



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO 3D PARA ESTUDOS DE ENGENHARIA COSTEIRA

Eric Didier¹, Paulo R.F. Teixeira², Maria Graça Neves³

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: edidier@lnec.pt

² Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: pauloteixeira@furg.br

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: gneves@lnec.pt

RESUMO

O objectivo principal deste artigo é implementar condições de fronteiras específicas num modelo URANS-VOF 3D (Unsteady Reynolds-Average-Navier-Stokes – Volume of Fluid) para futuras aplicações de engenharia costeira. Um campo de ondas realista é, assim, obtido combinando a condição limite de geração das ondas com a implementação de uma técnica de absorção activa das ondas, baseada na teoria linear das ondas longas, quer na fronteira de geração quer na fronteira de saída do domínio computacional. A técnica desenvolvida inicialmente para canal de ondas 2D necessita de adaptações para um tanque de ondas totalmente 3D, através da implementação de batedores múltiplos com absorção activa, incluindo correcções específicas devido à obliquidade das ondas nos batedores. A técnica de absorção activa apresenta várias vantagens comparando com outras metodologias, tal como a estabilidade numérica, a conservação do nível médio da água ao longo do tempo e não aumenta o domínio computacional (ao contrário da técnica da praia numérica de absorção). A técnica de absorção activa é aplicada a casos 2D e 3D para várias características de onda incidente e os resultados obtidos indicam que a metodologia implementada permite atingir boas performances.

Palavras-chave: Modelo RANS-VOF, Absorção activa, Tanque 3D, Batedores múltiplos com absorção activa

1. INTRODUÇÃO

A redução regular do tempo de cálculo computacional ao longo dos anos, devido às capacidades crescentes dos meios de cálculo, permite abordar actualmente simulações numéricas considerando domínios computacionais cada vez maiores, uma condição necessária para muitas aplicações de engenharia costeira. O estudo de estruturas costeiras em tanque de ondas numérico torna-se, assim, abordável da mesma forma que se realizam os ensaios físicos em

tanques de ondas experimentais. Os modelos numéricos de escoamentos com superfície livre de tipo URANS-VOF 3D, conjugando os modelos URANS (*Unsteady Reynolds-Average-Navier-Stokes*) e a técnica VOF (*Volume of Fluid*), permitem este tipo de modelação, tal como o modelo IH-2VOF (Lara et al., 2011) e o OpenFOAM® (Higuera et al., 2013). A vantagem destes modelos, comparando com os modelos potências de tipo BEM (*Boundary Element Method*) ou integrados de tipo Boussinesq, é evidentemente as suas capacidades para não só modelar o campo de ondas, mas também determinar forças em estrutura, galgamento de quebra-mares, modelar a rebentação das ondas, os impactos em estruturas costeiras e marítimas e analisar a topologia do escoamento, tal como a formação de vórtices, as correntes, o escoamento em meios porosos, etc. Para estas aplicações, uma das dificuldades reside na absorção das ondas nas extremidades do domínio computacional, quer na fronteira de geração de onda (batedor de tipo estático ou dinâmico) quer na fronteira de saída.

O objectivo principal deste artigo é implementar condições de fronteiras específicas no modelo URANS-VOF 3D FLUENT, versão 6.3.26 (Fluent, 2006), que permitam obter um campo de ondas realista para futuras aplicações de engenharia costeira, principalmente em estudos de interação de ondas com estruturas refletoras. Na fronteira de geração das ondas é implementada uma técnica simples mas eficaz de absorção activa que permite simultaneamente gerar a onda incidente e absorver as ondas reflectidas que chegam ao batedor. Na fronteira de saída do domínio computacional são implementadas duas técnicas de absorção das ondas: uma técnica clássica de praia numérica de dissipação e uma técnica de absorção activa similar à implementada na fronteira de geração das ondas.

A técnica de absorção activa, baseada na teoria linear das ondas longas, é bem conhecida em modelação física, em canal e tanque de ondas, e consiste na anulação das ondas reflectidas que chegam ao batedor. A metodologia proposta por Schäffer e Klopman (2000) é a aplicada no presente trabalho, pois é de fácil implementação e funciona relativamente bem, mesmo fora do intervalo das ondas rasas. Esta técnica já foi implementada com sucesso em modelos URANS-VOF, no IH-2VOF (Lara et al., 2011) e o OpenFOAM® (Higuera et al., 2013) como referido anteriormente, e também no modelo SPHyCE, um modelo SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) baseado na formulação Lagrangiana das equações de Navier-Stokes (Didier e Neves, 2012). A técnica de absorção activa é implementada em primeiro lugar para canal de ondas 2D, mas necessita adaptações para um tanque de ondas totalmente 3D, através da implementação de batedores múltiplos com absorção activa, incluindo correcções devido à obliquidade das ondas reflectidas nos batedores.

A técnica de absorção activa é primeiramente testada num canal 2D para o caso de uma onda regular incidente de 1.0 m de altura que interage com um quebra-mar vertical. Três períodos de onda são testados, 5.0, 7.5 e 12.0 s, considerando um canal com fundo horizontal com 10 m de profundidade, para analisar a eficiência da metodologia. As duas técnicas de absorção das ondas na fronteira de sotamar do canal são também analisadas para as mesmas características de onda incidente e comparadas entre si. Na segunda parte, a técnica de absorção activa integrada aos batedores múltiplos com correcção da obliquidade das ondas é analisada para a interacção de uma onda regular de período 7.5s e 1.0 m de altura com dois quebra-mares verticais num tanque 3D, gerando um campo de ondas complexo e totalmente tridimensional.

2. EQUAÇÕES

O escoamento de um fluido incompressível é descrito pelas equações de conservação da massa e de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

onde $i, j=1, 2$ para escoamento 2D e $i, j=1, 2, 3$ para escoamento 3D, u_i são as componentes i da velocidade, t o tempo, p a pressão, ρ a massa volúmica, g_i as componentes da aceleração da gravidade e τ_{ij} o tensor das forças viscosas. As equações URANS são obtidas a partir da decomposição da velocidade e pressão instantâneos das equações de Navier-Stokes, Eqs. 1 e 2, numa componente média e flutuante e da integração no tempo destas equações. A turbulência no escoamento é assim introduzida a partir dos tensores de Reynolds. Um modelo de turbulência permite fechar o sistema de equações e relacionar os tensores de Reynolds com as variáveis médias do escoamento. O modelo κ - ϵ *standard* é o utilizado no presente estudo.

O movimento da superfície livre é definido pela técnica VOF proposta por Hirt e Nichols (1981). O método consiste em identificar a posição da superfície livre através do transporte de um escalar, a fracção de volume, α , que toma o valor 0 no ar e 1 na água. A posição da interface entre os dois fluidos, a superfície livre, é definida pelo valor $\alpha=0.5$.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

3. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico URANS-VOF FLUENT, versão 6.3.26, é utilizado para desenvolver o canal 2D e o tanque 3D de onda. Uma técnica de volumes finitos (Versteeg e Malalasekera, 1998; Perić e Ferziger, 1997) é aplicada para resolver as equações URANS e VOF e as variáveis são definidas no centro dos elementos da malha. As simulações numéricas são realizadas com a versão 2D e 3D do modelo.

A integração no tempo é efectuada com uma formulação implícita e uma discretização no tempo de segunda ordem. Os termos viscosos são discretizados por um esquema de diferenças centradas de segunda ordem. Os termos convectivos são determinados pelo esquema MUSCL, de terceira ordem, e UPWIND de segunda ordem para as equações de conservação de quantidade de movimento e as equações do modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$, respectivamente. A pressão é determinada pelo esquema PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) classicamente utilizado para modelação de propagação de onda no FLUENT (Fluent, 2006). Os dois fluidos, ar e água, são incompressíveis. O modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$, com os coeficientes padrões, é o utilizado pois foi verificado que permite propagar com precisão as ondas tomando em conta os principais efeito e fenómenos devidos ao escoamento turbulento. O algoritmo SIMPLEC (Versteeg e Malalasekera, 1998), acoplado velocidade e pressão, é o utilizado. Os coeficientes de sub-relaxação são iguais a 1 para a quantidade de movimento e o VOF e 0.8 para o modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$. No método VOF, a fracção de volume é determinada pelo esquema HRIC (*High Resolution Interface Capturing*) (Perić e Ferziger, 1997).

Finalmente, são impostas as condições limites seguintes: pressão atmosférica no topo do canal/tanque de onda; gerador de ondas estático à entrada, através do perfil das componentes da velocidade e da fracção de volume correspondente; parede com condição de aderência na estrutura costeira localizada no fim do canal/tanque de ondas; condição de aderência no fundo do canal/tanque de ondas. As condições iniciais são de água parada, com campo de velocidade nulo e pressão hidrostática na água. O passo de tempo para as simulações é da ordem de $T/600$, T sendo o período da onda incidente, e 6 iterações não-lineares são realizadas a cada passo de tempo para reduzir os resíduos de pelo menos 2 a 3 ordens de grandeza, o que se verifica ser suficiente para assegurar a propagação das ondas com precisão (Paixão Conde et al., 2011; Didier et al., 2011; Teixeira et al., 2013).

Estudos anteriores indicam que a propagação das ondas com o modelo numérico definido anteriormente é bem simulada com uma malha Cartesiana ortogonal e com discretização da ordem de 70 segmentos por comprimento de onda na direcção de propagação e 20 segmentos por altura de onda, na direcção vertical na zona de deformação da superfície livre (Paixão Conde et al., 2011; Didier et al., 2011; Teixeira et al., 2013). Um refinamento da malha é realizado perto das paredes (estrutura costeira e fundo do canal/tanque) e nas proximidades do batedor estático, na zona da geração das ondas. A Figura 1 apresenta uma malha do canal de ondas 2D, perto do batedor estático e na zona de superfície livre ($x_2=0$), e no tanque de ondas 3D, onde o plano horizontal e os planos verticais mostram a malha no nível de repouso da água e nas paredes no fim do canal, respectivamente.

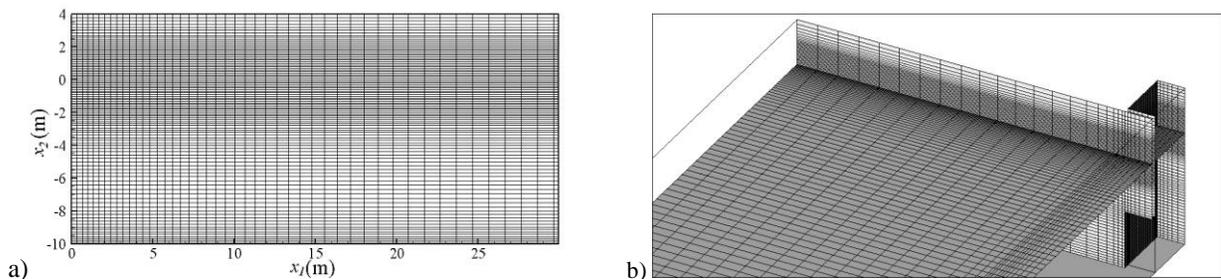


Figura 1. Malha utilizada em canal de ondas 2D (a) e tanque de ondas 3D (b).

3.1 Geração das ondas por batedor estático

A geração das ondas é realizada através um batedor estático na fronteira de entrada do domínio computacional. Os perfis das componentes da velocidade, função do tempo e da profundidade, são impostos assim como a posição da superfície livre correspondente definida pela fracção de volume, sendo 0 em cima e 1 em baixo da superfície livre. No FLUENT, estas condições são impostas recorrendo as UDFs (*User Defined Function*) DEFINE_PROFILE.

3.2 Geração das ondas com absorção activa

A absorção activa é bem conhecida em modelação física pois permite eliminar as ondas reflectidas que chegam ao batedor. A metodologia proposta por Schäffer e Klopman (2000) adapta-se sem problemas a um canal de ondas numérico. É baseada na teoria linear das ondas longas (Dean e Dalrymple, 1991) e consiste em corrigir a velocidade no batedor a partir da altura da onda reflectida em frente ao batedor. Esta técnica foi implementada com sucesso em outros modelos numéricos, tais como o IH-2VOF (Lara et al., 2011) e o OpenFOAM® (Higuera et al., 2013), dois modelos de tipo RANS-VOF, e o SPHyCE (Didier e Neves, 2012), um modelo de tipo SPH.

A componente horizontal da velocidade no batedor (componente da velocidade na direcção da propagação da onda, u_I) é corrigida em tempo real para evitar a re-reflexão das ondas no batedor. A correcção é realizada a partir da determinação da altura da onda reflectida, η_R , que deve ser absorvida, comparando a elevação de superfície livre teórica, η_T , calculada usando a teoria linear das ondas, à elevação da superfície livre em frente ao batedor, η_B :

$$\eta_R = \eta_T - \eta_B \quad (4)$$

A partir da altura da onda reflectida, a correcção de velocidade, u_{corr} , permitindo absorver esta onda é dada por:

$$u_{corr} = \eta_R (g/d)^{1/2} \quad (5)$$

onde g é a aceleração da gravidade e d a profundidade. A velocidade corrigida no batedor é dada pela relação:

$$u_I = u_T - u_{corr} \quad (6)$$

A elevação de superfície livre em frente ao batedor e a correcção de velocidade são determinadas usando a UDF DEFINE_ADJUST e os perfis das componentes da velocidade e da fracção de volume no batedor estático são impostos usando a UDF DEFINE_PROFILE. A absorção activa pode ser aplicada num batedor único e em batedores múltiplos independentes em tanque de onda 3D.

3.3 Absorção das ondas por praia de absorção

A praia de absorção numérica é implementada utilizando a técnica clássica de aumento da viscosidade do fluido, neste caso da água. A viscosidade é aumentada de forma linear da viscosidade da água até um valor alto de $1000 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, numa distância superior a 1.5 comprimentos de onda. O valor da viscosidade é imposto no FLUENT com a UDF DEFINE_PROPERTY. A aplicação desta técnica leva a um aumento do domínio computacional superior a de 1.5 comprimentos de onda, o que envolve necessariamente um custo computacional adicional.

3.4 Absorção das ondas por absorção activa

Esta técnica é exactamente a mesma que a descrita para a absorção activa das ondas no batedor (secção 3.2). Neste caso, as ondas para absorver são só as ondas incidentes e a onda teórica corresponde à superfície livre em repouso, ou seja, a elevação de superfície livre nula. A vantagem desta metodologia é que não necessita de malha adicional para a absorção já que é realizada directamente na fronteira do domínio computacional.

3.5 Batedor múltiplo e correcção da obliquidade das ondas

Num tanque 3D é necessário adaptar as técnicas introduzidas anteriormente (secção 3.2). A geração das ondas é realizada por batedores estáticos múltiplos, independentes, que permitem gerar ondas e absorver (absorção activa) localmente as ondas reflectidas que podem ser diferentes entre si ao longo do conjunto de batedores. Esta técnica de batedores múltiplos pode ser igualmente utilizada para absorção das ondas no fim dum tanque (secção 3.4).

No entanto, as ondas reflectidas podem apresentar uma direcção oblíqua relativamente ao batedor. Neste caso, a correcção de velocidade no batedor, u_{corr} , é calculada tomando em conta a velocidade média tangente ao plano do batedor, u_{tg} , para corrigir o módulo da velocidade, u_{calc} , determinado em frente ao batedor a partir da altura da onda reflectida, η_R (Higuera et al., 2013). Da equação (5) escreve-se o módulo da velocidade dado por:

$$u_{calc} = \eta_R (g/d)^{1/2} \quad (7)$$

Esta velocidade é decomposta em duas componentes horizontais, normal e tangencial ao batedor, de tal forma que a correcção de velocidade pode-se escrever como:

$$u_{corr} = (u_{calc}^2 - u_{tg}^2)^{1/2} \quad (8)$$

A velocidade corrigida no batedor é obtida a partir da relação (6). Quando a equação (8) não tem solução a absorção não está activa.

4. CANAL DE ONDAS NUMÉRICO 2D

A absorção activa no batedor e a absorção das ondas na saída do canal, por praia numérica de dissipação e absorção activa, são aqui analisadas para um canal de ondas 2D. Na primeira configuração, um quebra-mar vertical é colocado no fim do canal. Na segunda configuração, uma praia de dissipação é adicionada ao domínio numérico anterior no final do canal. Esta praia numérica tem uma dimensão de dois comprimentos de onda e a resolução da malha nesta zona de dissipação é feita seguindo os critérios indicados na secção anterior. Na terceira configuração, a absorção activa é imposta no fim do canal, sem acréscimo do domínio computacional. Três ondas regulares incidentes com altura, H , de 1.0 m e período, T , de 5.0, 7.5 e 12.0 s foram testadas, o que corresponde à propagação de onda em águas mais ou menos intermédias. O canal horizontal útil tem uma profundidade de 10 m e um comprimento de $1.5 L$, L sendo o comprimento de onda com valor de 36.6, 65.4 e 113.3 m para os respectivos três períodos de onda. A Figura 2 apresenta o canal de ondas para a configuração com quebra-mar vertical, para $T=7.5$ s (malha com 13132 elementos rectangulares). A superfície livre ao repouso é localizada em $x_2=0.0$ m indicado por SWL (*Still Water Level*) na Figura. A análise da eficiência das ferramentas implementadas é feita através de duas sondas de elevação de superfície livre, G1 e G2, localizadas a 1.0 m do batedor e do fim do canal útil, respectivamente. A amplitude das cristas e cavas de cada onda são analisadas nestas sondas e permite calcular a regularidade da serie temporal através do *root-mean-square* (*rms*) das cristas e cavas.

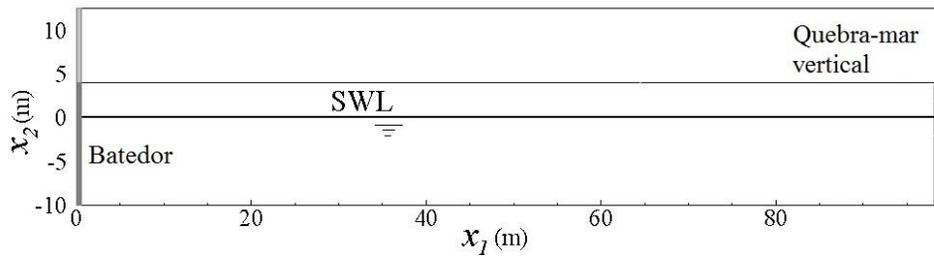


Figura 2. Canal de ondas 2D para uma onda de periodo 7.5 s e com quebra-mar vertical no fim.

4.1 Verificação da absorção activa no batedor

Um quebra-mar vertical é colocado no fim do canal, provocando a reflexão das ondas no batedor o que permite analisar a capacidade da absorção activa implementada no batedor.

As Figuras 3 e 4 apresentam a elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2 sem absorção activa no batedor para a onda incidente com $T=7.5$ s e com absorção activa no batedor, para as ondas incidentes com $T=5.0$ e 12.0 s, respectivamente.

Sem absorção activa, Fig. 3, as ondas reflectidas pelo quebra-mar vertical chegam ao batedor por volta dos 23.0 s e as reflexões no interior do canal começam provocando um aumento constante da altura de onda nas sondas até se verificar divergência numérica no solver do modelo numérico devido a problemas de consistência na condição limite da fronteira de geração e à rebentação energética das ondas.

Estes problemas desaparecem quando o batedor integra a absorção activa. Pode-se verificar na Fig. 4, quer para períodos pequenos, $T=5.0$ s, quer para períodos grandes, $T=12.0$ s, que a altura de onda em frente ao batedor e ao quebra-mar vertical, sondas G1 e G2, respectivamente, é muito regular depois do escoamento transitório, a absorção activa assegurando eficientemente a anulação das ondas reflectidas pelo quebra-mar vertical. A Tabela 1 apresenta uma análise quantitativa da variabilidade da altura das cristas e das cavas para os três períodos de onda incidente através da média da amplitude das cristas e cavas, do *rms* e da razão entre os dois, indicadores da capacidade de absorção do batedor. Confirma-se a óptima actuação da absorção activa para os três períodos de onda, sendo mais eficaz para os períodos maiores (razão *rms* / média da ordem de 0.3%) que os períodos pequenos (razão *rms* / média da ordem de 2.0%), como se poderia esperar visto a absorção activa ser baseada na teoria linear das ondas longas.

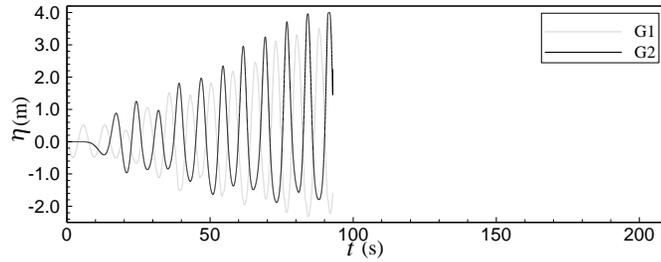


Figura 3. Elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2 sem absorção activa no baterdor, $T=7.5$ s.

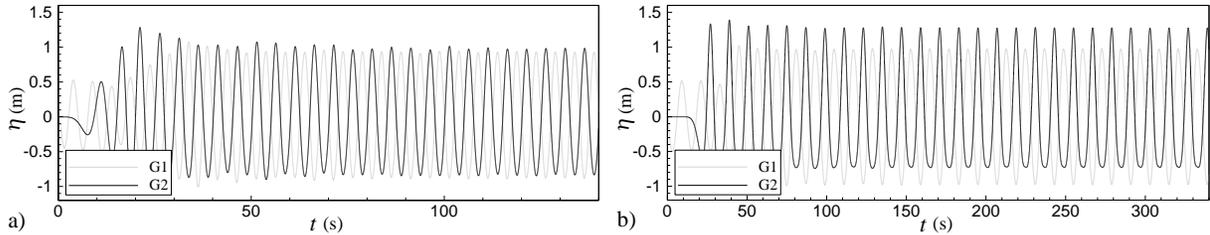


Figura 4. Elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2 com absorção activa no baterdor, $T=5.0$ (a) e 12.0 s (b).

Tabela 1. Média e *rms* da amplitude das cristas e cavas nas sondas G1 e G2 para $T=5.0$, 7.5 e 12.0 s.

Sonda G1	média (m)		<i>rms</i> (m)		<i>rms</i> / média (%)		
	T (s)	Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava
	5.0	0.913	-0.858	0.0152	0.0180	1.67	2.10
	7.5	0.962	-0.940	0.0017	0.0027	0.18	0.29
	12.0	0.973	-0.972	0.0038	0.0055	0.39	0.57
Sonda G5	média (m)		<i>rms</i> (m)		<i>rms</i> / média (%)		
	T (s)	Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava
	5.0	0.953	-0.821	0.0247	0.0109	2.59	1.32
	7.5	1.097	-0.845	0.0045	0.0023	0.41	0.28
	12.0	1.275	-0.728	0.0031	0.0015	0.24	0.21

4.2 Verificação da absorção das ondas na saída do domínio computacional

Compara-se, neste ponto, a capacidade de absorção das ondas no fim do canal 2D, o canal sendo assim “aberto”, para os três períodos de ondas incidentes, utilizando as duas abordagens descritas na secção 3. Na configuração com absorção activa na fronteira de saída do domínio computacional, a malha é composta de 13426 elementos, no caso de uma onda de período 7.5 s. A adição da zona dissipativa ao canal útil aumenta de 10976 o número de elementos da malha, ou seja, o canal passa a ter um total de 24108 elementos (aumento de 80% do número de elementos neste caso). Nas duas configurações a absorção activa no baterdor está ligada.

A Figura 5 apresenta a elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2 para as ondas incidentes com $T=5.0$ e 12.0 s, para a configuração de praia dissipativa. Os resultados obtidos nas mesmas sondas usando a absorção activa são apresentados na Fig. 4 (secção 4.1). As series temporais de elevação de superfície livre são relativamente regulares usando as duas metodologias, mas pode-se observar algumas diferenças na amplitude das cristas e cavas, particularmente para o período de onda de 5.0 s.

A Figura 6 apresenta a amplitude das cristas e das cavas a cada onda na sonda G2 para a praia numérica dissipativa e para a absorção activa na fronteira, para $T=12.0$ s. A estabilidade da amplitude das cristas e das cavas é verificada depois da parte transiente do escoamento com as duas técnicas de absorção das ondas, embora as amplitudes têm valores ligeiramente diferentes, à volta de 0.002 m para as cristas e 0.02m para as cavas.

A Tabela 2 apresenta, para as duas técnicas de absorção e os três períodos de onda incidente, uma análise quantitativa da variabilidade da amplitude das cristas e das cavas através da média, do *rms* e da razão *rms*/média, indicadores da capacidade de absorção da praia dissipativa e da absorção activa. Para poder estimar o desempenho das duas técnicas, os resultados são comparados com o caso de referência de uma onda que se propaga num canal de grande dimensão, com $15L$ de comprimento, usando os mesmos critérios de resolução da malha, no qual não se

utiliza meio de absorção no fim do canal. A diferença relativa da média da amplitude das cristas e cavas, E , e do conjunto, E_{medio} , são igualmente apresentadas. A análise está realizada para a sonda G2.

Embora não seja o foco desta análise, verifica-se, graças à modelação da propagação das ondas no canal de grande dimensão, que a geração e propagação das ondas no modelo numérico é muito regular, com uma razão $rms/média$ para as cristas e cavas da ordem de 0.1% para os três períodos de onda.

As duas técnicas de absorção das ondas apresentam um bom desempenho, com uma razão médio do $rms/média$ (média dos valores de $rms/média$ das cristas e cavas) da ordem de 0.16 e 0.5 % para a praia dissipativa e a absorção activa, respectivamente. No caso da absorção activa, o $rms/média$ é maior para o período de 5.0 s (1.5 % para a amplitude das crista) que para os períodos 7.5 e 12.0 s devido à técnica de absorção ser baseada na teoria linear das ondas longas.

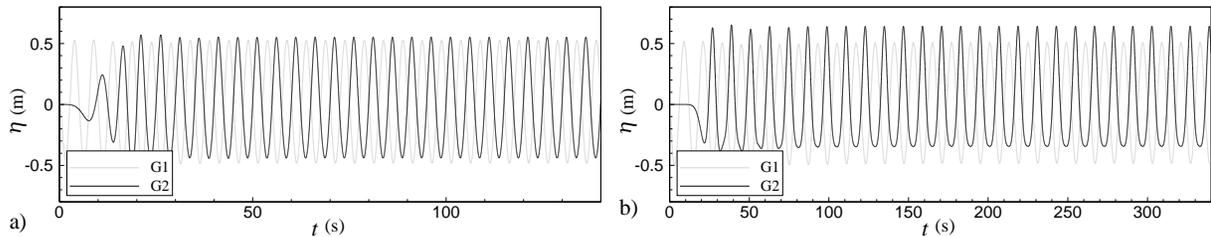


Figura 5. Elevação de superfície livre nas sondas G1 e G2 com praia numérica dissipativa, $T=5.0$ (a) e 12.0 s (b).

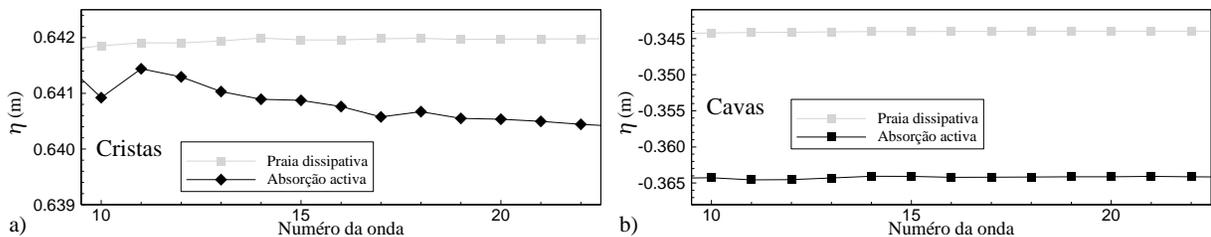


Figura 6. Amplitude das cristas (a) e das cavas (b) a cada onda na sonda G2 para a praia numérica dissipativa e a absorção activa na fronteira, $T=12.0$ s.

Tabela 2. Média e rms da altura das cristas e na sonda G2 para o canal de grande dimensão, a praia numérica dissipativa e a absorção activa na fronteira, para $T=5.0, 7.5$ e 12.0 s.

Propagação de ondas no canal de grande dimensão										
		média (m)		rms (m)		$rms / média$ (%)				
T (s)		Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	
5.0		0.549	-0.456	0.00089	0.00064	0.16	0.14			
7.5		0.566	-0.441	0.00018	0.00022	0.03	0.05			
12.0		0.643	-0.359	0.00026	0.00019	0.04	0.05			
Praia numérica dissipativa										
		média (m)		rms (m)		$rms / média$ (%)		E (%)		E_{medio} (%)
T (s)		Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	
5.0		0.552	-0.439	0.00162	0.00092	0.29	0.21	0.50	3.56	2.03
7.5		0.569	-0.425	0.00019	0.00021	0.03	0.05	0.62	3.58	2.10
12.0		0.642	-0.345	0.00048	0.00116	0.07	0.34	0.23	4.03	2.13
Absorção activa na fronteira de saída										
		média (m)		rms (m)		$rms / média$ (%)		E (%)		E_{medio} (%)
T (s)		Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	Crista	Cava	
5.0		0.536	-0.406	0.00819	0.00267	1.53	0.66	2.44	10.85	6.64
7.5		0.554	-0.430	0.00121	0.00154	0.22	0.36	2.08	2.43	2.25
12.0		0.641	-0.364	0.00084	0.00072	0.13	0.20	0.36	1.38	0.87

A comparação com a onda de referência permite definir o desempenho das técnicas de absorção das ondas. No caso da praia dissipativa, o E_{medio} é da ordem de 2 % para os três períodos, mas observa-se que o erro E nas cristas e cavas é significativamente diferente com valores de 0.5 e 2 %, respectivamente. No caso da absorção activa, o E_{medio} depende fortemente do período da onda: é de 6.6 % para o período de 5.0 s e de 0.87 % para o período de 12.0 s. O desempenho da absorção activa é, assim, significativamente dependente do período da onda. O erro global, considerando os três períodos, é da ordem de 2.08 e 3.30 % para a praia dissipativa e a absorção activa, respectivamente.

Assim, as duas técnicas têm as suas vantagens e desvantagens no que diz respeito à dimensão da malha e à absorção das ondas. A praia dissipativa tem uma boa performance, similar para os vários períodos de ondas, mas necessita de um aumento significativo do domínio computacional. A absorção activa tem um desempenho variável conforme o período da onda incidente, sendo mais eficaz para os períodos maiores, e um desempenho um pouco inferior ao da praia dissipativa, mas não necessita de aumentar o domínio computacional, o que induz uma redução significativa do tempo de cálculo, particularmente para aplicações 3D. Para o período de onda 7.5 s, o tempo de cálculo por período de onda é de 680 e 390 s para a configuração com praia dissipativa e a absorção activa, respectivamente.

5. TANQUE DE ONDAS NUMÉRICO 3D COM DOIS QUEBRA-MARES VERTICAIS

Analisa-se, neste ponto, a interacção entre uma onda incidente regular, $T=7.5$ s e $H=1.0$ m, com dois quebra-mares verticais colocados no fim de um tanque de 10 m de profundidade e 35 m de largura (Fig. 7). O quebra-mar 1 tem 20 m de comprimento e está localizado a 98.1 m (1.5L) da linha de batedores. O quebra-mar 2, de 15 m de comprimento, está situado a 123.6 m (1.89L) da linha de batedores. A interacção entre a onda e os dois quebra-mares verticais gera um campo de ondas complexo totalmente 3D. A geração com absorção activa e correcção da obliquidade das ondas é realizada por 7 batedores independentes de 5 m de largura cada. A elevação de superfície livre é adquirida em várias sondas em frente à linha de batedores e em frente aos quebra-mares 1 e 2.

Duas configurações de absorção activa no batedor são analisadas: batedor simples e batadores múltiplos com correcção da obliquidade das ondas.

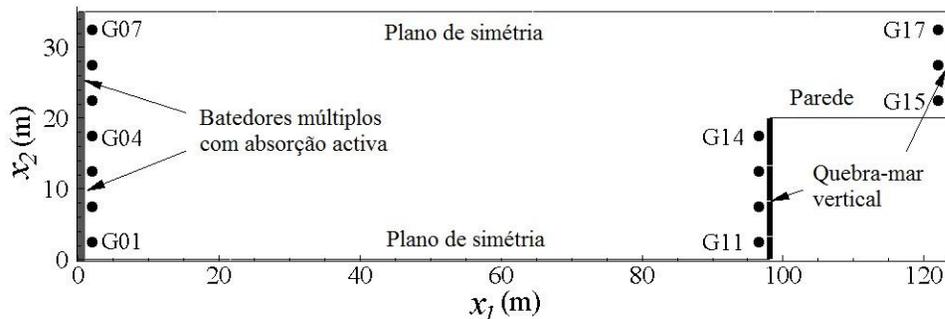


Figura 7. Esquema do tanque de ondas com os dois quebra-mares verticais e posição das sondas.

As Figuras 8 e 9 apresentam, para um batedor único com absorção activa, as series temporais de elevação de superfície livre em frente ao batedor (sondas G01, G04 e G07) e em frente aos dois quebra-mares verticais (G11 e G14 e G15 e G17), respectivamente. As Figuras 10 e 11 apresentam, para um batedor múltiplo com absorção activa, as series temporais de elevação de superfície livre em frente ao batedor (sondas G01, G04 e G07) e em frente aos dois quebra-mares verticais (G11, G12, G13 e G14 e G15, G16 e G17), respectivamente. A análise dos resultados é realizada comparando a elevação de superfície livre nas várias sondas e tomando em conta os resultados do estudo numérico 2D anterior e da literatura (Dean and Dalrymple, 1991): a altura de onda em frente aos dois quebra-mares deve tomar um valor em torno de 2.0 m, devido a presença de uma seixa, *standing wave*. Em frente ao batedor é também de esperar uma altura de onda em torno de 2.0 m devido à superposição da onda gerada e da onda reflectida que chega ao batedor.

A eficiência do batedor múltiplo é evidente quando são comparados os resultados apresentados nas Figuras 8 a 11. Com o batedor único, a elevação de superfície livre ao longo dos dois quebra-mares é muito variável e a altura de onda não é de 2.0 m, indicando a presença de ondas reflectidas no tanque de ondas, i.e. no presente caso, uma onda incidente falsa devido à incorrecta eliminação das ondas reflectidas pelos quebra-mares no batedor. Da mesma forma a superfície livre apresenta grandes diferenças ao longo do batedor, com diferenças de fase de 180° entre a série temporal de elevação de superfície livre da sonda G01 e G07, e não se verifica uma altura de onda em torno de 2.0 m: nas sondas G01 e G07 a altura de onda é da ordem de 4.0 m e 1.0 m, respectivamente. Com um batedor múltiplo, pode-se verificar que a elevação de superfície livre ao longo do batedor é relativamente constante com uma

altura em torno de 2.0 m. Nota-se uma diferença de fase entre a elevação de superfície livre na sonda G01 e G07 devido a diferença de distância entre o bateror e os dois quebra-mares. Em frente aos dois quebra-mares a altura de onda toma um valor em torno de 2.0 m, típico de uma parede totalmente reflectiva e da presença de uma seixa, *standing wave*. Nota-se, no quebra-mar 2, que a superfície livre é quase a mesma nas três sondas G15, G16 e G17, com um valor de 1.85 m. No quebra-mar 1 observa-se uma pequena diferença de altura de onda entre as quatro sondas, a altura diminuindo da sonda G11 (altura de 2.4 m) até a sonda G14 (altura de 1.95 m), ficando quase igual nas duas sondas G11 e G12. Esta variação é provavelmente devida à “esquina” entre o quebra-mar 1 e a parede que junta os dois quebra-mares, que induz a difracção da onda e altera o campo de ondas nesta zona e, conseqüentemente, no tanque.

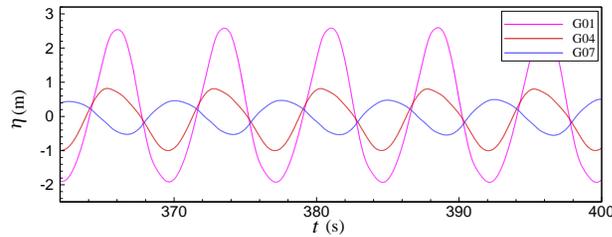


Figura 8. Elevação de superfície livre em frente ao bateror nas sondas G01, G04 e G07 para um bateror único.

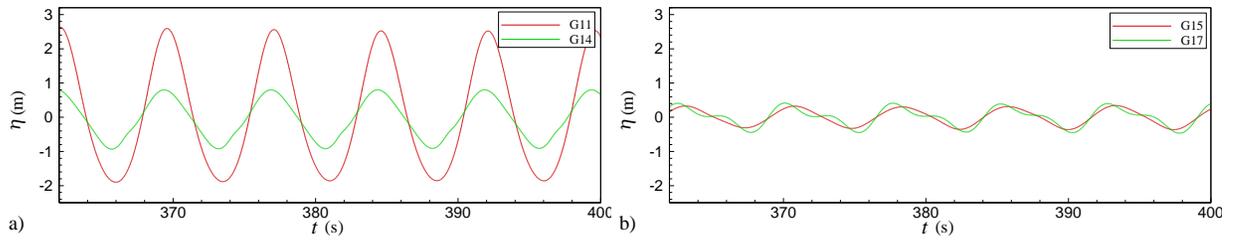


Figura 9. Elevação de superfície livre nas sondas localizadas em frente ao quebra-mar 1, G11 e G14 (a) e ao quebra-mar 2, G15 e G17 (b), para um bateror único.

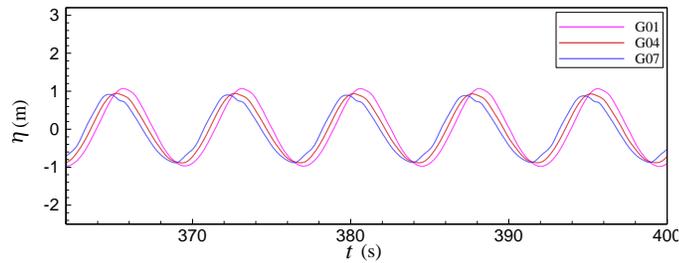


Figura 10. Elevação de superfície livre em frente ao bateror nas sondas G01, G04 e G07, para um bateror múltiplo.

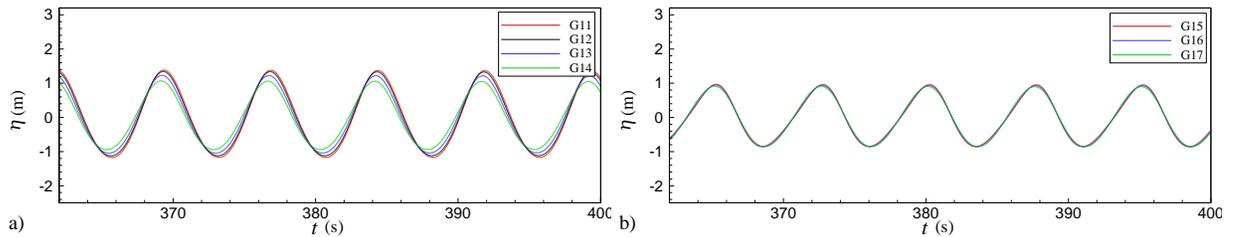


Figura 11. Elevação de superfície livre nas sondas localizadas em frente ao quebra-mar 1, G11 a G14 (a) e ao quebra-mar 2, G15 a G17 (b), para um bateror múltiplo.

6. CONCLUSÕES

Com o objectivo de simular um tanque de ondas numérico 3D realista utilizando modelos URANS-VOF para futuras aplicações de engenharia costeira, várias condições de fronteiras específicas foram implementadas no modelo URANS-VOF 3D FLUENT, versão 6.3.26. Na fronteira de geração das ondas é implementada uma técnica simples mas eficaz de absorção activa acoplada a uma condição de geração das ondas por batedor estático, que permite simultaneamente gerar a onda incidente e absorver as ondas reflectidas que chegam ao batedor. Na fronteira de saída do domínio computacional são implementadas duas técnicas de absorção das ondas: uma técnica clássica de praia numérica de dissipação e uma técnica de absorção activa similar à implementada na fronteira de geração das ondas.

As várias técnicas de absorção implementadas foram analisadas num canal de ondas 2D para três características de ondas incidentes regulares de 1.0 m de altura com período de 5.0, 7.5 e 12.0 s, e verificou-se um bom desempenho global. A eficácia da técnica de absorção activa, quer no batedor quer na saída do domínio computacional, depende do período de onda, como era de esperar sendo esta técnica baseada na teoria das ondas longas.

A técnica de absorção activa foi também aplicada a um tanque de ondas totalmente 3D através da implementação de batedores múltiplos com absorção activa, incluindo correcções de absorção devido à obliquidade das ondas nos batedores. A obliquidade das ondas está ligada à difracção das ondas provocada pelos dois quebra-mares não-alinhados e pela geometria do tanque. O campo de ondas induzido pelos dois quebra-mares para uma onda incidente com período 7.5 s e altura 1.0 m é, assim, totalmente tridimensional. Foi possível verificar que a técnica implementada funciona e permite obter um campo de ondas estabilizado, no qual a altura de onda em frente aos dois quebra-mares verticais é da ordem de duas vezes a altura da onda incidente, valor esperado devido a reflexão nas paredes verticais dos quebra-mares. Verificou-se também que a altura de onda em frente aos batedores toma igualmente uma altura em torno de 2.0 m, valor esperado devido a sobreposição da onda incidente e da onda reflectida pelos quebra-mares.

7. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento concedido no projecto SFRH/BPD/97343/2013 e o apoio financeiro concedido pela Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial – UNIDEMI – através do projeto UID/EMS/00667/2013.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Didier, E., Paixão Conde, J.M., and Teixeira, P.R.F., 2011. “Numerical simulation of an oscillation water column wave energy converter with and without damping”. In Proceedings of 4th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Lisbon, pp. 206-217.
- Didier, E., and Neves, M.G., 2012. “A Semi-Infinite Numerical Wave Flume using Smoothed Particle Hydrodynamics”. IJOPE, Vol. 22, N° 3, pp. 193-199.
- Dean, R.G., and Dalrymple, R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. World Scientific, Singapore.
- Fluent, 2006, Fluent 6.3 User’s Guide, Fluent Inc, USA.
- Higuera, P., Lara, J.L., and Losada, I.J., 2013. “Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models applications to OpenFoam®”. Coastal Engineering, Vol. 71, pp. 102-118.
- Hirt, C.W., and Nichols, B.D., 1981. “Volume of fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries”. J. Comp. Phys., Vol. 39, pp. 201-225.
- Lara, J.L., Rujju, A., and Losada, I.J., 2011. “Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by transient wave group on a beach”. In Proceedings of R. Soc. A., Vol. 467, pp. 1215-1242.
- Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., and Didier, E., 2011. “Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter: Comparison of two numerical codes”. In Proceedings of 21th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 688-674.
- Peric, M., and Ferziger, J.H., 1997. Computational Methods for Fluid Dynamics, 2nd ed. Berlin, Springer.
- Schäffer, H., and Klopman, G., 2000. “Review of multidirectional active wave absorption methods”. J. Waterw. Port. Coast. Ocean Eng., Vol. 126, pp. 88-97.
- Teixeira, P.R.F., Davyt, D.P., Didier, E. and Ramalhais R., 2013. “Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based Navier-Stokes equations”. Energy, Vol. 61, pp. 513-530.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1998. An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman, London.

9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.