

Propagação de ondas ao longo de um canal inclinado sem rebentação: Estudo numérico e experimental

José M. Paixão Conde^{1,2,3}, Conceição J.E.M. Fortes², Eric Didier^{1,2,4}, Diogo R.C.B. Neves²

¹ Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Dep. Eng. Mecânica e Industrial,
2829-516, Monte de Caparica, Portugal

email: jpc@fct.unl.pt <http://www.demi.fct.unl.pt>

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente,
Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal
jfortes@lnec.pt, edidier@lnec.pt, dneves@lnec.pt

³ IDMEC, Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

⁴ MARETEC, Instituto Superior Técnico,
Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

Sumário

Este trabalho analisa o desempenho de dois códigos numéricos (COULWAVE e FLUENT) na simulação das características das ondas (alturas e componentes espectrais) ao longo da sua propagação num canal com um fundo de batimetria variável, para o qual existem resultados de ensaios experimentais. Um dos modelos resolve as equações de Boussinesq (COULWAVE) e o outro resolve as equações RANS (FLUENT). É efectuada uma análise comparativa dos resultados experimentais e numéricos em termos das séries temporais de elevação de superfície livre e das correspondentes componentes espectrais em certos pontos ao longo do canal. A análise espectral permite caracterizar o desempenho dos modelos e a sua capacidade na simulação dos efeitos não lineares.

Palavras-chave: Propagação de ondas, Equações de Boussinesq, Equações RANS, COULWAVE, FLUENT

1 INTRODUÇÃO

Os modelos baseados nas equações estendidas de Boussinesq permitem uma descrição adequada da evolução das ondas marítimas em zonas de profundidade variável tendo em conta os efeitos de fenómenos como a refração, difracção, rebentação, geração de harmónicas e interacções não-lineares. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo COULWAVE [1]. As equações deste modelo foram deduzidas utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*), i.e., admitindo um dado perfil de velocidades para cada camada ao longo da coluna de água. O número de camadas considerado contribui para a precisão do modelo. De qualquer forma, como as equações são integradas na vertical considerando que em cada camada se admite uma determinada aproximação polinomial, não é possível obter com o modelo o perfil vertical da velocidade das partículas, particularmente importante quando se está interessado no transporte de sedimentos. Por outro lado, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da inclusão de termos na equação original, que dependem de um conjunto de parâmetros que têm de ser calibrados para cada caso de estudo.

Por sua vez, os modelos baseados na equação de Navier-Stokes são frequentemente utilizados e mostram um bom desempenho na simulação das características da onda em fundos de batimetria complexa. Exemplos da utilização deste tipo de modelos é o código FLUENT [2]. Este resolve as equações de Navier-Stokes em valores médios (*Reynolds Average Navier-Stokes* - RANS), em conjunto com um método numérico de seguimento da superfície livre do tipo *Volume of Fluid* (VOF). Este modelo permite simular o escoamento com superfície livre, a rebentação das ondas e a interacção onda-estrutura. Como resultados, podem obter-se valores de diferentes grandezas tais como os campos de velocidades e pressões, e a posição da superfície livre. Permite assim uma descrição mais precisa da propagação de ondas sobre fundos de profundidade variável e da interacção onda-estrutura em que a dissipação de energia por rebentação é efectuada sem recurso a parâmetros que necessitem de ser calibrados para cada caso de teste. Em contrapartida, as desvantagens deste modelo estão relacionadas com o elevado tempo de cálculo e esforço computacional, aos problemas de precisão associados à difusão numérica e aos modelos de turbulência. As soluções obtidas por códigos RANS são também dependentes dos algoritmos de

resolução utilizados e das próprias implementações numéricas, podendo por esta razão variar de código para código.

De modo a avaliar o desempenho destes dois modelos numéricos e aferir as potencialidades e limitações de cada deles, estes foram aplicados a um caso de teste estudado experimentalmente no LNEC. O caso de teste foi idealizado expressamente para este estudo e corresponde à propagação de ondas num canal com um fundo de batimetria variável, para uma condição de agitação que não induz a rebentação das ondas. Estes dois modelos já foram aplicados a condições de agitação incidente e profundidade nas quais se verificou a rebentação das ondas [3]. Devido à complexidade do fenómeno da rebentação, não foi possível inferir se os modelos apresentavam um correcto comportamento antes desta ocorrer. O caso apresentado neste artigo é um caso mais simples, sem rebentação das ondas, e tem por objectivo contribuir para a validação das simulações obtidas por estes dois códigos numéricos para este tipo de problemas. São assim comparados os valores numéricos com valores experimentais correspondentes às séries temporais de elevação da superfície livre. É também efectuada uma análise espectral para avaliação do comportamento não-linear dos modelos.

Neste trabalho, depois desta introdução efectua-se a descrição geral dos modelos numéricos (secção 2) e dos ensaios experimentais realizados no canal do LNEC (secção 3). Na secção 4, as condições de cálculo dos dois modelos numéricos, para o caso estudado experimentalmente sem rebentação, são explicadas e apresentam-se os resultados numéricos e experimentais obtidos, sendo, deste modo, avaliadas as capacidades e limitações de cada modelo numérico. As conclusões são apresentadas na secção 5.

2 MODELOS NUMÉRICOS

2.1 Modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, [1] [4] [5] [6] [7], é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares (a razão entre a amplitude da onda e a profundidade pode ser da ordem até 1) e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do modelo, do tipo de Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e quantidade de movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades, através de funções quadráticas com valores iguais na interface que divide a coluna de água. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior, que é normalmente utilizado na dedução das equações de Boussinesq.

Lynett e Liu, [1] [6] [7], introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade dependentes do tempo para ter em conta as variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

O modelo é assim aplicável desde águas muito profundas até águas pouco profundas incluindo a rebentação. Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby [8] utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são calculadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby [8] refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, dois tipos de condições são aplicadas: reflexão total e radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de Wei e Kirby [8] e para a radiação ou condição de fronteira aberta é utilizado um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), seguindo a metodologia de Kirby *et al.* [4].

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu [1] e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo consistem nas séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

2.2 Modelo FLUENT

O código FLUENT (versão 6.3.26), [2], aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes em valor médio (equações RANS).

A integração no tempo é realizada por um esquema de 2ª ordem. Foi escolhido o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ na sua versão padrão, pois é correntemente utilizado em aplicações de engenharia. Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Os termos convectivos são interpolados pelo esquema MUSCL de 3ª ordem. A pressão é obtida através do esquema de interpolação PRESTO que, de acordo com o guia de utilizador do código [2], é o aconselhado para modelação de escoamentos com superfície livre. Para o acoplamento entre a velocidade e a pressão seleccionou-se o algoritmo SIMPLEC, mais adequado para simulações não estacionárias do que o algoritmo SIMPLE.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VOF, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [9]. Em estudos numéricos anteriores, utilizando o modelo VOF no código FLUENT para modelar interacção entre ondas e estruturas e dispositivos de energia das ondas, [10] [11] [12], foi utilizado o método HRIC (*High Resolution Interface Capturing*) modificado [13] para interpolar a fracção de volume nas faces dos volumes de controlo, este esquema foi especialmente desenvolvido para simulação de escoamento com superfície livre. Verificou-se que este esquema permite uma representação da evolução da superfície livre com grande precisão. Verificou-se ainda que o esquema HRIC não permite modelar a rebentação das ondas quando associado a esquema de integração no tempo de segunda ordem. No entanto, em virtude de no presente caso de estudo não existir rebentação das ondas, utiliza-se o esquema HRIC com um esquema de integração no tempo de segunda ordem.

A geração da onda é feita através de um batedor numérico que consiste na imposição, como condição de fronteira na entrada do domínio computacional, das componentes horizontal e vertical de velocidade e da correspondente amplitude da deformação da superfície livre.

Os coeficientes de sub-relaxação, utilizados no algoritmo SIMPLEC, são iguais a 1 para a velocidade, a pressão e a fracção de volume. Para k e ε , os coeficientes são 0,7.

2.3 Vantagens e desvantagens dos modelos COULWAVE e FLUENT

O modelo COULWAVE, que é um modelo bidimensional em planta, resolve as equações estendidas de Boussinesq utilizando o conceito de multi-camada e permite uma descrição adequada dos fenómenos que intervêm na propagação das ondas em zonas de profundidade variável. No entanto, como para a dedução dessas equações, se admite um dado perfil de velocidade para cada camada presente na coluna de água, não é possível descrever convenientemente o escoamento em zonas onde o efeito da profundidade tem importância (zonas de variação brusca da profundidade, de rebentação, de espraiamento, por exemplo). Por outro lado, os fenómenos de dissipação da energia são introduzidos através de termos adicionados à equação original. No caso particular da rebentação, esta é incluída através da inclusão de um termo de viscosidade turbulenta na equação de conservação da quantidade de movimento. Ora este modelo de rebentação é dependente de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação, que têm de ser calibrados para cada caso de estudo, tornando-se assim uma limitação do modelo numérico.

O modelo FLUENT resolve as equações RANS permitindo simular com precisão escoamentos tridimensionais. O modelo permite obter os perfis verticais da velocidade e da pressão em qualquer secção do domínio de cálculo e modelar a interacção entre ondas e estruturas tornando-se, assim, muito vantajoso na aplicação a diferentes casos de estudo. Neste modelo, a geração da malha é uma etapa primordial da simulação numérica, pois condiciona a estabilidade numérica e a precisão dos resultados. O tempo de cálculo é um factor que limita as aplicações do modelo, particularmente quando se trata de modelar fenómenos não estacionários e tridimensionais.

Face ao exposto, é de referir que o modelo FLUENT apresenta grandes vantagens face ao modelo COULWAVE para estudos do escoamento sobre fundo de profundidade variável, rebentação das ondas ou da interacção ondas-estrutura. Mas por outro lado, o FLUENT, devido ao elevado tempo de cálculo e esforço computacional quando comparado com o COULWAVE, restringe a sua aplicação genérica.

3 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) num canal equipado com um gerador de ondas irregular (Fig. 1a-b). O comprimento útil do canal é de 32,57m pois o bateror encontra-se a 5,9m do início do canal.



Fig. 1 – a) e b) Vistas do canal de ondas utilizado para os ensaios experimentais; c) Sonda junto ao bateror; d) Conjunto de 8 sondas.

O perfil longitudinal do fundo é mostrado de forma simplificada na Fig. 2a, para uma profundidade de água $d=0,3\text{m}$ na origem do sistema de coordenadas (sendo y a coordenada vertical e x a coordenada horizontal). Este perfil consiste em duas zonas de inclinação constante (1:11 e 1:22) até $x=0$, posteriormente uma zona de profundidade constante, seguido de uma rampa de inclinação constante (1:20) e por fim uma zona de enrocamento inclinado (1:2). O canal é convergente em planta (Fig. 2b) desde $x=-12,5\text{m}$ até $x=-1,75\text{m}$, tendo o restante canal largura constante.

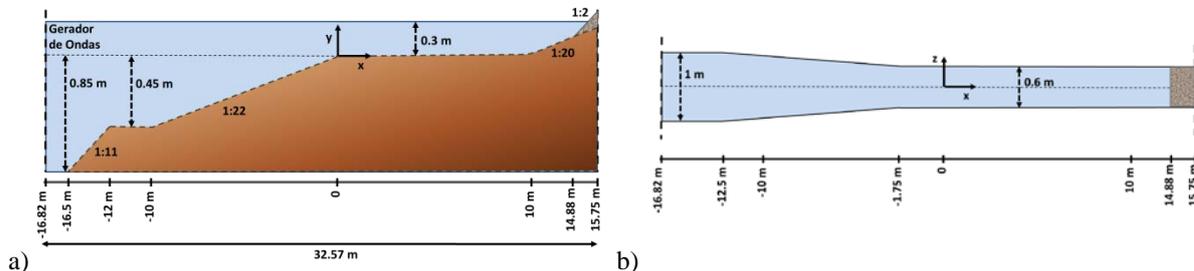


Fig. 2 – a) Perfil do fundo do canal dos ensaios b) Planta do canal dos ensaios.

Em trabalhos anteriores, Neves *et al.* [14], os ensaios realizados neste canal foram efectuados para várias condições de agitação incidente que induziam sempre a ocorrência da rebentação de ondas ao longo do canal. A profundidade em $x=0$ era $d=0,1\text{m}$.

No presente trabalho, a profundidade para $x=0$ é de $0,3\text{m}$ e apenas se considerou uma das condições de agitação que foram testadas para essa profundidade. Essa condição de agitação corresponde a um período de onda regular de $1,5\text{s}$ e uma altura de onda de 10cm . Nesta situação de nível de água e de agitação incidente não se verificou rebentação.

Foi colocada uma sonda a 6m do bateror, para a caracterização das condições de agitação incidente em todos os ensaios, Fig. 1c. A função desta sonda é a de verificar se o gerador de ondas está gerar correctamente a onda incidente.

Efectuou-se a medição dos valores da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas, com o recurso a oito sondas resistivas, separadas de 20cm entre si, Fig. 1d, que foram agregadas a uma estrutura móvel. Esta estrutura foi colocada em 21 posições diferentes de modo a registar valores em vários pontos ao longo do canal. A frequência de amostragem dos ensaios foi de 25Hz .

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

A condição de agitação testada numericamente corresponde a agitação regular e têm as características seguintes: $T=1,5s$, $H=10cm$ para uma profundidade de água de 30cm no topo da rampa ($x=0$), para obter ondas sem rebentação ao longo do canal. Para esta condição, avaliou-se o desempenho dos dois modelos numéricos comparando os respectivos resultados numéricos com os experimentais, correspondentes às séries temporais de elevação de superfície livre em várias sondas. Recorrendo à análise espectral, analisou-se também o comportamento não linear dos modelos.

Os cálculos com o modelo COULWAVE foram efectuados num PC Intel Core i5 de 2,80GHz, com 3,46GB de memória RAM. O modelo FLUENT foi executado num PC Intel Core (TM) i7 CPU 920 de 2,67GHz, com 8,0GB de memória RAM. O Quadro 1 indica o tempo de cálculo dos respectivos modelos numéricos.

Quadro 1 – Características dos testes numéricos.

H (cm)	T (s)	Tempo de CPU	
		FLUENT	COULWAVE
10	1,5	5H30min por período de onda	6min para 300s

4.1 Condições de cálculo

Para o modelo FLUENT, as dimensões da geometria experimental foram reproduzidas no modelo, tal qual são apresentadas na Fig. 2, no que diz respeito à variação do fundo e à variação da largura do canal, até $x=10m$. No fim do canal numérico ($x>10m$) é localizada uma praia numérica de absorção para eliminar a reflexão das ondas. O batedor numérico está localizado na fronteira esquerda do domínio. A geração é realizada utilizando perfis de velocidade deduzidos da teoria linear das ondas. Por esse facto, o modo de geração da onda no canal físico difere do realizado por um batedor tipo pistão. A malha computacional é não uniforme na direcção de propagação (refinamento progressivo enquanto a profundidade diminui) e na direcção vertical (refinamento na zona da superfície livre e no fundo). A malha é refinada na zona da superfície livre, com 50 a 60 elementos por comprimento da onda incidente e 20 elementos entre a cava e a crista. O número total de volumes de controlo é de 563300, usando um plano de simetria longitudinal na direcção do eixo do canal). O passo de tempo é igual a 0,0015 s e foram realizadas 6 iterações não-lineares a cada passo de tempo para resolver as não linearidades. O tempo total simulado foi de 35 s.

No modelo COULWAVE, o domínio de cálculo tem as dimensões 37,2m×1m. Neste caso, o canal é representado com secção constante. A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de $\Delta x=0,05m$. O próprio modelo gera uma malha computacional de diferenças finitas. O número de Courant admitido foi igual a 0,2. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição $x=0$. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos extremos do domínio. Não foi incluído o atrito do fundo. O tempo total simulado foi de 300 s. Os resultados numéricos foram obtidos em todos os nós da malha de cálculo.

4.2 Séries temporais de elevação de superfície

Na Fig. 3 apresenta-se a comparação das series temporais de elevação de superfície livre ao longo do canal obtidas com os modelos COULWAVE e FLUENT e por via experimental.

Como se pode observar, à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidade acontece a transformação na forma da onda. A deformada da superfície livre apresenta características cada vez mais não-lineares. Verifica-se também o aparecimento de harmónicas à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidade.

De uma forma geral, constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais em qualquer das posições das sondas, especialmente em termos do período da onda.

Em maior detalhe, no caso do modelo COULWAVE, as diferenças entre resultados numéricos e experimentais são primeiramente ao nível da amplitude máxima (e também mínima) da elevação da superfície livre. Em geral,

o modelo subestima os valores mais elevados da elevação da superfície livre em todas as secções e especialmente para nas localizações próximas do fim do canal.

No caso do modelo FLUENT, verifica-se uma concordância razoável entre os resultados numéricos e os experimentais. A deformada da superfície livre apresenta características não-lineares com aparição de harmónicas. No entanto, os valores de altura de onda são sistematicamente subestimados. Em maior detalhe, os mínimos de elevação de superfície livre são relativamente bem estimados mas os máximos são subestimados. Estas diferenças são ainda mais evidentes na parte final do canal que corresponde à zona de menor profundidade.

4.3 Análise espectral

A partir das séries de dados numéricos e experimentais de elevação da superfície livre, determinou-se o periodograma e a análise harmónica respectiva que se apresenta na Fig. 4. No Quadro 2 apresentam-se os valores da amplitude correspondentes às frequências de pico e das várias harmónicas.

Da análise destas figuras, verifica-se que de uma maneira geral o comportamento dos modelos FLUENT e COULWAVE são semelhantes aos dos resultados experimentais, isto é, as frequências de pico e as das várias harmónicas de ordem superior calculadas pelo modelo coincidem com as correspondentes dos dados experimentais. Os modelos distribuem a energia pela frequência fundamental e pelas harmónicas seguintes, à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidade. No entanto na maioria das secções os dois modelos subestimam a amplitude relativamente à frequência fundamental e às harmónicas.

Em mais detalhe, e em relação ao modelo COULWAVE, os valores da frequência fundamental em todas as posições são bem simuladas, verificando-se maiores diferenças com os valores experimentais para o caso da 2ª harmónica e principalmente para a 3ª harmónica. O modelo FLUENT tem claramente um melhor comportamento. Em termos de densidade de energia o COULWAVE apresenta sempre valores mais baixos do que os experimentais especialmente nas últimas secções.

Quadro 2 – Amplitudes das respectivas componentes do espectro (cm) para $T=1,5$ s e $H=10$ cm, para $x=-8,0$, $-1,0$ e $1,0$ m.

	$x=-8,0$ m			$x=-1,0$ m			$x=1,0$ m		
	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
Experimental	5,495	0,624	0,399	6,378	1,698	0,489	6,082	2,889	1,339
COULWAVE	5,078	0,462	0,054	4,732	1,052	0,244	4,626	1,392	0,405
FLUENT	5,112	0,519	0,076	5,792	1,553	0,417	5,417	2,156	0,811

5 CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentou-se a aplicação de dois modelos numéricos, COULWAVE e FLUENT, à propagação de ondas num canal com um fundo de batimetria variável, para uma condição de agitação que não induz a rebentação das ondas. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, obtidos expressamente para este estudo, nomeadamente no que se refere às séries temporais de elevação de superfície livre ao longo do canal. Efectuou-se também uma análise espectral dos resultados obtidos.

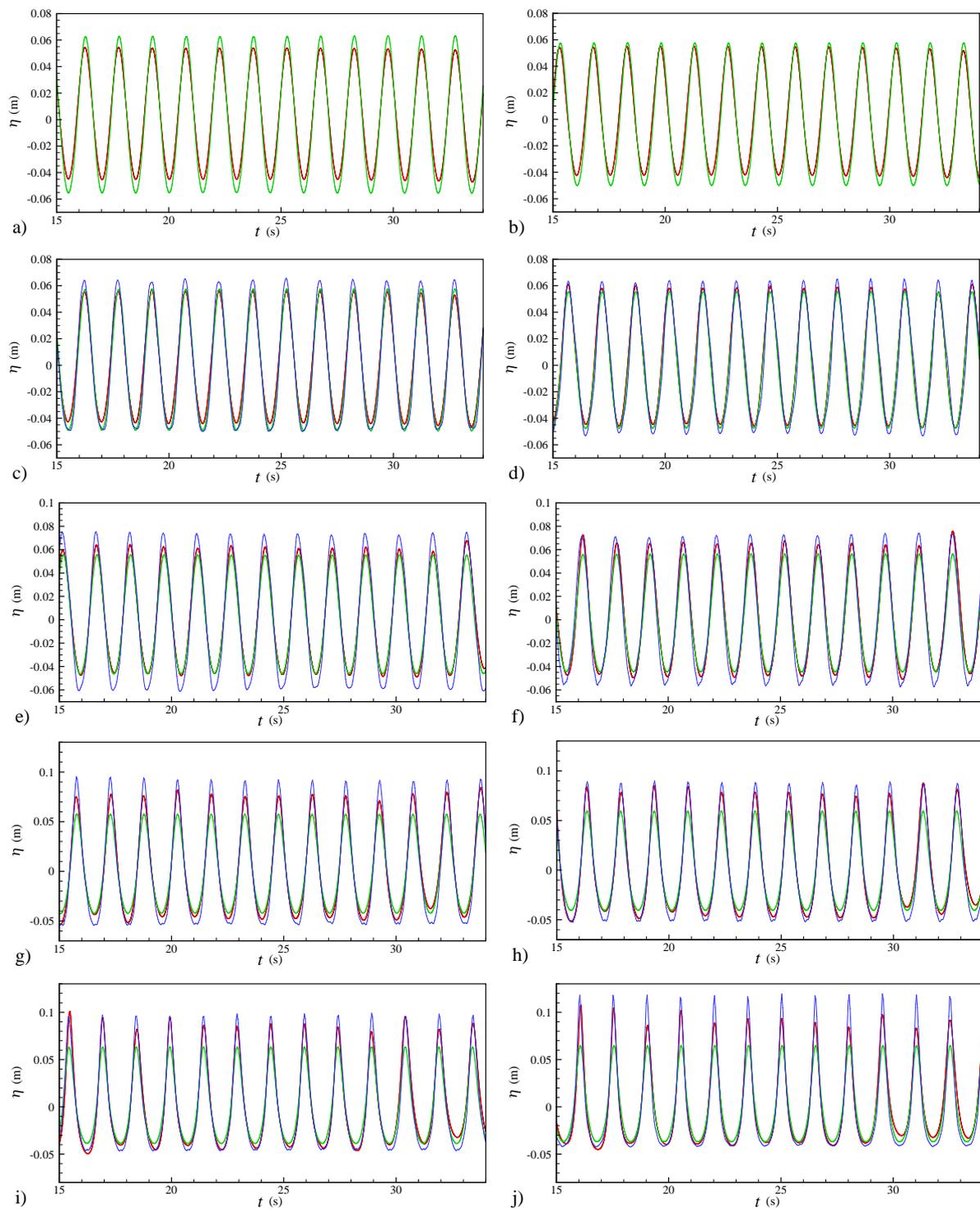


Fig. 3. Séries temporais de elevação de superfície livre para $T=1,5s$ e $H=10cm$ (FLUENT – linha vermelha, COULWAVE – linha verde, Experimental – linha azul): a) $x=-16,5m$; b) $x=-12,0m$; c) $x=-10,0m$; d) $x=-8,0m$; e) $x=-6,0m$; f) $x=-4,0m$; g) $x=-2,0m$; h) $x=-1,0m$; i) $x=0,0m$; j) $x=1,0m$.

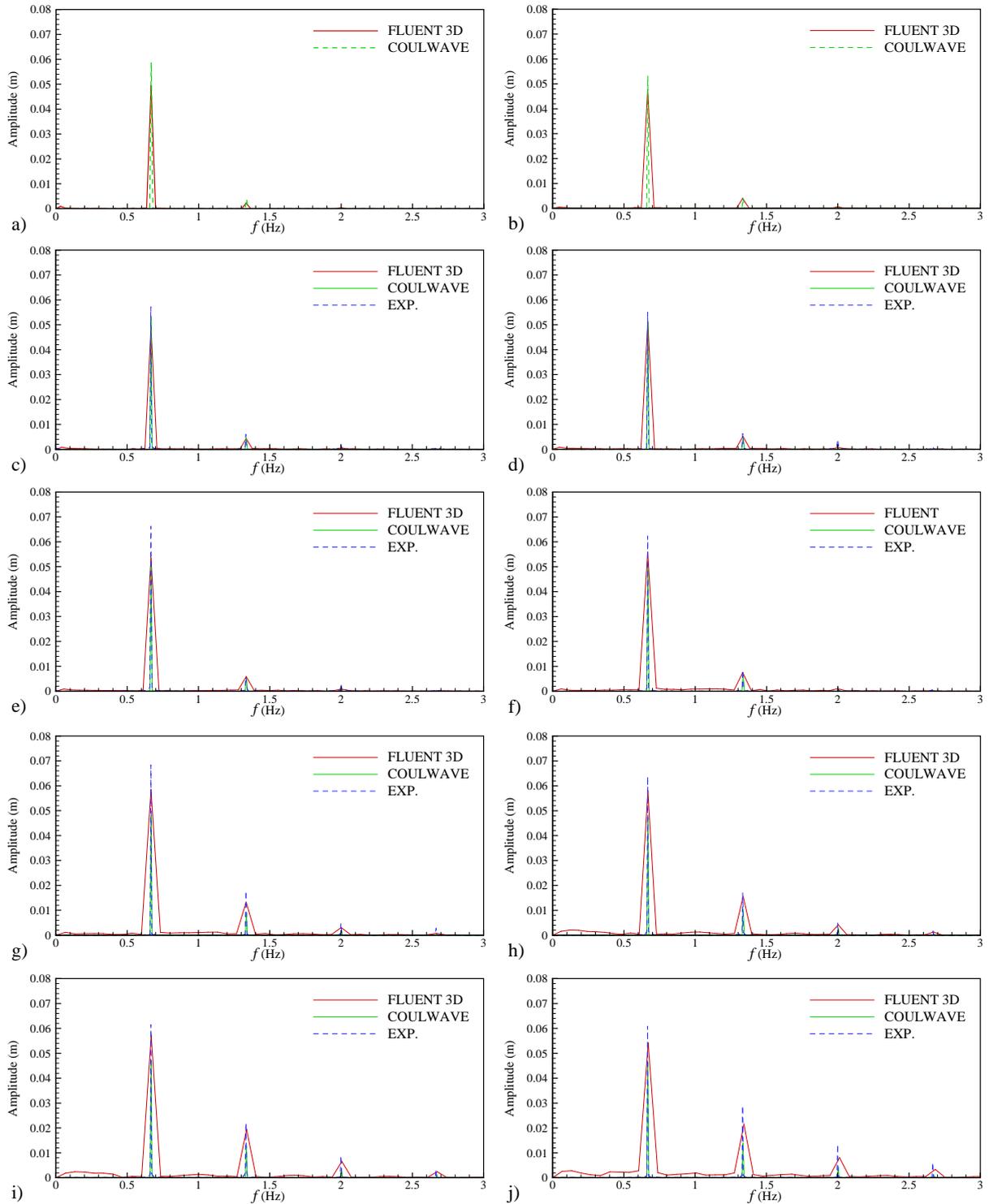


Fig. 4. Periodograma para $T=1,5$ s e $H=10$ cm (FLUENT – linha vermelha, COULWAVE – linha verde, Experimental – linha azul): a) $x=-16,5$ m; b) $x=-12,0$ m; c) $x=-10,0$ m; d) $x=-8,0$ m; e) $x=-6,0$ m; f) $x=-4,0$ m; g) $x=-2,0$ m; h) $x=-1,0$ m; i) $x=0,0$ m; j) $x=1,0$ m.

Os resultados mostraram que os modelos simulam a maioria das transformações das características das ondas ao longo da sua propagação. Verifica-se que:

- De uma forma geral, os resultados dos modelos numéricos apresentam um andamento e uma ordem de grandeza semelhante à dos resultados experimentais em relação às séries temporais da elevação da superfície livre. Tanto com um como outro modelo e para todas as secções, a fase da onda é correctamente simulada embora as amplitudes máximas e também mínimas não o sejam tão bem, principalmente para o modelo COULWAVE. Verifica-se que para este modelo os valores máximos das séries de elevação da superfície livre são subestimadas;
- Relativamente à análise espectral, os modelos COULWAVE e FLUENT conseguem modelar as frequências de pico e as das várias harmónicas de ordem superior. Para o modelo FLUENT as amplitudes relativas à frequência fundamental e às harmónicas calculadas coincidem com as correspondentes dos dados experimentais. No caso do modelo COULWAVE são subestimadas.

As diferenças observadas entre os dois modelos numéricos e os valores experimentais podem ser devidas a vários factores:

- O método de geração de onda é diferente quer nos modelos numéricos quer no modelo físico, ou seja, as condições de entrada dos modelos numéricos são diferentes das do batedor. No COULWAVE a elevação de superfície livre é imposta como condição limite na secção do batedor. No modelo FLUENT a elevação de superfície livre e o perfil de velocidades (componente horizontal e vertical) são impostas na secção do batedor. Estas diferenças nas condições limite, e consequentemente de onda incidente (harmónicas e fases), explicam a existência de diferenças nas elevações da superfície livre, onde se obtêm valores inferiores aos medidos.
- O modelo COULWAVE é um modelo integrado em profundidade o que tem as suas limitações, especialmente. Além disso, o canal é caracterizado por um estreitamento progressivo da secção transversal o que altera a altura da onda incidente. O modelo COULWAVE para o qual o canal é considerado de secção constante, não pode, como é natural, reproduzir com total fidelidade os ensaios.
- No modelo FLUENT, a modelação da propagação das ondas necessita uma discretização da malha correspondente a 60 segmentos por comprimento de onda. Se este critério é respeitado para a frequência fundamental, não se verifica para as harmónicas (35 segmentos para a primeira harmónica). As harmónicas são assim dissipadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no LNEC no âmbito da licença sabática de J. M. Paixão Conde. Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento do projeto PTDC/AAC-AMB/120702/2010. Os autores agradecem o financiamento dos centros de investigação IDMEC e MARETEC. Agradece-se ainda o apoio de Mariana Fernandes, António Reis e André Martins nalguns dos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] Lynett, P., Liu, P.L-F. (2004). *Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations*. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.
- [2] Fluent (2006). *FLUENT 6.3 User's Guide*, ANSYS-FLUENT.
- [3] Endres, L.A.M., Neves, D.R.C.B., Didier, E., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T. (2011). *Avaliação do desempenho de modelos numéricos na simulação de ondas ao longo de um canal de ondas*, Proc. Congresso de Métodos Numéricos CMNE 2011, Coimbra, Portugal.
- [4] Kirby, J.T., Wei G., Chen Q. (1998). *COULWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model*. Documentation and user's manual, UD, Newark, Rel. CACR 98 06.

- [5] Lynett, P., Wu, T., Liu, P.L-F (2002). *Modelling wave run-up with depth-integrated equations*, Coastal Engineering, 46, 89-107.
- [6] Lynett, P., Liu, P.L-F. (2004). *A two-layer approach to water wave modelling*, Proc. of the Royal Society of London A, 460, 2637– 2669.
- [7] Lynett, P., Liu, P.L-F. (2004), *A numerical study of submarine landslide generated waves and run-up*, Proc. of the Royal Society of London A, 460, 2637– 2669.
- [8] Wei, G., Kirby, J.T. (1995). *Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations*, J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 251-261.
- [9] Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). *Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries*, J. Comp. Phys., 39, 201-225.
- [10] Didier, E., Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F. (2011). *Numerical simulation of an oscillating water column wave energy converter with and without damping*, Proc. Computational Methods in Marine Engineering IV – MARINE 2011, 90 (11 p. CDrom), Lisboa, Portugal.
- [11] Paixão Conde, J.M., Didier, E., Lopes, M.F.P., Gato, L.M.C. (2009). *Nonlinear wave diffraction by a submerged horizontal circular cylinder*, IJOPE, 19(3), 198-205.
- [12] Didier, E., Gil, L., Anselmo, A. (2007). *Análise do escoamento viscoso em torno dum cargo (Tipo Série60, $C_b=0.6$)*, Proc. Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia – CMNE, 548 (19 p. CDrom), Porto, Portugal.
- [13] Muzaferija, S., Peric, M., Sames, P., and Schellin, P. (1998). *A Two-Fluid Navier- Stokes solver to Simulate Water Entry*, Proc of the Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics, 638-649.
- [14] Neves, D.R.C.B., Fortes, C.J.E.M., Endres, L., Okamoto, T. (2011). *Modelação física da propagação e rebentação de ondas num canal*, Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária (JPECP), Porto.