



Constructal design de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real para uma profundidade fixa

Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for a fixed depth

M. M. Goulart¹, J. C. Martins¹, M. das N. Gomes³, I. C. Acunha Jr², J. A. Souza¹,
L. A. O. Rocha³, L. A. Isoldi¹, E. D. dos Santos^{1*}

¹Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 96201-900, Rio Grande - RS, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), 90050-170, Rio Grande – RS, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 90050-170, Porto Alegre – RS, Brasil.

*elizaldosantos@furg.br

(Recebido em 15 de setembro de 2014; aceito em 16 de outubro de 2014)

O estudo a respeito das tecnologias e princípios de funcionamento de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica (WEC) tem crescido sensivelmente. Entre os WECs estudados está o dispositivo de galgamento. O seu princípio físico de funcionamento consiste em uma rampa que guia a água das ondas incidentes para um reservatório localizado acima do nível médio do mar. A água acumulada no reservatório escoava através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica. No presente trabalho é realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, empregando *Constructal Design*. O principal propósito aqui é avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo para uma distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque de $S = 6.0$ m. Nas presentes simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é empregado. Os resultados mostraram que as melhores geometrias são obtidas para as menores razões de H_1/L_1 para a profundidade analisada, 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*.

Palavras-chave: Galgamento, *Constructal Design*, Energia das Ondas do Mar.

The study about technologies and operational principles of devices to convert wave energy into electrical one (WEC) has increased significantly. Among the studied WECs it is possible to mention the overtopping device. Its main operational principle consists on a ramp which guides the incoming waves into a reservoir raised slightly above the sea level. The accumulated water in the reservoir flows through a low head turbine generating electricity. In the present work it is performed a numerical study concerned with the effect of ramp geometry over the performance of an onshore overtopping device in real scale by means of *Constructal Design*. The main purpose here is to evaluate the ratio between the height and length of ramp (H_1/L_1) which maximizes the amount of water that enters into device reservoir for one specific distance from the bottom of the tank to the bottom of device of $S = 6.0$ m. In the present simulations, the conservation equations of mass, momentum and one equation for the transport of volumetric fraction are solved with the finite volume method (FVM). To tackle with water-air mixture, the multiphase model *Volume of Fluid* (VOF) is used. Results showed that the best shapes were achieved for the lowest ratios of H_1/L_1 for the evaluated depth, contrarily to what was observed in previous studies of literature for a device in laboratory scale in the middle of a wave tank mimicking an offshore overtopping device.

Keywords: Overtopping, *Constructal Design*, Ocean Wave Energy

1. INTRODUÇÃO

É possível verificar na literatura que poucos trabalhos têm investigado o princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento [1–3]. Dentre os trabalhos realizados, há uma maior concentração no desenvolvimento de estudos experimentais para avaliação de parâmetros construtivos do dispositivo [1,4]. Além destes, também podem ser citados trabalhos no âmbito numérico para obter uma melhor compreensão da fenomenologia do escoamento e também para avaliar parâmetros geométricos [5,6]. O princípio de funcionamento deste dispositivo baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas de baixa queda que acionam geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado é produzida através do galgamento da onda sobre uma rampa inclinada (Fig. 1).

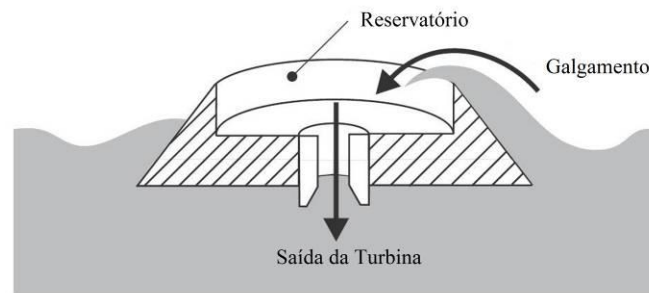


Figura 1: Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento.

Alguns dos principais estudos encontrados na literatura são apresentados a seguir:

Kofoed et al. [1] realizaram no período 1998-2001 extensos testes em um tanque de ondas em um protótipo em escala reduzida de 1:50. Posteriormente, um novo protótipo em escala reduzida de 1:(4.5) do dispositivo *Wave Dragon* foi testado durante quase mais 3 anos. Nesse estudo foi realizado um monitoramento da potência, clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, tensões na estrutura e movimentos do protótipo, resultando em um plano de estudos com a finalidade de determinar a concepção para a estrutura e o planejamento para implantação de uma unidade de produção de energia de 4 MW.

Margheritini et al. [4] analisaram um dispositivo denominado *Sea Slot-cone Generator* (SSG), que consiste em um dispositivo com múltiplas rampas. A planta piloto é um módulo *onshore* em escala real com três níveis de altura para o reservatório. Os resultados dos testes de laboratório foram usados para projetar uma planta piloto e definir suas características construtivas.

No âmbito numérico, Liu et al [7] apresenta um estudo numérico sobre um dispositivo de galgamento em um domínio bidimensional em escala de laboratório. Foi empregada a metodologia VOF (*Volume of Fluid*) para a modelagem do escoamento entre ar e água. As equações de conservação foram resolvidas com o método de volumes finitos, mais precisamente com o software FLUENT. Várias condições das ondas incidentes e rampas com razões de altura por comprimento de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas. Contudo, a variação geométrica não foi definida impondo-se uma restrição de área constante para a rampa, i.e., sem *Constructal Design*.

Posteriormente, [8] avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional considerando um clima de ondas semelhante ao encontrado no sul do Brasil (cidade de Rio Grande, colocada em aproximadamente 32°S e 52°W). Nesse trabalho, observou-se que a melhor geometria foi obtida para um ângulo de 30°. Vale destacar que a área da rampa variava para cada caso, ou seja, não foi empregado o *Constructal Design* para avaliação das geometrias estudadas.

Outro importante estudo foi realizado em [5], onde os autores empregaram um modelo numérico denominado *mild-slope* para resolver o escoamento de forma transiente sobre um único dispositivo do tipo *Wave Dragon* e com arranjos de dispositivos. Para a avaliação do arranjo foram testadas distâncias entre os equipamentos de D , $2D$ e $3D$, sendo $D = 260$ m a dimensão da distância entre as duas pontas do refletor do *Wave Dragon*. Como resultado, os

autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

Recentemente, em [9] foi realizado um estudo numérico para determinar a influência da geometria sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *offshore* em escala de laboratório para três diferentes profundidades relativas: $h/\lambda = 0.3, 0.5$ e 0.62 empregando o *Constructal Design*. No estudo apresentado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para a solução da interface água-ar é utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que a forma ótima da razão entre altura e comprimento da rampa, $(H_1/L_1)_o$, apresentou uma forte dependência da profundidade relativa, indicando a não existência de uma geometria universal que conduzia ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de onda.

No presente trabalho pretende-se realizar um estudo numérico da forma geométrica da rampa de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real que conduz ao melhor desempenho fluidodinâmico através do método *Constructal Design* [10,11]. Mais especificamente, pretende-se avaliar a influência da razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) sobre a quantidade de massa que entra no tanque. Para todos os casos a área da rampa será mantida constante ($A = 80.0 \text{ m}^2$). Além disso, pretende-se avaliar o efeito da razão H_1/L_1 sobre as vazões mássicas de água que entram no reservatório.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi empregado o método dos volumes finitos [12,13], mais precisamente o código comercial FLUENT [14]. No que tange a geração da onda, a mesma foi realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria linear de ondas. Esta metodologia foi empregada anteriormente no trabalho de Dos Santos et al. [9]. Para a abordagem adequada da interação entre ar, água e dispositivo será empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) [7,15].

2.1. *Constructal Design* Aplicado ao Dispositivo de Galgamento

O problema físico analisado consiste de um dispositivo de galgamento bidimensional colocado em um tanque de ondas, conforme representado na Fig. 2. A terceira dimensão Y é perpendicular ao plano da figura. O movimento da onda é gerado pela imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do tanque. O objetivo da análise é a determinação da geometria ideal (H_1/L_1) que conduz à maior quantidade de massa de água que entra no reservatório. O grau de liberdade H_1/L_1 é otimizado para um escoamento com uma profundidade $h = 10.0 \text{ m}$ para uma onda com comprimento de onda de $\lambda = 65.4 \text{ m}$ (profundidade relativa de $h/\lambda = 0.15$) e período $T = 7.5 \text{ s}$. Neste estudo será mantida fixa a relação entre as áreas da rampa e do tanque de ondas ($\phi = A_r/A_T = 0.012$). Também foram mantidos fixos outros parâmetros $H_T/L_T = 0.0612$ (relação entre altura do tanque, $H_T = 20.0 \text{ m}$, e comprimento do mesmo, $L_T = 327.0 \text{ m}$) e $H/h = 0.1$ (relação entre a altura da onda, $H = 1.0 \text{ m}$, e profundidade da lâmina de água, $h = 10.0 \text{ m}$). Além disso, será considerado um reservatório com um comprimento de $L_R = 20.0 \text{ m}$ e na seguinte faixa de altura para o dispositivo: $S = 6.0 \text{ m}$. Para esse valor de S foram simulados várias razões de H_1/L_1 .

No âmbito do *Constructal Design*, a otimização do problema estudado está sujeita a duas restrições, ou seja, a área total de restrição de tanque a onda

$$A_T = H_T L_T \quad (1)$$

e a área de restrição a rampa

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

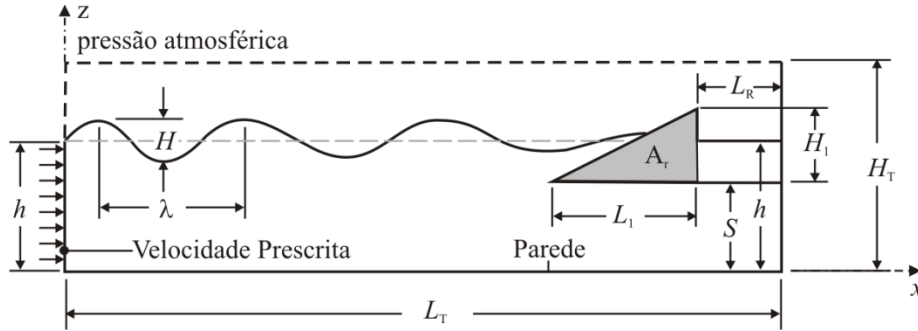


Figura 2: Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com um grau de liberdade.

A Equação (2) pode ser reescrita como a fração de volume (área) do dispositivo

$$\phi = \frac{A_r}{A_r} \quad (3)$$

Também está sendo considerado como uma restrição do problema que $(S + H_1) > (h + H/2)$ de forma que a crista da onda não seja superior a máxima altura do dispositivo.

Com relação ao processo de otimização, o processo consiste na variação da razão H_1/L_1 mantendo-se fixa a submersão do dispositivo $S = 6.0$ m. O valor máximo encontrado para a massa de água que entra no reservatório será denominada a massa de água uma vez maximizada, m_m , e a correspondente razão H_1/L_1 será denominada a razão uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$. Neste estudo específico foi realizado um total de 13 simulações.

2.2. O modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF)

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por [9]:

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

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e \vec{v} o vetor de velocidade do escoamento (m/s). A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

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

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

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

onde μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg}/(\text{ms})$). Para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste

modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase [15].

Nas simulações deste estudo, são consideradas duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Consequentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária [9,15]:

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

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

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

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

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (superfície lateral esquerda da Fig. 2) e simula o comportamento de um gerador de onda [16]. As componentes de velocidade nas direções de propagação de onda (x) e vertical (z) para o canal de entrada são baseados na teoria linear de Airy e dadas respectivamente por [17]:

$$u(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (10)$$

$$w(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (11)$$

onde H é a altura de onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}), h é a profundidade da água (m), T é o período da onda (s), $\sigma = 2\pi/T$ é a frequência (rad/s) e t é o tempo (s).

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica $P_{\text{abs}} = 101.3$ kPa (superfícies tracejadas na Fig. 2.). Nas superfícies inferior, lateral direita, bem como, na superfície do dispositivo de galgamento é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = w = 0$ m/s).

Com relação as condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso e que a lâmina de água possui uma superfície livre com altura $h = 10.0$ m.

3. PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

O solver empregado é baseado na pressão e todas as simulações foram realizadas com esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e *PRESTO* (*Pressure Staggering Option*) para as discretizações espaciais do termo advectivo da equação da conservação da quantidade de movimento e pressão, respectivamente. O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método *PISO* [13]. Para a determinação da superfície ocupada pela água é empregado o método *Geo-reconstruction*. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0.3 e 0.7 serão impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. As soluções obtidas aqui foram consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e z foram inferiores a 10^{-6} .

Todas as simulações foram realizadas usando um computador com dois processadores de Intel dual-core com clock de 2.67 GHz e 8 GB de memória ram. Emprega-se uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: *Message Passing Interface*) para paralelização. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente 1.44×10^5 s (40 h).

Primeiramente, é realizada uma discretização do domínio em volumes finitos retangulares e com um maior refinamento da malha nas regiões dos maiores gradientes de velocidades e na superfície livre da onda. Em Gomes et al. [18] é apresentada uma recomendação para o número de elementos empregados ao longo do domínio que foi adotada neste estudo, sendo gerados aproximadamente 120000 volumes finitos retangulares. A Figura 3. ilustra a malha empregada no presente trabalho e também as condições de contorno empregadas no domínio.

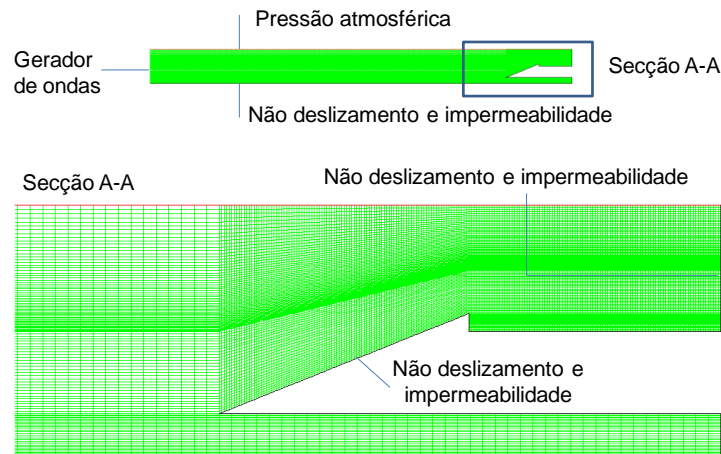


Figura 3: Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento onshore em escala real.

Após a definição da discretização espacial empregada, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo para o problema transiente abordado e sua influência na altura da superfície livre da onda, Fig. 4(a), a solução independente foi verificada com resultados analíticos de Chakrabarti [17]. No primeiro estudo a altura da superfície livre da onda foi obtida para 4 diferentes passos de tempo: $\Delta t = 5.0 \times 10^{-3}$ s, $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2}$ s, $\Delta t = 2.0 \times 10^{-2}$ s e $\Delta t = 4.0 \times 10^{-2}$ s. Em todas as simulações o tempo final foi de $t_f = 100.0$ s. A Figura 4(a) mostra uma boa concordância entre os resultados para os diversos passos de tempo estudados, com exceção do caso com $\Delta t = 4.0 \times 10^{-2}$ s onde é possível observar que houve uma defasagem com relação ao tempo e também um amortecimento na magnitude da onda. Consequentemente, foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 2.0 \times 10^{-2}$ s. Para a verificação do modelo numérico empregado foi realizada uma comparação entre a altura da superfície livre da onda obtida numericamente e medida em um ponto específico do tanque ($x = 50.0$ m) e a solução analítica. A Figura 4(b) mostra que a estabilização da solução numérica ocorre em torno de $t = 15.0$ s. Assim apenas o intervalo entre $15.0 \text{ s} \leq t \leq 80.0 \text{ s}$ foi considerado para a verificação da onda gerada. Analisando a diferença entre os resultados analíticos e numéricos no intervalo onde a onda estava estabilizada, o desvio médio obtido foi aproximadamente 0.1 % comparando-se as alturas da superfície livre e aproximadamente 8.0 % comparando-se somente a variação de altura da superfície livre.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise será avaliar o efeito da razão H_1/L_1 sobre o comportamento transiente da vazão mássica instantânea que entra no reservatório ao longo do tempo. A Figura 5 apresenta a vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento (\dot{m}) em função do tempo ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) para três diferentes razões de H_1/L_1 : $H_1/L_1 = 0.14$, $H_1/L_1 = 0.18$ e $H_1/L_1 = 0.22$ (que representam uma razão extrema mínima, uma intermediária e uma razão máxima onde

ocorrem galgamento de forma representativa). Os casos que foram demonstrados referem-se a três resultados de galgamento para uma altura de $S = 6.0$ m.

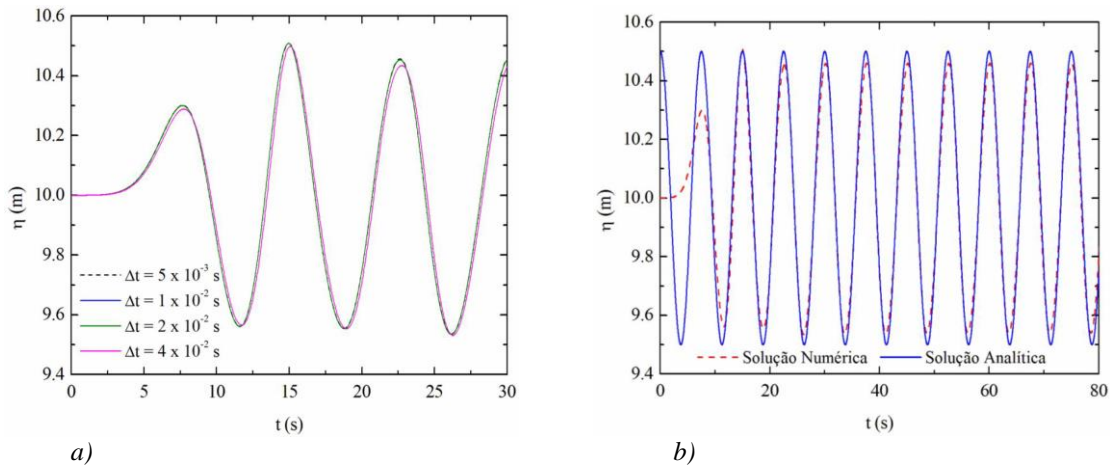


Figura 4: a) estudo de independência de passo de tempo, b) verificação da solução numérica com a solução analítica apresentada em [17].

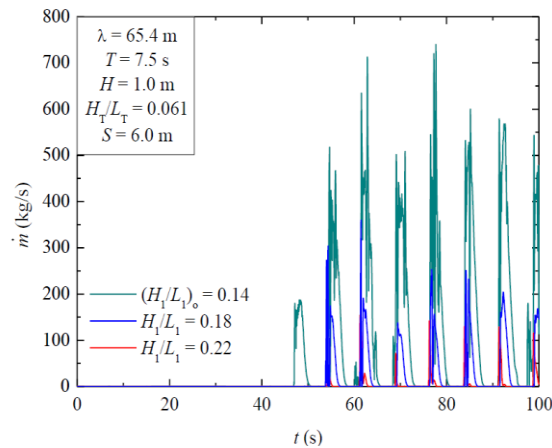


Figura 5: Vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento em função do tempo ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) para varias razões de H_1/L_1 .

Na Figura 5 é possível observar que para todos os casos os picos de vazão mássica começaram a ocorrer em um instante de tempo de aproximadamente $t \sim 55.0$ s, com exceção do caso $H_1/L_1 = 0.14$ onde o galgamento inicial ocorreu em um instante de tempo anterior ($t \sim 48.0$ s), ou seja, para uma onda incidente anterior. Para $H_1/L_1 = 0.14$ a maior magnitude foi observada em $t \sim 77.0$ s e seu valor foi $\dot{m} = 720.29$ kg/s, enquanto que para os casos $H_1/L_1 = 0.18$ e 0.22 os maiores galgamentos ocorreram nos instantes de tempo de aproximadamente $t \sim 61.0$ s com magnitudes de $\dot{m} = 360.02$ kg/s e $\dot{m} = 154.70$ kg/s, respectivamente. Consequentemente, os resultados mostram que a geometria possui uma grande influência sobre a magnitude da vazão mássica instantânea, bem como influencia os instantes de tempo em que o galgamento ocorre. Outra observação importante é que após a ocorrência do primeiro galgamento, todas as ondas que incidiram no dispositivo tiveram energia suficiente para realizar o galgamento. Isso pode ser comprovado pelos intervalos entre cada ocorrência do fenômeno. Os mesmos apresentam uma periodicidade próxima a do período da onda ($T = 7.5$ s) com uma defasagem muito pequena entre os picos de cada caso. Vale destacar que entre todas as geometrias simuladas para $S = 6.0$ m, o caso ótimo foi obtido para $(H_1/L_1)_0 = 0.14$. Para esta razão de H_1/L_1 , a magnitude da vazão mássica foi superior em todo o intervalo de tempo observado em comparação com os outros casos estudados.

Na Figura 6 é ilustrado o comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$. Mais precisamente é apresentada a distribuição da fração volumétrica de água no domínio

para vários instantes de tempo. Nos campos de fração volumétrica, a água é representada na cor vermelha, enquanto o ar é representado com a cor azul. Os campos de fração volumétrica são apresentados para os seguintes instantes de tempo: $t = 48.0$ s a 50.0 s, com incremento de 1.0 s, Fig. 6(a - c), respectivamente. Na Figura 6 pode ser percebida a ocorrência do primeiro ciclo de galgamento. Uma vez que ainda não há energia acumulada de outras ondas incidentes, a quantidade de massa que entra no reservatório é muito pequena.

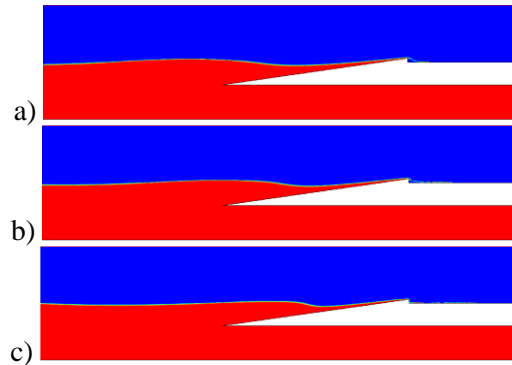


Figura 6: Comportamento transiente da fração volumétrica de água do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ para os instantes de tempo: a) $t = 48.0$ s, b) $t = 49.0$ s e $t = 50.0$ s.

A Figura 7 mostra o comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ para os mesmos instantes de tempo apresentados na Fig. 6, i.e., para os instantes de tempo $t = 48.0$ s a 50.0 s com incremento de $\Delta t = 1.0$ s, Fig. 7(a - c). Diferentemente do caso anterior, o galgamento não ocorreu para os instantes de tempo analisados. Mesmo com a incidência de diversas ondas a energia acumulada não foi suficiente para provocar um galgamento significativo. Dessa forma, a mudança na geometria da rampa, ou seja, o aumento da razão H_1/L_1 leva o dispositivo a se comportar como um quebra-mar, fato este também observado anteriormente nos trabalhos da literatura. O mesmo comportamento do escoamento na região da rampa observado para relação $H_1/L_1 = 0.14$ a respeito da formação de uma camada de cisalhamento e quebra de onda também foi notado para a razão $H_1/L_1 = 0.22$.

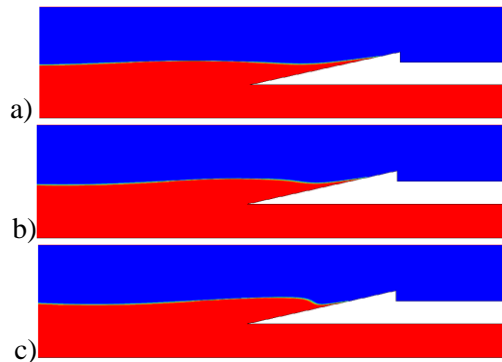


Figura 7: Comportamento transiente da fração volumétrica de água do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ para os instantes de tempo: a) $t = 48.0$ s, b) $t = 49.0$ s e $t = 50.0$ s.

O processo de otimização, conforme já foi citado, consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de H_1/L_1 . A Figura 8(a) apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a quantidade total de massa que entra no reservatório ao longo do intervalo de tempo analisado ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$). Pode ser visto nessa figura que o aumento da razão H_1/L_1 conduz a uma diminuição na quantidade de massa de água que entra no reservatório, até um limite inferior onde não ocorrerá o galgamento. Os resultados de uma forma geral demonstram a importância da avaliação geométrica, bem como, a aplicabilidade do *Constructal Design* para este tipo de problema. Vale destacar aqui que o efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água que entrou no reservatório para o estudo realizado foi diferente do que foi observado no estudo anterior de Dos Santos et al. [9] para escoamentos de ondas em escala de laboratório sobre

dispositivos *offshore*. Neste estudo foi observado que os limites inferior e superior conduziam aos piores desempenhos, ou seja, menor quantidade de massa de água acumulada no reservatório, conforme pode ser observado na Fig. 8(b). No presente trabalho o melhor desempenho foi obtida para as menores relações de H_1/L_1 . Também não foi observado no presente estudo a presença de pontos de máximo local para relações intermediárias de H_1/L_1 , como previsto em [9]. Contudo, os resultados obtidos aqui foram concordantes com os apresentados nos estudos experimentais em escala de laboratório para um dispositivo *onshore* de Kofoed [19], que também obtiveram melhores resultados para as menores relações entre a altura da rampa do dispositivo pelo seu comprimento. Futuros estudos são recomendados para avaliar se as diferenças estão relacionadas à simulação de escoamentos em diferentes escalas ou mesmo à posição do dispositivo no tanque (*onshore* ou *offshore*).

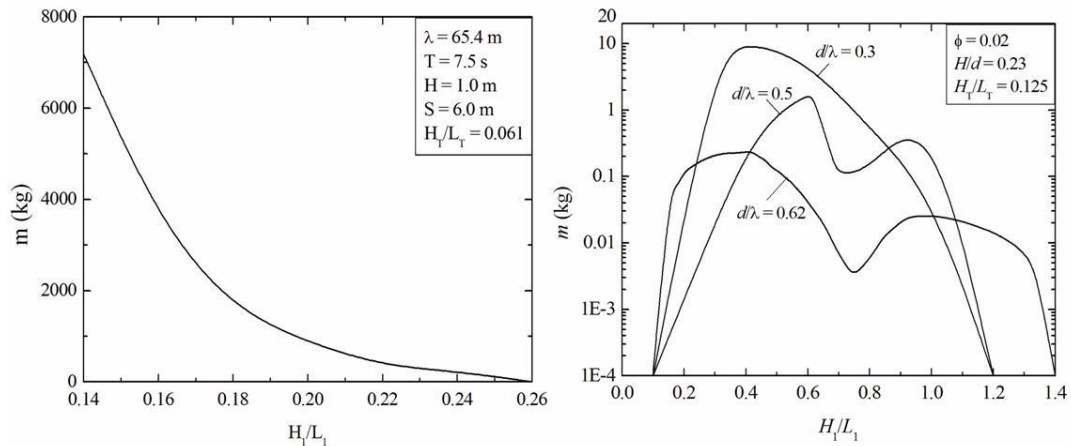


Figura 8: Efeito da razão H_1/L_1 sobre a massa de água que entra no reservatório: a) escala real onshore – presente trabalho, b) escala de laboratório – offshore ([9])

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico para avaliar as geometrias que conduzem a um melhor desempenho fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Esta análise foi realizada através do método *Constructal Design* e considerou-se o dispositivo com uma distância fixa entre o fundo do tanque e a superfície inferior do reservatório ($S = 6.0$ m). Foi avaliado um problema com um grau de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa, H_1/L_1) e uma restrição geométrica (área ocupada pela rampa no tanque de ondas simulado). Para todos os casos as mesmas ondas foram empregadas ($H = 1.0$ m, $\lambda = 65.4$ m e $T = 7.5$ s). O principal objetivo foi maximizar a quantidade de água das ondas incidentes que entram no reservatório do dispositivo de galgamento. Para tal estudo foram resolvidos escoamentos transientes 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, com o software FLUENT. O método *Volume of Fluid* 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.

Os resultados mostraram que a máxima quantidade de água que entrou no reservatório ao longo do tempo foi obtida para as menores razões de H_1/L_1 e os piores desempenhos foram alcançados para as maiores razões de H_1/L_1 . Além disso, não houve a ocorrência de pontos ótimos locais. O comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água que entrou no reservatório foi contrário ao que havia sido observado anteriormente no trabalho de Dos Santos et al. (9) para um escoamento em escala de laboratório sobre um dispositivo com localização *offshore*, mas concordantes com resultados experimentais de Kofoed [19] em dispositivos *onshore* em escala de laboratório. Futuros estudos são necessários para investigar as causas dessa discordância. Além disso, os resultados corroboraram a não existência de uma geometria

ótima universal que conduz ao melhor desempenho desse tipo de dispositivo e demonstram a importância do método Constructal para avaliação geométrica e racionalização dos recursos energéticos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores J. A. Souza, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro. O autor J. C. Martins agradece a CAPES pela bolsa de mestrado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kofoed JP, Frigaard P, Friis-Madsen E, Sørensen HC. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renew Energy*. 2006; 31(2):181–189, doi:10.1016/j.renene.2005.09.005.
2. Falcão AF de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renew Sustain Energy Rev*. 2010; 14(3):899–918, doi:10.1016/j.rser.2009.11.003.
3. Zabihian F, Fung AS. Review of marine renewable energies: Case study of Iran. *Renew Sustain Energy Rev*. 2011; 15(5):2461–2474, doi:10.1016/j.rser.2011.02.006.
4. Margheritini L, Vicinanza D, Frigaard P. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renew Energy*. 2009; 34(5):1371–1380, doi:10.1016/j.renene.2008.09.009.
5. Beels C, Troch P, De Visch K, Kofoed JP, De Backer G. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. *Renew Energy*. 2010; 35(8):1644–1661, doi:10.1016/j.renene.2009.12.001.
6. Rocha LAO, Lorente S, Bejan A. *Constructal law and the unifying principle of design*. New York: Springer; 2013, doi: 10.1007/978-1-4614-5049-8.
7. Liu Z, Hyun B, Jin J. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC. *J Korean Soc Mar Environ Eng*. 2008; 11(1): 35–41.
8. Iahnke SLP. Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento, Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Rio Grande; 2010.
9. Dos Santos ED, Machado BN, Zanella MM, das Neves Gomes M, Souza JA, Isoldi LA, et al. Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design. *Defect Diffus Forum*. 2014; 348: 232–244, doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.348.232.
10. Bejan A. *Shape and structure, from engineering to nature*. New York: Cambridge University Press; 2000. 324 p.
11. Bejan A. *Design with constructal theory*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons; 2008. 529 p.
12. Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, USA: McGraw Hill; 1980. 214 p.
13. Versteeg HK, Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson; 2007. 503 p.
14. FLUENT. *Documentation Manual – FLUENT 6.3.16*. Ansys, Inc.; 2007.
15. Lv X, Zou Q, Reeve D. Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method. *Adv Water Resour*. 2011; 34(10):1320–1334, doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.009.
16. Horko M. *CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter*, Dissertação de Mestrado. School of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Computing and Mathematics. The University of Western; 2007.
17. Chakrabarti SK. *Handbook of offshore engineering*. Amsterdam; London: Elsevier; 2005.
18. Gomes M das N, Dos Santos ED, Isoldi LA, Rocha LAO. Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques. *Proceedings VII Congresso nacional de Engenharia Mecânica*. São Luiz - Maranhão; 2012.
19. Kofoed JP. *Wave overtopping of marine structures – utilization of wave energy*, PhD thesis, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory. Department of Civil Engineering. Aalborg University; 2002.