

Simulação numérica da interacção onda-cilindro utilizando o código OpenFOAM

J. Conde⁽¹⁾ e T. Moreira⁽¹⁾

(1) UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. jpc@fct.unl.pt.

Resumo: No presente artigo apresentam-se as simulações numéricas feitas, utilizando o código OpenFOAM®, para a interacção de uma onda regular com um cilindro horizontal totalmente submerso, colocado paralelamente à crista das ondas incidentes, com o seu eixo a 3 raios de profundidade. O código numérico utilizado resolve as equações de Navier-Stokes em regime transitório e utiliza um esquema do tipo VoF (Volume of Fluid) para identificar a superfície livre. É estudada a dependência da solução face ao refinamento da malha e feita a comparação dos resultados obtidos com dados experimentais e de outros códigos numéricos. São apresentadas: a elevação da superfície livre nas proximidades do cilindro; perfis de velocidade em localizações seleccionadas ao longo do canal; e o campo de velocidades nas proximidades do cilindro. Constatou-se uma boa correspondência entre os resultados obtidos no âmbito deste trabalho com os experimentais e os obtidos por outros códigos numéricos.

Palavras-chave: Interacção onda-cilindro, Simulação numérica, OpenFOAM, Navier-Stokes, Volume of Fluid.

1. INTRODUÇÃO

A interacção entre ondas regulares e um cilindro circular submerso, com o eixo paralelo às cristas das ondas incidentes, tem sido estudada analiticamente, experimentalmente e numericamente por muitos autores. O estudo da interacção entre as ondas de superfícies e corpos totalmente submersos é relevante em muitas aplicações de engenharia, como por exemplo: quebra-mares submersos; e alguns dispositivos de aproveitamento de energia das ondas. A presença de um obstáculo submerso próximo da superfície livre pode originar ondas reflectidas e ondas transmitidas modificadas. Estas dependem das características da onda incidente, da forma geométrica do obstáculo e da profundidade a que este está submerso. A grande variedade de estudos disponíveis tornam-no numa boa escolha para validar códigos numéricos.

O primeiro estudo foi efectuado por Dean (1948) e provou que para a primeira ordem, numa abordagem linear, o cilindro não reflecte qualquer energia independentemente do seu raio, profundidade de submersão ou frequência das ondas; e as ondas transmitidas apenas sofrem mudança de fase e não de amplitude. Uma apresentação detalhada dos diferentes estudos disponíveis da literatura pode ser encontrada em Conde *et al.* (2009a) e Hirdaris *et al.* (2014).

O objectivo deste trabalho é a validação do código OpenFOAM® (OpenCFD, 2010) na simulação da propagação de ondas num canal horizontal e a sua interacção com um cilindro submerso. É estudada a dependência da solução face ao refinamento da malha e feita a comparação dos resultados obtidos com dados experimentais e de outros códigos

numéricos, nomeadamente, os códigos FLUENT e CANAL (Conde *et al.*, 2009b).

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema em análise corresponde ao estudo experimental efectuado por Conde *et al.* (2009a). A Figura 1 mostra um dos ensaios realizados num canal no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Civil, Arquitectura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, Portugal. O canal de ondas tem 20 m de comprimento e 0,70 m de largura. A profundidade da água em repouso é de 0,425 m. Utilizou-se um cilindro de PVC com raio exterior $r = 0,025$ m, colocado horizontalmente a 6,95 m do gerador de ondas, com o seu eixo paralelo à crista das ondas e a 0,075 m ($3r$) de profundidade. Para minimizar os efeitos de profundidade finita e atrito no fundo escolheu-se uma onda com frequência $f = 1,4$ Hz. Para esta frequência o comprimento de onda é $L = 0,796$ m, respeitando por isso a condição de água profunda. A amplitude das ondas considerada neste estudo é $a = 0,0119$ m.



Fig. 1. Ensaio em modelo físico (Conde *et al.*, 2009a).

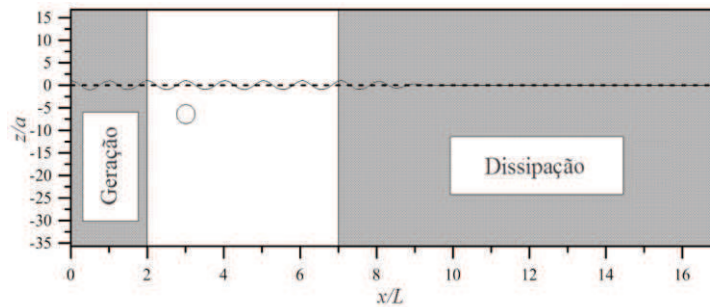


Fig. 2. Domínio de cálculo com indicação das zonas de relaxação relativas à geração e dissipação das ondas.

O canal está equipado com um gerador de ondas do tipo pistão com absorção dinâmica. A energia das ondas é dissipada num perfil de enrocamento com 20° de inclinação na outra extremidade do canal. O coeficiente de reflexão médio para estes ensaios foi de 0,057 (Conde *et al.*, 2009a).

3. CÓDIGO NUMÉRICO

O OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) é um pacote de software (bibliotecas) gratuito e de código fonte aberto (*Open Source*). Este código é tradicionalmente compilado em sistema operativo Linux. Nas simulações efectuadas neste trabalho foi utilizada a versão 1.7.1, instalada em sistema operativo Ubuntu 10.04LTS.

Foi utilizado o solver InterFoam que permite resolver escoamentos bifásicos com superfície livre. Este resolve as equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e da continuidade para dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, juntamente com a equação de transporte da fracção de volume, que toma o valor 0 no ar e 1 na água. 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 fracção de volume independentes do esquema numérico subjacente, estrutura da malha, etc. Mais detalhes sobre o algoritmo de resolução, os esquemas de discretização e de interpolação utilizados podem ser encontrados em Moreira (2012).

4. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

O domínio computacional (Fig. 2) é semelhante ao utilizado por Conde *et al.* (2009b) para o código numérico FLUENT. Trata-se de um canal bidimensional com o limite superior 0,2 m acima da superfície livre em repouso e com 0,425 m de profundidade e tem apenas 17L de comprimento de modo a reduzir o tempo de cálculo. O eixo do cilindro localiza-se em $x_c=3L$. Foram testados dois métodos de geração de ondas: as bibliotecas *waves2Foam* (Jacobsen *et al.*, 2012) e *groovyBC*. Nas simulações efectuadas com a biblioteca *waves2Foam* utilizou-se uma zona de relaxação com

2L de comprimento na direcção de propagação da onda para gerar ondas de primeira ordem. Para a biblioteca *groovyBC* aplicaram-se as equações das componentes da velocidade e da fracção de volume, para a teoria linear das ondas, na fronteira esquerda do domínio. Na fronteira oposta utilizou-se uma praia de dissipação numérica com um comprimento de 10L.

Utilizaram-se malhas bidimensionais mistas com volumes finitos triangulares e rectangulares (Fig. 3) semelhantes às utilizadas por Conde e Didier (2009). A superfície do cilindro é discretizada utilizando 120 segmentos de igual dimensão. A região compreendida entre $2 \leq x/L \leq 7$ e $-1,5 \leq z/a \leq 1,5$ é composta por volumes rectangulares de igual dimensão, fora dessa região os volumes aumentam progressivamente de tamanho na direcção das fronteiras exteriores. Foram consideradas 4 níveis de discretização nessa região: segundo a horizontal, com segmentos de 0,003 m de comprimento (malha I), 0,005 m (malhas II e III) ou 0,01 m (malha IV); segundo a vertical, com segmentos de 0,001 m (malhas I, II e IV) ou 0,0015 m (malha III).

O código FLUENT é também um código RANS-VoF com geração de ondas semelhante à biblioteca *groovyBC*. O código CANAL é um código potencial não linear com um gerador de ondas do tipo pistão.

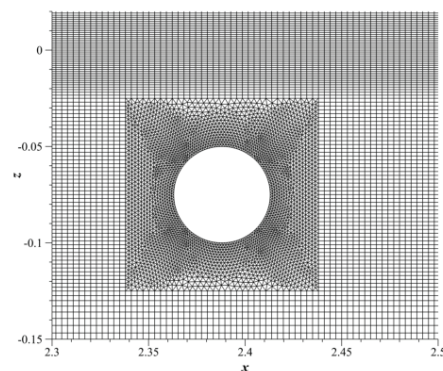


Fig. 3. Pormenor da malha de discretização.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4a apresenta as deformações da superfície livre obtidas para as diferentes malhas em conjunto com os resultados experimentais, enquanto que na

Figura 4b se faz a comparação de diferentes códigos para a malha mais refinada. Observa-se que, de um modo geral, existe concordância entre os resultados apresentados. São claramente visíveis as perturbações originadas na superfície livre após a passagem da onda sobre o cilindro. Não existe grande diferença entre as soluções obtidas pelas

malhas I e II, a solução obtida pela malha IV apresenta demasiada difusão e a solução da malha III apresenta um comportamento intermédio. A utilização da biblioteca *groovyBC* com a malha I mostra que existe dependência da solução com a forma como é gerada a onda.

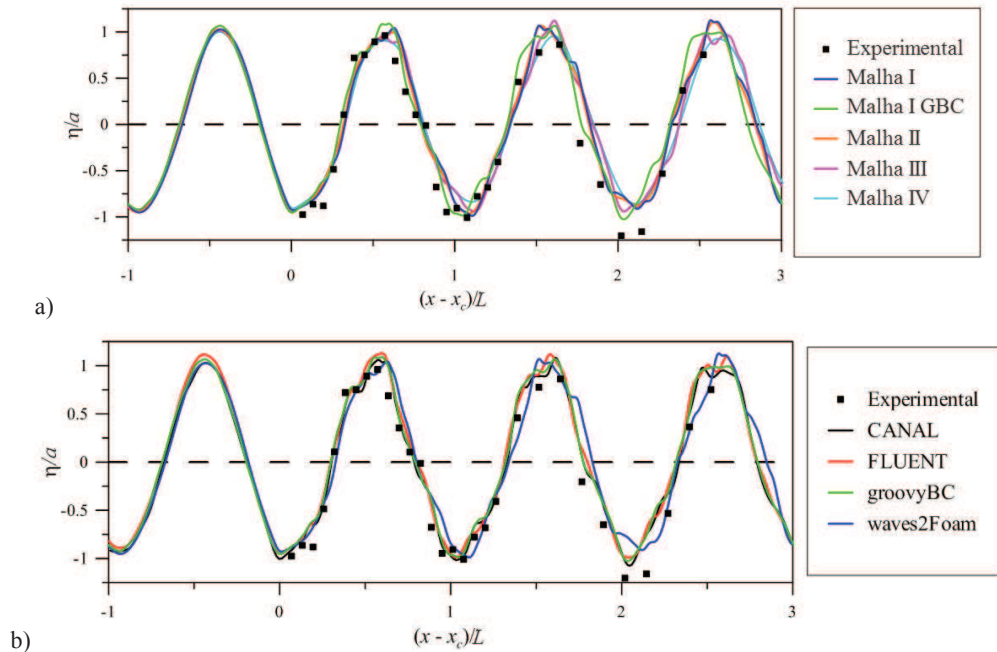


Fig. 4. Deformações da superfície livre: a) comparação de diferentes malhas; b) comparação de diferentes códigos.

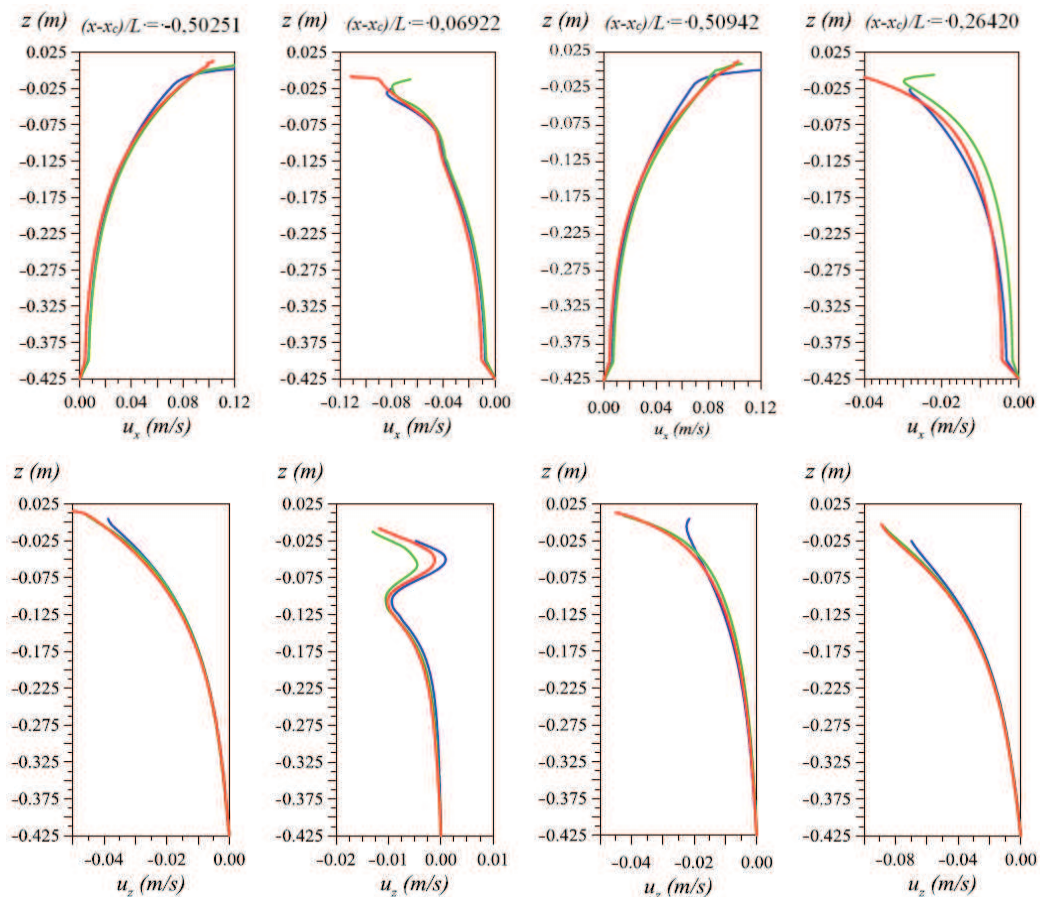


Fig. 5. Perfis de velocidade: verde – groovyBC; azul - waves2Foam; vermelho - FLUENT (Conde et al., 2009b).

Os resultados obtidos por diferentes códigos numéricos (Fig. 4b) utilizando a malha mais refinada apresentam boa concordância entre si. As pequenas diferenças verificadas não podem ser consideradas significativas. Tal como no caso da Figura 4a os resultados evidenciam a dependência da solução com a forma como é gerada a onda.

Na Figura 5 estão representados perfis de velocidade em quatro localizações no canal, à semelhança do feito por Conde *et al.* (2009b). Os resultados são globalmente semelhantes, no entanto existem algumas diferenças nas proximidades da superfície livre, o que mostra dependência da solução em relação ao código numérico e ao processo de geração das ondas.

Na Figura 6 está representada a distribuição do módulo de velocidade em torno do cilindro. Apresentam-se as duas soluções obtidas para o OpenFOAM e a solução obtida com o código FLUENT (Conde *et al.*, 2009b).

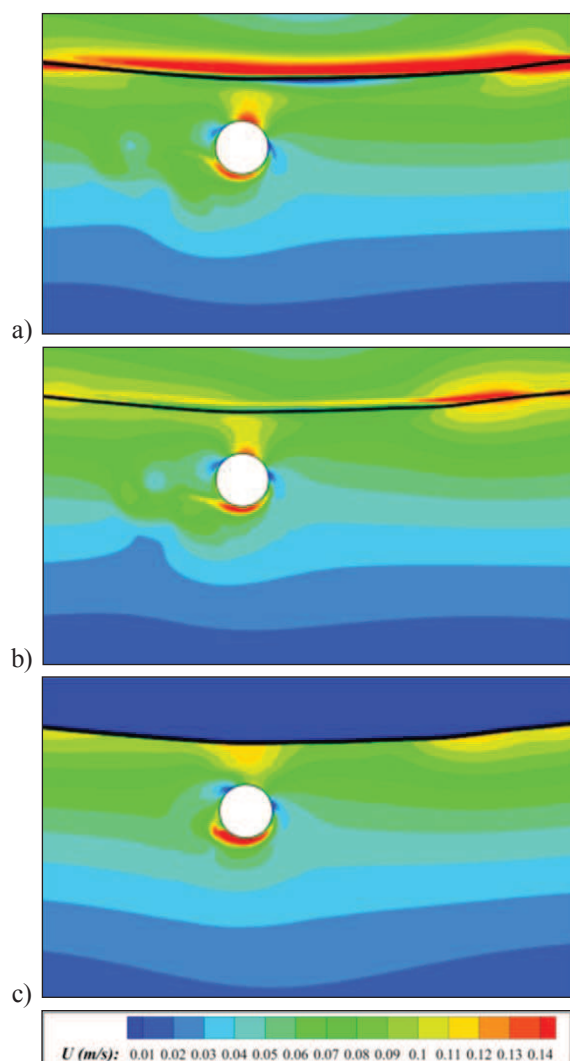


Fig. 6. Distribuição do módulo da velocidade em torno do cilindro no instante representado na figura 4: a) waves2Foam; b) groovyBC; c) FLUENT (Conde *et al.*, 2009b).

Tal como nos resultados apresentados anteriormente, estas figuras ilustram campos com algumas diferenças em aspecto e em valor. Em ambos os resultados do OpenFoam verificam-se variações mais abruptas do campo na parte inferior do cilindro do que na solução obtida pelo FLUENT. Estas diferenças não deverão ser unicamente devidas ao processo de geração das ondas, mas também a diferenças dos próprios modelos/códigos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projecto DITOWEC (PTDC/ECM-HID/1719/2012).

REFERÊNCIAS

- Conde, J.M.P. e Didier, E. (2009). Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante. *Actas 9º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBIM9)*, Las Palmas de Gran Canaria, España, Cap. 5, 88-95.
- Conde, J.M.P., Didier, E., Lopes, M.F.P. and Gato, L.M.C. (2009a). Nonlinear Wave Diffraction by Submerged Horizontal Circular Cylinder. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 19 (3), 198–205.
- Conde, J.M.P., Didier, E. e Teixeira, P.R.F. (2009b). Simulação numérica da interacção de uma onda regular com um cilindro submerso: Comparação de três códigos numéricos. *Actas da III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE2009)*, Bragança, Portugal.
- Dean, W.R. (1948). On the Reflection of Surface Waves by a Submerged Circular Cylinder. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 44, 483-491.
- Hirdaris, S.E., Bai, W., Dessi, D., Ergin, A., Gu, X., Hermundstad, O.A., Huijsmans, R., Iijima, K., Nielsen, U.D. Parunov, J., Fonseca, N., Papanikolaou, A., Argyriadis, K., Incecik, A. (2014). Loads for use in the design of ships and offshore structures. *Ocean Engineering*, 78, 131-174.
- Jacobsen, N.G, Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70, 1073-1088.
- Moreira, T.M. (2012). *Contribuição para a validação do código numérico OpenFOAM em escoamentos com superfície livre*. Dissertação de mestrado, FCT-UNL, Portugal.
- OpenCFD (2010). *OpenFoam – The Open Source CFD Toolbox User Guide (Version 1.7.1)*.