

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

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

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

RESUMO

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

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

ABSTRACT

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

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

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

E-mail:

moraesgoulart@yahoo.com.br

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

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

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

2. MODELO FÍSICO

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

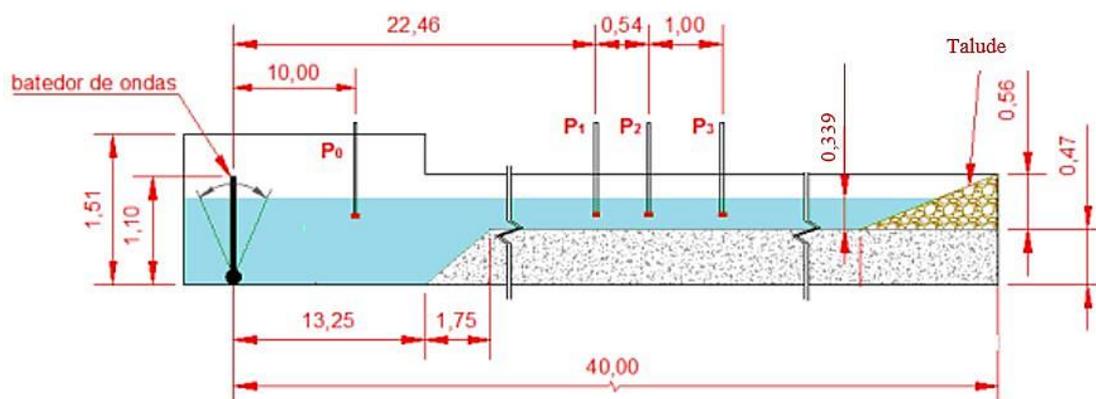


Figura 1. Esquema de posição das sondas (Fonte: adaptado de (Gomes, 2018)).

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

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

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

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

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

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

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

3.1 Geração da Onda e Condições de Contorno

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

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

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

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

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

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

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

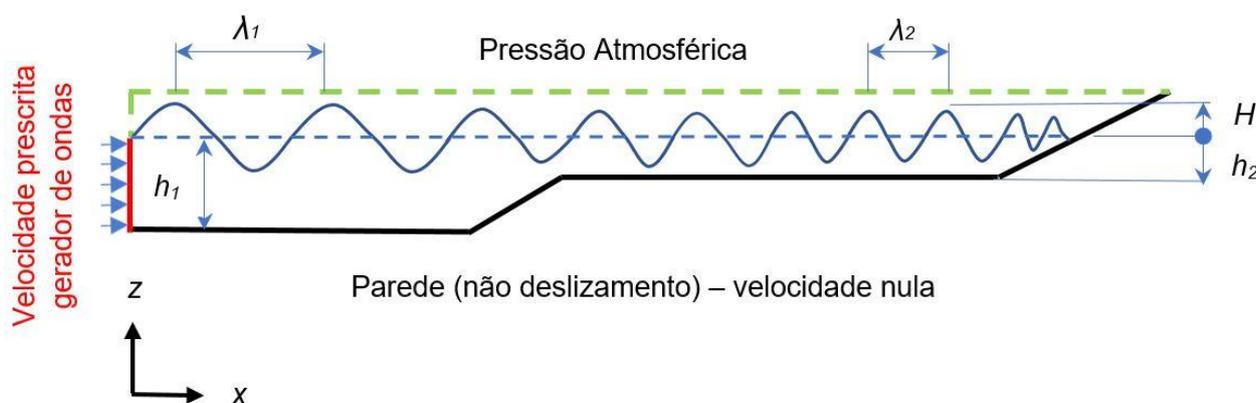


Figura 2. Representação esquemática do canal de ondas.

4. MODELO COMPUTACIONAL

4.1 Modelo Multifásico Volume of Fluid (VOF)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2 Procedimentos Numéricos

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

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

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teste de sensibilidade de malha

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

Tabela 2. Análise de simulações com diferentes malhas.

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

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

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

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

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

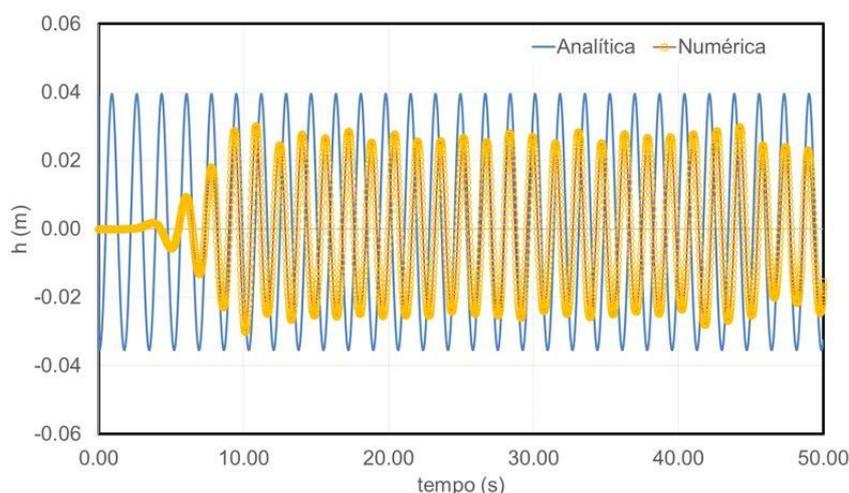


Figura 3. Comparação dos resultados analítico e numérico.

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

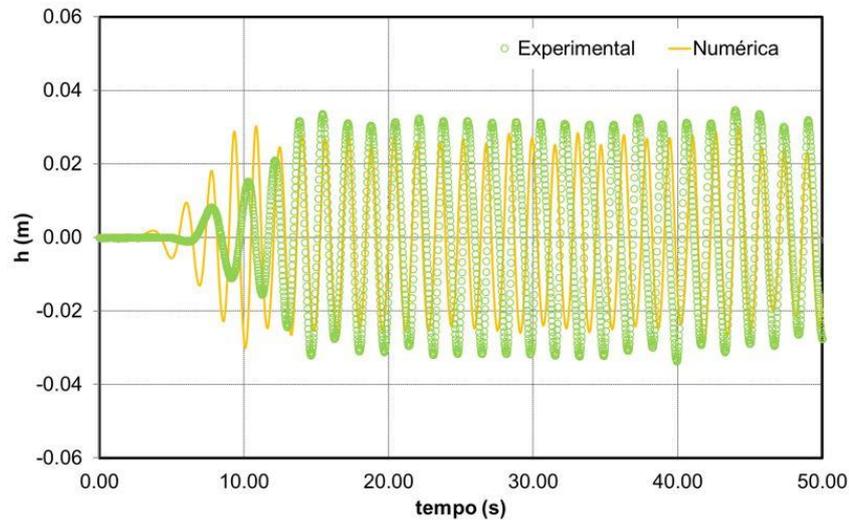


Figura 4. Comparação dos resultados experimental e numérico.

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

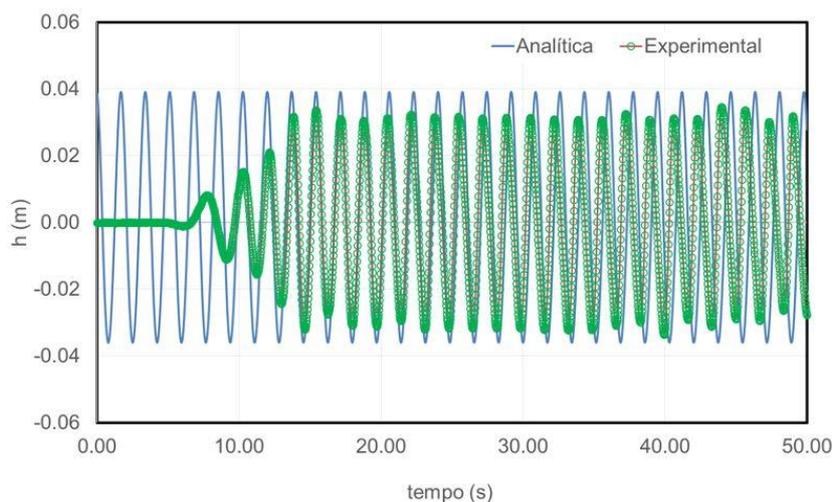


Figura 5. Comparação dos resultados analítico e experimental.

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

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

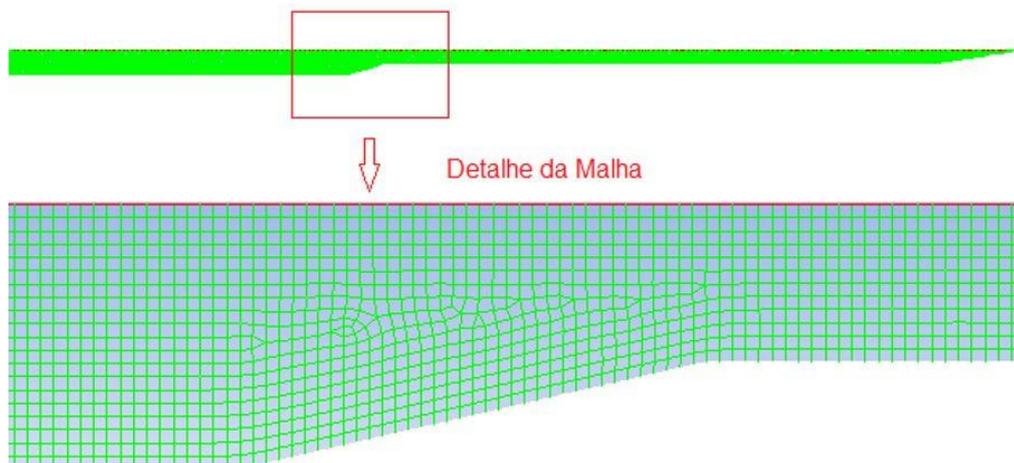


Figura 6. Discretização espacial do canal de ondas.

5.2 Verificação e validação do modelo numérico

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

onde x_j representa a variável em consideração instantânea.

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

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

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

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

6. CONCLUSÕES

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

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

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

AGRADECIMENTOS

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

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

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

HIRT, C.W., NICHOLS, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.

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

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

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

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

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