

ANÁLISE DE MALHAS PARA GERAÇÃO NUMÉRICA DE ONDAS EM TANQUES

Mateus das Neves Gomes, mateus.gomes@ifpr.edu.br^{1,3}
Liércio André Isoldi, liercioisoldi@furg.br²
Elizaldo Domingues dos Santos, elizaldosantos@furg.br²
Luiz Alberto Oliveira Rocha, luizrocha@mecanica.ufrgs.br³

¹Instituto Federal do Paraná - Campus Paranaguá, Rua Antônio Carlos Rodrigues 453, Bairro Porto Seguro, Paranaguá, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmiento Leite, 425, CP. 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

Resumo: Este trabalho apresenta uma metodologia para a geração numérica de ondas em tanques e também um estudo de malhas a serem utilizadas em simulações numéricas da propagação de ondas regulares bidimensionais em tanques. São testados dois tipos de geração e refinamento de malhas. Assim busca-se encontrar uma malha independente que forneça resultados com acurácia e com menor esforço computacional. Foram realizadas simulações numéricas da geração de ondas através do pacote FLUENT®, que é baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). Foi empregado o modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) para reproduzir a propagação da onda no tanque. Esses resultados poderão ser utilizados em trabalhos futuros, principalmente no estudo numérico de dispositivos para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, como por exemplo, os dispositivos de coluna de água oscilante (OWC) e de galgamento.

Palavras-chave: Geração de ondas, Tanque de Ondas, Volume of Fluid, Simulação Numérica, Energia das Ondas mar.

1. INTRODUÇÃO

Desde longa data trabalhos experimentais de Engenharia Oceânica e Arquitetura Naval tem usado tanques de ondas. Pode-se citar o Dr. William Froude (1810-1879) que realizou ensaios de resistência ao avanço com modelos de embarcações em escala reduzida em um tanque de ondas. 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 (Carneiro, 2007).

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 (Dean e Dalrymple, 1991).

Em Gomes et al. (2009) foram apresentadas duas diferentes metodologias numéricas de geração de ondas regulares de gravidade num tanque de ondas. Foram realizadas simulações numéricas da geração de ondas através do pacote FLUENT®, empregando-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) para reproduzir computacionalmente a propagação da onda no tanque. Esse modelo numérico vem sendo largamente empregado na modelagem computacional de tanques de ondas e de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. 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 (fração volumétrica). Existem alguns estudos relacionados à aplicação desse método na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, como em Barreiro (2009), Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Liu (2008a) e Liu (2008b), onde as equações governantes são resolvidas através do Método dos Volumes Finitos (MVF), utilizando o aplicativo comercial FLUENT®.

No presente trabalho é utilizada a mesma metodologia empregada em Gomes et al. (2009) com o objetivo de fazer uma análise detalhada da influência da malha gerada para a representação computacional da propagação de ondas regulares bidimensionais em tanques. De acordo com Barreiro (2009), a geração de malha é citada frequentemente como uma parte crítica e que consome grande parte do tempo na modelagem numérica. Os resultados numéricos devem ser independentes da malha, ou seja, a sua precisão está intimamente ligada à sua qualidade. Adicionalmente, os códigos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) – do inglês: *Computational Fluid Dynamic* – são mais robustos e

eficientes quando usam uma malha bem construída. É assim fundamental conhecer em detalhe os métodos de geração de malha (estruturadas e não estruturadas).

Conseqüentemente, é importante realizar um estudo com o objetivo de encontrar uma malha que possibilite resultados computacionais acurados e com baixo esforço computacional. É importante destacar que, será considerada neste estudo apenas uma análise espacial da propagação de uma onda regular bidimensional com características de laboratório. As análises se darão principalmente com base no erro da elevação da superfície livre.

Para isso, foram utilizados dois tipos de geração e refinamento de malhas. As simulações numéricas foram divididas em quatro conjuntos, onde no primeiro conjunto (conjunto 1) foram utilizadas malhas regulares quadradas e a partir de uma malha base aplicou-se uma razão de refino constante, igual a dois, para tornar mais refinada ou mais grosseira a malha. Por outro lado, no segundo conjunto (conjunto 2) foi empregada uma malha cuja principal característica é possuir um maior refino na região da superfície livre e, também, que associa a uma determinada característica do domínio computacional um determinado número de volumes, aplicando a essas malhas uma razão de refino constante e igual a dois. Essa técnica é conhecida como malha *stretched*, e consiste em utilizar malhas espaçadas de diversas ordens de magnitude, resultando em grandes razões de aspecto. Nos conjuntos três (conjuntos 3) e quatro (conjunto 4) serão realizados apenas alguns testes variando o número de volumes de determinadas características do domínio e mantendo outras fixas. As análises do erro se darão com base nas soluções analíticas.

A solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com um código CFD baseado no MVF, mais precisamente através do software FLUENT[®]. No que tange a geração da onda, a mesma é realizada através do emprego de uma Função Definida pelo Usuário – do inglês: *User Defined Function*. Esta metodologia foi empregada anteriormente nos trabalhos de Gomes et al. (2009) e Gomes (2010). Para a abordagem da interação entre as fases ar e água emprega-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), semelhante ao utilizado por Liu et al. (2008a) e Liu et al. (2008b).

2. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PROBLEMA

O problema proposto consiste em analisar numericamente a propagação de uma onda regular bidimensional em um tanque de ondas. O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de 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, também em taxas acentuadas, o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia, e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas, são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).

A realização da simulação numérica de um tanque 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 de conservação do modelo numérico. Nas subseções 2.1 a 2.3 são dados detalhes da representação computacional do problema proposto.

2.1. Domínio Computacional

A partir do conhecimento das características principais da onda (período, amplitude e profundidade de propagação) é possível determinar o comprimento e a altura do tanque de ondas apresentado na Fig. (1). Não existe uma regra que relacione essas medidas, porém algumas considerações devem ser levadas em conta. A profundidade de propagação da onda é a mesma do tanque, representada por h . Para o comprimento do tanque é preciso considerar o comprimento da onda, que é calculado através de um processo iterativo com a Eq. (1). É possível estabelecer que o comprimento do tanque deva ser seis vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda sem efeitos de reflexão por um tempo razoável de propagação e sem aumentar desnecessariamente o tamanho do domínio computacional da malha, fator que influencia diretamente no esforço computacional.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (1)$$

Em relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim é possível estabelecer que a altura do tanque seja dada pela profundidade mais três vezes a altura da onda. Diante do exposto e sabendo que a onda a ser gerada tem as características mencionadas na Tab. (1) e em concordância com a Fig. (1), as dimensões do tanque a ser considerado nesse estudo são dadas por: comprimento = 6.00 m, altura = 0.80 m e profundidade (h) = 0.50 m.

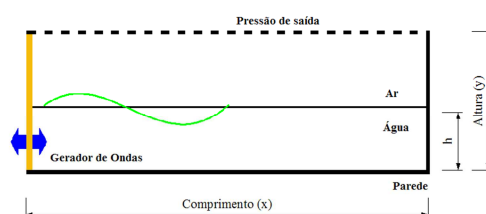


Figura 1. Representação esquemática do tanque de ondas.

2.2. Geração da onda e condições de contorno

Como é possível observar na Fig. (1), no que diz respeito ao gerador de onda numérico, a condição de contorno é baseada na Metodologia Função empregada em Gomes et. al (2009). Esta metodologia consiste em aplicar ao gerador de ondas uma velocidade de entrada (*velocity inlet*) através de uma UDF. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas na superfície de entrada são dadas por:

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

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

onde: A é a amplitude da onda (m); g a aceleração da gravidade (m/s^2); L é o comprimento da onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/L$ (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).

De acordo com a Tab. (1) é possível obter a relação $H/\lambda = 0.14$. Se $H/\lambda < 1/50$ utiliza-se a teoria linear de ondas e se $H/\lambda \geq 1/50$, que é o caso do presente trabalho, o sugerido é utilizar a teoria não-linear de 2ª ordem de Stokes, que consiste em assumir que as propriedades do movimento das ondas, como o potencial de velocidades, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações (McCormick, 1976).

Tabela 1. Características da onda a ser gerada.

Características	Dimensões
Período (T)	0.80 s
Altura (H)	0.14 m
Comprimento (λ)	1.00 m
Profundidade (h)	0.50 m

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada da Fig. (1)). Nas demais superfícies do tanque de ondas: 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.

É possível ainda destacar uma equação que descreve o movimento da superfície livre de forma analítica:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (4)$$

onde z é variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. Maiores detalhes desta teoria podem ser encontrados em McCormick (1976) e Dean e Dalrymple (1991).

2.3. Geração da malha

A fase inicial de qualquer simulação numérica consiste na discretização do domínio computacional, ou seja, na geração de uma malha adequada. Conforme Maliska (2004), quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais, podemos afirmar que a discretização ou a malha resultante é estruturada, uma vez que cada volume interno tem o mesmo número de vizinhos. Por outro lado, técnicas de geração de malhas não-estruturadas são inerentemente mais automáticas e passíveis de geometrias complexas do que as malhas

estruturadas ou estruturadas em blocos. A premissa básica é que devido aos elementos poderem ser construídos aleatoriamente os mesmos preenchem mais facilmente o domínio computacional (Mavripilis, 1997).

A influência da malha adotada na discretização do domínio computacional é o ponto central deste trabalho. Foram testadas duas formas de geração de malha, ambas estruturadas. A primeira estratégia consiste em subdividir o domínio computacional em quadrados, e utilizando um refinamento constante (igual a dois) e em ambas as direções. Partindo de uma malha base, bastante refinada, com quadrados de 0.005×0.005 m, foram testadas cinco diferentes malhas (mais grosseiras) com refino de malha igual a dois. Uma segunda estratégia consiste em gerar uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como a superfície livre por exemplo. Essa metodologia é baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavripilis, 1997)..

Em todos os conjuntos de simulações foi estabelecido o número de volumes para as diferentes regiões do domínio computacional, conforme a Fig. (2). Onde “a” é o número de volumes da região acima da superfície livre (R1), que contém somente ar. Na região da superfície livre (R2), onde se tem água e ar, o número de volumes é dado por “b”. Na região abaixo da superfície livre (R3), que contém somente água, a letra “c” representa o número de volumes. Além disso, “d” é o número de volumes por cada comprimento de onda (R1). Com esse esquema foi possível definir as dimensões de cada volume da malha dividindo a dimensão da região pelo número de volumes desejado. Semelhante ao que é feito em Barreiro (2009), pretende-se ao final deste estudo apresentar o número mínimo de volumes por característica da onda, comprimento e altura, de forma a assegurar a acurácia da solução.

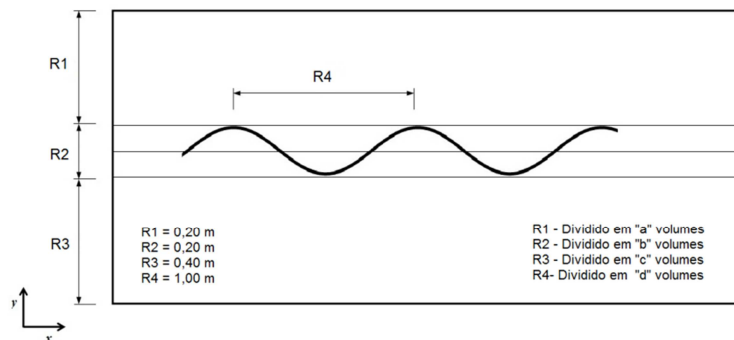


Figura 2. Malha definida através do número de volumes por característica da onda.

Nas análises que serão apresentadas utilizou-se o gerador de malhas GAMBIT. O GAMBIT é um programa computacional que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É 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, 2006).

2.4. Modelo Matemático e Numérico

O método volume of fluid é um modelo numérico multifásico que permite tratar adequadamente da interação entre água e ar no interior do tanque de ondas. Nessa formulação, a superfície livre pode ser identificada pela fração de volume (f) variável. Dentro de cada célula da malha (elemento), se $f = 1$ o elemento contém somente água. Quando $f = 0$ então a célula contém somente ar e quando $0 < f < 1$, tem-se a existência de água e ar simultaneamente na célula. Somente um conjunto de equações da continuidade e momentum são escritas para ambos os fluidos no modelo VOF. Para um fluido Newtoniano, as equações da continuidade e do momentum pode ser escritas como (FLUENT,2006):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (6)$$

onde \vec{v} é o vetor velocidade (m/s), ρ é a densidade (kg/m³), t o tempo (s), \vec{g} o vetor aceleração da gravidade (m/s²), p a pressão (Pa) e $\vec{\tau}$ o tensor tensão (Pa). A fração volumétrica é modelada adicionando ao sistema uma equação de transporte para f tal que:

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

Para as propriedades físicas nas Eqs. (5-7) são assumidos valores médios calculados por:

$$\rho = f \rho_{\text{Água}} + (1 - f) \rho_{\text{Ar}} \quad (8)$$

$$\rho = f \mu_{\text{Água}} - (1 - f) \mu_{\text{Ar}} \quad (9)$$

Como já foi dito, para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado o software FLUENT[®], que é um código comercial baseado no MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. 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 AMD Athlon com 3.0 Gb de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a técnica do processamento paralelo disponibilizada pelo software FLUENT[®] (FLUENT, 2006). O tempo de cada simulação numérica é variável de acordo com o número de volumes podendo nos casos com malhas mais grosseiras durar 1800 s ou então 4.32×10^5 s nos casos com malhas mais refinadas.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

3.1. Variáveis de interesse

A variável de interesse primária é a elevação da superfície livre (η), que analiticamente é dada pela Eq. (4). Para efetuar essa medida, numericamente, serão dispostas sondas numéricas ao longo do tanque, espaçadas por 0.5 metros totalizando 11 sondas posicionadas a partir da extremidade esquerda (gerador de ondas), conforme a Fig. (1). Essa medida deve ser feita considerando a opção *integral* no FLUENT[®] que é calculada da seguinte forma:

$$\int \phi dA = \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (10)$$

onde ϕ_i é um campo variável, neste caso a quantidade de água em cada volume, e A_i é a área de cada volume, mas por se tratar de uma linha representa o comprimento de cada volume.

Uma variável de interesse secundária é o perfil de velocidades na direção x e na direção z , que pode ser comparado com as equações analíticas dadas pelas Eqs. (2) e (3).

3.2. Verificação do modelo numérico

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. Três tipos de métodos podem ser empregados na solução de um problema: experimentais (erros experimentais), analíticos (erros de modelagem) e numéricos (erros de modelagem e numéricos). E nesse trabalho o interesse foi pela análise do erro numérico. De forma geral, o erro numérico pode ser causado por: erros de discretização, erros de iteração, erros de arredondamento e outras fontes de erro. A principal fonte de erro é o erro de discretização (Versteeg & Malalasekera, 2007). O erro numérico (E) é a diferença entre a solução analítica exata (Φ) de uma variável de interesse e a sua solução numérica (ϕ), ou seja (Ferziger & Peric, 1999):

$$E(\phi) = \Phi - \phi \quad (11)$$

Para verificar a metodologia empregada neste estudo foi utilizada a estratégia de comparação, entre a solução analítica, dada pela Eq. (4), e a solução numérica, que consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a variação na superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do tanque de ondas. A onda gerada para essa verificação tem suas características descritas na Tab. (1).

Na Figura (3) apresenta-se graficamente a comparação da onda numérica utilizada neste trabalho (utilizando-se a malha da simulação 3 do conjunto 1, vide Tab. 2) com a onda analítica obtida pela Eq. (4) na posição $x = 1.00$ m (sonda 2). Para análise do fenômeno vale considerar três faixas de tempo no gráfico. Na primeira, $0.00 \text{ s} \leq t \leq 2.40 \text{ s}$, 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, onde o amortecimento não é considerado. Este amortecimento tende a diminuir com o avanço do tempo de simulação. Posteriormente, para $2.40 \text{ s} \leq t \leq 4.80 \text{ s}$, 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, calculada pela Eq. (11), entre as amplitudes de cristas e cavas de aproximadamente 1.28 %. Vale também destacar que nessa região o erro máximo obtido na cava da onda é de 2.24 % e o erro máximo obtido na crista é de 1.74 %. Para $4.80 \text{ s} \leq t \leq 8.00 \text{ s}$ o fenômeno de reflexão da onda começa a interferir nos resultados numéricos, comprometendo assim as análises. Esse fato fica evidente no instante de tempo 5.60 s, onde existe uma sobreposição de ondas. De uma forma geral, é possível observar que o modelo numérico apresentado neste estudo apresenta um comportamento satisfatório quando comparado com a solução analítica. O erro médio foi calculado considerando uma média aritmética, na região de estabilidade da propagação da onda, do valor absoluto do erro calculado com a Eq. (11). É importante ainda destacar que em Gomes et al (2009), Gomes (2010) e Liu (2008a,2008b) são apresentadas verificações e validações da aplicação do modelo VOF

na geração de ondas, comprovando a eficácia do modelo nesse tipo de aplicação.

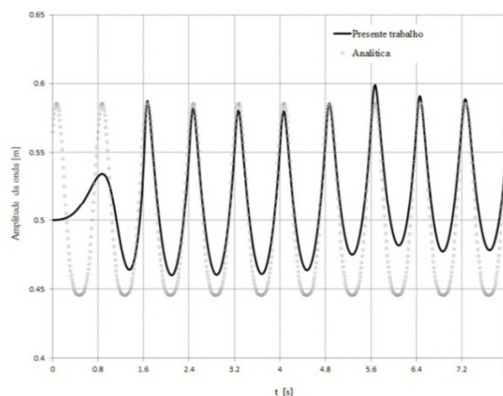


Figura 3. Comparação dos resultados numérico e analítico.

3.3. Estudo de caso

Para as análises propostas as simulações numéricas foram divididas em quatro conjuntos, onde no primeiro conjunto foram utilizadas malhas quadradas com uma razão de refino constante (dois). No segundo conjunto foram empregadas malhas que têm como principais características um refino maior na região da superfície livre e a associação de uma determinada característica do domínio computacional com um determinado número de volumes, aplicando a essas malhas uma razão de refino constante (dois). Nos conjuntos três e quatro foram realizados apenas alguns testes variando o número de volumes de determinadas características do domínio e mantendo algumas fixas. É importante salientar que as análises do erro foram baseadas nas soluções analíticas.

No conjunto 1 a variável de interesse primária foi analisada em cinco diferentes malhas, como o mostrado na Tab. (2). A malha utilizada é composta de quadrados distribuídos pelo domínio computacional.

Tabela 2. Simulações Numéricas: conjuntos 1, 2, 3 e 4.

	Simulação	a	b	c	d	Número total de volumes
conjunto 1	1	40	40	80	200	192.000
	2	20	20	40	100	48.000
	3	10	10	20	50	12.000
	4	5	5	10	25	3.000
	5	3	2	5	13	780
conjunto 2	1	40	120	60	400	528.000
	2	20	60	30	200	132.000
	3	10	30	15	100	33.000
	4	5	15	8	50	8.400
	5	3	7	4	25	2.100
	6	2	4	2	13	624
conjunto 3	1	5	30	8	100	25.800
	2	10	30	15	100	33.000
	3	20	30	30	100	48.000
conjunto 4	1	10	15	15	50	12.000
	2	10	30	15	100	33.000
	3	10	60	15	200	102.000

No fenômeno em consideração a onda propaga-se na superfície livre sendo essa região de maior interesse. Portanto no conjunto 2 de simulações, Tab. (2), foi empregada uma malha conforme a da Fig. (3), determinando assim o número de volumes necessários por região do domínio computacional. Foram testadas seis diferentes malhas e a cada uma dessas foi adotado um refino de malha constante igual a dois.

No terceiro conjunto de simulações, Tab. (2), o número de volumes na região da superfície livre (“a” e “d”), ver Fig. (2), é mantido constante e o número de volumes nas outras regiões do domínio é variado. O objetivo foi verificar até que ponto essa variação do número de volumes nessas outras regiões afeta no resultado global da simulação numérica. Por outro lado, no quarto conjunto de simulações o número de volumes em todas as regiões do domínio computacional foi mantido constante, exceto na região da superfície livre (“a” e “d”), ver Fig. (2), onde um refinamento foi considerado.

3.4. Resultados e discussões

Conforme o que já foi destacado, a variável de interesse primária foi a elevação da superfície livre em determinadas regiões do tanque de ondas. Essas regiões estão representadas por sondas que estão numeradas de 1 a 11, a partir da extremidade esquerda do tanque, ver Fig. (1), e estão espaçadas por 0.50 m.

Foram considerados três tipos de análises em relação a essa variável de interesse. Primeiramente, foi calculado o erro médio em cada sonda de medição. Para tanto, através das Eqs. (4) e (11) o erro foi calculado em cada instante de tempo para após calcular a média aritmética do valor absoluto do erro num dado intervalo de tempo. Esse intervalo corresponde ao tempo de propagação onde a onda se mantém estável. Cada uma das sondas dispostas ao longo do tanque possui uma diferente região de estabilidade devido a estarem localizadas em diferentes posições. Nas sondas S1 a S3 a região de estabilidade esta entre a terceira e sexta onda, ou seja, quando $2.40 s \leq t \leq 4.80 s$. Para as sondas 4 e 5, é entre a quarta e a sétima onda, no intervalo $3.20 s \leq t \leq 5.60 s$. Na sonda 6, a estabilidade ocorre entre a quinta e a sexta onda, na sonda 7 tem-se a estabilidade entre a sexta e a nona onda. Para as sondas 8 e 9, a estabilidade está no intervalo $5.60 s \leq t \leq 7.20 s$. Por fim, para a sondas 10 e 11 considera-se como estável a região de propagação da nona e da décima onda. No tanque de ondas adotado tem-se a possibilidade da propagação de até dez ondas sem que o efeito da reflexão cause interferências na onda gerada, isso pode ser corroborado pela Fig. (3).

Os outros dois tipos de análises de erro da variável elevação da superfície livre levam em conta o erro máximo e o erro mínimo na região de estabilidade de cada sonda. Entende-se por erro máximo o maior erro calculado ocorrido na região da crista da onda. Por outro lado o erro mínimo é calculado levando em conta o maior erro obtido na região da cava da onda. Com essas análises, descritas na Tab. (3), é possível observar que em todos os conjuntos nem sempre as malhas mais refinadas fornecem resultados mais acurados, muito em razão das diversas fontes de erro numérico. Na Tabela (3) são apresentados os resultados (análise do erro) referentes às sondas 1 – 6 (S1 a S6), pois é a região onde a propagação da onda ocorre de forma estabilizada sendo esta, de acordo com Barreiro (2009), a zona de desenvolvimento da onda. Já a outra metade do tanque, região entre 3.00 e 6.00 m, é considerada segundo Barreiro (2009) a zona de absorção a onda.

Tabela 3. Cálculo do erro em diferentes sondas de todas as simulações da variável primária.

	Simulação	Erro (%)	S1	S2	S3	S4	S5	S6
conjunto 1	1	Médio	1.34	1.48	1.51	2.03	2.74	2.84
		Máximo	3.25	3.03	-3.20	-4.78	-5.12	-4.89
	2	Médio	1.37	1.53	1.39	1.81	2.22	2.89
		Máximo	3.20	3.14	-3.00	-3.63	-4.12	-5.03
	3	Médio	1.43	1.28	1.35	1.62	2.12	2.45
		Máximo	3.49	-2.24	-2.74	-3.68	-4.92	6.58
	4	Médio	1.54	1.41	1.35	1.65	1.82	2.55
		Máximo	4.90	4.44	3.39	4.13	4.18	-5.17
	5	Médio	2.03	2.02	2.58	2.74	3.05	3.55
		Máximo	6.58	5.91	6.64	6.92	7.40	-4.51
conjunto 2	1	Médio	1.52	1.45	1.68	2.41	3.06	3.89
		Máximo	3.72	3.12	-2.95	-5.27	5.87	-8.35
	2	Médio	1.35	1.46	1.59	2.18	2.87	3.63
		Máximo	2.99	-3.10	-3.01	-4.34	5.85	7.53
	3	Médio	1.36	1.53	1.58	1.86	2.46	2.67
		Máximo	3.47	3.26	2.94	-4.12	4.22	-5.69
	4	Médio	1.29	1.47	1.31	1.52	1.58	3.13
		Máximo	3.81	4.16	2.95	3.13	-3.25	8.18
	5	Médio	1.42	1.40	1.49	1.79	1.94	2.69
		Máximo	4.24	3.78	3.77	4.14	4.23	9.49
	6	Médio	1.66	2.40	2.38	3.06	3.31	4.06
		Máximo	-3.62	-5.16	3.94	-5.62	-5.23	8.86
conjunto 3	1	Médio	1.27	1.53	1.54	1.85	2.19	2.68
		Máximo	-2.94	2.98	-2.84	-4.07	-4.27	-5.83
	2	Médio	1.37	1.39	1.55	2.05	2.29	2.54
		Máximo	3.08	-2.51	-2.86	4.86	-4.52	6.17
	3	Médio	1.40	1.75	1.56	2.11	2.24	2.61
		Máximo	3.36	3.81	-2.88	-3.77	-4.39	-5.52
conjunto 4	1	Médio	1.28	1.39	1.29	1.42	1.56	2.07
		Máximo	3.80	3.77	2.98	-3.34	-3.18	6.13
	2	Médio	1.45	1.52	1.55	1.86	2.22	2.56
		Máximo	4.02	2.94	-2.86	-4.12	-4.36	-5.52
	3	Médio	1.41	1.53	1.55	2.41	2.86	3.90
		Máximo	3.43	3.19	-2.81	-4.13	5.47	-9.01

De acordo com os resultados apresentados na Tab. (3) e na Fig. (4) é possível afirmar que no conjunto 1 a simulação 3 é a que apresenta os resultados mais acurados. No conjunto 2 é a simulação 4 e nos conjuntos 3 e 4 é a simulação 1 dos dois conjuntos respectivamente. Para essa escolha considerou-se principalmente o erro médio em cada uma das sondas e ainda levou-se em conta qual simulação tinha o maior número de sondas com o erro médio menor.

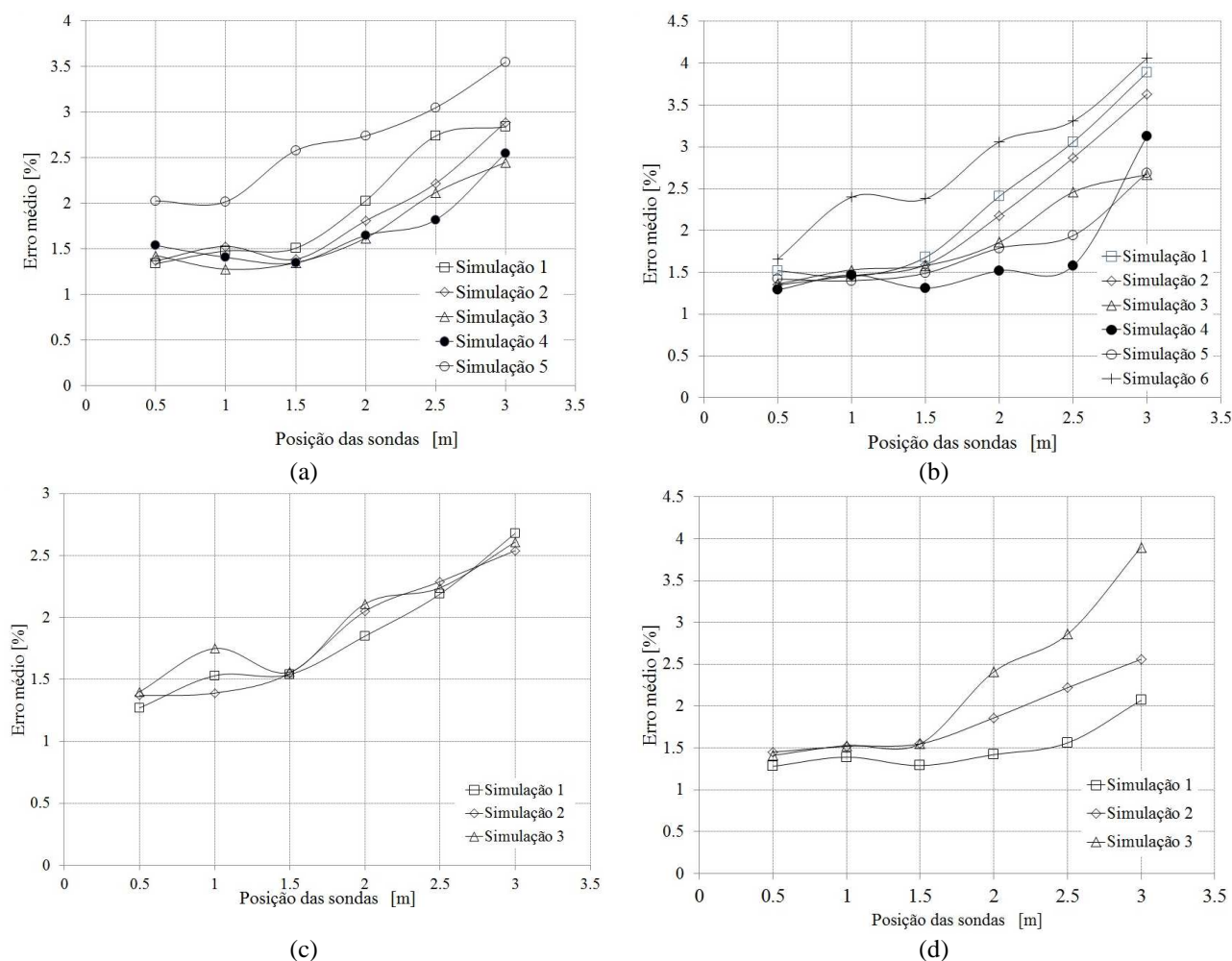


Figura 4. Comportamento do erro médio das simulações (a) do conjunto 1, (b) do conjunto 2, (c) do conjunto 3, (d) do conjunto 4.

Nos trabalhos de Gomes et al (2009) e Gomes (2010) a malha mais utilizada para simular computacionalmente uma onda (com características semelhantes a desse trabalho) é composta de quadrados com 0.01×0.01 m. Ou seja, uma malha semelhante a da simulação 2 do conjunto 1, ver Tab. (2). Os resultados obtidos aqui mostram que o emprego de uma malha *stretched* com um menor número de volumes na discretização do domínio conduz a resultados tão ou mais acurados do que uma malha regular constituída de quadrados com 0.01×0.01 m, por exemplo. Esse aspecto é muito importante devido a sua influência sobre o esforço computacional.

Destaca-se ainda que essa técnica de geração de malha refinada nas regiões de interesse, já utilizada em Barreiro (2009) e amplamente testada no presente trabalho, apresenta resultados satisfatórios. Pois, por exemplo, com a malha da simulação 1 do conjunto 4, ver Tab. (2), que possui 12,000 volumes obtém-se resultados tão acurados quanto os apresentados pela malha da simulação 2 do conjunto 1, que possui 48,000 volumes, e que já foi utilizada em Gomes et al. (2009) e Gomes (2010). Isso representa uma diminuição no tempo de simulação de 14400 s para 1800 s.

Na Fig. (5), apresenta-se o perfil de velocidades numa dada posição e num dado instante de tempo, da simulação 1 do conjunto 4. Quando comparamos, na posição de 1.00 m a partir do gerador de ondas (ver Fig. (1)), o perfil de velocidades na direção x obtido numericamente com o perfil de velocidades analítico, calculado pela Eq.(2), tem-se que principalmente na região da superfície livre (entre 0.00 e -0.10 m) os resultados são bastante semelhantes, de acordo com o que se pode observar na Fig. (5), mostrando assim a capacidade dessa malha em gerar resultados acurados com baixo esforço computacional.

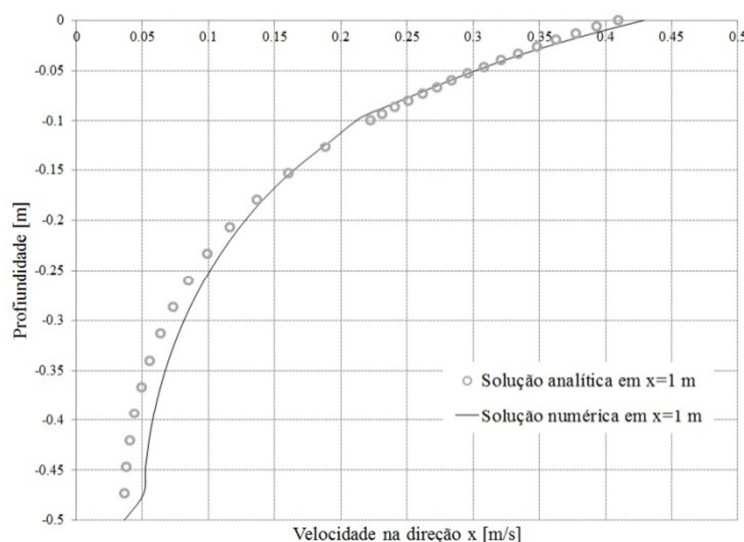


Figura 5. Perfil de velocidades na direção x na posição $x = 1$ m no instante $t = 3.3$ s.

Em concordância com o resultado gráfico apresentado na Fig. (5), é possível verificar um comportamento semelhante na simulação 3 do conjunto 1, simulação 4 do conjunto 2 e simulação 1 dos conjuntos 3 e 4. Conforme o apresentado na Tab. (4) o erro médio na comparação dos perfis de velocidade na direção x , obtidos analiticamente e numericamente, tem seu maior valor em 1.37 %. A posição e o instante de tempo, assim como na Fig. (5), é $x = 1.00$ m e $t = 3.30$ s.

Tabela 4. Erro médio no perfil de velocidades na direção x .

Conjunto	Simulação	Erro médio (%)
1	3	0.95
2	4	1.37
3	1	1.03
4	1	0.83

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico a respeito da influência de malhas geradas com diferentes tamanhos e características na simulação numérica da propagação de ondas em tanques. Um estudo semelhante foi realizado em Barreiro (2009), considerando uma onda com 2 m de altura, 225 m de comprimento e o período de 12 s. Foi indicado que, para não haver perda de característica em relação à altura da onda, o ideal é uma discretização com 20 volumes entre cava e crista da onda. Já para o comprimento o recomendado é uma discretização com 45 ou 50 volumes.

Dessa forma, foi possível observar uma relação entre os resultados obtidos no presente trabalho e no estudo de Barreiro (2009), ainda que as características da onda sejam diferentes. Um dos resultados obtidos (no presente trabalho) com baixo esforço computacional e com acurácia foi obtido para a malha da simulação 4 do conjunto 2 que tem uma discretização de 15 volumes entre a cava e a crista da onda e uma discretização de 50 volumes no comprimento da onda, totalizando 8,400 volumes. Além disso, para a simulação de 8.0 s do fenômeno físico foi requerido um tempo de processamento de aproximadamente 1800 s.

Percebe-se então que esta seria a malha recomendada para trabalhos numéricos envolvendo a propagação de ondas em tanques com características semelhantes às adotadas nesse trabalho. Esse trabalho evidencia a necessidade de realização de um trabalho futuro semelhante, porém analisando a influência da discretização temporal. Assim seria possível, talvez, reduzir ainda mais o esforço computacional.

Por tudo que foi analisado entende-se que este trabalho tem uma relevância grande para trabalhos futuros nessa área, principalmente no estudo numérico de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, pois com os resultados obtidos é possível simular computacionalmente o fenômeno e obter resultados acurados com baixo esforço computacional.

5. 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 ao o CNPq pelo suporte financeiro (Processo: 555695/2010-7). L. A. O. Rocha também agradece o CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Barreiro, T. G., 2009, “Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- Carneiro, M. L., 2007, “Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 116 p.
- Dean, R. G., Dalrymple, R.A., 1991, “Water wave mechanics for engineers and scientists”, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- Ferziger, J. H., Peric, M., 1999, “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Springer, Berlim, 364 p.
- FLUENT (version 6.3.16), “ANSYS”, Inc., 2006.
- Gomes, M. das N. ; Olinto, C. R. ; Rocha, L. A. O. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A., 2009, “Computational modeling of a regular wave tank”, Engenharia Térmica, v. 8, p. 44-50.
- Gomes, M. N., 2010, “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.
- Liu, Z., Hyun B., Hong, K., 2008a, “ 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.
- Liu, Z., Hyun B., Jin, J., 2008b, “ Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC”, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 11, No.1.
- McCormick, M. E., 1976, “Ocean engineering wave mechanics”, John Wiley & Sons, USA, New York.
- Maliska, C. R., 2004, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos.
- Mavriplis, D. J., 1997, “Unstructured Grid Techniques”, Annual Reviews Fluid Mechanics , Vol. 29, pp: 473-514.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics”, Malaysia : Pearson.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF GRIDS FOR NUMERICAL WAVE GENERATION IN TANKS

Mateus das Neves Gomes, mateus.gomes@ifpr.edu.br^{1,3}

Liércio André Isoldi, liercioisoldi@furg.br²

Elizaldo Domingues dos Santos, elizaldosantos@furg.br²

Luiz Alberto Oliveira Rocha, luizrocha@mecanica.ufrgs.br³

¹Federal Institute of Paraná - Campus Paranaguá, Rua Antônio Carlos Rodrigues 453, Bairro Porto Seguro, Paranaguá, PR, Brazil.

²Federal University of Rio Grande, School of Engineering, Av. Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brazil.

³Federal University of Rio Grande do Sul, Department of Mechanical Engineering, Rua Sarmiento Leite, 425, CP. 90050-170, Porto Alegre, RS, Brazil.

Abstract: This work presents a methodology to numerical generation of waves in tanks and also a study of grids used in numerical simulation of bidimensional regular waves propagation in tanks. Two types of grid generation and of grid refinement were tested. The aim was to find an independent grid that produces accurated results with lower processing time. Numerical simulations of the waves generation were performed with the FLUENT package, based on the Finite Volume Method (FVM). The Volume of Fluid (VOF) multiphase model was adopted to reproduce the wave propagation in the tank. The obtained results can be employed in future works, mainly in the numerical study of devices used to convert the ocean wave energy into electrical energy, such as the Oscilating Water Column (OWC) and the Overtopping Converters.

Keywords: Wave generation, Wave tank, Volume of Fluid (VOF), Numerical Simulation, Ocean wave energ