

VI SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 12 a 14 de Novembro de 2014

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS REGULARES NUM CANAL TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO O CÓDIGO OPENFOAM

José M. P. Conde^{1,2}, Paulo T. S. Roberto¹, Conceição J. E. M. Fortes²

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT - UNL)
Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial (UNIDEMI)
Campus de Caparica, 2829-516 Monte de Caparica, Portugal

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA)
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
e-mails: jpc@fct.unl.pt; p.roberto@campus.fct.unl.pt; jfortes@lnec.pt

RESUMO

No presente artigo apresentam-se as simulações numéricas feitas utilizando o código OpenFOAM[®], recorrendo ao solver waves2Foam, para simular a propagação de ondas regulares sem rebentação num canal tridimensional. O código numérico resolve as equações de Navier-Stokes em regime transitório e utiliza um esquema do tipo VoF (Volume of Fluid) para identificar a superfície livre. Foi considerada uma onda regular incidente com 1,5 s de período e 10 cm de altura. Esta é uma das condições de entre o vasto conjunto de ensaios em canal de ondas realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) cujo objetivo foi a análise da hidrodinâmica da propagação de onda sobre um fundo de batimetria variável, para várias condições de agitação incidente. São feitas comparações entre os resultados numéricos e os experimentais. Estas comparações incluem: evoluções temporais de sondas de nível em várias localizações ao longo do canal e correspondentes espectros de amplitude; evolução da altura significativa e do período médio das ondas ao longo do canal; evolução temporal das componentes da velocidade em localizações selecionadas no canal e distribuição bidimensional dessas componentes. Constata-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas bem como a diferenças entre a forma de geração de onda entre o numérico e o experimental.

1. INTRODUÇÃO

A modelação física da propagação de ondas em fundos complexos e de profundidade variável é fundamental para um melhor conhecimento e caracterização da forma como a onda se propaga e de como se processa a sua rebentação. É com este objetivo que tem sido realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) um extenso conjunto de ensaios em canal de ondas, para a análise da transformação e rebentação de ondas sobre fundos de batimetria complexa, em várias condições de agitação incidente. As análises temporais, espectrais e estatísticas realizadas contribuem para um melhor conhecimento da hidrodinâmica da propagação e rebentação das ondas e fornecem resultados importantes para a validação de modelos numéricos.

Neste âmbito, Okamoto et al. (2010), Endres et al. (2011), Neves et al. (2011, 2012) e Conde et al. (2012) efetuaram ensaios em canal para condições de agitação regular incidente que originam ondas com e sem rebentação, para diferentes batimetrias de fundo. Na sequência destes trabalhos, Conde et al. (2013a, 2013b) testaram condições de agitação incidente bicromáticas e que conduzem a situações com e sem rebentação e Conde et al. (2013c) consideraram condições de agitação incidente irregulares (espectro JONSWAP) com rebentação, para a mesma batimetria de fundo.

No âmbito da engenharia costeira os códigos de resolução numérica são tradicionalmente baseados em equações do tipo Boussinesq. Recentemente, graças ao aumento da capacidade computacional, os códigos que resolvem as

equações de Navier-Stokes em valor médio, RANS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*), tornaram-se de uso mais generalizado. As equações RANS têm a vantagem de permitir determinar, por exemplo, as características da turbulência que ocorre na zona de rebentação e os esforços resultantes dos impactos das ondas nas estruturas costeiras.

O OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) é um pacote de software (bibliotecas) gratuito e de código fonte aberto (*Open Source*) que pode ser utilizado para resolução de problemas de mecânica dos fluidos computacional, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), entre outros. É desenvolvido pela OpenCFD Ltd (ESI Group) e distribuído pela OpenFOAM® Foundation. Por estar sob a Licença Pública Geral da GNU (GNU GPL), o utilizador tem a total liberdade de executar, adaptar, redistribuir e aperfeiçoar o OpenFOAM®.

Recentemente foram desenvolvidos dois códigos, baseados no OpenFOAM®, para resolver problemas de engenharia costeira, a biblioteca waves2Foam (Jacobsen et al., 2012) e o código IHFoam (Higuera et al., 2013), que apresentam potencial para resolver a grande maioria dos problemas associados a estruturas costeiras.

Neste artigo são apresentadas simulações numéricas de propagação de ondas regulares sem rebentação num canal tridimensional. Estas simulações numéricas correspondem aos ensaios experimentais efetuados por Conde et al. (2012).

2. CÓDIGO OPENFOAM®

O código OpenFOAM® é tradicionalmente compilado em sistema operacional Linux. Nas simulações efetuadas neste trabalho, foi utilizada a versão OpenFOAM® 2.2.1 (OpenFOAM, 2013), instalada em sistema operacional Ubuntu 12.04 LTS.

Nas simulações apresentadas neste artigo foi utilizado o solver waves2Foam, que é baseado no interFoam que permite resolver escoamentos bifásicos com superfície livre. Este solver resolve as equações RANS, Eq. (1), e da continuidade, Eq. (2), para dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, juntamente com a equação de transporte da fração de volume, α , que toma o valor 0 no ar e 1 na água, Eq. (3). O algoritmo é baseado no método VoF (*Volume of Fluid*). Este solver utiliza o método limitador multidimensional universal para solução explícita, MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*), para manter os limites da fração de volume independentes do esquema numérico subjacente, da estrutura da malha. O algoritmo utilizado pelo solver waves2Foam é o algoritmo PIMPLE, trata-se de uma combinação dos algoritmos PISO e SIMPLE (OpenFOAM, 2013).

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T] = -\nabla \cdot p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}] + \sigma_T \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u} \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (3)$$

Nestas equações, $\mathbf{u} = (u \ v \ w)$ é o campo de velocidades em coordenadas cartesianas $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$, p^* é a pressão subtraindo a componente hidrostática, \mathbf{g} a aceleração gravitacional, ρ a massa específica e μ a viscosidade dinâmica molecular. O último termo da Eq. (1) contabiliza o efeito da tensão superficial, onde σ_T é a tensão superficial e κ_α a curvatura da superfície. O tensor das tensões de Reynolds é definido pela Eq. (4) onde μ_t é a viscosidade turbulenta e k a energia cinética turbulenta. Na equação de transporte da fração de volume, Eq. (3), o último termo do membro esquerdo é um termo compressivo estabilizador da superfície livre, sendo \mathbf{u}_r a velocidade relativa (Jacobsen et al., 2012).

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{2}{\rho} \mu_t \left[\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] - \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (4)$$

3. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios em modelo físico

Os testes experimentais foram realizados num canal com 32,57 m de comprimento útil (Figs. 1 e 2). Este canal, construído nos anos 50 do século XX, foi projetado com uma redução da área da secção transversal de modo a melhorar o seu comportamento hidráulico, minimizando o aparecimento de ondas transversais indesejadas. Adicionalmente, esta redução de secção permite obter ondas com maior altura (devido ao seu empolamento na rampa com inclinação 1:11) do que as originadas pelas capacidades limitadas do gerador de ondas regulares original. Atualmente o canal está equipado com um gerador de ondas regulares/irregulares do tipo pistão controlado por uma placa de conversão A/D ligada a um computador pessoal. O gerador dispõe de um sistema de absorção dinâmica de ondas refletidas (Capitão e Conde, 2012), no entanto, nos ensaios realizados no âmbito deste artigo, este sistema não foi ativado, podendo-se deste modo garantir que, em todos os ensaios, as ondas são sempre geradas do mesmo modo, evitando as correções do movimento do gerador de ondas que poderiam diferir de ensaio para ensaio.

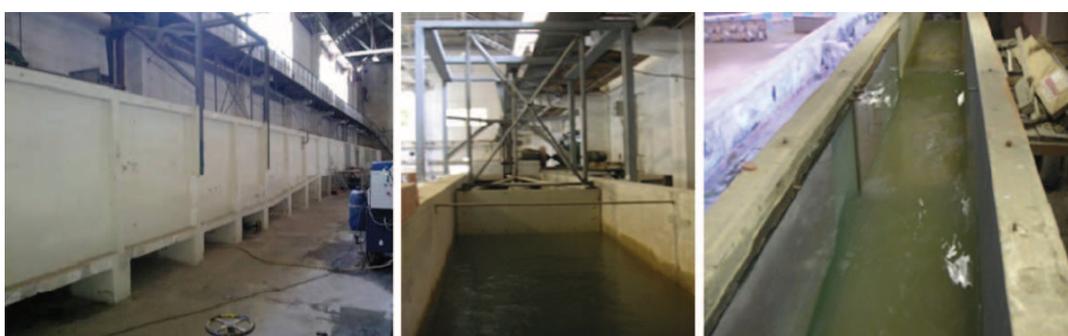


Figura 1. Vista lateral do canal (esquerda), gerador de ondas (centro) e vista de cima do canal (direita).

Após a rampa de declive 1:11 foi construída uma rampa em cimento impermeável com 10 m de extensão e declive 1:22, seguida de uma zona horizontal com 10 m de extensão e outra rampa de declive 1:20 e, por fim, uma zona de enrocamento com declive 1:2. Foram colocados tapetes porosos no declive 1:20 para reduzir a energia das ondas refletidas. O canal em planta tem uma zona inicial com largura constante de 1 m, seguida de um troço convergente, e finalmente, uma zona também com largura constante de 0,6 m (Fig. 2).

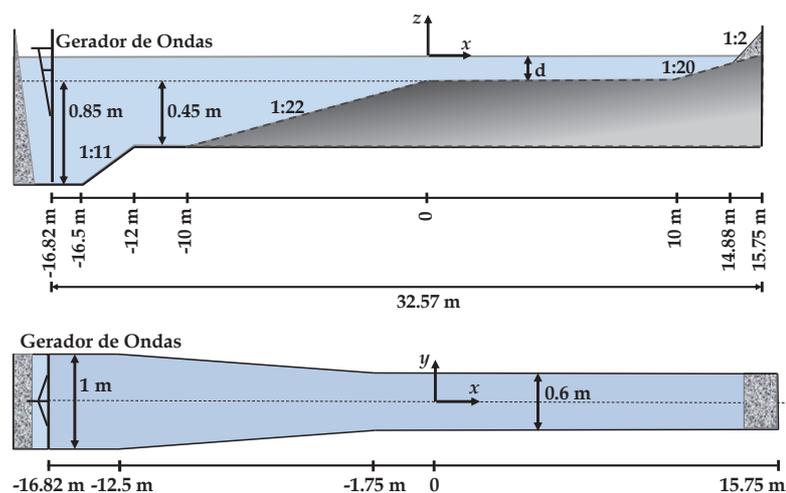


Figura 2. Canal de ondas: perfil longitudinal (cima) e planta (baixo).

Os ensaios experimentais foram realizados em três fases principais, correspondendo a diferentes condições de agitação incidente:

- Ondas regulares, com um de quatro períodos de onda ($T=1,1$ s; 1,5 s; 2,0 s; e 2,5 s) e uma de seis alturas de onda ($H=0,08$ m; 0,10 m; 0,12 m; 0,14 m; 0,16 m e 0,18 m);
- Ondas bicromáticas resultantes da combinação de dois dos períodos das ondas regulares anteriores considerando uma determinada altura de onda, i.e., $T=1,1$ s e 1,5 s e $H=0,05$ m ou 0,08 m;
- Ondas irregulares (espectro JONSWAP) com período de pico $T_p=1,5$ s e quatro diferentes alturas significativas de onda ($H_s=0,12$ m; 0,14 m; 0,16 m e 0,18 m); $T_p=2,0$ s e $H_s=0,14$ m; e $T_p=2,5$ s e $H_s=0,14$ m.

Foram considerados dois níveis de água a sotamar da rampa de declive 1:22 (na origem do referencial $Oxyz$, Fig. 2), $d=0,1$ m e 0,3 m, de modo a obter condições com e sem rebentação, respetivamente.

Nos ensaios experimentais foi efetuada a medição: a) da elevação da superfície livre ao longo do canal; das componentes da velocidade das partículas no centro da coluna de água; e de perfis verticais das componentes de velocidade das partículas em posições selecionadas ao longo do canal.

Os valores de elevação da superfície livre ao longo da direção longitudinal do canal, eixo dos xx , foram medidos com o recurso a oito sondas resistivas alinhadas e espaçadas de 20 cm entre si e solidarizadas a uma estrutura móvel (Fig. 3 - esquerda). Esta estrutura foi colocada em diferentes localizações ao longo do canal de forma a obter medições entre as posições $x=-10$ m e $x=10$ m. Para todos os ensaios experimentais foi colocada uma sonda de nível a 6 m do batedor, após a rampa de declive 1:11, na posição $x=-10,8$ m (Fig. 3 - centro). Esta sonda foi mantida nesta posição para controlar a geração de ondas.

As medições da velocidade foram efetuadas usando um velocímetro acústico Doppler (ADV - *Acoustic Doppler Velocimeter*), o qual fornece as três componentes ortogonais da velocidade instantânea das partículas em suspensão na coluna de água, numa posição de análise (volume de medição). Junto ao ADV foi colocada uma sonda resistiva (Fig. 3 - direita), para que, conjuntamente com a velocidade das partículas, seja também medida a elevação da superfície livre, na mesma secção transversal do canal.



Figura 3. Conjunto de 8 sondas de nível (esquerda), sonda de nível junto ao batedor (centro) e sondas ADV e de nível (direita).

3.2 Caracterização das simulações numéricas

Neste artigo são apresentadas simulações numéricas de propagação de ondas regulares sem rebentação. Estas simulações numéricas correspondem aos ensaios experimentais efetuado por Conde et al. (2012) para $d=0,3$ m, $T=1,5$ s e $H=0,1$ m.

Foram criadas malhas de discretização específicas para cada caso, de forma respeitar o mínimo de 10 elementos por altura de onda e 50 por comprimento de onda. A Fig. 4 apresenta a malha utilizada.

O solver *waves2Foam* utiliza zonas de relaxamento, uma para geração de ondas e outra para a sua dissipação. Este solver dispõe de um conjunto de ferramentas de pré-processamento para a definição: das condições fronteiras e iniciais; das zonas de relaxamento; e parâmetros da onda a ser gerada conforme a teoria de onda selecionada. Possui ainda ferramentas de pós-processamento para análise de resultados obtidos, incluindo a possibilidade de criar ficheiros com sondas de superfície livre e distribuí-las ao longo do domínio para registar a evolução da superfície livre em função do tempo.

A Fig. 5 apresenta o domínio computacional utilizado, indicando as zonas de relaxação: a de geração à esquerda; e a de dissipação à direita. As rampas de declive 1:20 e 1:2 do modelo físico não foram consideradas no canal numérico, tendo sido substituídas pela zona de relaxação de dissipação. A malha é constituída por 322040 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea. A zona de ar acima da superfície livre tem 0.5 m de altura.

Como condições de fronteira foram impostas: condição de velocidade nula para o fundo do canal e para as paredes laterais; para o termo da pressão é considerado gradiente nulo; e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície livre encontra-se em $z=0$, no instante $t=0$.

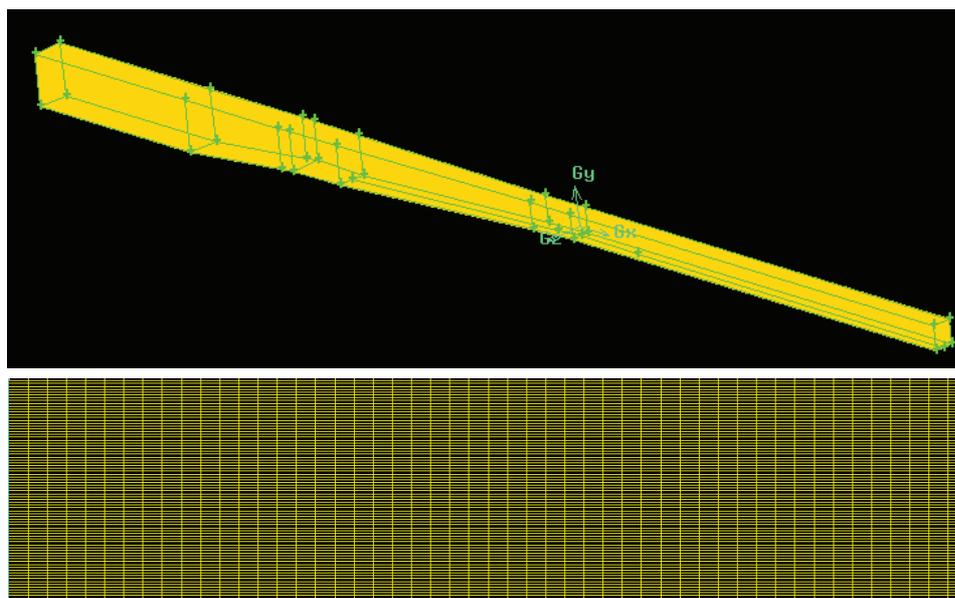


Figura 4. Malha de discretização utilizada na simulação de ondas regulares sem rebentação: totalidade do domínio (cima); e pormenor da malha numa extensão correspondente a um comprimento de onda incidente (baixo).

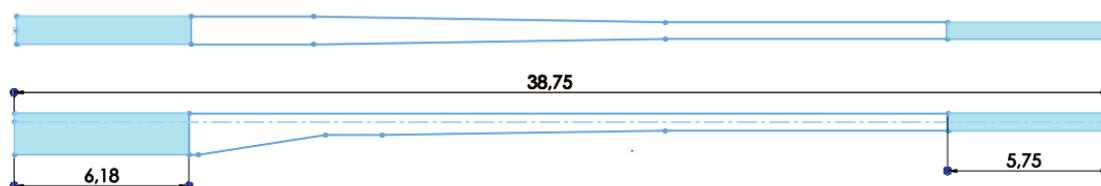


Figura 5. Dimensões (em m) do canal numérico utilizado na simulação de ondas regulares sem rebentação, com a representação das zonas de relaxamento, destacadas a azul.

Para esta simulação foram utilizados os esquemas numéricos e algoritmos de resolução indicados na Tab. 1.

Tabela 1. Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados na simulação de ondas regulares sem rebentação.

Esquemas Numéricos	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos gradientes
	Discretização dos termos Laplacianos
Esquemas de Interpolação	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de Volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
Algoritmos de Resolução	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da Velocidade
	Equação da Fracção de Volume

3.3 Resultados

Na Fig. 6 estão representadas as elevações da superfície nas secções $x=-10$, -5 , -2 , 1 e 5 m para a simulação de ondas regulares sem rebentação, juntamente com os resultados experimentais. Na Fig. 7 apresentam-se os espectros de amplitude para os sinais apresentados na Fig. 6. Os espectros foram obtidos pela aplicação da transformada discreta de Fourier (DFT), sendo a amplitude de referência, a_{ref} : para os valores experimentais igual a metade do valor da altura significativa obtida na sonda posicionada em $x=-10$ m, ou seja, $H_{sref}=0.119$ m; e para a simulação numérica igual a 0.05 m, que correspondente a metade da altura de onda para a mesma secção. Na Tab. 2 estão os valores numéricos das amplitudes correspondentes às frequências principais e harmónicas apresentadas na Fig. 7. Na Fig. 8 está representada a evolução da altura significativa, H_s , e do período médio, T_{av} , ao longo do canal, tanto para o caso experimental como para o caso numérico.

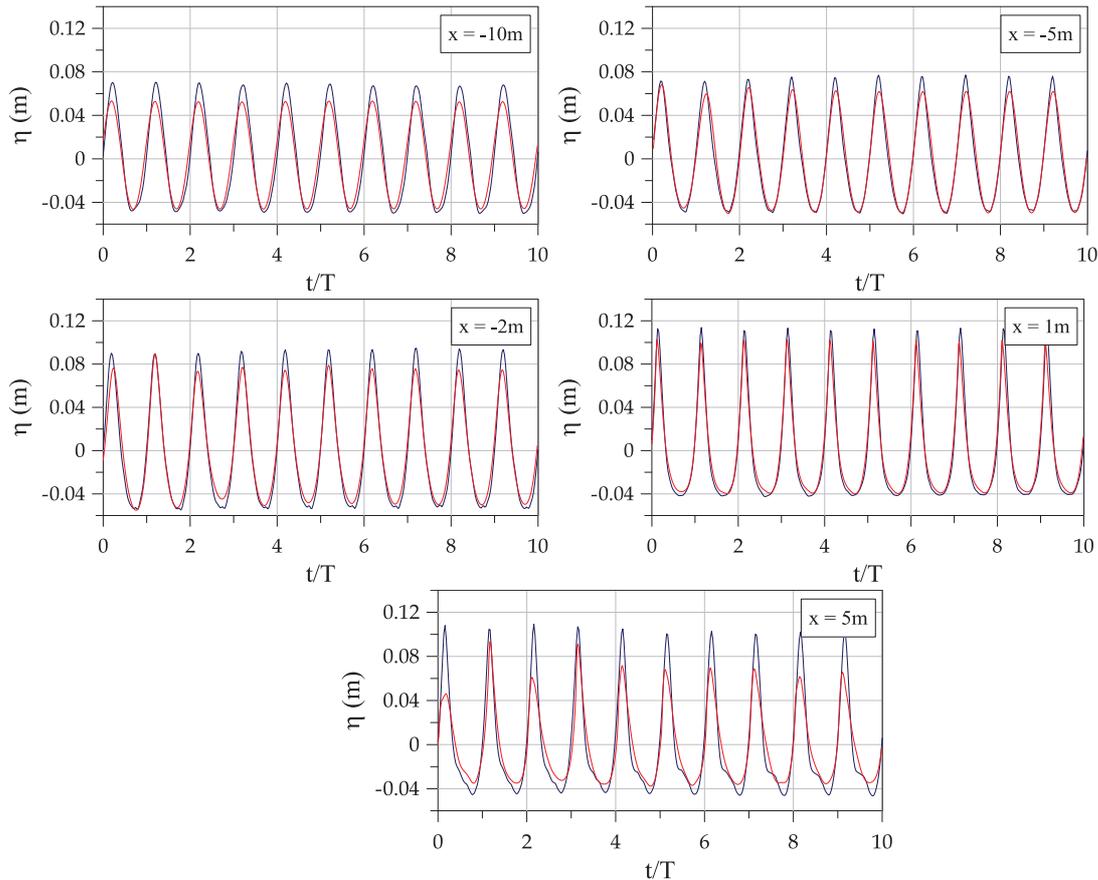


Figura 6. Elevação da superfície livre, η , para ondas regulares sem rebentação ($d=0,3$ m, $T=1,5$ s e $H=0,1$ m) para diferentes posições ao longo no canal. (vermelho - numérico e azul - experimental).

Pela observação das Figs. 6-8, constata-se que em ambos os casos, numérico e experimental, se verifica que à medida que a profundidade do canal diminui e estreita, aumenta a amplitude das harmónicas, que para $x=-10$ m eram praticamente inexistentes. As sondas de superfície livre mostram um comportamento semelhante para ambos os casos, no entanto o caso numérico apresenta sempre uma menor amplitude. Na secção $x=5$ m as sondas apresentam um maior distanciamento entre si, a solução numérica apresenta uma maior perda de amplitude.

Verifica-se que em ambos os casos, numérico e experimental, ocorre um aumento da altura significativa ao longo do canal devido ao efeito da redução de área da secção transversal e da diminuição da profundidade. No caso numérico, a partir de $x=5$ m verifica-se que a altura significativa começa a diminuir, ao contrário do caso experimental, sendo que esta perda de altura pode ocorrer devido à dissipação de energia ao longo da malha, o que significa que esta deveria ser mais refinada. Verifica-se ainda que a simulação numérica não apresenta as oscilações ao longo do canal verificadas no caso experimental, este facto mostra que a zona de dissipação está a dissipar as ondas no fim do canal com eficácia. Nos dados experimentais verificou-se que o coeficiente de reflexão, avaliado pelo método de Mansard e Funke (1980) é aproximadamente igual a $0,15$.

Para o período médio, verifica-se que ao contrário do caso experimental onde o período permanece constante, no caso numérico ocorre um ligeiro aumento ao longo do canal, bem como algumas oscilações. Este resultado pode ser explicado pelo facto de no caso numérico ter sido utilizado uma frequência de aquisição de dados de 5Hz, inferior aos 25Hz utilizados no caso experimental, o que provoca uma maior imprecisão no tratamento dos dados numéricos.

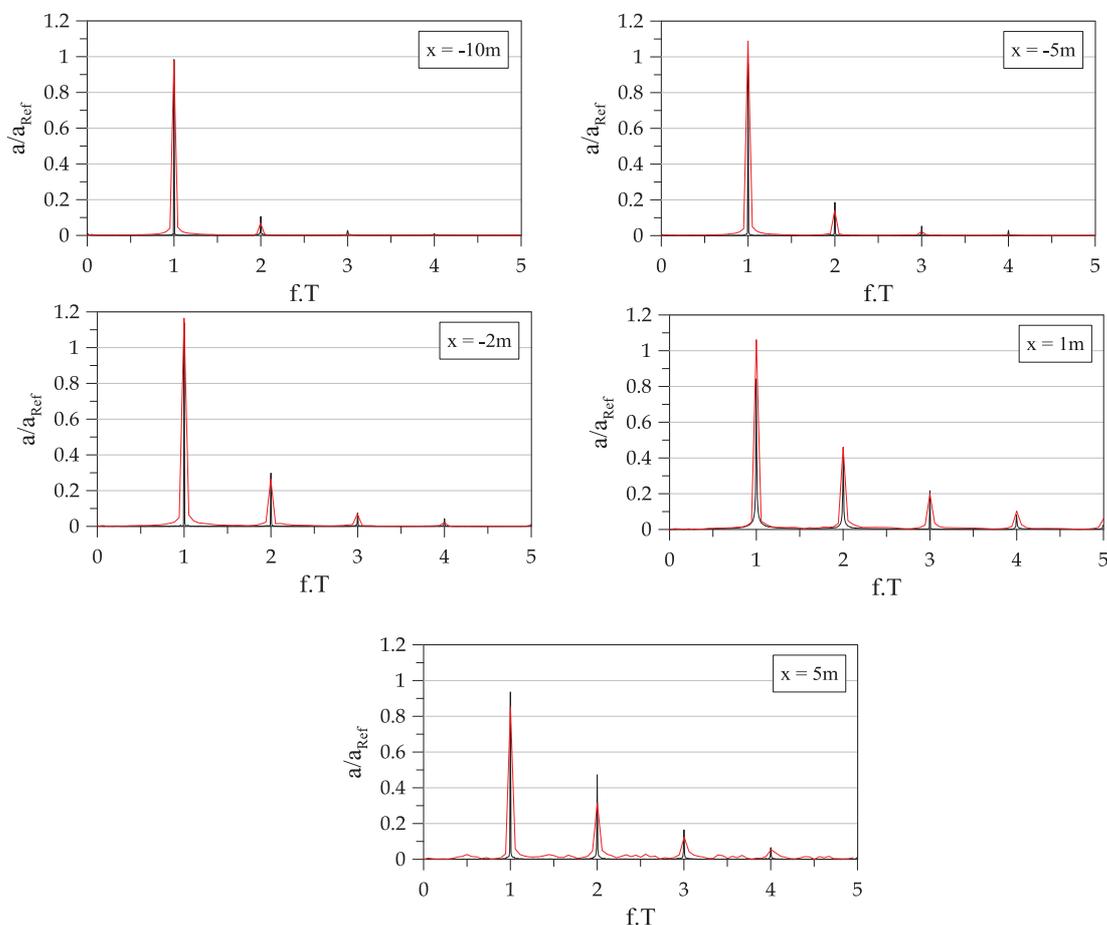


Figura 7. Espectros de amplitude para ondas regulares sem rebentação ($d=0,3m$, $T=1,5s$ e $H=0,1m$) para diferentes posições ao longo no canal. (vermelho - numérico e preto - experimental).

Tabela 2. Valores obtidos nos espectros de amplitude.

f.T	Caso Numérico				Caso Experimental				x(m)
	1	2	3	4	1	2	3	4	
a/a_{ref}	0.978	0.0697	0.0071	0.0004	0.984	0.106	0.0279	0.0107	-10
	1.09	0.141	0.0229	0.0045	0.962	0.185	0.053	0.0298	-5
	1.16	0.264	0.0299	0.0208	1.14	0.297	0.0757	0.0436	-2
	1.06	0.460	0.1986	0.1024	0.84	0.405	0.217	0.0818	1
	0.852	0.315	0.125	0.0546	0.936	0.472	0.165	0.0653	5

Na Fig. 9a) está representada a comparação da evolução das três componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos. Observar-se que: para a componente V_x os resultados obtidos nesta simulação são bastante próximos dos experimentais; para a componente V_y a velocidade é praticamente nula no caso numérico, como seria de esperar face à forma como a onda foi gerada; para a componente V_z , verifica-se que no caso numérico a amplitude é ligeiramente superior à obtida experimentalmente, tomando valores próximos dos obtidos para V_x , o que mostra que a onda simulada tem características lineares que diferem da onda experimental.

Na Fig. 9b) faz-se uma representação num diagrama hodógrafo da distribuição das componentes da velocidade nos planos xy , xz e yz para a secção $x=-10m$. É então visível que, para o plano xz , no caso experimental, as componentes da velocidade geram uma órbita elíptica, enquanto para a simulação numérica, a órbita é praticamente circular, pois as componentes V_x e V_z tomam valores aproximados ao longo do tempo. Para os planos xy e yz

observa-se uma trajetória linear em ambos os casos, pois para o caso experimental a componente V_y toma valores próximos do 0 e no caso numérico a componente V_y é praticamente nula.

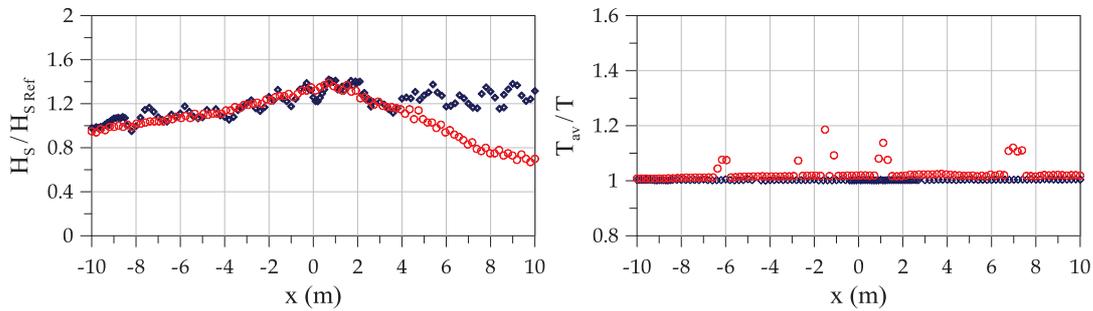


Figura 8. Altura significativa, H_s , e período médio, T_{av} , para ondas regulares sem rebentação ($d=0,3m$, $T=1,5s$ e $H=0,1m$) ao longo no canal. (vermelho - numérico e azul - experimental).

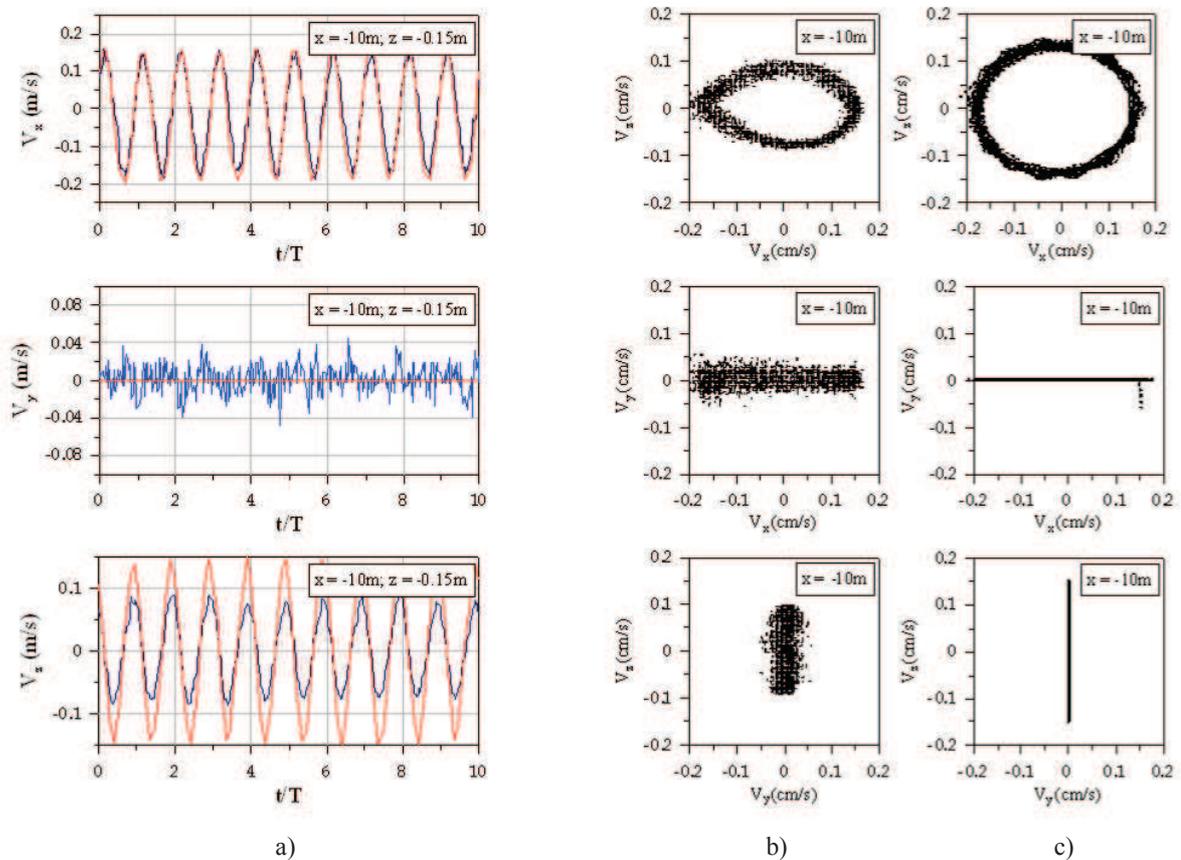


Figura 9. a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, para a posição $x=-10$, $y=0$ e $z=-0,15m$ (vermelho - numérico e azul - experimental); Distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos xy , xz e yz para a mesma posição: b) experimental; e c) numérico.

Na Fig. 10, encontra-se representada a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano xz para diferentes posições ao longo do canal de ondas. Verifica-se que no estudo experimental as orbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal, consequência directa da diminuição da profundidade e do estreitamento, verificando-se mesmo o achatamento para $x=-2m$. No caso da simulação numérica, verifica-se que para a posição de $x=-10m$ as partículas possuem orbitas praticamente circulares e que estas orbitas se vão tornando elípticas e mais alongadas ao longo do domínio, tal como no caso experimental. No entanto, uma análise mais atenta permite verificar que, embora achatadas, as distribuições são diferentes, particularmente para V_x negativo e $V_z \sim 0$.

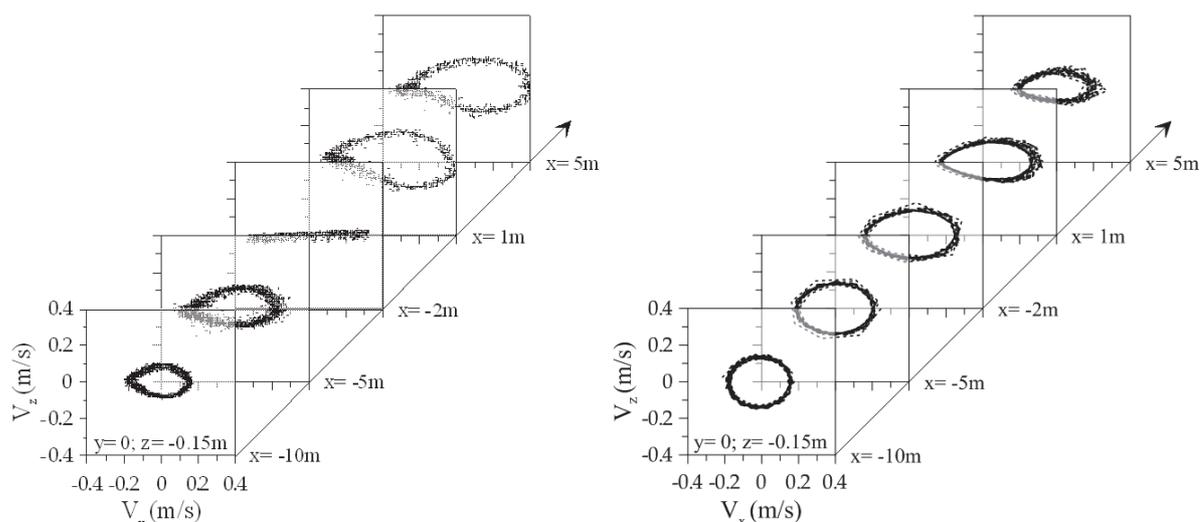


Figura 10. Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano xz do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), para as posições $x=-10,-5,-2,1$ e 5 , $y=0$ e $z=-0,15$ m.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se as simulações numéricas feitas utilizando o código OpenFOAM®, recorrendo ao solver waves2Foam, para simular a propagação de ondas regulares sem rebatimento num canal tridimensional.

Foi considerada uma onda regular incidente com 1,5 s de período e 10 cm de altura. Esta é uma das condições de entre o vasto conjunto de ensaios em canal de ondas realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) cujo objetivo foi a análise da hidrodinâmica da propagação de onda sobre um fundo de batimetria variável, para várias condições de agitação incidente. Foram feitas comparações entre os resultados numéricos e os experimentais.

Constatou-se que, em ambos os casos, numérico e experimental, se verifica que à medida que a profundidade do canal diminui e estreita, aumenta a amplitude das harmónicas. As sondas de superfície livre mostram um comportamento semelhante para ambos os casos, no entanto, o caso numérico apresenta sempre uma menor amplitude. Verifica-se que, em ambos os casos, numérico e experimental, ocorre um aumento da altura significativa ao longo do canal devido ao efeito da redução de área da secção transversal e da diminuição da profundidade. No caso numérico, verifica-se uma diminuição da altura significativa que não ocorre experimentalmente, este efeito pode ser devido a malha de discretização insuficientemente refinada. Verifica-se ainda que, a simulação numérica não apresenta as oscilações ao longo do canal verificadas no caso experimental e este facto mostra que a zona de dissipação está a dissipar as ondas no fim do canal com eficácia.

Na comparação da evolução das três componentes da velocidade em função do tempo pode observar-se que: para a componente V_x os resultados obtidos nesta simulação são bastante próximos dos experimentais; para a componente V_y , a velocidade é praticamente nula no caso numérico, como seria de esperar, face à forma como a onda foi gerada; para a componente V_z , verifica-se que no caso numérico a amplitude é ligeiramente superior à obtida experimentalmente, tomando valores próximos dos obtidos para V_x , o que mostra que a onda simulada tem características lineares que diferem da onda experimental.

Pela representação num diagrama hodógrafo da distribuição das componentes da velocidade nos planos xy , xz e yz , constata-se que as componentes da velocidade geram uma órbita elíptica para os dados experimentais, enquanto para a simulação numérica, a órbita é praticamente circular.

Pela distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano xz para diferentes posições ao longo do canal de ondas, verifica-se que no estudo experimental as órbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal, consequência direta da diminuição da profundidade e do estreitamento, verificando-se mesmo o achatamento para $x=-2$ m. No caso da simulação numérica, verifica-se que para a posição de $x=-10$ m as partículas possuem órbitas praticamente circulares e que estas órbitas se vão tornando elípticas e mais alongadas ao longo do domínio, tal como no caso experimental. No entanto, uma análise mais atenta permite verificar que, embora achatadas, as distribuições são diferentes, particularmente para V_x negativo e $V_z \sim 0$.

Conclui-se que os resultados numéricos obtidos apresentam valores próximos dos experimentais. As diferenças verificadas são atribuíveis a imprecisões numéricas bem como a diferenças entre a forma de geração de onda entre o numérico e o experimental.

5. AGRADECIMENTOS

Os resultados experimentais apresentados foram obtidos no âmbito da licença sabática de José M. P. Conde no LNEC. Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projeto DITOWEC - PTDC/ECM-HID/1719/2012 e do projeto HIDRALERTA - PTDC/AAC-AMB/120702/2010.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Capitão, R. and Conde, J.M.P., 2012. “Implementing the awasys wave absorption system in a peculiar wave flume.” Proc 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection – Coastlab12, Ghent, Belgium.
- Conde, J.M.P., Reis, R., Fortes, C.J.E.M. and Neves, D.R.C.B., 2012. “Wave propagation on a flume: Physical modeling”. Engenharia Térmica (Thermal Engineering), Vol. 11, pp. 22-29.
- Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Didier, E., Lemos, R. and Reis, R., 2013a. “Physical modelling of bichromatic wave propagation and wave breaking in a wave flume”. In Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Lisbon, Portugal.
- Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Didier, E., Lemos, R. and Reis, R., 2013b. “Ensaios experimentais de ondas bicromáticas com e sem rebentação”. In Proc. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Bilbao, España.
- Conde, J.M.P., Fortes, C.J.E.M., Lemos, R. e Reis, R., 2013c. “Ensaios experimentais de ondas irregulares com rebentação”. In Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, Portugal.
- Endres, L., Neves, D.R.C.B., Didier, E., Fortes, C.J.E.M. e Okamoto, T., 2011. “Avaliação do desempenho de modelos numéricos na simulação de ondas ao longo de um canal de ondas”. In Proc. Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia CMNE2011, Coimbra, Portugal.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013. “Realistic wave generation and active wave adsorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®”. Coastal Engineering, Vol. 71, pp.102-118.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J., 2012. “A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®”, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 70, pp. 1073-1088.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., 1980. ‘The measurements of incident and reflected spectra using a least squares method’. Proc. 17th International Conference of Coastal Engineering, Sidney, Australia, pp.154–172.
- Neves, D.R.C.B., Endres, L., Fortes, C.J.E.M. and Okamoto, T., 2011. “Physical modelling of wave propagation and wave breaking in a wave channel”. In Proc. 5th SCACR International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Germany.
- Neves, D.R.C.B., Endres, L., Fortes, C.J.E.M. and Okamoto, T., 2012. “Directional spreading model in a wave channel: Wave propagation and wave breaking”. Ocean Engineering, Vol. 55, pp. 148-160.
- OpenFOAM, 2013. OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox User Guide. Version 2.2.1.
- Okamoto, T., Fortes, C.J.E.M. and Basco, D.R., 2010. “Bore Propagation Speed at the Termination of Wave Breaking”. In Proc. 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China.

7. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste paper.