{ m} \leq x \leq 3.30 \text{ m}$ ) e a última região é aquela à jusante do dispositivo de galgamento ( $x \geq 3.30 \text{ m}$ ). Esta divisão foi realizada com o intuito de obter-se uma malha com maior refinamento na região do dispositivo, onde os gradientes de velocidades são mais intensos. Nas regiões à montante e à jusante do dispositivo, utilizou-se uma malha regular constituída de hexaedros de dimensão  $\Delta x = 0.02 \text{ m}$ , totalizando aproximadamente 630000 elementos. Na região do dispositivo empregou-se uma malha tetraédrica com a mesma dimensão de malha empregada nas outras regiões, totalizando aproximadamente 602000 volumes. Para a discretização temporal empregou-se um passo de tempo de  $\Delta t = 1.00 \times 10^{-3} \text{ s}$ . O tempo total de simulação foi de  $t = 8.00 \text{ s}$ .

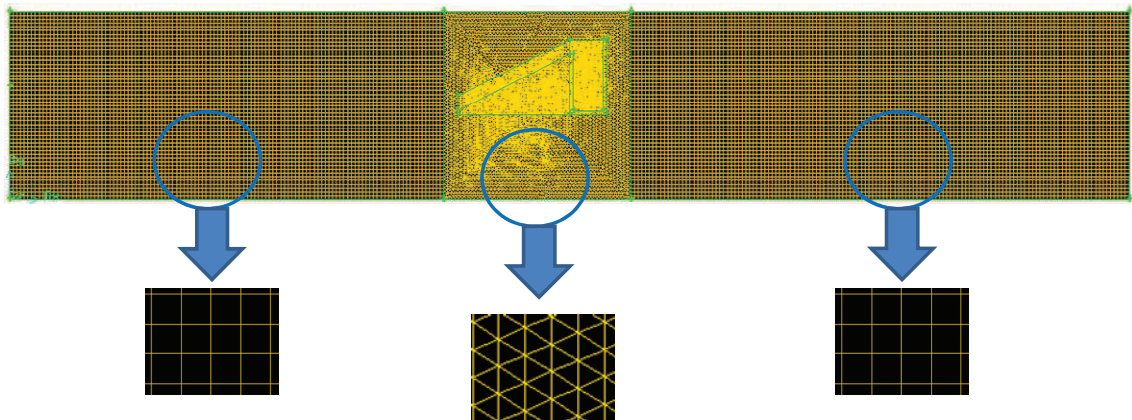


Fig. 5.3 - Divisão do domínio computacional em três regiões distintas com ilustração da malha aplicada em cada região.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as características da onda simulada neste problema:

Tabela 5.2 – Características da onda empregada no problema.

<b>Característica</b>	<b>Medida</b>
Período – $T$ (s)	0.88
Altura da onda – $H$ (m)	0.18
Comprimento da onda – $\lambda$ (m)	1.20
Profundidade do tanque – $h$ (m)	0.60

## 5.2.2 Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real

Neste estudo emprega-se um modelo numérico tridimensional para estudar um dispositivo de galgamento *onshore*. A principal diferença deste estudo para o apresentado anteriormente é a escala. Neste caso, trata-se de um dispositivo em escala real. Como no caso anterior, o princípio operacional do dispositivo de galgamento consiste em uma estrutura que direciona as ondas incidente para o reservatório. O objetivo principal deste estudo é maximizar a vazão mássica incidente no reservatório e, para tal, faz-se o uso do Design Construtal para definição da melhor forma da rampa, ou seja, a forma da rampa que conduzirá a uma maior vazão mássica, além de objetivar expandir tridimensionalmente o estudo apresentado em Goulart, 2014.

Goulart, 2014, usou um modelo numérico bidimensional que estuda o efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Neste estudo foram encontrados:  $(H_I/L_I)_o = 0.34$  (razão entre a altura e comprimento da rampa) e  $S_o = 3.5$  m (distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque, ou seja, submersão do dispositivo de galgamento). Para tal, será realizada uma adaptação deste estudo para um modelo numérico tridimensional. Ou seja, simularemos o mesmo clima de ondas e a mesma geometria apresentados no trabalho bidimensional, mas agora para um modelo numérico tridimensional.

O problema físico analisado constituirá de um dispositivo de galgamento tridimensional colocado no centro de um tanque de ondas, conforme representado na Fig. 5.4. O movimento de onda será gerado através da imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do tanque. Para realização deste, foram utilizadas as seguintes recomendações de Goulart, 2014 (vide Fig 5.4): características do tanque de ondas e do dispositivo de galgamento: comprimento do tanque de ondas  $L_T = 327$  m, altura do tanque de ondas  $H_T = 20$  m,  $H_T/L_T = 0.0612$ , largura da rampa do dispositivo de galgamento  $L_I = 21.6931$  m, altura da rampa do dispositivo de galgamento  $H_I = 3.3756$  m,  $(H_I/L_I)_o = 0.34$ , comprimento do reservatório do dispositivo de galgamento  $L_R = 20$  m, submersão do dispositivo de galgamento  $S_o = 3.5$  m.

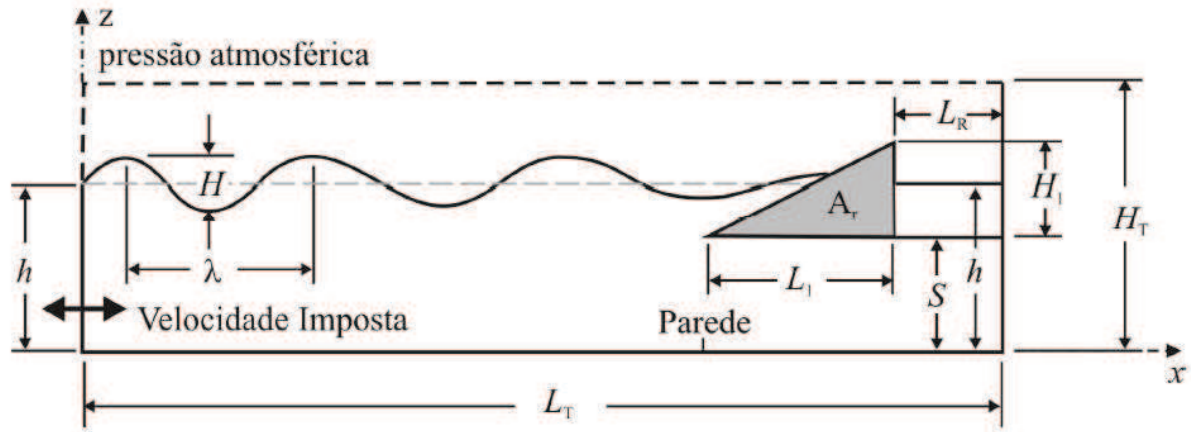


Figura 5.4 – Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real – vista lateral (Adaptado de Goulart, 2014).

Porém, para construção de um modelo numérico tridimensional, necessitamos trabalhar com a terceira dimensão  $z$ , perpendicular ao plano da figura. Para tal, recorreu-se então, a referências bibliográficas para obtenção de uma recomendação quanto à largura (terceira dimensão) do dispositivo e, conseqüentemente, do tanque de ondas.

No trabalho de Beels et al., 2010, foram realizadas diversas simulações de um *Wave Dragon* e suas dimensões podem ser observadas na Fig. 5.5. Realizando a análise das dimensões do dispositivo de galgamento simulados por Goulart, 2010, onde o comprimento total do dispositivo de galgamento (comprimento do reservatório somado ao comprimento da rampa) é 41.6931 m e, comparando com o dispositivo *Wave Dragon* apresentado em Beels et al., 2010, onde o comprimento total do dispositivo é 150 m. Obteve-se a razão de proporcionalidade de 3.5977.

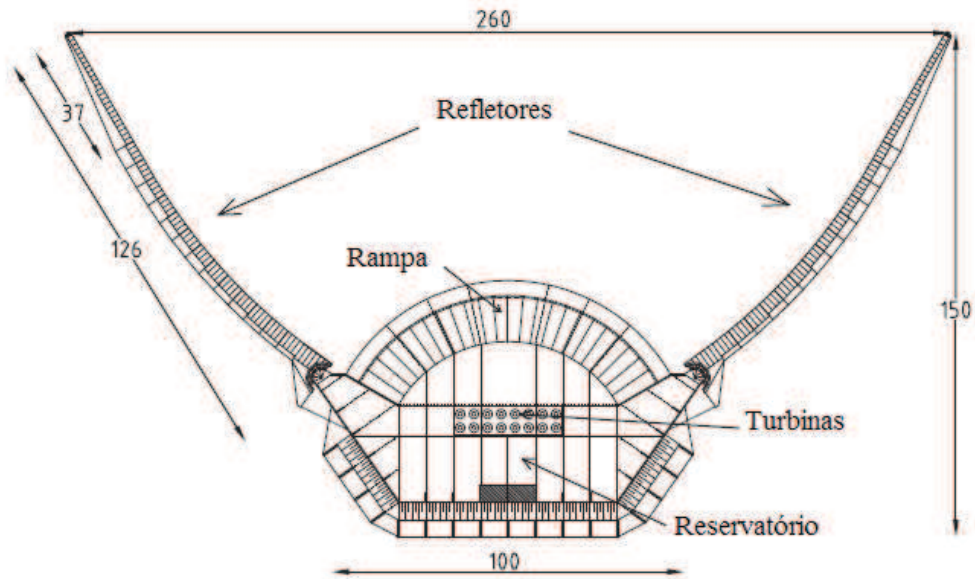


Figura 5.5 – Dimensões do dispositivo simulado por Beels et al., 2010.

Após as devidas análises dos valores completou-se a geometria tridimensional do dispositivo de galgamento, vide Fig. 5.6, onde as características adicionais do tanque de ondas e dispositivo de galgamento, são: largura do tanque de ondas,  $L_t = 100$  m e largura do dispositivo de galgamento,  $L_D = 27.7955$  m.

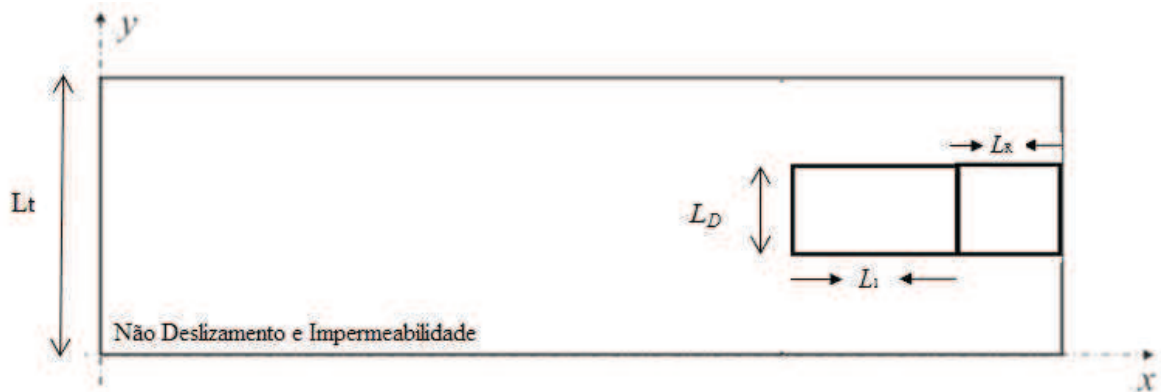


Figura 5.6 – Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real – vista superior.

Vale destacar, que o dispositivo será considerado centralizado no tanque de ondas (plano  $xy$ ), vide Fig. 5.6.

No âmbito do Design Construtal a otimização do problema foi realizada da mesma maneira do estudo apresentado anteriormente. Ou seja, foram impostas duas restrições ao problema, sendo elas: a restrição da área total do tanque de ondas:

$$A = H_r L_r \quad (5.9)$$

e a restrição da área da rampa:

$$A_r = \frac{(B+b)L_r}{2} \quad (5.10)$$

onde  $B$  é a base inferior do trapézio formado pela rampa,  $b$  é a base superior do trapézio formado pela rampa e  $L_r$  é a altura ou distância entre as bases do trapézio (mantida constante). As formas que a geometria do dispositivo recebe ao longo do processo de simulação numérica foram semelhantes às apresentadas no estudo anterior. Portanto, para este caso, também é possível observar as alterações no design do dispositivo de galgamento através da Fig. 5.2. As variações de  $B$  e  $b$  podem ser observadas na Tab. 5.3.

Tabela 5.3 – Variações das geometrias simuladas no processo de otimização geométrica.

<b>b/B</b>	<b>b [m]</b>	<b>B [m]</b>
<b>3.00</b>	41.6931	13.8977
<b>2.33</b>	38.91356	16.67724
<b>1.86</b>	36.13402	19.45678
<b>1.50</b>	33.35448	22.23632
<b>1.22</b>	30.57494	25.01586
<b>1.00</b>	27.7954	27.7954
<b>0.82</b>	25.01586	30.57494
<b>0.67</b>	22.23632	33.35448
<b>0.54</b>	19.45678	36.13402
<b>0.43</b>	16.67724	38.91356
<b>0.38</b>	15.30761	41.6931
<b>0.33</b>	13.8977	41.6931



Conforme se pode verificar na Fig. 5.7, para realização das simulações, o domínio computacional foi subdividido em duas regiões. A primeira região é constituída por um volume localizado à montante e na parte superior do tanque de ondas, onde se utilizou uma malha regular constituída por hexaedros de dimensão  $\Delta x = 1.00$  m. A segunda região é o volume onde se encontra o dispositivo de galgamento, onde se empregou uma malha tetraédrica com a mesma dimensão empregada na outra região. Computando os volumes empregados em ambas as regiões do domínio computacional, empregou-se em torno de 1100000 elementos de malha. O objetivo desta divisão foi obter uma malha com maior refinamento na região do dispositivo, onde os gradientes de velocidades são mais intensos. Para a discretização temporal empregou-se um passo de tempo de  $\Delta t = 0.05$  s. O tempo total de simulação foi de  $t = 100.00$  s. Maiores detalhes a respeito dos testes de independência de malha e passo de tempo serão abordados no Capítulo 7.

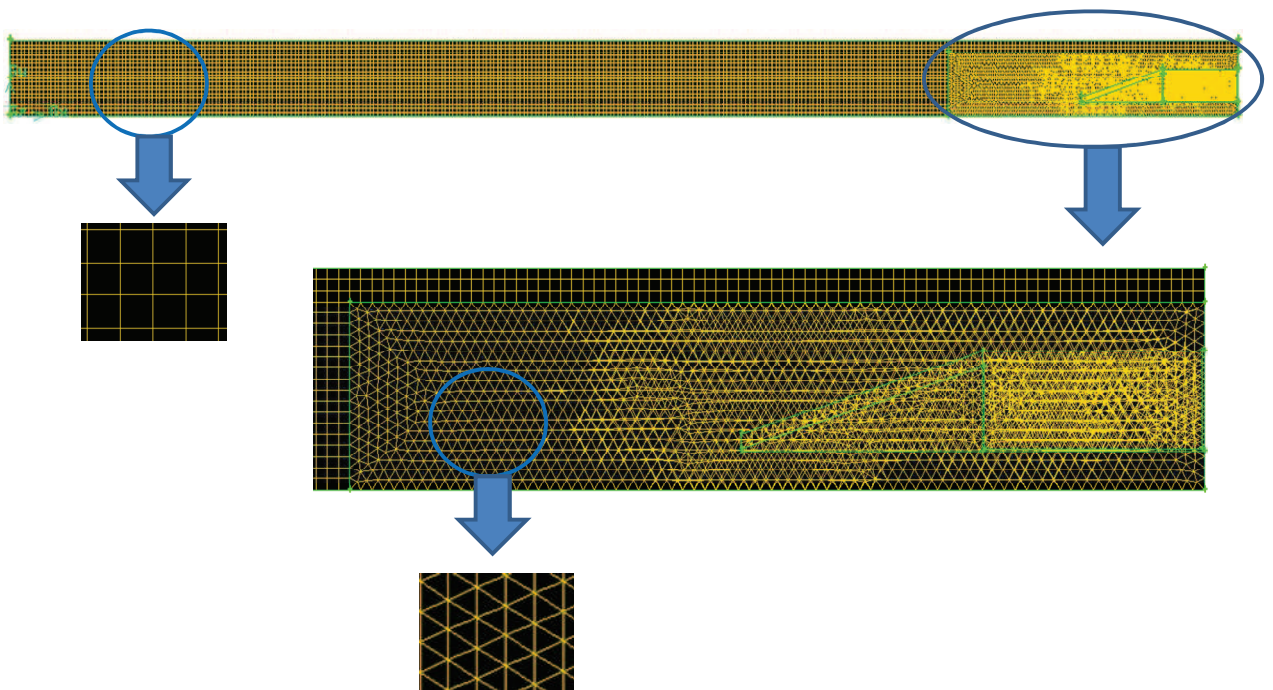


Figura 5.7 - Divisão do domínio computacional em duas regiões distintas com ilustração da malha aplicada em cada região.

Baseado nas recomendações obtidas de Goulart, 2014, na Tab. 5.4, são apresentadas as características da onda simulada neste problema:

Tabela 5.4 – Características da onda empregada no problema.

Característica	Medida
Período – T (s)	7.5
Altura da onda – H (m)	1.0
Comprimento da onda – $\lambda$ (m)	65.4
Profundidade do tanque – h (m)	10.0

### 5.3 Funções definidas para Geração de Ondas

Conforme mencionado anteriormente, o movimento do fluido é imposto pelo movimento da parte inferior da superfície lateral esquerda (linha contínua nas Fig. 5.1(a) e Fig. 5.1 (b)). Nesta superfície é imposta velocidade de entrada (*velocity inlet*) dada através de uma Função Definida pelo Usuário (UDF – do inglês: *User Defined Function*)

É importante ressaltar que, de acordo com a classificação proposta por Chakrabarti, 2005, a onda adotada no primeiro estudo (onde trabalha-se com um dispositivo em escala de laboratório) descrita na Tab. 5.2, é considerada de alta ordem. Conforme pode-se observar na Fig. 5.8, destacada pela linha contínua de cor azul. Entretanto, aqui será considerada como uma onda de segunda ordem, pela maior simplicidade de aplicação e facilidade de convergência. Enquanto no segundo estudo, caso em que se trabalha com um dispositivo de galgamento em escala real, verifica-se pela Fig. 5.4, linha vermelha tracejada, que a onda empregada trata-se de uma onda de Stokes de 2ª ordem.

Assim, as condições de contorno de velocidade impostas na superfície de entrada do tanque de ondas, para os dois casos apresentados neste estudo, são dadas pelas Eqs. (5.11) e Eq. (5.12).

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (5.11)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{8} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (5.12)$$

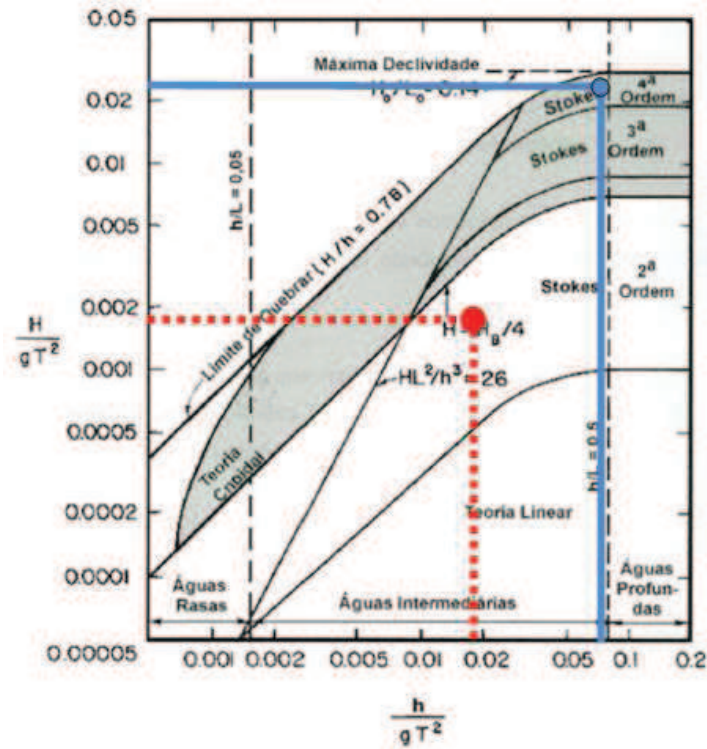


Figura 5.8 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Adaptado de Chakrabarti, 2005).

Esta metodologia foi desenvolvida por Horko, 2007, e empregada nos trabalhos de [Gomes, 2010; Gomes et al., 2009; Machado, 2012], entre outros. Ainda, segundo Gomes, 2010, as vantagens desta metodologia são a redução do tempo de processamento e uma melhor convergência da solução. Neste sentido, como o interesse do presente trabalho é a otimização geométrica de dispositivos de galgamento e a demanda computacional para realização desta é extremamente elevada, considera-se de extrema importância a diminuição do tempo de processamento.

## 6 MODELAGEM NUMÉRICA

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos de engenharia e da física é uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica [Maliska, 2004].

Segundo Devloo, 2005, a área de mecânica computacional procura simular diversos fenômenos físicos utilizando uma sistemática que envolve engenharia, matemática e ciência da computação. O fenômeno físico em estudo é representado por um sistema de equações parciais diferenciais (tradução do problema de engenharia para matemática). O sistema de equações é aproximado por um método de discretização (problema de matemática para problema de matemática aplicada e de ciência da computação). Finalmente os resultados da simulação são comparados com o fenômeno físico em estudo (engenharia).

A experimentação numérica (simulação numérica), por sua vez, praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno gerais, definidos em geometrias também complexas e apresentando resultados com uma rapidez muito grande. O tempo e o custo do projeto de um equipamento podem ser sensivelmente reduzidos com o uso da simulação numérica [Maliska, 2004].

Com o advento dos computadores e a intensificação da pesquisa na área da análise numérica, surgiu um segmento direcionado ao estudo da dinâmica dos fluidos que atualmente é conhecido como Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou CFD (do inglês: *Computational Fluid Dynamics*). O avanço tecnológico do setor computacional abriu novas possibilidades para a abordagem dos problemas de engenharia, com a utilização de cálculos de soluções para os mais completos modelos matemáticos [Duarte, 2006].

Os códigos CFD são mais que simples resolvidores de sistemas de equações. Estes códigos permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento de solução ao longo

das iterações e disponibilizam um display de resultados com alta capacidade gráfica para o processamento das soluções obtidas. Uma das mais importantes e significantes áreas de avanço em CFD nas últimas décadas tem sido a flexibilidade das malhas, pois atualmente os softwares permitem refinamentos detalhados em regiões específicas do domínio computacional [Duarte, 2006].

De uma maneira geral, a modelagem computacional realizada em softwares comerciais ou em programas computacionais desenvolvidos, é dividida em três etapas principais, [Versteeg e Malalasekera, 1995; Tannehil et al., 1997]:

- **Pré processamento:** é responsável por definir a geometria da região de interesse (domínio computacional), dividir o domínio em um número finito de subdomínios (geração da malha), definir os tipos de condições de contorno e iniciais e selecionar o fenômeno físico a ser modelado.
- **Processamento:** denominada também como solução, é a etapa principal da simulação numérica. Consiste na resolução de um sistema de equações algébricas obtidos da equação diferencial que definem o problema físico. Existem diversos métodos para realizar a transformação do domínio contínuo em um domínio discretizado, entre eles os mais difundidos na literatura são: Método de Diferenças Finitas (MDF) [Ferziger e Peric, 1997], Método de Volumes Finitos (MVF) [Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995] e Método de Elementos Finitos (MEF) [Reddy e Gartling 1994; Hughes, 1987]. A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método.
- **Pós processamento:** nesta etapa realiza-se a apresentação e a análise dos resultados obtidos na etapa de processamento como, por exemplo, plotar topologias dos campos de velocidade, pressão, obtenção de coeficientes de arrasto, sustentação e taxas de transferência de calor. Esta etapa pode ser realizada com o software comercial utilizado na etapa anterior, pois os pacotes CFD estão equipados com ferramentas versáteis para análise e apresentação dos resultados.

Nesta pesquisa foram utilizados os softwares comerciais GAMBIT (na etapa de pré-

processamento) e FLUENT (para as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento). A seguir será feita uma breve apresentação destes softwares, dando maior ênfase ao método de discretização adotado pelo FLUENT.

## **6.1 Modelos Numéricos Empregados**

### **6.1.1 GAMBIT (Pré Processamento)**

O GAMBIT é um *software* que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É um programa capaz de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção, discretização (geração da malha) e definição dos tipos de regiões do modelo, sendo suficientemente versátil para tratar uma ampla variedade de modelos [FLUENT, 2007].

### **6.1.2 FLUENT (Processamento e Pós Processamento)**

O FLUENT é um *software* comercial, baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), para a modelagem de escoamentos de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas. Apresenta flexibilidade de malha, incluindo a capacidade de resolver problemas de escoamento usando malhas não estruturadas, geradas em geometrias complexas com relativa facilidade. É compatível com malhas do tipo bidimensional (triângulo, quadrilátero) e tridimensional (tetraedro, hexaedro, híbridas) [FLUENT, 2007].

## **6.2 Método dos Volumes Finitos – MVF**

A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando não é possível a solução analítica e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se ter a solução para um número mínimo discreto de pontos, com um determinado erro, esperando que, quanto maior for esse número de pontos,

mais perto da solução exata será a solução aproximada (ou numérica). Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos [Maliska, 2004].

Assim, quanto mais precisos forem os cálculos, maior será o número de variáveis do domínio envolvidas, que por sua vez aumentam na mesma proporção o número de incógnitas. Para solução deste problema existirá um sistema com proporção igual de variáveis do domínio, incógnitas e equações, e quanto maior for esse valor, maior será o esforço computacional para solução do mesmo.

A Fig. 6.1 ilustra o processo de discretização empregado pelo método numérico, o qual transforma uma equação, definida no domínio  $D$ , em um sistema de equações algébricas.

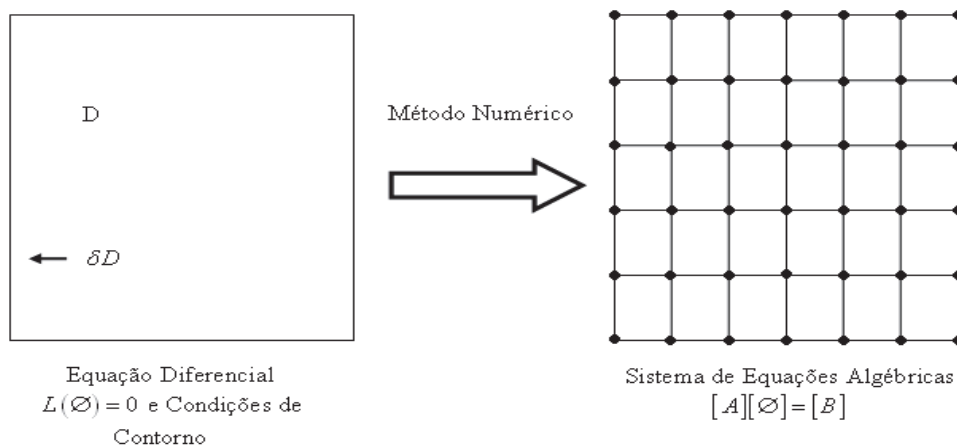


Figura 6.1 - Função do Método Numérico [Maliska, 2004].

As derivadas da função existentes na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. Transformar as derivadas em termos que contém a função significa integrar a equação diferencial, e as diversas maneiras de fazê-lo são o que caracteriza o tipo do método numérico [Maliska, 2004].

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, por exemplo, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras,

da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs [Bortoli, 2000; Fortuna, 2000].

Assim, todo método que, para obter equações aproximadas, satisfaz a conservação de propriedade em nível de volumes elementares é um Método de Volumes Finitos. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa [Maliska, 2004].

É fácil reconhecer que os processos são equivalentes, pois basta lembrar que, para deduzir as equações diferenciais que representam fenômenos físicos, é necessário primeiro realizar um balanço em um volume finito, fazendo-se, em seguida, o processo de limites para obter a equação diferencial. Para ilustrar a conexão entre as equações aproximadas usadas no MVF e as equações diferenciais na forma conservativa, considerar o volume elementar bidimensional mostrado na Fig. 6.4 [Maliska, 2004].

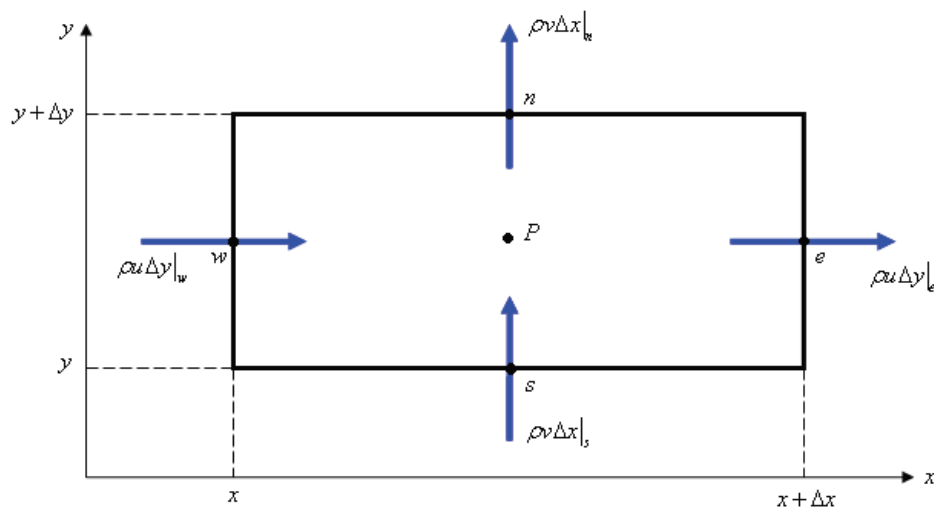


Figura 6.2 - Volume elementar para os balanços de conservação [Maliska, 2004].

De modo a deduzir a equação diferencial que representa a conservação da massa, será mostrado o balanço de massa no volume elementar encontrado na Fig. 6.4

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (6.1)$$



onde  $\dot{m}$  denota o fluxo de massa e os índices  $e$ ,  $w$ ,  $n$  e  $s$  significam respectivamente leste, oeste, norte e sul (*east, west, north and south*) e servem para identificar as faces do volume de controle na discretização numérica. A equação que descreve o volume elementar em coordenadas cartesianas, nos termos de velocidade na Fig. 6.4 é a seguinte:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (6.2)$$

Na qual  $u, v$  e  $\rho$  significam, respectivamente, componente da velocidade na direção  $x$ , componente da velocidade na direção  $y$  e massa específica. Dividindo a Eq. (6.2) pelo produto  $\Delta x \Delta y$ , o qual denota a variação do componente da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, encontra-se:

$$\frac{\rho u|_e - \rho u|_w}{\Delta x} + \frac{\rho v|_n - \rho v|_s}{\Delta y} = 0 \quad (6.3)$$

Após a aplicação do limite, encontra-se a equação diferencial que define a forma diferencial da equação da conservação da massa, para um escoamento permanente bidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (6.4)$$

A equação está na forma conservativa, pois existem os produtos  $\rho u$  e  $\rho v$  dentro do sinal de derivação. Portanto, a equação de conservação para um volume finito é um passo intermediário para a obtenção da equação de conservação em nível infinitesimal. Logo, a Eq. (6.4) será resolvida pela maneira prática do MVF, ou seja, através de integração numérica no volume elementar, como se pode observar

$$\int_w^e \int_s^n \left[ \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right] dx dy = 0 \quad (6.5)$$

$$\int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (6.6)$$

Avaliando o fluxo de massa no meio da face do volume como representação da média de variação na face, pode-se escrever:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (6.7)$$

Nota-se que a Eq. (6.7) é idêntica a Eq. (6.2), obtida através de realização do balanço, que também pode ser escrita como a Eq. (6.8), como segue:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (6.8)$$

A Eq. (6.2) é a equação aproximada que vale para o volume  $P$ . Portanto, realizar a integração da forma conservativa da equação diferencial ou fazer o balanço são procedimentos equivalentes. Realizando a integração para todos os volumes elementares, obtém-se uma equação algébrica para cada volume  $e$ , portanto, o sistema de equações algébricas procurado [Maliska, 2004].

### 6.3 Procedimentos Numéricos

Como citado anteriormente, para a simulação numérica das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica foi empregado um código comercial baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF) [FLUENT, 2007].

Quanto à malha utilizada, optou-se pela discretização do domínio computacional com uma malha híbrida. A qual, segundo Santos, 2008, consiste na utilização simultânea de malhas estruturadas (disposta em um padrão regular, podendo ser quadriláteros em 2D e hexaedros regulares em 3D) e não estruturadas (possui os elementos dispostos de maneira aleatória, normalmente utiliza elementos triangulares em 2D e tetraédricos em 3D) em regiões

específicas de forma a evidenciar suas vantagens.

Conforme descrito anteriormente, para discretização através da malha híbrida, dividiu-se o domínio computacional em regiões distintas onde aplicou-se elementos de malha estruturada e não estruturada. Neste caso, utilizou-se uma malha regular nas regiões à montante e à jusante do dispositivo de galgamento e na região do dispositivo empregou-se uma malha tetraédrica.

Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para tratamento dos termos advectivos. Por sua vez, a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO (*Pressure Staggering Option*), método que utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial sobre a face para computar a pressão na face [Gomes, 2010]. Para tratamento da fração volumétrica utilizou-se o método GEO-RECONSTRUCTION [Gomes, 2010; Iahnke, 2010]. Quanto ao problema do acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) [Versteeg e Malalasekera, 1995]. Além disso, empregaram-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente.

Todas as soluções foram realizadas usando computadores com 2 processadores Intel DualCore de 2.67 GHz de clock e 8.00 Gb de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a biblioteca de passagem de mensagens - MPI (do inglês: *Message Passing Interface*) disponibilizada pelo software FLUENT [FLUENT, 2006]. O tempo de cada simulação do primeiro estudo foi de aproximadamente  $1.2 \times 10^6$  s (333.60 h), aproximadamente 14 dias; enquanto, no segundo estudo demandou-se aproximadamente 18 horas.

Vale destacar que existem dificuldades no tratamento de escoamentos advectivo dominantes, sendo requeridos esquemas de advecção para tratamento deste tipo de escoamentos. Além disso, há uma grande dificuldade para resolver os campos de velocidades e pressão devido à diferença de ordem que os mesmos se encontram nas equações de conservação da quantidade de movimento. Por este motivo, as próximas seções são destinadas à realização de uma descrição sucinta sobre os esquemas de advecção, acoplamento pressão-velocidade e discretização temporal empregados nas simulações do presente trabalho.

### 6.3.1 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação

De acordo com Dos Santos, 2011, com relação à estabilidade dos métodos para escoamentos advectivos dominantes, a discretização por diferenças finitas centrais para o tratamento dos termos advectivos produzem soluções que sofrem a ação de oscilações espúrias nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Estas oscilações podem ser reduzidas empregando um maior refinamento de malha. No entanto, não é possível empregar este tipo de refinamento a problemas reais devido ao elevado esforço computacional oriundo deste refinamento [Maliska, 2004]. Em função disso, foram desenvolvidas técnicas para abordagem deste problema.

Dentre estas técnicas desenvolvidas, cita-se uma das primeiras formas de tratamento, o esquema de advecção *upwind*. Neste esquema a direção do escoamento é levada em consideração para realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito. Além disso, a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas (*wiggles*). Outra vantagem da função de interpolação *upwind* é a simplicidade de sua aplicação em programas de CFD. Vale destacar que este esquema pode conduzir a resultados inadequados para discretização de primeira ordem (falsa difusão) [Dos Santos, 2011; Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1995].

Neste trabalho utilizou-se o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para tratamento dos termos advectivos. Segundo Gomes, 2010, quando este esquema é utilizado, as quantidades em todas as faces dos volumes são determinadas supondo que o centro do volume para um campo variável representa um valor médio ao longo de todo o volume e mantém as características em todo o volume. Assim, quando utiliza-se o esquema *upwind* de primeira ordem, o valor  $\varphi_f$  na interface é igual ao valor da célula que está à montante da face [Patankar, 1980]. Por exemplo, se a velocidade principal do escoamento ocorre na direção  $x$ , conforme ilustra a Fig. 6.3, a variável  $\varphi_e$  (na face leste) será dada por [Dos Santos, 2011] :

$$\begin{aligned} \varphi_e &= \varphi_P \quad \text{se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \\ \varphi_e &= \varphi_E \quad \text{se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \end{aligned} \quad (6.9)$$

O valor das variáveis nas outras faces, neste caso,  $\varphi_f = \varphi_w$ , são definidas de forma similar.

Um maior detalhamento a respeito do esquema de advecção *upwind*, bem como, outros esquemas de advecção empregados, Exponencial, *Power-Law* e QUICK, podem ser obtidos na literatura de referência [Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995; Maliska, 2004].

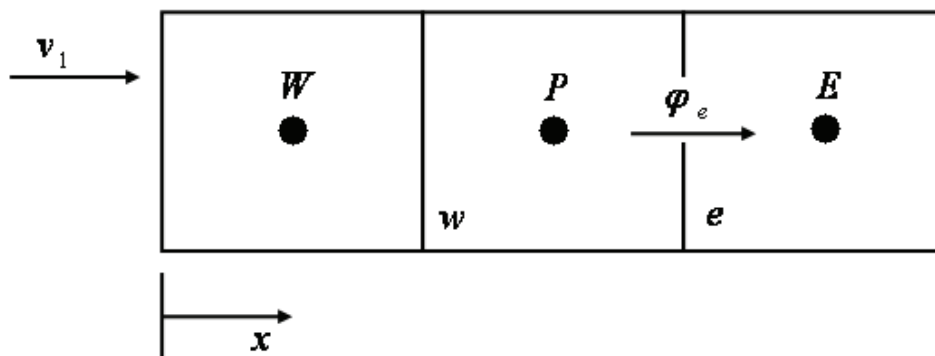


Figura 6.3 - Obtenção de  $\varphi_f$  em uma face do volume de controle usando o esquema *upwind*

[Dos Santos, 2011].

### 6.3.2 Acoplamento Pressão-Velocidade

Com relação à variação temporal das variáveis primárias, os campos de velocidade e temperatura podem ser avançados no tempo, empregando-se as equações de conservação da quantidade de movimento e energia, respectivamente. No entanto, na solução de escoamentos incompressíveis a pressão não possui uma equação própria para seu avanço no tempo e a equação da conservação de massa, por sua vez, não serve de equação evolutiva para nenhuma variável, sendo apenas uma restrição que deve ser obedecida pelo campo de velocidades [Maliska, 2004]. Vale destacar que, independente da metodologia empregada (MDF, MVF ou MEF) dificuldades numéricas associadas à simulação de escoamento incompressíveis tem sido relatadas na literatura [Kawahara e Hirano, 1983; Dos Santos, 2011].

Portanto, a solução segregada das equações de conservação de quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento sequenciado e

iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo imperfeito de velocidade se aproxime progressivamente da solução que satisfaz a equação da continuidade na forma discretizada [FLUENT, 2005; Gomes, 2010].

Dentre as três opções de algoritmos de acoplamento pressão-velocidade oferecidas pelo FLUENT (SIMPLE, SIMPLEC e PISO), optou-se pela utilização do método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), da família do SIMPLE, baseado no grau mais alto da relação de aproximação entre as correções para a pressão e a velocidade. Uma das limitações do SIMPLE e do SIMPLEC é o fato das novas velocidades e fluxos correspondentes não satisfazerem o balanço da quantidade de movimento após a equação da correção da pressão ser resolvida. Para melhorar a eficiência deste cálculo, o algoritmo PISO possui duas correções adicionais: correções das vizinhanças e correção “*skewness*” [Gomes, 2010].

### 6.3.3 Discretização Temporal das Equações de Conservação

Para a análise de problemas transientes é necessário empregar algum esquema de integração no tempo. Estes esquemas podem ser classificados em implícitos, semi-implícitos e explícitos. Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e permitem um maior passo de tempo com relação ao demais. No entanto, para domínios de grande dimensão há uma grande dificuldade para o armazenamento na memória principal das matrizes completas do sistema, gerando um maior tempo de processamento para obtenção dos resultados da simulação [Reddy e Gartling, 1994]. Já os esquemas explícitos ocupam pouco espaço na memória central. Contudo, estes esquemas apresentam fortes restrições de estabilidade numérica, limitando o passo a ser adotado [Gresho e Sani, 1999; Dos Santos, 2011].

Assim, a discretização temporal envolve a integração de todos os termos nas equações diferenciais durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Uma expressão geral para a evolução no tempo de uma variável  $\phi$  é dada por [Gomes, 2010]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (6.10)$$

onde a função  $F(\phi)$  incorpora qualquer tipo de discretização espacial. Se a derivada no tempo é discretizada usando diferença para trás, uma aproximação de primeira ordem para a discretização temporal é dada por:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (6.11)$$

e a discretização de segunda ordem é dada por:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (6.12)$$

sendo  $\phi$  uma quantidade escalar,  $n+1$  o valor do próximo nível de tempo,  $n$  o valor do nível de tempo corrente e  $n-1$  o valor do nível de tempo anterior.

No presente estudo é utilizado o esquema de avanço temporal implícito de primeira ordem. Assim, um método para calcular a função  $F(\phi)$  em um nível de tempo futuro é dado por [Gomes, 2010]:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (6.13)$$

Isto é chamado de integração implícita desde que  $\phi^{n+1}$  num dado volume esta relacionada com  $\phi^{n+1}$  em volumes vizinhos através de  $F(\phi^{n+1})$ :

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t.F(\phi^{n+1}) \quad (6.14)$$

Esta equação implícita pode ser resolvida iterativamente pela inicialização  $\phi^1$  a  $\phi^n$  e alterando a equação:

$$\phi^1 = \phi^n + \Delta t.F(\phi^1) \quad (6.15)$$

para uma formulação de primeira ordem implícita:

$$\phi^1 = \frac{4}{3} \cdot \phi^n - \frac{1}{3} \cdot \phi^{n-1} + \frac{2}{3} \Delta t \cdot F(\phi^1) \quad (6.16)$$



## 7 RESULTADOS

A presente seção apresenta os resultados obtidos para os dois casos estudados ao longo deste trabalho. Para tal, apresenta-se este capítulo subdividido em vários itens: verificação do modelo numérico, otimização segundo a Teoria Construtal de um dispositivo de galgamento em escala de laboratório, otimização segundo a Teoria Construtal de um dispositivo de galgamento onshore em escala real (onde são apresentados estudos de qualidade de malha e influência do passo de tempo), utilizando um modelo numérico tridimensional. Particularmente, é estudada a influência do ângulo de abertura lateral da rampa de um dispositivo tridimensional de galgamento sobre a massa de água que entra no reservatório do dispositivo.

### 7.1 Verificação do Modelo Numérico

Para verificar a metodologia empregada, foi utilizada a estratégia de comparação entre a solução analítica para a movimentação da superfície livre da água, dada pela Eq. (3.2), e a solução numérica, que consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a variação na posição da superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do tanque de ondas.

Vale ressaltar que a onda gerada numericamente possui as mesmas características da obtida analiticamente. As mesmas são apresentadas na Tab. 5.2.

Na Fig. 7.1 apresenta-se uma comparação da onda numérica obtida neste trabalho com a onda analítica predita pela Eq. (3.17) na posição  $x = 2.00$  m. Para análise do fenômeno vale considerar duas faixas de tempo no gráfico. Na primeira, para  $0.00 \text{ s} \leq t \leq 4.00 \text{ s}$ , observa-se que o escoamento da onda parte do repouso e, em função da inércia do escoamento, as primeiras ondas geradas no tanque numérico são mais amortecidas, levando a desvios consideráveis na comparação com os resultados analíticos. Este amortecimento tende a diminuir com o avanço do tempo de simulação. Posteriormente, para  $4.00 \text{ s} \leq t \leq 8.00 \text{ s}$ , a altura da superfície livre da onda em função do tempo assume um comportamento cíclico

estável. Nesta faixa de tempo, é observada uma diferença média entre as amplitudes de cristas e cavas, calculadas numérica e analiticamente, de aproximadamente 6.00%. Vale também destacar que, como se trata de uma onda de Stokes de 2ª Ordem, as amplitudes de crista e cava são distintas. Por exemplo, ao observarmos a 8ª crista ( $t = 6.80$  s) a diferença percentual entre as alturas da superfície livre fica em torno de 3.70%. Para a cava obtida no instante de tempo  $t = 7.25$  s, percebe-se uma diferença de aproximadamente 5.80%. De uma forma geral, é possível observar que o modelo numérico apresentado neste estudo apresenta um comportamento satisfatório quando comparado com a solução analítica.

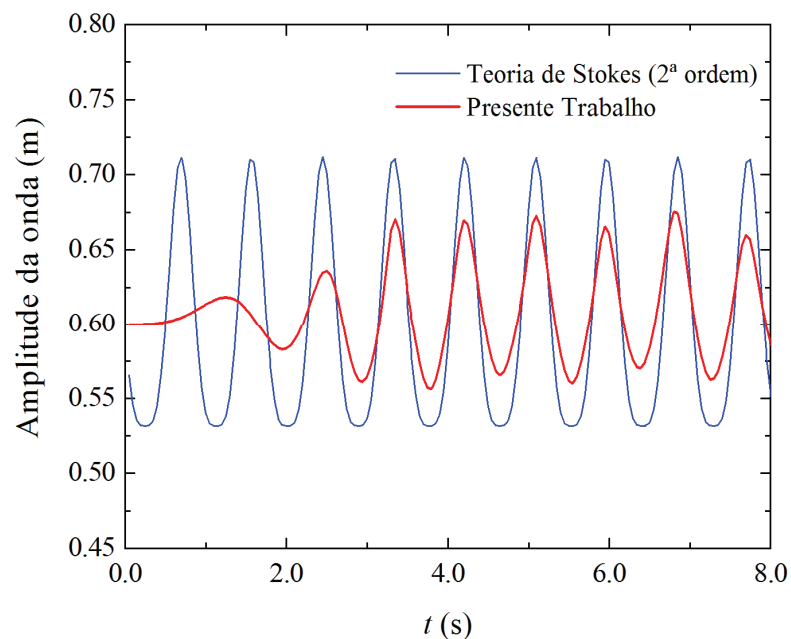


Figura 7.1 - Validação da Onda Numérica.

## 7.2 Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento em Escala de Laboratório

Conforme mencionado anteriormente, este problema de otimização consiste em calcular numericamente a massa de água que entra no reservatório para várias geometrias do dispositivo de galgamento (rampa e reservatório) inserido em um tanque de ondas regulares em escala de laboratório. O objetivo é otimizar o grau de liberdade  $b/B$  (razão entre a base superior e a base inferior da rampa do dispositivo), isto é, calcular o design que maximiza a massa de água que entra no reservatório. Foram mantidos constantes a área total do tanque de

ondas, Eq. 5.7, e a área da rampa do dispositivo de galgamento, Eq. 5.8. Além destas áreas, foram mantidos constantes o comprimento total do tanque de ondas,  $L_T = 6.00$  m, o comprimento da rampa do dispositivo de galgamento,  $L_R = 0.67$  m, a distância do início da rampa do dispositivo ao reservatório do mesmo,  $L_I = 0.60$  m, a altura do reservatório,  $L_2 = 0.32$  m, a altura da onda,  $H = 0.18$  m, a altura do tanque de ondas,  $H_T = 1.00$  m, e a profundidade do tanque de ondas,  $h = 0.60$  m. Maiores características do tanque de ondas e do dispositivo podem ser observadas no Cap. 5. Em suma, o processo de otimização numérica consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de  $b/B$ , variações estas, observadas na Tab. 5.1.

Primeiramente, a fim de comparar os resultados obtidos nos 11 casos estudados, realizou-se um somatório de toda a vazão mássica que entra no reservatório ao longo dos 8.00 s de simulação. Para tal, a Figura 7.2 apresenta o efeito da razão  $b/B$  sobre a quantidade total de massa de água que entra no reservatório ao longo do tempo. Pode ser observado que há uma razão de  $(b/B)_o = 0.43$ , que maximiza a massa de água que entra no reservatório ao longo do tempo, a quantidade de massa de água máxima para este caso foi de  $m_m = 1.696$  kg. Em todos os casos simulados ocorreu galgamento e o caso com menor quantidade de água galgada foi o caso de maior razão  $b/B = 3.00$ , onde a quantidade total de água encontrada no reservatório do dispositivo de galgamento ao final dos 8.00 s de simulação foi de  $m = 0.002$  kg. Um comportamento interessante é observado para  $b/B = 0.86$ , no qual um ponto de máximo local é obtido ( $m = 0.381$  kg).

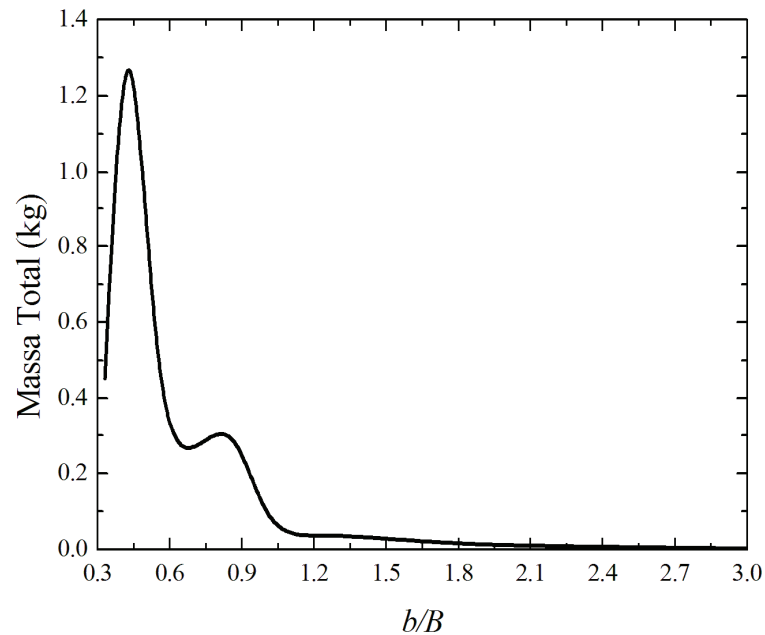


Figura 7.2 - Vazão mássica total em função da razão  $b/B$ .

Vejamos então, a vazão mássica ( $kg/s$ ) que entra no reservatório do dispositivo de galgamento ao longo do tempo para os casos com destaque neste estudo, ou seja, o caso houve maior ocorrência de galgamento,  $(b/B)_o = 0.43$ , o caso com menor ocorrência de galgamento,  $b/B = 3.00$ , e o caso onde encontra-se um ponto máximo local,  $b/B = 0.86$ . Com esta análise é possível avaliar o efeito da influência de  $b/B$  sobre a quantidade de água que galgou a rampa. A Fig. 7.3 evidencia que o caso onde  $b/B = 3.00$  é o que conduz a resultados insatisfatórios. Pode ser visualizado que, a partir de  $t = 4.20$  s começa a ocorrer o galgamento para os casos de razão  $b/B = 0.43$  e, a partir de  $t = 4.30$  s para o caso de razão  $b/B = 0.86$ , enquanto que para o caso de razão  $b/B = 3.00$ , o galgamento começa a ocorrer somente a partir de  $t = 7.00$  s. No caso de razão  $b/B = 3.00$  a visualização ficou comprometida na Fig. 7.3 devido ao pequeno volume de galgamento apresentado nas descargas. Destaca-se, também, que esta dificuldade de visualização dá-se pelo fato do caso ter apresentado apenas dois sensíveis picos de galgamento. Curiosamente, os casos de razão  $b/B = 0.43$  e  $b/B = 0.86$  apresentam uma grande semelhança no primeiro pico de galgamento. Também foi possível notar que, a partir do instante de tempo de aproximadamente 6.20 s, a quebra da onda minimizou sensivelmente a quantidade de água que galgou a rampa, devido a dissipação da energia contida na onda ocorrida pela presença do dispositivo de galgamento.

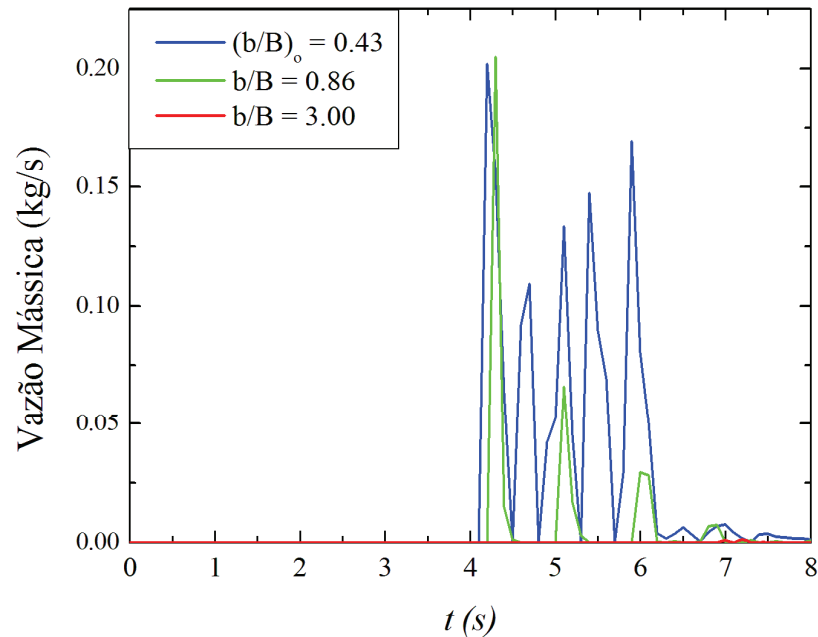


Figura 7.3 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para alguns casos simulados ( $(b/B)_o = 0.43$ ,  $b/B = 0.86$  e  $b/B = 3.00$ ).

A Figura 7.4 apresenta o comportamento transiente de uma onda gerada numericamente em um tanque sobre a rampa para o caso ótimo, ou seja, o caso de razão  $(b/B)_o = 0.43$ . Vale mencionar que estas topologias do comportamento da onda foram obtidas considerando um plano  $x$ - $z$  localizado na metade do tanque de ondas ( $y = 0.50$  m). A água é representada na cor vermelha, enquanto o ar é representado na cor azul. As topologias das fases em função do tempo são obtidas para os seguintes instantes de tempo:  $t = 1.00$  s,  $2.00$  s,  $3.00$  s,  $4.00$  s,  $5.00$  s,  $6.00$  s,  $7.00$  s e  $8.00$  s, representados respectivamente pelas Fig. 7.4 (a) – 7.4 (h). E, conforme a Fig. 7.4 (a) ilustra, no seu complemento lateral de cada instante de tempo é apresentado um zoom desta imagem no entorno do dispositivo de galgamento, objetivando uma melhor visualização do fenômeno. Para os instantes de tempo iniciais, Fig. 7.4 (a) – 7.4 (c), há a formação das primeiras ondas devido à imposição do campo de velocidades na superfície de entrada do tanque de ondas, porém ainda não foi gerado um número suficiente de ondas para incidir no dispositivo de galgamento. No instante  $t = 4.00$  s, observa-se que a onda incide na rampa, porém a água ainda não entra no reservatório. O que nos leva a crer, através das imagens (e também pode ser constatado na Fig. 7.3) que a ocorrência do galgamento dar-se-á nos próximos instantes. Em  $t = 5.00$  s nota-se uma grande

quantidade de água incidente no reservatório, ou seja, a onda conseguiu superar a resistência imposta ao escoamento pela rampa e realizou o galgamento sendo descarregada no reservatório. Além disso, pode ser vista a massa de água coletada no interior do reservatório, o que não havia sido observado nas topologias para os instantes de tempo anteriores (Fig. 7.4 (a) – (d)). Para  $t = 6.00$  s (Fig. 7.4 (f)), observa-se que a onda, mais uma vez vence a resistência imposta ao escoamento e, assim como no caso anterior, observa-se a massa de água descarregada no reservatório do dispositivo de galgamento. Para  $t = 7.00$  s (Fig. 7.4 (g)) é visto o efeito da reflexão causado pelo dispositivo de galgamento, bem como o comportamento irregular das ondas. Observa-se também, que a quantidade da massa de água no reservatório do dispositivo de galgamento é superior aos casos apresentados anteriormente (Fig. 7.4 (a) – (f)). Em  $t = 8.00$  s é observada a quebra da onda que chega ao dispositivo de galgamento, dissipando a energia da mesma. Esse fato leva a uma redução significativa da quantidade de água que entra no reservatório.

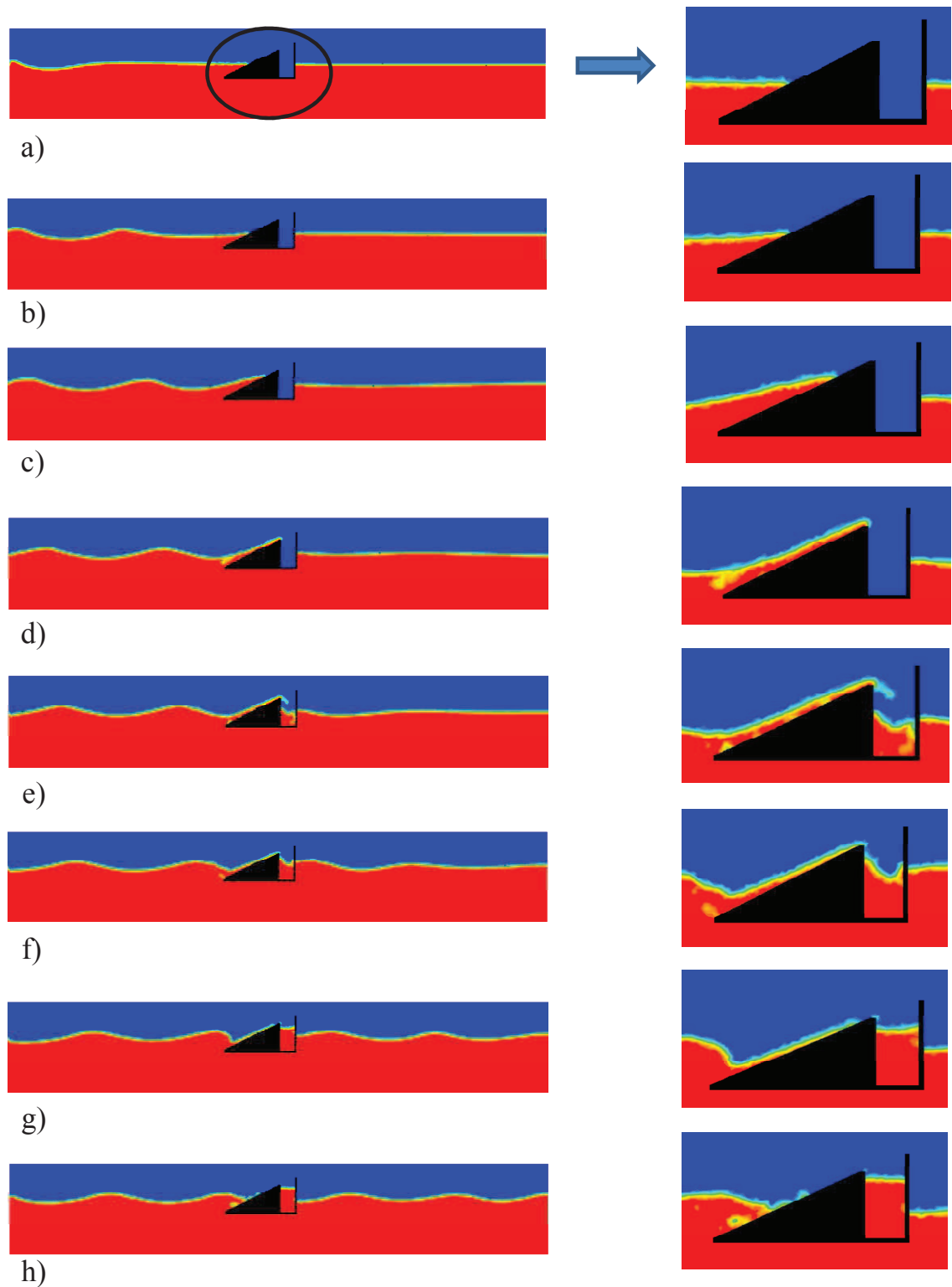


Figura 7.4 - Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $b/B = 0.43$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 1.00$  s; b)  $t = 2.00$  s; c)  $t = 3.00$  s; d)  $t = 4.00$  s; e)  $t = 5.00$  s; f)  $t = 6.00$  s; g)  $t = 7.00$  s; h)  $t = 8.00$  s.

Na Figura 7.5 é apresentado o comportamento transiente das ondas sobre o dispositivo para o caso de razão  $b/B = 0.86$ , caso onde se localiza o ponto local máximo. Neste caso, são avaliados os mesmos instantes de tempo do caso anterior, permitindo uma comparação qualitativa entre os dois casos apresentados até o presente momento. Para os primeiros três passos de tempo apresentados,  $t = 1.00$  s,  $2.00$  s e  $3.00$  s (Fig. 7.5 (a) – (c)), da mesma forma que para o caso anterior, não houve galgamento. Para o instante de tempo  $t = 4.00$  s (Fig. 6.4 (d)) a onda que incide sobre a rampa está na iminência de galgar a mesma. Destaca-se também, que a quantidade de água sobre a rampa é inferior ao apresentada no mesmo instante de tempo do caso anterior. Ou seja, na comparação com o caso de razão  $b/B = 0.43$ , a geometria deste caso ( $b/B = 0.86$ ) proporcionou que a onda apresente uma mudança visível na quantidade de água na região do dispositivo. Posteriormente, em  $t = 5.00$  s (Fig. 7.5 (e)) observa-se que a onda vence a resistência imposta ao escoamento, ultrapassa a rampa e permite a entrada de água no reservatório, assim como ocorrera no caso anterior ( $b/B = 0.43$ ). É possível observar na Fig. 7.5 (e) uma redução significativa da quantidade de água no interior do reservatório do dispositivo de galgamento ao comparar com este mesmo instante de tempo do caso anterior ( $b/B = 0.43$ ), Fig. 7.4 (e). Para os outros instantes de tempo,  $t = 6.00$  s a  $8.00$  s (Fig. 6.5 (f) – (h)) novamente foi observado o galgamento e é possível observar o aumento na quantidade de água no interior do dispositivo de galgamento oriunda dos instantes de tempo intermediários aos apresentados nas imagens. Assim como os fenômenos de reflexão e quebra da onda, os quais reduzem significativamente a quantidade de água que entra do reservatório do dispositivo de galgamento, ao compararmos este caso de razão  $b/B = 0.86$  com o caso ótimo ( $(b/B_o) = 0.43$ ), observa-se que a quantidade de água galgada ao longo de  $t = 8.00$  s de simulação foi expressivamente inferior.



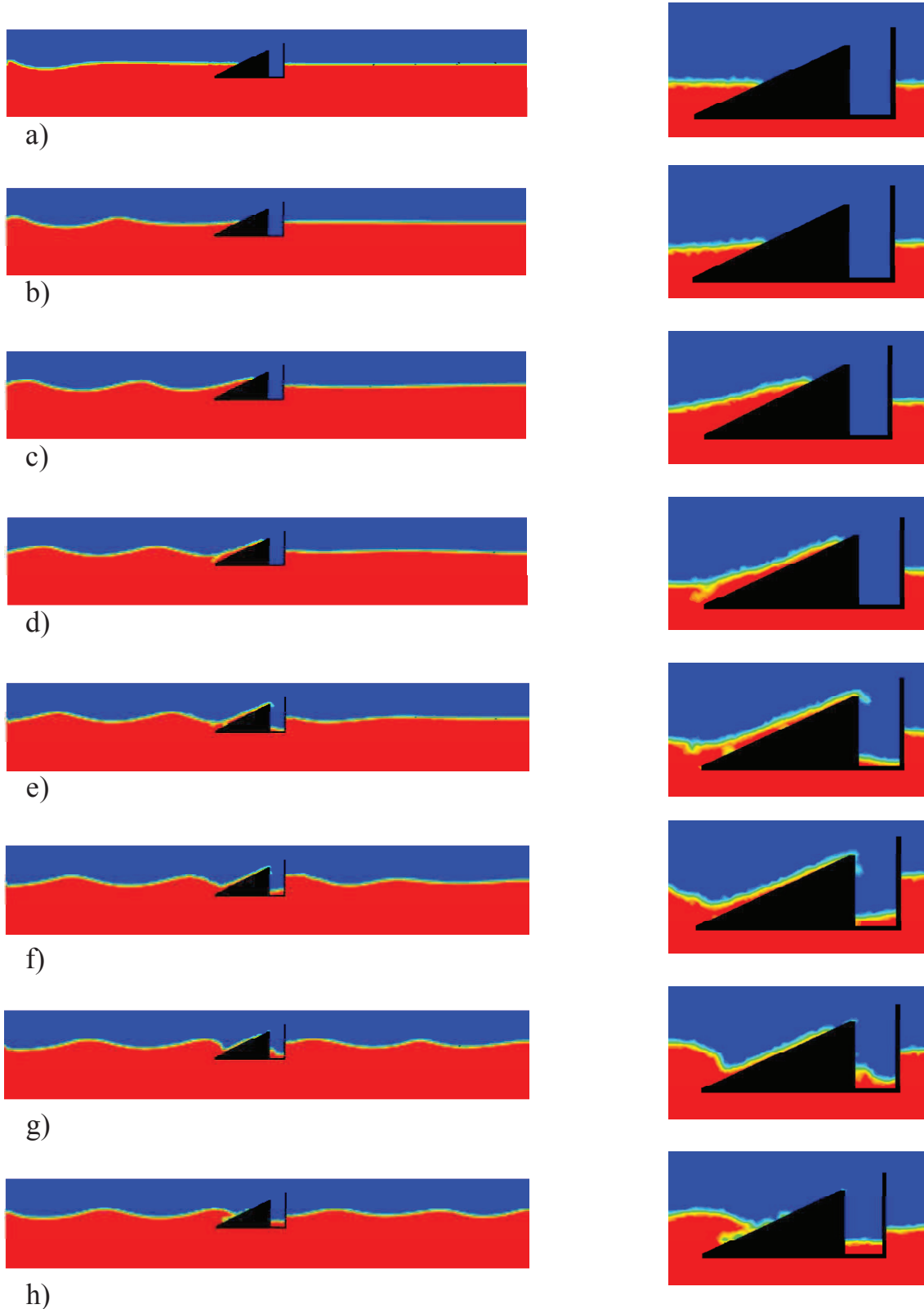


Figura 7.5 - Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $b/B = 0.86$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 1.00$  s; b)  $t = 2.00$  s; c)  $t = 3.00$  s; d)  $t = 4.00$  s; e)  $t = 5.00$  s; f)  $t = 6.00$  s; g)  $t = 7.00$  s; h)  $t = 8.00$  s.

Na Figura 7.6 é apresentado o comportamento transiente das ondas sobre o dispositivo de galgamento para o caso de razão  $b/B = 3.00$ , caso onde houve uma menor massa de água galgada entre os estudados. Neste caso, também se observa uma dificuldade de galgamento nos instantes iniciais da simulação (Fig. 7.6 (a) – (c)). Porém, este caso difere-se dos demais, principalmente pela dificuldade que a onda obteve de vencer a resistência imposta pela rampa do dispositivo de galgamento. Nos instantes de tempo  $t = 4.00$  s e  $5.00$  s (Fig. 7.6 (d) – (e)) não houve ocorrência de galgamento e também, nota-se uma menor quantidade de água na região da rampa, indicando que o galgamento que ocorrerá nos instantes seguintes conduzirá uma menor quantidade de água para dentro do reservatório em comparação com os casos de razão  $b/B = 0.43$  e  $b/B = 0.86$ . Posteriormente, para  $t = 6.00$  s e  $7.00$  s (Fig. 7.6 (f) – (g)), a onda é capaz de vencer a resistência ao escoamento e consegue galgar a rampa. Porém, este design apresenta uma pequena quantidade de água no interior do reservatório, o que não foi observado para os designs anteriores. Para o instante de tempo  $t = 8.00$  s (Fig. 7.6 (h)) a onda sofre o efeito da perda de energia pela reflexão devido à presença do dispositivo de galgamento. Com a análise da Fig. 7.6, é evidente que este design apresenta menor ocorrência de galgamento do que nos casos anteriores ( $b/B = 0.43$  e  $b/B = 0.86$ ).

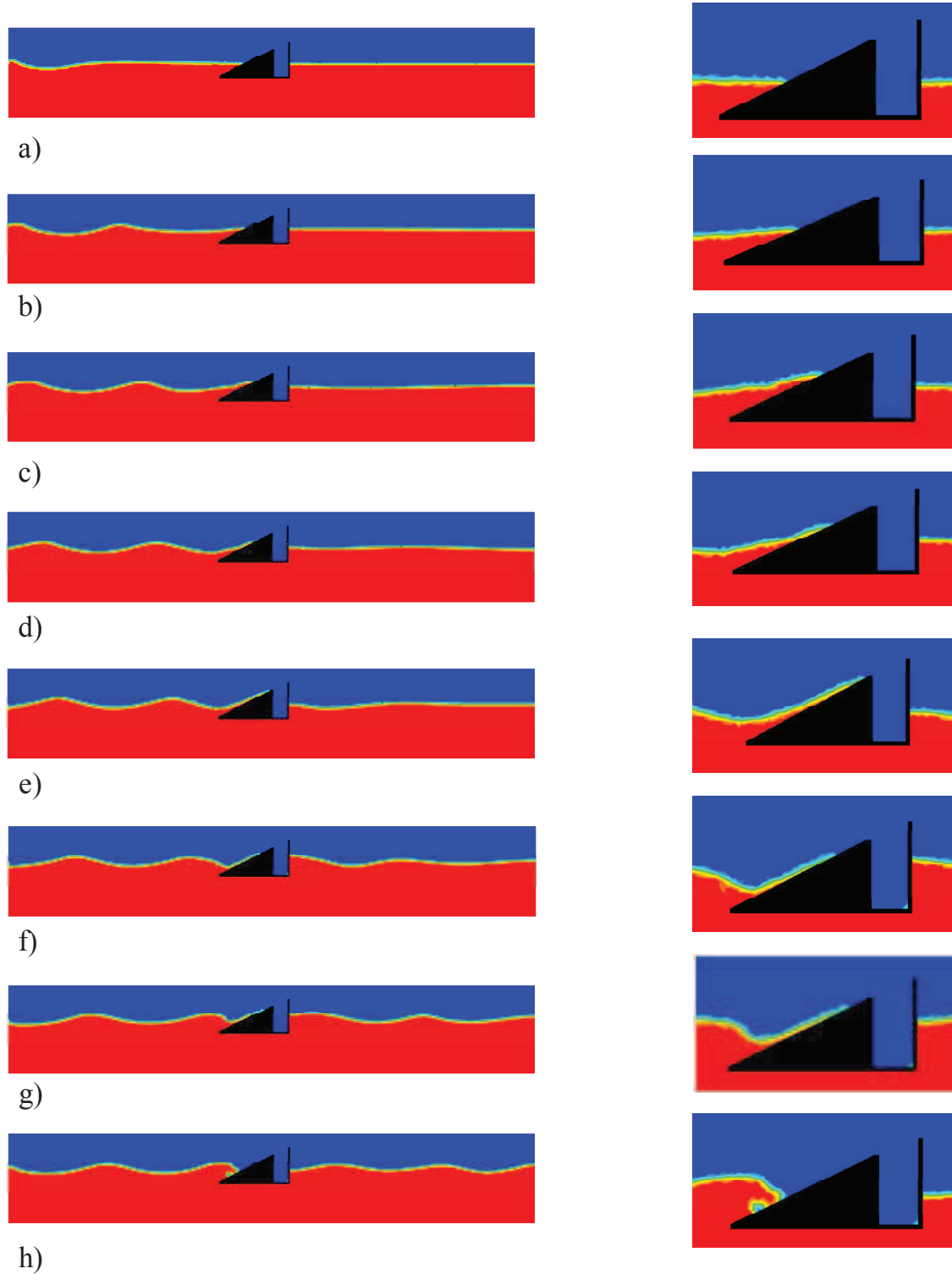


Figura 7.6 - Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $b/B = 3.00$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 1.00$  s; b)  $t = 2.00$  s; c)  $t = 3.00$  s; d)  $t = 4.00$  s; e)  $t = 5.00$  s; f)  $t = 6.00$  s; g)  $t = 7.00$  s; h)  $t = 8.00$  s.

De uma forma geral, a comparação entre as topologias das fases para os três casos indica, de forma qualitativa, que a razão menor de  $b/B$  conduzia a uma maior quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento.

Conclui-se também, que o Design Construtal permitiu um aumento significativo no desempenho do dispositivo. Por exemplo, a quantidade de galgamento de água para a geometria ideal ( $(b/B)_o = 0.43$ ) é aproximadamente 848 vezes maior do que a observada para a relação  $b/B = 3.00$ , o caso com a quantidade mínima de vazão mássica entre os casos simulados neste estudo. Estes resultados enfatizam a importância da geometria no desempenho dos sistemas onde há escoamento.

### 7.3 Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real

Com a finalidade da obtenção de uma maior precisão de resultados e também, pelo fato deste estudo ser o primeiro a realizar uma simulação tridimensional de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, realizou-se estudos de independência de malha e independência de passo de tempo. Tais estudos são apresentados na sequência.

#### 7.3.1 Estudo de Qualidade de Malha

Conforme explicitado no Capítulo 5, Fig. 5.7, para realização das simulações, o domínio computacional foi subdividido em duas regiões, objetivando a obtenção de uma malha com maior refinamento na região do dispositivo, onde os gradientes de velocidades são mais intensos. Para encontrar a dimensão elementos da malha, realizou-se um teste onde foram avaliados três possíveis  $\Delta x$  (dimensão da malha). E, avaliou-se o número total de elementos de malha gerados, o erro médio (calculado através da comparação da altura da onda calculada analiticamente com a onda calculada numericamente) e, também, o tempo total da demanda computacional (tempo total de simulação).

- **Malha refinada:** os volumes de malha possuem dimensão  $\Delta x = 1.00$  m e foram gerados 1099795 elementos de malha. Neste caso, o erro médio apresentado na comparação da

superfície livre de onda numérica com a onda analítica foi em torno de 4.42% e, o tempo total de simulação foi de aproximadamente 53.5 horas.

- **Malha intermediária:** os volumes de malha possuem dimensão  $\Delta x = 1.30$  m e foram gerados 540040 elementos de malha. Neste caso, o erro médio apresentado na comparação da superfície livre de onda numérica com a onda analítica foi em torno de 5.31% e, o tempo total de simulação foi de aproximadamente 30 horas.
- **Malha grosseira:** os volumes de malha possuem dimensão  $\Delta x = 1.60$  m e foram gerados 273376 elementos de malha. Neste caso, o erro médio apresentado na comparação da superfície livre de onda numérica com a onda analítica foi em torno de 5.17 % e, o tempo total de simulação foi de aproximadamente 30 horas.

Observa-se na Fig. 7.7 a influência da dimensão da malha sobre a superfície livre da onda. Conclui-se que a malha refinada, ou seja, a malha com  $\Delta x = 1.00$  m foi a que obteve maior concordância com a onda gerada analiticamente. Observa-se na Fig. 7.7 que a discretização da malha influencia consideravelmente na concordância com a onda analítica, portanto, as diferenças nas ondas geradas numericamente com as malhas Grosseira e Intermediária ocorrem devido a um menor refino de malha nesses caso (ou seja, um maior  $\Delta x$ ). Como, a diferença do tempo total de simulação do caso com maior refino de malha para os demais casos foi menor de 24 horas, optou-se pela utilização desta malha com maior refinamento entre os elementos. E, após buscar por uma redução no tempo total de simulação através do estudo de influência de passo tempo, vale destacar que esta dimensão de malha foi mantida padrão nas duas regiões do tanque de ondas, ou seja, empregou-se tanto na região constituída por tetraedros quanto na região constituída por hexaedros.

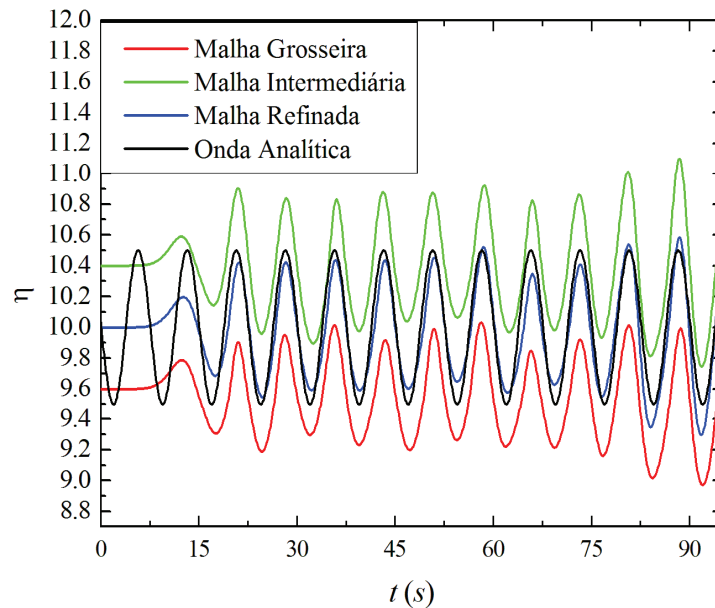


Figura 7.7 - Teste de Qualidade de Malha: comparação da onda gerada analiticamente com a onda gerada com as malhas de dimensões  $\Delta x = 1.00$  m,  $\Delta x = 1.30$  m e  $\Delta x = 1.60$  m.

### 7.3.2. Teste de Influência do Passo de Tempo

Visto que se trata de um problema transiente, realizou-se o teste de qualidade do passo de tempo a fim de reduzir o tempo total de simulação. Para este estudo, empregou-se a malha estabelecida no estudo anterior, ou seja, com  $\Delta x = 1.00$  m e foram realizadas quatro simulações variando apenas o passo de tempo, a fim de investigar a influência do passo de tempo sobre a altura da superfície livre da onda. Em todas as simulações o tempo total foi de  $t = 100.00$  s. E, os seguintes passos de tempo foram avaliados:  $\Delta t = 0.01$  s,  $\Delta t = 0.02$  s,  $\Delta t = 0.04$  s e  $\Delta t = 0.05$  s. Conforme se observa na Tab. 7.1, a diferença do erro médio para cada caso estudado foi mínima. Destaca-se que, o passo de tempo que apresentou um menor erro (calculado através da comparação da altura da onda calculada analiticamente com a onda calculada numericamente) foi  $\Delta t = 0.01$ s, porém o tempo total de simulação para este passo de tempo foi em torno de 53.5 horas. Enquanto que, para  $\Delta t = 0.05$ s, o tempo total de simulação foi de 18 horas e o erro médio foi praticamente idêntico (4.44%). Portanto, visto a defasagem

em relação ao tempo total de simulação, ou seja, a condução a um menor esforço computacional optou-se pela utilização de  $\Delta t = 0.05s$ .

Tabela 7.1 - Comparação dos quatro passos de tempo estudados.

$\Delta t$	Erro Médio	Tempo Total de Simulação
0.01	4.42%	53.5 horas
0.02	4.53%	44 horas
0.04	4.56%	24 horas
0.05	4.44%	18 horas

### 7.3.3 Resultados da Análise Numérica de um Dispositivo de Galgamento *Onshore* em Escala Real

Conforme mencionado anteriormente, este problema de otimização é muito semelhante ao apresentado anteriormente. Logo, este problema também consiste em encontrar numericamente a solução para várias geometrias do dispositivo de galgamento (rampa e reservatório) inserido em um tanque de ondas regulares, porém, em escala real. O objetivo é encontrar o valor da geometria  $b/B$  (razão entre a base superior e a base inferior da rampa do dispositivo) que maximiza a massa de água no reservatório. Foram mantidos constantes os graus de liberdade estudados por Goulart, 2014:  $(H_1/L_1)_o = 0.34$  (razão entre a altura e o comprimento da rampa) e  $S_o = 3.5$  m (submersão do dispositivo de galgamento). A área total do tanque de ondas, Eq. 5.9, e a área da rampa do dispositivo de galgamento, Eq. 5.10, também foram mantidas constantes e são as restrições geométricas do problema. As características do tanque de ondas e do dispositivo podem ser observadas no Cap. 5. Em suma, o processo de otimização numérica consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de  $b/B$ , variações estas, observadas na Tab. 5.3.

A fim de comparar o desempenho dos doze casos simulados, realizou-se o somatório de toda a massa que entra no reservatório ao longo dos 100.00 s de simulação. A Figura 7.8 apresenta o efeito da razão  $b/B$  sobre a quantidade total de massa de água que entra no

reservatório ao longo do tempo. É de fácil observação que há uma razão,  $(b/B)_o = 0.38$ , que maximiza a massa de água que entra no reservatório ao longo do tempo. A quantidade de massa de água máxima para este caso foi de aproximadamente  $m_m = 115915$  kg. Em todos os casos simulados ocorreu galgamento e o caso com menor quantidade de água galgada foi  $b/B = 3.00$ , onde a quantidade total de água encontrada no reservatório do dispositivo de galgamento ao final dos 100.00 s de simulação foi de aproximadamente  $m = 2346$  kg. Observa-se também que, com exceção do caso ótimo  $(b/B)_o = 0.38$ , a massa total de água galgada é inversamente proporcional ao grau de liberdade estudado, ou seja, a razão  $b/B$ . Observa-se que a curva se acentua especialmente para os valores da razão  $b/B$  maiores que 1, casos em que a vazão mássica tem decréscimo de aproximadamente 50% entre cada caso. Veja o exemplo: para o caso onde  $b/B = 1.00$ , a massa total é aproximadamente 75102 kg, enquanto que, para a razão  $b/B = 1.22$ , a massa total é aproximadamente 37551 kg.

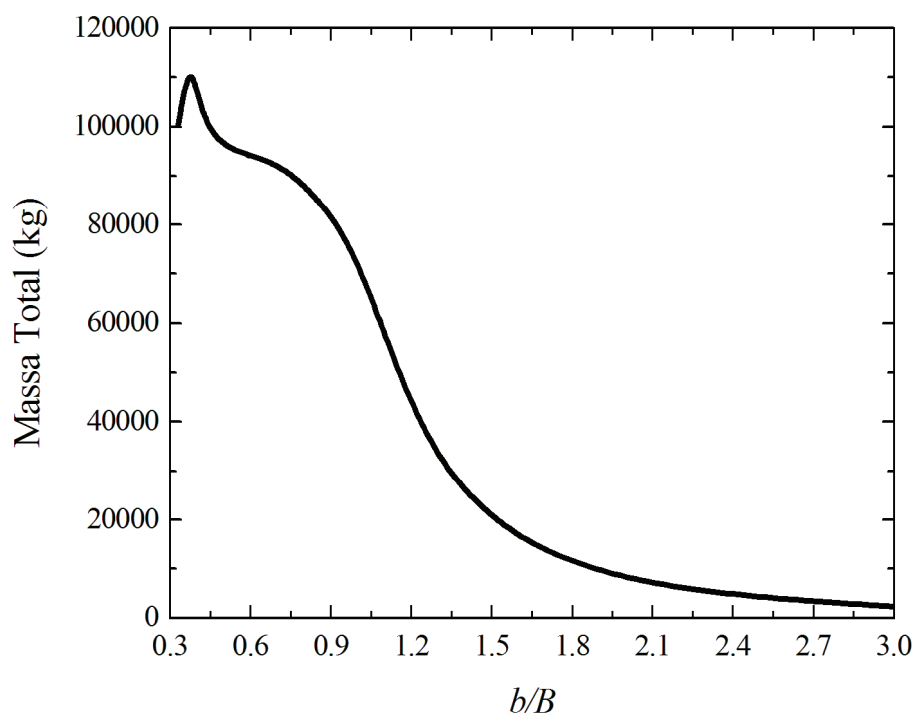


Figura 7.8 - Vazão mássica total em função da razão  $b/B$ .

Vejamos, então, a vazão mássica (kg/s) que entra no reservatório do dispositivo de galgamento ao longo dos 100 s simulados para o caso com maior ocorrência do galgamento



$(b/B)_o = 0.38$ , para o caso que ocorreu uma menor vazão mássica  $b/B = 3.00$ , ou seja, aquele que apresenta menor quantidade de água galgada e para  $b/B = 1.00$ , relação onde a rampa é considerada “reta”, ou seja, o grau de liberdade onde não há influência do ângulo de abertura da rampa. Na Fig. 7.9 é possível avaliar o efeito da influência da razão  $b/B$  sobre a quantidade de água que galgou a rampa. Em todos os casos analisados, observa-se a ocorrência de galgamento. Na Fig. 7.9 também fica evidente que a razão  $b/B = 3.00$  conduz aos piores resultados. Pode ser visualizado que, a partir de aproximadamente  $t = 45$  s começa a ocorrer galgamento para o caso ótimo  $(b/B)_o = 0.38$ , enquanto que, para os demais casos, a ocorrência de galgamento se dá a partir de aproximadamente  $t = 50$  s. Após este instante de tempo, os casos apresentam um comportamento de descargas de galgamento periódico, comportamento este, também observado em Machado, 2012, Goulart, 2014, Dos Santos, 2014, entre outros. Estes casos apresentam uma periodicidade de  $t = 7.5$  s, ou seja, ocorre o pico de galgamento a cada período de onda. Para o caso com menor descarga de galgamento,  $b/B = 3.00$ , esta visualização ficou comprometida devido ao pouco volume de água apresentado nas descargas de galgamento. É de fácil visualização que o caso ótimo,  $(b/B)_o = 0.38$ , apresenta picos de galgamento mais elevados que os outros dois casos apresentados ( $b/B = 1.00$  e  $b/B = 3.00$ ). Porém, curiosamente, no instante de tempo de aproximadamente  $t = 97$  s (sétimo pico de galgamento apresentado) o caso de razão  $b/B = 1.00$  apresenta um pico de galgamento maior.

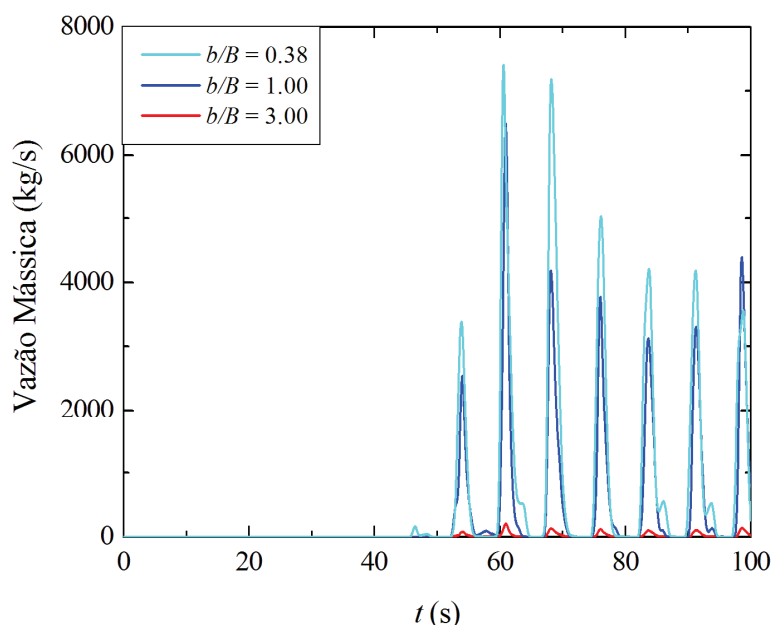


Figura 7.9 - Vazão mássica instantânea em função do tempo para alguns casos simulados ( $(b/B)_o = 0.38$ ,  $b/B = 1.00$  e  $b/B = 3.00$ ).

Vejam as topologias das fases para o caso ótimo e também, para o caso com pior desempenho,  $(b/B)_o = 0.38$  e  $b/B = 3.00$ , respectivamente. Logo, a Fig. 7.10 apresenta o comportamento transiente de uma onda gerada numericamente em um tanque de ondas sobre a rampa de um dispositivo de galgamento para o caso de razão ótimo,  $(b/B)_o = 0.38$ . Destaca-se que estas topologias do comportamento da onda foram obtidas considerando um plano  $x-z$  localizado na metade do tanque de ondas ( $y = 50$  m). A água é representada pela cor vermelha, enquanto o ar representado pela cor azul. As topologias das fases em função do tempo foram obtidas para os instantes de tempo  $t = 10.00$  s,  $20.00$  s,  $30.00$  s e  $40.00$  s,  $50.00$  s,  $60.00$  s,  $70.00$  s,  $80.00$  s,  $90.00$  s,  $100.00$  s representados, respectivamente, pelas Fig. 7.9 (a) – 7.9 (j). Para os instantes de tempo iniciais, Fig. 7.10 (a) – 7.10 (c) há a formação das primeiras ondas devido à imposição do campo de velocidades na superfície de entrada do tanque de ondas, porém ainda não foi gerado um número suficiente de ondas para incidir no dispositivo de galgamento. No instante  $t = 40.00$  s, observa-se que a onda ainda não conseguiu ultrapassar a rampa e permitir a entrada de água no reservatório. Em  $t = 50.00$  s nota-se uma pequena quantidade de água descarregada no reservatório do dispositivo de galgamento, ou seja, a onda conseguiu superar a resistência imposta ao escoamento pela

rampa. Além disso, pode ser vista a massa de água coletada no interior do reservatório, o que não havia sido observado nas topologias para os instantes de tempo anteriores (Fig. 7.10 (a) – (d)). Para  $t = 60.00$  s e  $70.00$  s (Fig. 7.10 (f) – (g)) observa-se facilmente a ocorrência do fenômeno de galgamento e um aumento na massa de água presente no reservatório do dispositivo. Assim como nas Fig. 7.10 (h) – (i), onde a massa de água no reservatório do dispositivo aumenta a cada ocorrência do fenômeno de galgamento. No instante final de simulação,  $t = 100.00$  s, observa-se uma ampla massa de água no reservatório do dispositivo de galgamento. Destaca-se que, diferentemente dos estudos realizados anteriormente, as topologias das fases não acusaram o fenômeno de reflexão nem o fenômeno de quebra da onda causado pelo dispositivo de galgamento neste estudo. Fenômenos estes, que levavam a uma redução significativa da quantidade de água que entra no reservatório. Dessa forma, este estudo concorda com os resultados encontrados em Goulart (2014), onde a modificação do posicionamento do dispositivo no tanque de ondas conduz ao melhor desempenho do dispositivo, ou seja, a geometria da rampa se adapta ao afundamento do dispositivo.

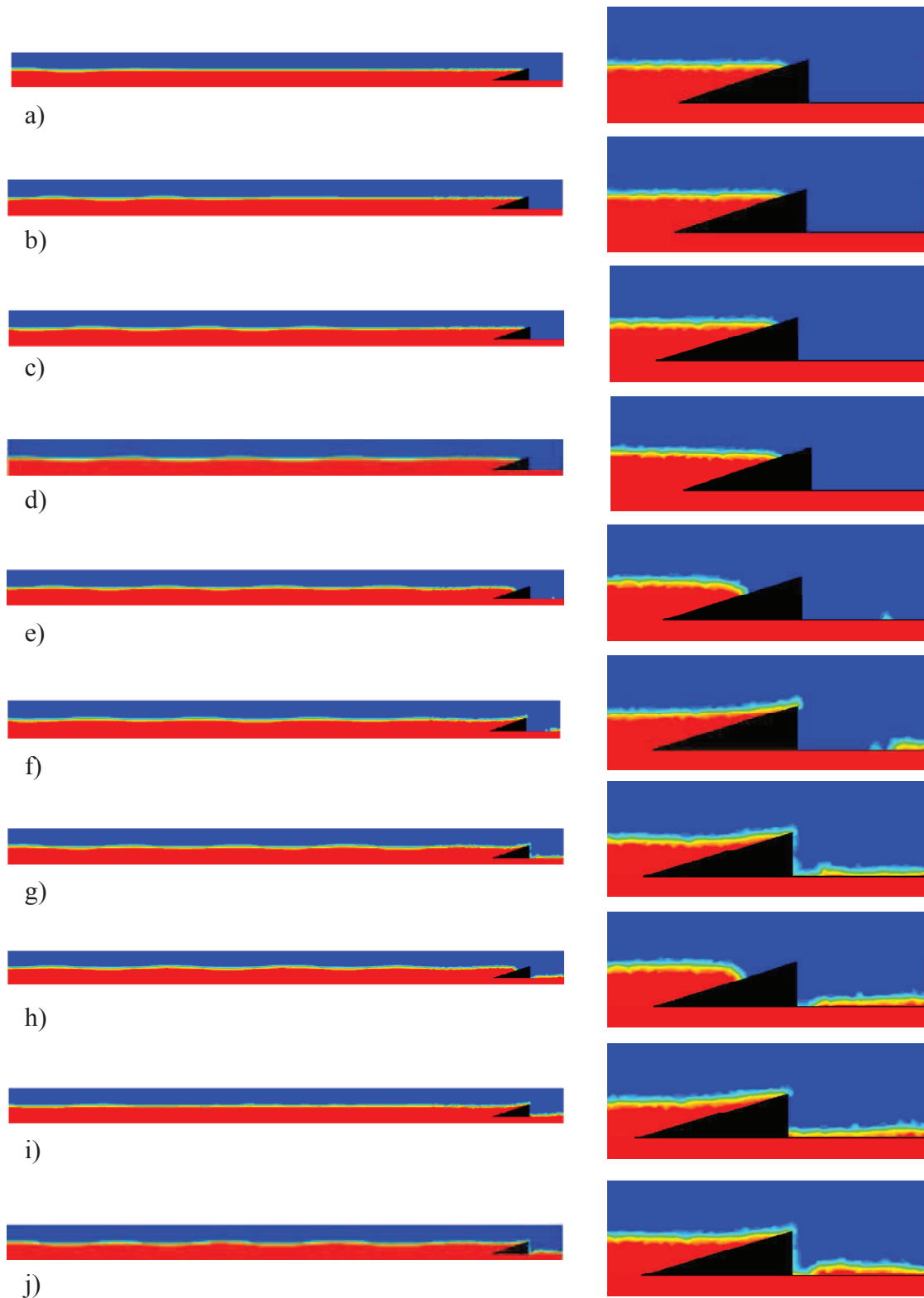


Figura 7.10 - Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $(b/B)_o = 0.38$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 10.00$  s; b)  $t = 20.00$  s; c)  $t = 30.00$  s; d)  $t = 40.00$  s; e)  $t = 50.00$  s; f)  $t = 60.00$  s; g)  $t = 70.00$  s; h)  $t = 80.00$  s; i)  $t = 90.00$  s; j)  $t = 100.00$  s.

Na Figura 7.11 é apresentado o comportamento transiente das ondas sobre o dispositivo para o caso de razão  $b/B = 3.00$ , caso com menor ocorrência de galgamento. Neste caso, são avaliados os mesmos instantes de tempo do caso anterior, permitindo uma comparação qualitativa entre os dois casos apresentados até o presente momento. Para os primeiros três passos de tempo apresentados,  $t = 10.00$  s,  $20.00$  s e  $30.00$  s (Fig. 7.11 (a) – (c)), da mesma forma que para o caso anterior, não houve galgamento. A diferença, para este caso, é que nos instantes seguintes  $t = 40.00$  s e  $50.00$  s ainda não havia ocorrência de galgamento e também, nota-se uma menor quantidade de água na região da rampa, indicando que o galgamento que ocorrerá nos instantes seguintes conduzirá uma menor quantidade de água para dentro do reservatório em comparação com o caso de razão  $b/B = 0.38$ . Para este caso o galgamento ocorreu após  $t = 50.00$  s, ou seja, é possível observar que o fenômeno de galgamento foi retardado devido à influência da geometria da rampa. Posteriormente, para  $t = 60.00$  s (Fig. 7.11 (f)), a onda é capaz de vencer a resistência ao escoamento e consegue galgar a rampa. Porém, apresenta uma pequena quantidade de água no interior do reservatório, o que não foi observado para os casos anteriores. A ocorrência de galgamento é observada para os demais instantes de tempo ( $t = 70.00$  s,  $80.00$  s,  $90.00$  s e  $100.00$  s) (Fig. 7.11 (g) – (j)) devido ao aumento da massa de água incidente no reservatório do dispositivo. Mas, especialmente para os instantes de tempo  $t = 70.00$  s e  $100.00$  s, este fenômeno fica evidenciado através das imagens (Fig. 7.11 (g) e Fig. 7.11 (j)), comportamento este, semelhante ao ocorrido no caso ótimo e, devido ao fato das descargas de galgamento ocorrerem de maneira cíclica para os casos apresentados na Fig. 7.9. Com a análise da Fig. 7.11, é evidente que este caso apresenta menor ocorrência de galgamento quando comparado ao caso anterior ( $(b/B)_o = 0.38$ ).

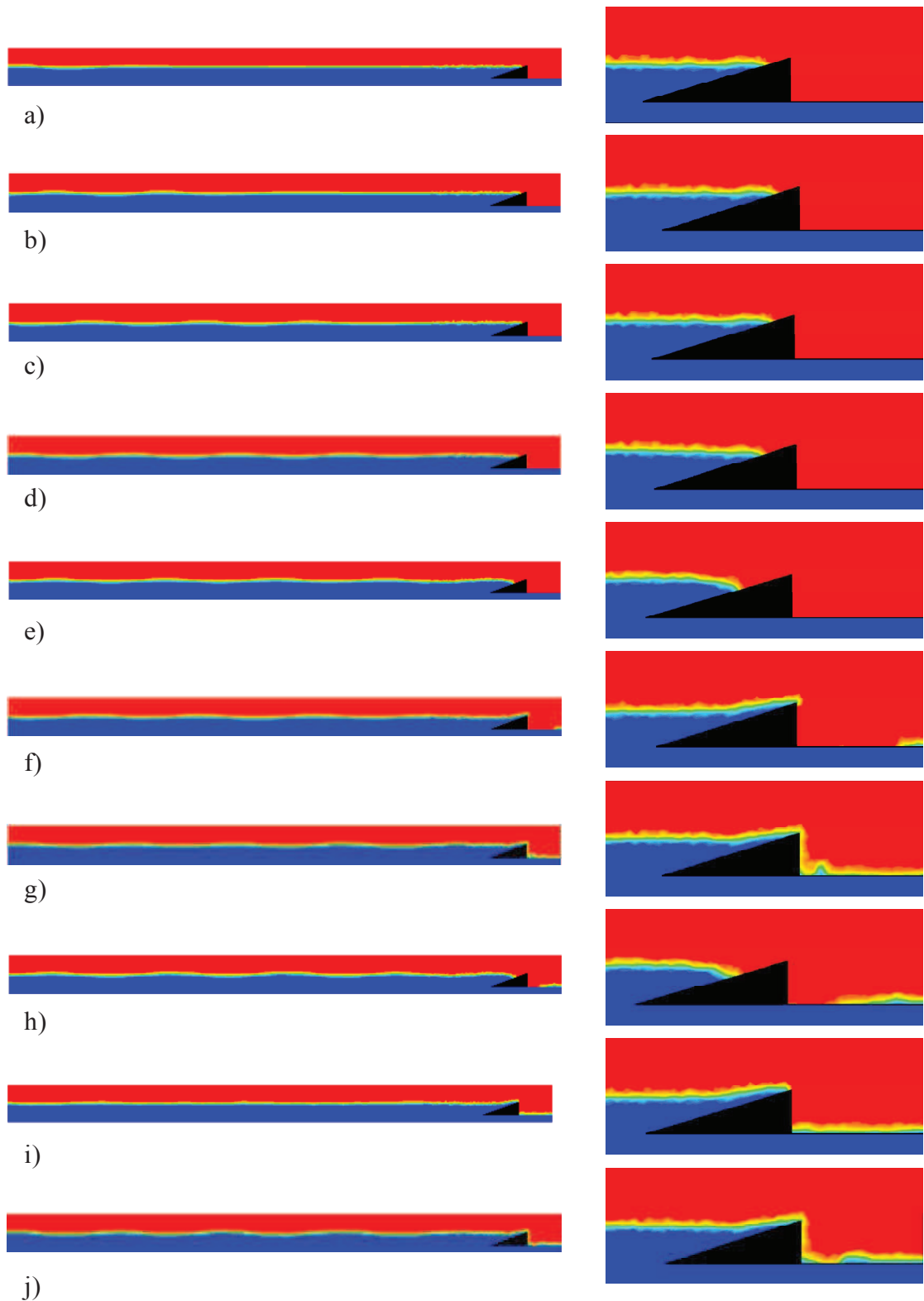


Figura 7.11 - Comportamento transiente do escoamento de ondas sobre o dispositivo de galgamento do caso de razão  $b/B = 3.00$  para os seguintes instantes de tempo: a)  $t = 10.00$  s; b)  $t = 20.00$  s; c)  $t = 30.00$  s; d)  $t = 40.00$  s; e)  $t = 50.00$  s; f)  $t = 60.00$  s; g)  $t = 70.00$  s; h)  $t = 80.00$  s; i)  $t = 90.00$  s; j)  $t = 100.00$  s.

A comparação entre as topologias das fases para os dois casos apresentados indica, de forma qualitativa, que a menor razão de  $b/B$  conduz a uma maior a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento.

Conclui-se também, que o Design Construtal permitiu um aumento significativo no desempenho do dispositivo. Por exemplo, a quantidade de galgamento de água para a geometria ideal ( $(b/B)_o = 0.38$ ) é aproximadamente 49 vezes maior do que a observada para a relação  $b/B = 3.00$ , o caso com a quantidade mínima de vazão mássica entre os casos simulados neste estudo. Estes resultados enfatizam a importância da geometria no desempenho dos sistemas onde há escoamento.

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico de análise e otimização objetivando avaliar as geometrias que conduzem a um melhor desempenho de um dispositivo de galgamento. Para tal estudo foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura ar-água no regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foi obtida através do Método de Volumes Finitos. O método *Volume of Fluid* (VOF) foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um tanque de ondas e sua interação com o dispositivo de galgamento.

A presente tese foi subdividida em dois estudos. No primeiro, realizou-se um estudo numérico tridimensional visando à otimização geométrica da rampa de um dispositivo de galgamento inserido em um tanque de ondas em escala de laboratório. No segundo caso otimizou, através de um modelo numérico tridimensional, a influência da forma da rampa do dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Em ambos os casos foi empregado o Método Design Construtal aliado a busca exaustiva.

No primeiro caso (seção 7.2), o grau de liberdade  $b/B$  foi otimizado, mantendo-se fixos a área total do tanque de ondas ( $A = 6.00$  m) e a área total da rampa ( $A_r = 0.134$  m). O objetivo foi maximizar a vazão mássica da água incidente no reservatório do dispositivo. Os resultados mostraram que houve uma razão ótima  $(b/B)_o = 0.43$ , que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório. Outra observação importante pode ser realizada quanto à ocorrência de um ponto de máximo local em  $b/B = 0.86$ . Além disso, as maiores razões  $b/B$  conduziram aos piores desempenhos. Os resultados, mais uma vez comprovaram a aplicabilidade da Lei Construtal na otimização de problemas de conversão da energia das ondas. Por exemplo, a quantidade de galgamento de água para a geometria ideal  $((b/B)_o = 0.43)$  é aproximadamente 848 vezes maior do que a observada para a relação  $b/B = 3.00$ , o caso onde ocorreu a menor vazão mássica dentre os onze casos simulados neste estudo.

No segundo caso (seção 7.3) foi apresentado um estudo de otimização semelhante ao realizado no caso anterior, porém as principais diferenças são a escala e a localização do dispositivo (*onshore*). Para este novo estudo, os resultados mostraram que a geometria ótima



do dispositivo sofreu influência da escala. A geometria ótima para este caso foi obtida para  $(b/B)_o = 0.38$ . Vale ainda destacar que, da mesma maneira que no estudo em escala de laboratório, os extremos superiores da relação  $b/B$  conduziram ao pior desempenho. Porém, neste caso, não foi observado um ponto de máximo local, diferente do que ocorreu com o caso em escala de laboratório. A quantidade de galgamento de água para a geometria ideal ( $(b/B)_o = 0.38$ ) é aproximadamente 49 vezes maior do que a observada para a relação  $b/B = 3.00$ , o caso com a quantidade mínima de vazão mássica entre os doze casos simulados neste estudo.

Observou-se também, que o comportamento geral do dispositivo de galgamento sofreu influência da escala. Para o dispositivo em escala de laboratório obteve-se a razão ótima  $(b/B)_o = 0.43$ , enquanto para o dispositivo em escala real obteve-se  $(b/B)_o = 0.38$ . Observou-se uma diferença de pouca expressão e também, que pode ter sido acarretada devido à diferença de localização (*onshore* e *offshore*) do dispositivo de galgamento. Portanto, estudos de um dispositivo de galgamento *offshore* em escala real são necessários, afim de comparar a influência da localização do dispositivo de galgamento na quantidade de água incidente no reservatório do dispositivo.

Recomendações teóricas sobre formas geométricas ótimas, que permitem o melhor aproveitamento da energia contida na onda incidente ao dispositivo, foram obtidas com a utilização do Design Construtal aliado ao processo de busca exaustiva. Ou seja, comprovou-se, mais uma vez, a eficiência deste método para a otimização de dispositivos do tipo galgamento, utilizados na conversão de energia contida nas ondas do mar em energia elétrica.

Destaca-se, também, a contribuição do presente trabalho para o estado da arte de dispositivos de galgamento, tendo em vista que não foram encontradas bibliografias a respeito estudos tridimensionais do mesmo, destacando-se este como o primeiro estudo numérico tridimensional de dispositivos de galgamento. Enfatiza-se também que este estudo contribui para bibliografia pelo fato do grau de liberdade investigado restringir a estudos de domínios computacionais complexos, ou seja, a razão  $b/B$  só pode ser avaliada em um estudo tridimensional. De uma forma geral, os resultados encontrados para ambos os estudos de otimização foram promissores e encorajam a realização de novas pesquisas nesta área.

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

- Comparar a localização de um dispositivo de galgamento em escala real levando em

consideração um dispositivo *offshore* (localizado no meio do tanque de ondas) com os resultados obtidos para o caso *onshore* em escala real.

- Realizar estudos experimentais de um dispositivo de galgamento considerando abordagens *onshore* e *offshore*, finalizando a validação de modelos numéricos para simulação de dispositivos de galgamento.

- Otimizar geometricamente um dispositivo de galgamento, adotando uma abordagem numérica tridimensional e considerando um clima de ondas em escala de laboratório, avaliando mais do que um grau de liberdade, por exemplo, avaliar também a inclinação da rampa.

- Otimizar geometricamente um dispositivo de galgamento, adotando uma abordagem numérica tridimensional e considerando um clima de ondas em escala real, avaliando mais do que um grau de liberdade, por exemplo, avaliar também a inclinação da rampa.

- Desenvolver alguma técnica que permita a inserção de uma turbina no sistema, de modo a determinar o potencial energético resultante do dispositivo de galgamento.

- Comparar o potencial energético para dispositivos em escala real, localizados *onshore* e *offshore*.

- Trabalhar na geração de malhas hexaédricas em todo o domínio computacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, L. E. **Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do Rio Grande do Sul**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.

Barbosa, D.; Dos Santos, D. ; Goulart, M. ; Souza, J. ; Carvalho, O.; Dos Santos, E.; Isoldi, L. **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, 2015.

Basak, T.; **The law of life: The bridge between Physics and Biology**, Phys Life Rev. Vol. 8, pp. 249–252, 2011.

Beels C., Troch, P., Visch, K. De, Kofoed, J. P. and Backer, G. D. **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. 2010.

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

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

Bejan, A. and M. Almgöbel, **Constructal T-shaped fins**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 2101 – 2115, 2000.

Bejan, A., Lorente and Lee, J., **Unifying constructal theory of tree roots, canopies and forests**. J. Theor. Biol., 2008.

Bejan, A. and Lorente, S., **The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration**, Int. J. Heat Mass Transfer 47, 2004.

Bejan, A. and Lorente, S., **Theory of generation of configuration in nature and engineering**, J. Appl. Phys.100, 2006.

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

Bejan, A.; Lorente, S.; **Constructal Law of design and evolution: physics, biology, technology and society**. Journal of Applied Physics, v. 113, PP. 151301-1-151301-20, 2013.

Bejan, A.; Marden, J. **Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying**, The Journal of Experimental Biology 209, 238-248: The Company of Biologists, 2005.

Bejan, A. and Merkkx, G. W., **Constructal Theory of Social Dynamics**. Springer. USA, 2007.

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

Bello-Ochende, T., Bejan, A., **Constructal multi-scale cylinders in cross-flow**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, 2005.

Bello-Ochende T., Lienbenberg, L., Bejan, A., **Constructal conjugate heat transfer in three-dimensional cooling channels**. Journal of Enhanced Heat Transfer, v. 14, 2007a.

Bello-Ochende, T., Lienbenberg, L., Bejan, A., **Constructal cooling channels for micro-channel heat sinks**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 50, 2007b.

Biserni C., L.A.O. Rocha, and A. Bejan, **Inverted fins: geometric optimization of the intrusion into a conducting wall**. Int. J. Heat Mass Transfer, v. 47, pp. 2577 –2586, 2004.

Bortoli, A. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**, Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

Brito, S. **Estudo de Galgamento em Estruturas Marítimas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

Bryant, E. **Tsunami. The Underrated Hazard**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

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

Chakrabarti, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.

Costa, P. R. **Energia das ondas do mar para geração de eletricidade**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), 2004.

Cruz, J.; Sarmiento, A. **Energia das Ondas – Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Instituto do Ambiente, 2004.

Davyt , D. P.; Teixeira, P. R. F.; Ramalhais, R.; Didier, E. **Simulação Numérica da Ação de Ondas sobre um Dispositivo de Captação de Energias das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante**. RevistaVetor, v. 21, n.1, p. 51-71. Rio Grande, 2012.

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

Devloo, P. R. B. **Simulação numérica**. Multi Ciência: A Linguagem da Ciência, n. 4, 2005.

Dos Santos, E. D. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Não-Reativos com Transferência de Calor por Convecção e Radiação**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2011.

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, pp. 275~294. 2013.

Dos Santos, E. D. ; Machado, B. N. ; Zanella, M. M. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O. **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, 2014.

Duarte, C. R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2006.

Estefen, S. F., Costa, P. R., Ricarte, E. and Pinheiro, M. M.. **Wave energy hyperbaric device for electricity production**. *Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. OMAE-2007, San Diego, USA, 2007.

Estefen, S. F. **Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar**. Disponível em: <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>. 2006.

Estefen, S. F.; Fernandes, A. C.; Esperança, P. T. Energia das ondas. In: Tolmasquim, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

Energy Technology Support Unit - ETSU. **Technology status report: Wave energy, a report by ETSU as part of the DTI's new and Renewable Energy Programme**, Technical report, Energy Technology Support Unit. 2001.

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

Ferziger, J. H., Peric, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer, Berlin, 1997.

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

Fluent (version 6.2), ANSYS, Inc., 2005.

Fluent (version 6.3), ANSYS, Inc., 2006.

Fluent (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2007.

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

Garcia, F.H. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-fotovoltaico**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

Geller, H.S. **Revolução Energética: Políticas para um Futuro Sustentável**. Rio de Janeiro: Relume Dumará: USAid, 2003.

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

Gomes, M. N.; Isoldi, L. A.; Olinto, C. R. Rocha, L. A. O.; Souza, J. A. **Simulação numérica e otimização do comprimento de um dispositivo do tipo coluna d'água oscilante**. Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (CILAMCE), Armação dos Búzios, Brasil, 2009.

Gomes, M. N.; Nascimento, C. D.; Bonafini, B. L.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O., 2012b, **Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter in laboratory scale**". Engenharia Térmica, v. 11, pp. 30-36.

Gomes, M. N., Waess, K. R., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O. **Modelagem Computacional e Otimização Geométrica 2d com Constructal Design de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante em escala real – comparação onshore e offshore**. In Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Pirenópolis, Goiás, 2013.

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

Gonçalves, W. M.; Feijó, F. T.; Abdallah, P. R. **Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil**. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO), Rio Grande, Brasil, 2008.

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

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

Gresho, P. M.; Sani, R. L., **Incompressible Flow and the Finite Element Method: Advection-diffusion and Isothermal Laminar Flow**. Sussex, UK: Jhon Wiley & Sons Ltda, 1999.

Grimmler, J. do A. M. **Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e estudo geométrico.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2013.

Henriques, D. M. M. G. **Estudos de áreas para Implementação de Tecnologias para Aproveitamento da Energia das Ondas na Ilha da Madeira.** Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2009.

Hirt, C.W., and Nichols, B. D. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries.** Journal of Computational Physics, v. 39, n. 1, pp. 201-225, 1981.

Holthuijsen, Leo H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters.** New York: Cambridge University Press, 2007.

Horko, M. **CFD Optimization of an Oscillating Water Column Energy converter.** Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 2007.

Horta, L. M. P. **Green Science Training within the Web Space.** In the 3<sup>rd</sup> IEEEES, Évora, Portugal, 2007.

Hughes, T. J. R. **The Finite Element Method.** Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1987.

Iahnke, S. L. P. **Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2010.

Iahnke, S. L. P.; Gomes, M.; Isoldi, L.; Rocha, L.. **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, 2009.

Kawahara, M.; Hirano, H., **A Finite Element Method for High Reynolds Number Viscous Fluid Flow Using Two Step Explicit Scheme.** Int. J. Numer. Met. Fluids, v. 3, 1983.

Kofoed, J. P., et al. **Prototype testing of the wave energy converter Wave Dragon.** Renew. Energ., v. 31, p. 181 – 189, 2006.

Lee, J., Kim, S., Lorente, S. E Bejan, A , **Vascularization with trees matched canopy to canopy: diagonal channels with multiple sizes.** Int. J. Heat and Mass Transf., 2008.

Lima, J. A. O. **Gerador de Baixa Rotação para Aproveitamento de Energia das Ondas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2010.

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

Liu, Z., Hyun B., Hong, K., **Application of Numerical Wave Tank to OWC air chamber for wave energy conversion.** In: Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, Canada, 2008a.

Liu, Z., Hyun B., Jin, J., **Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC.** Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, v. 11, nº.1, 2008b.

Liu, Z.; Hyun, B.; Hong, K. **Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy converter.** China Ocean Engineering, v. 25, pp. 169-178, 2011.

Lopes, N.; Sant'anna, F. S. P.; Gomes, M. N.; Souza, J. A.; Teixeira, P. R. F.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O. **Constructal Design Optimization of the Geometry of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter (OWC-WEC).** Constructal Law Conference, 2011, Porto Alegre.

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

Lorenzini, G. and L. A. O. Rocha, **Constructal design of Y-shaped assembly of fins.** International Journal Heat Mass Transfer, v. 49, 2006.

Lorenzini, G.; Correa, R. L.; Dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O.; **Constructal design of complex assemblies of fins.** Journal of Heat Transfer, v. 133, p. 081902-1-081902-7, 2011.

Losada, I. J.; Lara, J. L.; Guanche, R.; Ondina, J. M. G. **Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters.** Coastal Engineering, v. 55, p. 47 - 62 2008.

Ly, X., Zou, Q.; Reeve, D. **Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method.** Adv. Water Resour. 34: 1320~1334. 2011.

Machado, B. N., Gomes, M. N., Dos Santos, E. D, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O. **Análise Numérica da Geometria da Rampa de um Dispositivo de Galgamento Aplicando Constructal Design.** In Proceedings of the XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Fortaleza, Ceará, 2014.

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. **Simulação Numérica de um Dispositivo de Galgamento Tridimensional para Conversão de Energia das Ondas.** XIII ENPOS, Universidade Federal de Pelotas, 2011a.



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

Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Teixeira, P. R. F., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., Rocha, L. A. O. **Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter**. Constructal Law Conference, Porto Alegre. 2011c.

Machado, R. N., **Simulação Numérica de uma Rede de Canais Vasculares Aplicada a Autocura de Materiais Compósitos Empregando Constructal Design**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

Maliska, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Margheritini, L.; Frigaard, P. **The SSG Wave Energy Converter and Application on the Breakwater of the New Liseleje Harbour**. Aalborg University, 2007.

Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Frigaard, P. **SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device**. Renewable Energy, v. 34, 2009.

Martinez, M. A. B. **Teorias de Onda**. PEF – 2506 - Projeto de Estruturas Marítimas. Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais, Universidade de São Paulo, 2012.

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. **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, 2015(a).

Martins, J. C.; Goulart, M. M.; Souza, J. A.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Gomes, M. N.; Rocha, L. A. O. **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. 2015(b).

Massel, S. R. **Fluid Mechanics for Marine Ecologists**. Germany: Springer, 1999.

Mc Cormick, M. E., **Ocean Engineering Mechanics**. New York: Cambridge University Press. 2010.

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

Patankar, S.V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, New York, 1980.

Pegden, C.D. **Introduction to simulation using SIMAN**. NY: McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup>ed, 1990.

Pepe, V. R., **Estudo de Redes Vasculares Aplicadas aos Materiais Multifuncionais**. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia/FURG, 2008.

Ramalhais, R.S. **Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

Reddy, J. N., Gartling, D. K., **The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics**. CRC, Boca Raton, Florida, USA, 1994.

Reeve, D.E.; Soliman, A.; Lin, P. Z. **Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall**. Coastal Engineering, v. 55, p. 155 - 166, 2008.

Reis, M. T. e Neves, M. G. **Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico baseado na Teoria da Onda em Condições de Água pouco Profunda**. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 397-417. Portugal, 2011.

Relatório do Wavec. **Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal**. Wave Energy Centre, 2004.

Rhinefrank, K., Agamloh, E. B., Von Jouanne, A. **Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy**. Renewable Energy, v. 31, n.9, Jul, pp.1279-1298. 2006.

Ronchi, F.P; Schaeffer, L. **Classificação das Tecnologias para Conversão de Energia das Ondas**. 3<sup>a</sup> Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis - RENOMAT. Porto Alegre/RS. Brasil, 2013.

Rosa, P. B. G. **Controle e Otimização de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

Santos, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 110 p. 2008.

Santos, A. L.; Weber, L. M.; Moreira, T. Z. T. **A Matriz Energética Brasileira e o Aproveitamento das Fontes Renováveis**. *Análise Conjuntural*, v. 28, n. 1-2, p. 18, 2006.

Schafer, L. B. **Análise computacional e otimização geométrica de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. Monografia de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

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

Schmidt, A. L. L. **Desenvolvimento de um sistema novo de aproveitamento de energia das ondas.** Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2011.

Seibt, F. M. **Análise numérica do princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo placa submersa.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande, Rio Grande, 2014.

Seibt, F. M.; et al. **Análise Numérica da Eficiência do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Submersa.** In: Proceedings of Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), v. 1, p. 1-13, 2013.

Shankar, N.J.; Jayaratne, M. P. R. **Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures.** 2001.

Souza, R. A. **Escolha de tecnologia de conversão da energia das ondas em energia elétrica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, 2011.

Tannehill, J. C., Anderson, D. A., Pletcher, R. H., **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer.** 2. ed., Taylor & Francis, Estados Unidos, 1997.

Tedd, J. Kofoed, J. P. **Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon.** Wave Energy Converter, Renewable Energy, v. 34, 2009.

Thorpe, T. W. **A brief review of wave energy.** Technical report, ETSU Report R-120 for the DTI, 1999.

Tolmasquim, M. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

Versteeg, H.K.; Malalasekera, W., **An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method.** Longman Group Ltd, 1995.

Waveplan, **A National Operational Wave Observation Plan.** United States. March, 2009.

## APÊNDICE A

- **Construção e Instalação:**

Tabela A1 – Possíveis impactos ambientais provocados pela construção e instalação de um dispositivo de conversão de energia das ondas.

<b>Operação</b>	<b>Possíveis Impactos</b>	<b>Medidas de Minimização</b>
Instalação de cabos Submarinos	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de cabos submarinos em zonas referenciadas
	Danificação de zonas de interesse arqueológico	
Instalação de cabos na costa	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de dispositivos e toda a sua estrutura envolvente em zonas referenciadas
Instalação do sistema de amarração	Efeitos semelhantes na amarração de navios: perturbação (temporária) de alguns habitats	Evitar a colocação de blocos de amarração (âncoras) em zonas referenciadas
Construção do dispositivo	Impactos diversos (visuais, ruídos, etc.)	Sempre que possível evitar a construção do dispositivo no local
Tráfego marítimo durante a instalação	Aumento do tráfego marítimo durante a instalação de dispositivos não costeiros, o que pode afetar uma gama variada de espécies	Evitar a instalação de dispositivos em períodos relevantes para as espécies locais (migrações, períodos de descanso,...)

- **Operação e Manutenção:**

Tabela A2 – Possíveis impactos ambientais provocados pela operação e manutenção de um dispositivo de conversão de energia das ondas.

<b>Operação</b>	<b>Possíveis Impactos</b>	<b>Medidas de Minimização</b>
Presença do dispositivo	Impactos visuais	Depende do tipo de dispositivo, sendo particularmente relevantes nos costeiros
	Efeitos positivos e negativos dos recursos pesqueiros (dispositivos afastados da costa)	Positivos (criação de zonas de exclusão e de recifes artificiais); para os negativos a solução passa por evitar zonas de pesca comercial e de recreio
	Influência do ruído nos mamíferos marinhos	Adaptar o projeto do dispositivo para a possibilidade de este atrair algumas espécies (por ex.: distância entre dispositivos)
	Impactos na navegação (dispositivos não costeiros)	Evitar a colocação em zonas de grande tráfego marítimo; sinalização dos dispositivos (luzes, radar, ...)
	Alteração no regime de ondas (podendo influenciar o processo de erosão costeira, alterar habitats marinhos e alterar o valor turístico de uma	Depende fortemente do tipo do dispositivo, podendo ter impactos benéficos ou maléficos

	zona)	
Presença dos cabos submarinos	Geração de um campo eletromagnético	Os cabos submarinos são enterrados no fundo do mar, tornando este impacto mínimo
Operação do sistema de conversão de energia	Impactos que dependem fortemente do sistema em causa	O maior impacto será provavelmente o ruído, que varia de acordo com o sistema e deverá ser mais intenso quando se utilizam turbinas de ar e sistemas com velocidades significativas entre partes móveis
Presença do sistema de amarração (dispositivos não costeiros)	A presença dos blocos de amarração (âncoras) afeta o ambiente em torno	Devem-se evitar certas áreas identificadas como zonas importantes para pesca, etc.
	A presença das correntes de amarração pode afetar os habitats naturais do fundo (caso se arrastem)	Projetar as correntes de modo a não permanecerem no fundo
	O sistema de amarração (blocos + correntes) pode constituir um recife artificial, fomentando o aparecimento e o crescimento de espécies marinhas	Impacto benéfico (não necessita de medidas de minimização)
Presença das instalações costeiras	As instalações costeiras (apoio, subestações, ...) têm necessariamente um impactante visual	Escolha adequada do local de implementação a procura de soluções arquitetônicas adequadas

Manutenção	A regularidade na manutenção pode ter associada, por exemplo no caso dos dispositivos não costeiros, o aumento do tráfego marítimo	Devem ser respeitadas as medidas preventivas já mencionadas (evitar períodos de migração dos animais, etc.); não se espera que o tráfego seja muito diferente do associado à pesca
Mecanismos anticorrosão	Possíveis emissões tóxicas para o meio envolvente	A indústria naval apresenta soluções não tóxicas (revestimentos a base de silicone, por exemplo)

- **Desmantelamento:**

Tabela A3 – Possíveis impactos ambientais provocados pelo desmantelamento de um dispositivo de conversão de energia das ondas.

<b>Operação</b>	<b>Possíveis Impactos</b>	<b>Medidas de Minimização</b>
Desmantelamento e remoção do dispositivo do local	Os impactos imediatos são predominantes nos dispositivos costeiros, embora possam ser relevantes nos dispositivos <i>offshore</i> (eventual remoção do recife artificial criado)	O projeto do dispositivo deve ter em atenção a utilização de materiais recicláveis sempre que possível
Remoção do sistema de amarração (quando necessário)	Influência no meio envolvente (alteração do habitat de algumas espécies)	Utilização de técnicas de minimização disponíveis na indústria offshore
Remoção dos cabos submarinos		