

## Desempenho dos modelos numéricos COULWAVE e FLUENT na simulação de ondas ao longo de um canal de ondas

C.J.E.M. Fortes<sup>1</sup>, E. Didier<sup>1,2</sup>, D.R.C.B. Neves<sup>1</sup>, L. Endres<sup>3</sup>, P. Teixeira<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, NPE/DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
e-mail: jfortes, edidier, dneves@lnec.pt <http://www.dha.lnec.pt/npe/>

<sup>2</sup>Marine Environment and Technology Center – MARETEC  
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91501-970, Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande,  
Av. Itália, km 8, Campus Carreiros, 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil

---

### Sumário

*Este trabalho avalia o desempenho de dois modelos do tipo Boussinesq (COULWAVE) e RANS (FLUENT, versão 6.3.26) na zona de rebentação, aferindo as potencialidades e limitações de cada um, quando aplicados ao caso de teste, estudado experimentalmente no LNEC, de simulação da propagação de ondas sobre um fundo de batimetria variável. O modelo COULWAVE é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. O modelo FLUENT é um modelo de volumes finitos que utiliza um método de captura de interface VOF para determinação da posição da superfície livre.*

*Os resultados numéricos de ambos os modelos são analisados para as várias condições de agitação testadas (ondas monocromáticas com 2 períodos e 2 alturas diferentes). É efectuada uma análise no tempo e comparados os valores experimentais com os numéricos referentes à altura de onda significativa, e aos valores mínimo, máximo e médio da velocidade horizontal ao longo do canal (a meio da coluna de água). Determinaram-se parâmetros estatísticos de modo a quantificar a diferença entre os resultados numéricos e experimentais no caso da altura da onda e da velocidade. É também realizada uma análise espectral de modo a caracterizar o desempenho dos modelos e a sua capacidade na simulação dos efeitos não lineares. Com o modelo FLUENT é ainda apresentada uma comparação entre valores numéricos e experimentais de perfis de velocidade ao longo da coluna de água.*

---

**Palavras-chave:** *Rebentação de ondas, Modelação numérica, Equações de Boussinesq, Equações de RANS, COULWAVE, FLUENT*

## 1 INTRODUÇÃO

A determinação da zona de rebentação é essencial em estudos de hidrodinâmica costeira e de transporte de sedimentos. Mais concretamente, a localização e extensão da rebentação são dois dos factores principais para esses estudos uma vez que determinam a localização e estabilidade das estruturas marítimas e o transporte de sedimentos associado.

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 refacção, difracção, rebentação, geração de harmónicas e interacções não-lineares. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo COULWAVE, [7] [8] [9] e [10]. 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 em que se divide a coluna de água. O número de camadas considerado contribui para a precisão do modelo. De qualquer forma, como em cada camada se admite uma determinada aproximação polinomial e com tal se integra as equações na vertical, não é possível obter com o modelo a estrutura vertical da velocidade da partícula e este aspecto é particularmente importante quando se está interessado no transporte de sedimentos. Por outro lado, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de

termos à equação original, que dependem de um conjunto de parâmetros que têm de ser calibrados para cada caso de estudo.

De forma a resolver este problema, os modelos baseados nas equações de Navier-Stokes são frequentemente utilizados e mostram um excelente desempenho na simulação das características da onda em fundos de batimetria complexa. O modelo FLUENT [4] que resolve as equações de Navier-Stokes-Reynolds (RANS – *Reynolds-Average-Navier-Stokes*) incorporando um método numérico de captura da superfície livre do tipo *Volume of Fluid* (VOF), permite simular o escoamento com superfície livre, a rebentação das ondas e a interação entre ondas e estruturas.

Do exposto, é claro que o modelo FLUENT permite uma descrição mais completa da propagação de ondas sobre fundos de profundidade variável e da interacção ondas-estrutura, em que a simulação da rebentação das ondas surge de forma natural sem o recurso à definição de parâmetros a calibrar pelo utilizador (como acontece no caso do modelo COULWAVE). Em contrapartida, as desvantagens deste modelo estão relacionadas com o elevado tempo de cálculo e esforço computacional quando comparado com o modelo COULWAVE e problemas de difusão da fracção de volume utilizada no método VOF.

Numa primeira avaliação comparativa dos modelos COULWAVE e FLUENT foi realizada a simulação da propagação de apenas uma condição de agitação ( $H=0.12$  m e  $T=2.0$  s) num canal com um fundo de batimetria variável [3], para o qual existem resultados de ensaios experimentais. Verificou-se que, de uma forma geral, os resultados dos modelos numéricos apresentam um andamento e uma ordem de grandeza semelhante à dos resultados experimentais, quer em relação às séries temporais da elevação da superfície livre, de espectro ou de velocidade horizontal, embora as diferenças sejam mais acentuadas no caso da velocidade, e especialmente para o modelo COULWAVE.

No presente trabalho, pretende-se estender o anterior trabalho a mais condições de agitação incidente (4 condições de ondas monocromáticas), e avaliar assim o desempenho de cada modelo, de forma a utilizá-los de forma sistemática em estudos deste tipo. Na realidade, tendo em conta as vantagens e limitações de cada modelo pode-se escolher o modelo mais adequado a cada caso de estudo e condição de agitação, inferir assim as incertezas dos resultados obtidos.

## 2 MODELOS NUMÉRICOS

### 2.1 O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, [7] [8] [9] [10], 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, [8] [9] [10], 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 e apresenta características lineares até  $kh \sim 8$  e um comportamento não linear de 2ª ordem até  $kh \sim 6$ . 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 [15] 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 efectuadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até  $\Delta t^4$  em tempo e  $\Delta x^4$  em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby [15] 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 [15] enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta é usado um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com Kirby *et al.* [6].

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu [8] e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

## 2.2 O modelo FLUENT

O código FLUENT (versão 6.3.26), [4], aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes-Reynolds (RANS).

A integração no tempo é realizada por um esquema de 2ª ordem. O modelo de turbulência  $k-\epsilon$  na sua versão *standard* é o escolhido, pois é classicamente utilizado nas aplicações em 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, aconselhado pelo *User Guide* do FLUENT (versão 6.3.26) [4], para modelação de escoamentos com superfície livre. Para o acoplamento entre a velocidade e a pressão, seleccionou-se o algoritmo SIMPLEC, mais adaptado para simulações não estacionárias que o algoritmo SIMPLE.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VOF (*Volume of Fluid*), desenvolvido inicialmente em [4]. Em estudos numéricos anteriores, utilizando o modelo FLUENT para modelar interacção entre ondas e estruturas e dispositivos de energia das ondas [1] [2] e [12], foi utilizado o método HRIC, [13], especialmente desenvolvido para simulação de escoamento com superfície livre. Foi verificado que este esquema permite uma representação da evolução da superfície livre com grande precisão. No entanto, o esquema HRIC não permite modelar a rebentação das ondas quando associado a esquema de integração no tempo de segunda ordem. Assim, no presente caso de estudo, o esquema utilizado é o esquema CICSAM, [14]. Verificou-se que este esquema permite obter resultados com um erro razoável, comparando a teoria linear e os resultados obtidos com o esquema HRIC (erro da ordem de 5%).

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

Os coeficientes de sub-relaxação, utilizados no método SIMPLEC de acoplamento entre velocidade e pressão, são iguais a 1 para a velocidade, a pressão e a fracção de volume. Para a turbulência, os coeficientes são iguais a 0.7.

## 2.3 Vantagens e desvantagens dos modelos COULWAVE e FLUENT

O modelo COULWAVE, 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.

Quanto ao modelo FLUENT é um modelo que resolve as equações RANS permitindo simular escoamentos tridimensionais. O modelo permite obter o perfil vertical da velocidade e de pressão em qualquer secção do domínio de cálculo, 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, pois condiciona a estabilidade numérica e a precisão dos resultados. No entanto, para configurações complexas, a construção da malha pode revelar-se complexa e difícil. O tempo de cálculo é um factor que limita as aplicações do modelo, particularmente quando se trata de modelar fenómenos não estacionários e tridimensionais. Existem também problemas de difusão numérica da fracção de volume utilizando o método VOF.

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 facto de o FLUENT apresentar um elevado tempo de cálculo e esforço computacional, quando comparado com o modelo COULWAVE, restringe a sua aplicação genérica.

### 3 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os testes experimentais, [11], foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) num canal com 38.3 m de comprimento total e equipado com um gerador de ondas irregular, Fig. 1. O comprimento útil do canal é de 32.4 m pois o bateror encontra-se a 5.9 m do início do canal. Nesta figura, apresenta-se uma planta do canal e o respectivo perfil de fundo, a partir da posição do bateror.

O perfil longitudinal do fundo foi implantado no canal à escala 1:1 e é mostrado na Fig. 1 (sendo  $y$  a coordenada vertical e  $x$  a distância horizontal até ao bateror). Este perfil consiste numa zona de inclinação variável de cerca de 6.82 m, antes de uma rampa de 10 m com inclinação de aproximadamente 1:20. Posteriormente, vem uma zona de profundidade constante.

As condições de agitação incidente no total de 15 casos, corresponderam a períodos de onda regular de: 1.1, 1.5, 2.0, e 2.5 s e alturas de onda de 12, 14, 16 e 18 cm. No caso de  $T=1.1$  s e  $H=18$  cm, as ondas rebentavam imediatamente após a sua formação devido à declividade da onda, pelo que este teste foi excluído.

Em todos os ensaios, foi colocada uma sonda de nível junto ao bateror ( $x=-1000$  cm) para a caracterização das condições de agitação incidente. A frequência de aquisição para todas as sondas foi de 25 Hz. A função desta sonda é a de verificar se o bateror de ondas consegue gerar a altura de onda correcta. Para cada condição de agitação incidente, foram efectuadas medições de elevação da superfície livre e velocidade ao longo do canal de ondas segundo a seguinte metodologia:

- Ensaios Tipo I - medição dos valores da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas, com o recurso a oito sondas resistivas, separadas de 20 cm entre si que foram agregadas a uma estrutura móvel. Esta estrutura teve 18 posições diferentes de modo a registar valores em vários pontos ao longo do canal.
- Ensaios Tipo II - medição da velocidade das partículas abaixo da superfície livre e da elevação da superfície livre ao longo do canal, com recurso a um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), e uma sonda resistiva utilizadas simultaneamente. A sua posição variou entre -1000 cm até 560 cm, com um espaçamento de: a) 100 cm no intervalo entre -1000 e -200 cm; b) 10 cm entre os -200 cm e os 200 cm; c) 20 cm entre os 200 cm e os 560 cm;
- Ensaios Tipo III - medição de perfis de velocidade e de elevação da superfície livre em determinados locais do canal. Nestes ensaios, a posição do ADV correspondeu aos valores de  $x=-1000$  cm, -500 cm, -150 cm, -100 cm, 0 cm, 50 cm, 100 cm. Para cada valor de  $x$ , a sonda do ADV foi posicionada em várias profundidades em relação ao fundo do canal. As profundidades em que foram efectuadas as medições variaram entre os 47 cm e os 27 cm para  $x=-1000$  cm, 22 cm e 7 cm para  $x=-500$  cm, 15 cm e 5 cm para  $x=-150$  cm, 12 cm e 7 cm para  $x=-100$  cm. Os intervalos em profundidade para as várias

posições segundo  $x$  foram de 5 cm. Nas posições em  $x=0$  cm, 50 cm e 100 cm foi feito apenas um ensaio devido à baixa profundidade do local.

Efectuou-se também o registo da localização do início e do fim da rebentação por observação visual.

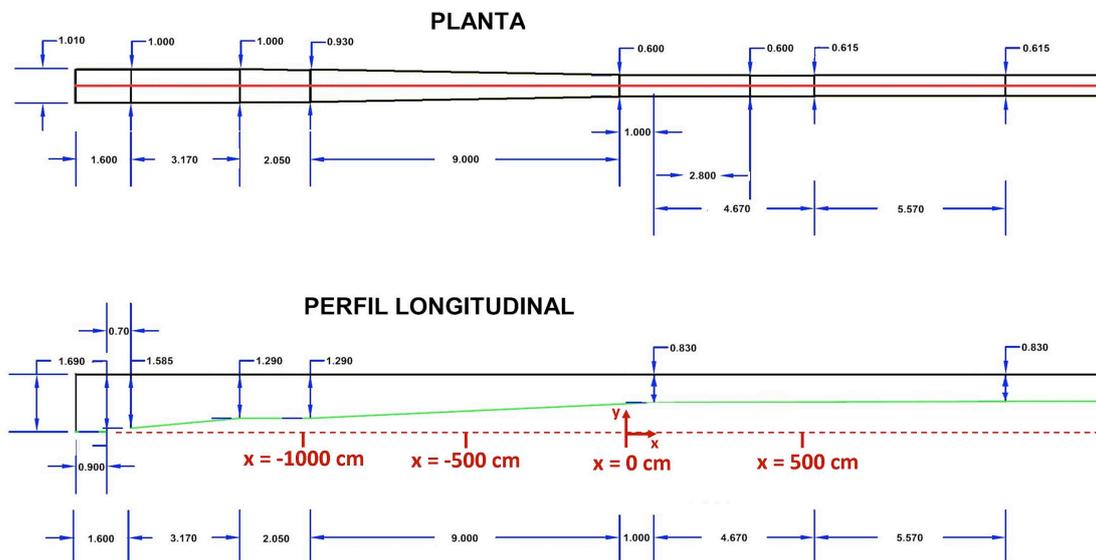


Fig. 1 – Vistas do canal de ondas utilizado para os ensaios experimentais. Planta e perfil longitudinal.

#### 4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As condições de agitação testadas numericamente correspondem à agitação regular e têm as características seguintes:  $T=1.5$  s,  $H=0.12$  e  $0.14$  m e  $T=2.0$  s,  $H=0.12$  e  $0.14$  m.

Estes quatro casos foram os escolhidos por serem os testes em que as velocidades foram medidas detalhadamente em sete posições ao longo do canal, antes e após o processo de rebentação da onda, como indicado na secção 3.

Para esta condição, avaliou-se o desempenho dos dois modelos numéricos comparando os respectivos resultados numéricos com os experimentais no que diz respeito a:

- Valores de altura de onda significativa e aos valores mínimo, máximo e médio das velocidades horizontais ao longo do domínio;
- Parâmetros estatísticos ( $RMSE$ ,  $bias$  e índice de concordância ( $ic$ )) relativos aos valores da altura de onda significativa e da velocidade das partículas;
- Perfil de velocidades ao longo da coluna de água no caso do modelo FLUENT;
- Espectro de energia para análise do 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, utilizando as opções de paralelização para utilizar os 4 *cores*. O tempo de cálculo é de 6 min para simular 300 s de escoamento com o COULWAVE e 5h30min por período de onda com o FLUENT.

##### 4.1 Condições de cálculo

O domínio computacional usado pelos modelos numéricos é indicado na Fig. 1.

Para o modelo FLUENT, o domínio computacional é igual ao canal físico no que diz respeito à variação do fundo e à variação da largura do canal. No final do canal numérico é adoptada uma praia numérica de

absorção para eliminar a reflexão das ondas. O batedor numérico está localizado na fronteira esquerda do domínio. 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 [1] [2] e [12]. O número total de volumes de controlo é de cerca de 875000 (plano de simetria longitudinal na direcção do eixo do canal). O passo de tempo é igual a 0.00234 s e 0.003125 s para as ondas de período  $T=1.5$  e 2.0 s, respectivamente, e foram realizadas 8 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 computacional reproduz exactamente a variação do fundo, mas a largura do canal é constante. O próprio modelo gera uma malha computacional de diferenças finitas com base num número mínimo de pontos fornecido pelo utilizador, que neste caso, foi de 40. O número de Courant admitido é igual a 0.2. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição  $x=-1600$  cm. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos extremos do domínio. Não foi incluído o atrito do fundo.

## 4.2 Análise temporal

### 4.2.1 Altura significativa

Na Fig. 2 apresentam-se os valores da altura significativa que caracterizam as séries (numérica e experimental) de valores da elevação da superfície da água, para os casos em estudo.

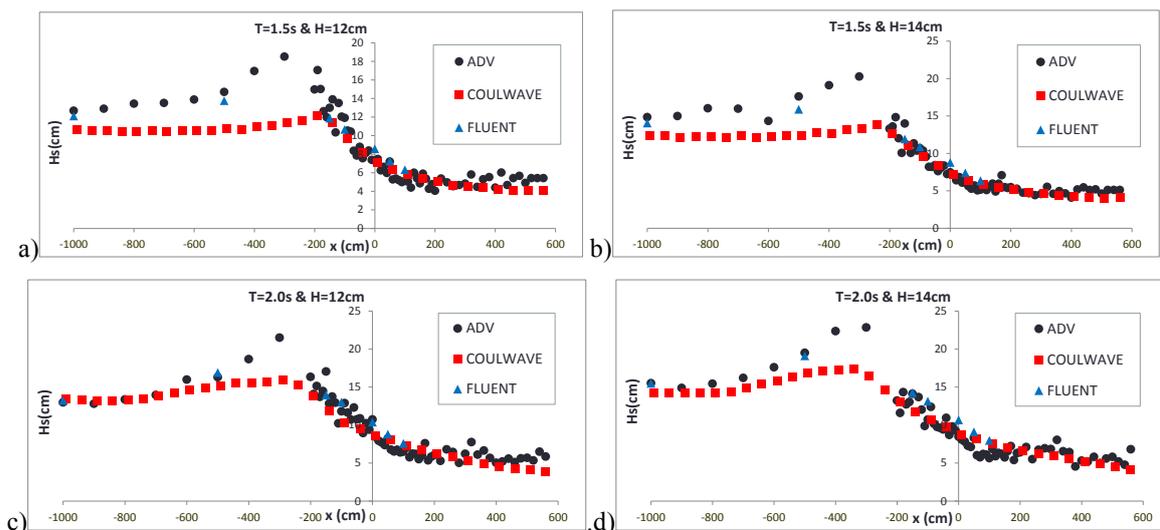


Fig. 2. Altura de onda significativa. Comparação entre resultados numéricos e experimentais. a)  $T=1.5$  s;  $H=12$  cm, b)  $T=1.5$  s;  $H=14$  cm; c)  $T=2.0$  s;  $H=12$  cm; d)  $T=2.0$  s;  $H=14$  cm.

De um modo geral, observa-se que o andamento dos resultados numéricos da altura de onda significativa é semelhante aos correspondentes dos resultados experimentais. Ambos os modelos numéricos simulam o aumento da altura de onda  $H_s$  à medida que a profundidade diminui, a ocorrência de rebentação, o decréscimo de  $H_s$  depois desta rebentação e a sua manutenção num valor constante mesmo após o fim da rebentação. Além disso, verifica-se que:

- O modelo COULWAVE não conseguiu reproduzir os elevados valores experimentais de altura de onda na zona à volta da rebentação (entre  $x=-400$  cm e  $x=-200$  cm), para todas as condições de agitação testadas e, em especial, para as de período igual a 1.5 s. Nestes casos não conseguiu reproduzir mesmo a posição da rebentação o que não acontece com  $T=2.0$  s. Após a rebentação, os valores numéricos e experimentais são bastante próximos, o que mostra que o modelo está a dissipar correctamente a energia e a produzir valores após a rebentação similares aos que se verificaram nas experiências.

- O modelo FLUENT reproduz de forma correcta a variação de altura de onda antes e após rebentação. Verifica-se que o estreitamento do canal produz um aumento da altura da onda (evidente na secção  $x=-500$  cm). O resultado de  $H_s$  na secção  $x=-500$  cm está bastante próximo do  $H_s$  experimental. No entanto, faltam resultados numéricos na zona de rebentação para analisar o desempenho do modelo.

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 da 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 antes da rebentação e nas velocidades horizontais após a rebentação, assim como nas elevações da superfície livre, onde se obtêm valores inferiores aos medidos.
- O modelo COULWAVE é um modelo integrado em profundidade, o que na zona de rebentação tem as suas limitações. Além disso, o canal é caracterizado por um estreitamento progressivo da secção transversal que altera a altura da onda incidente antes da rebentação. O modelo COULWAVE para o qual o canal é considerado de secção constante, não pode, como é natural, reproduzir com total fidelidade os ensaios. A zona de rebentação é por consequência, diferente.
- 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. No modelo FLUENT, o esquema de integração das equações no tempo é apenas de primeira ordem (existem problemas de convergência com o esquema de segunda ordem). Neste caso verificou-se que o período da onda é bem simulado mas a altura da onda é ligeiramente subestimada (5%), contribuindo para a alteração das características da onda incidente.

#### 4.2.2 Máximo, mínimo e média de velocidades horizontais e perfis de velocidade

Na Fig. 3 apresentam-se os valores da média dos máximos, da média dos mínimos e a média de velocidade das partículas de cada registo de cada onda correspondentes aos valores numéricos obtidos com os modelos COULWAVE e FLUENT para os 4 casos de teste, ao longo do canal e a meio da coluna de água.

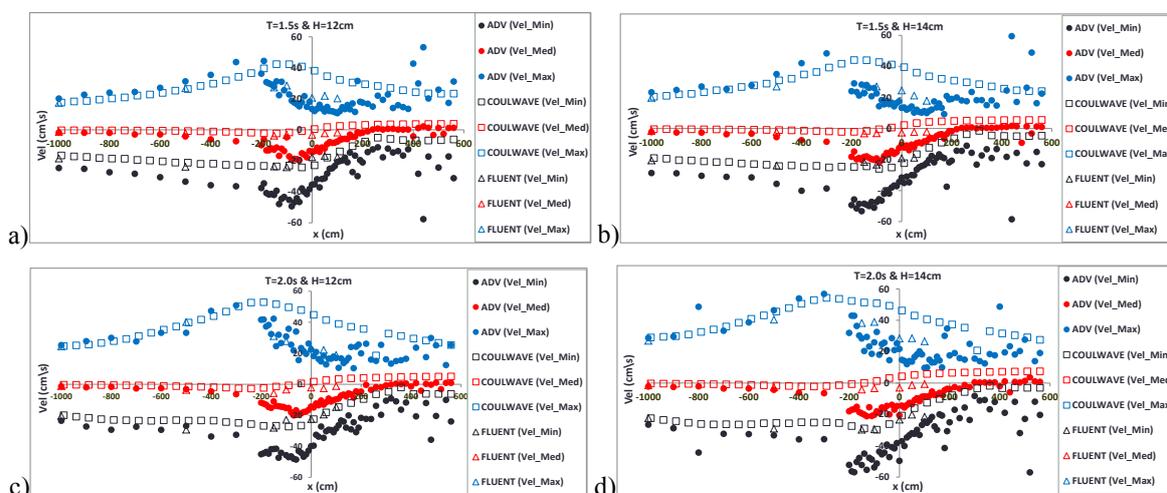


Fig. 3. Escoamento médio e envolvente da velocidade das partículas. Comparação entre resultados numéricos e experimentais. a)  $T=1.5$  s;  $H=12$  cm, b)  $T=1.5$  s;  $H=14$  cm; c)  $T=2.0$  s;  $H=12$  cm; d)  $T=2.0$  s;  $H=14$  cm.

Verifica-se que, em geral, ambos os modelos numéricos simulam razoavelmente bem o escoamento médio e envolvente antes da rebentação, até  $x=-400$  cm, e depois do fim da rebentação, após  $x=+100$  cm. Nestes casos, os valores experimentais da média dos máximos, da média dos mínimos e os médios são semelhantes aos resultados numéricos. Fora dessas secções, as diferenças entre resultados numéricos e experimentais acentuam-se especialmente no que diz respeito ao valor da média dos máximos e da média dos mínimos da velocidade das partículas.

Para o modelo COULWAVE, verifica-se que o modelo sobrestima os valores da média dos máximos na zona de rebentação e nessa zona, o próprio andamento dos valores numéricos é bastante diferente do experimental. No caso dos valores da média dos mínimos, os resultados numéricos tem um andamento semelhante aos experimentais nessa zona e também ao longo do canal, mas o modelo numérico continua a sobrestimar os valores. Tal é expectável pois o modelo é integrado em profundidade.

Para o modelo FLUENT, os valores da média dos máximos de velocidade apresentam uma boa concordância com os dados experimentais, antes e após a rebentação. Os valores médios são sobrestimados na zona de rebentação das ondas. Os valores da média dos mínimos são também sobrestimados. Existe um factor 2 entre os valores numéricos e experimentais. O andamento da média dos mínimos é similar à do COULWAVE.

A Fig. 4 mostra os perfis verticais de velocidade horizontal ao longo da coluna de água, estabelecendo uma comparação entre os valores experimentais e numéricos, calculados através do modelo FLUENT. São representados os valores máximos e mínimos da velocidade e a média da velocidade de cada registo. Os perfis obtidos numericamente são semelhantes ao experimental, excepto para  $T=1.5$  s e  $H=14$  cm para os valores máximos e mínimos da velocidade. Para os casos com período  $T=2.0$  s, verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais dos valores médios. A média da velocidade é correctamente estimada para cada caso, apresentando valores um pouco inferior ao valor nulo, indicando assim a presença de uma corrente no sentido contrário à propagação das ondas.

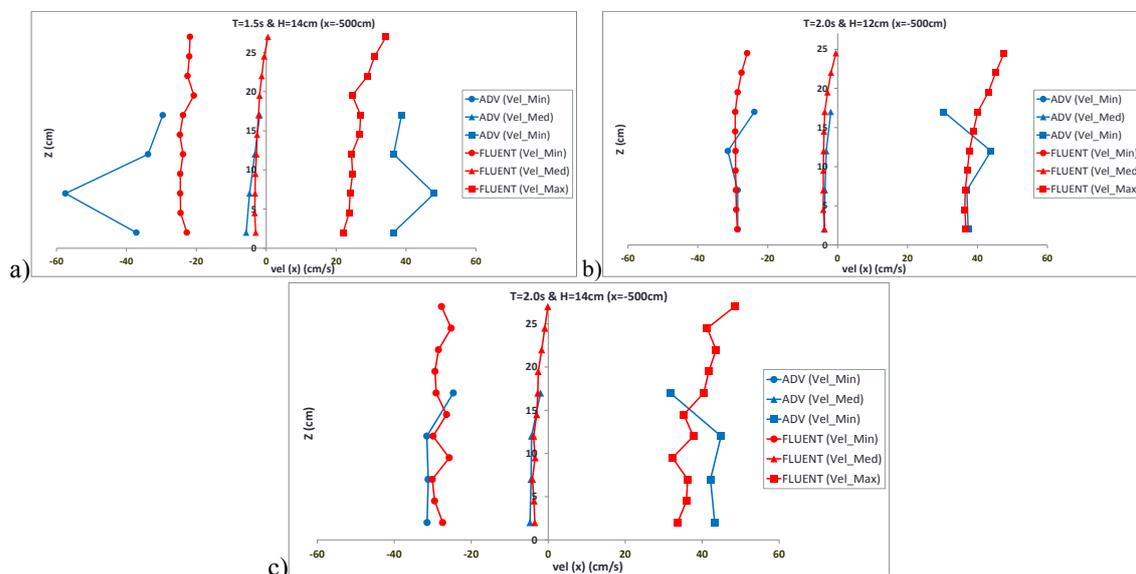


Fig. 4. Perfis de velocidade para  $x=-500$  cm. Comparação entre resultados numéricos e experimentais a)  $T=1.5$  s;  $H=14$  cm; b)  $T=2.0$  s;  $H=12$  cm; c)  $T=2.0$  s;  $H=14$  cm.

#### 4.2.3 Análise estatística

Nesta secção apresenta-se a análise estatística realizada com base nos valores de altura de onda e nos máximos, médios e mínimos das velocidades horizontais de resultados numéricos e experimentais obtidos ao longo do domínio. Assim, foram calculados parâmetros estatísticos como o erro médio quadrático,  $RMSE$ , e o desvio,  $bias$ . Calculou-se também o seguinte índice de concordância,  $ic$ , dado por:

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (1)$$

onde  $x_i$  são os valores experimentais (referência),  $y_i$  são os valores dos modelos numéricos,  $\bar{x}$  é a média do valor experimental e  $n$  é o número de pontos.

Para ambos os modelos, apenas se calcularam os valores correspondentes às sete localizações para as quais se obtiveram dados com FLUENT, i.e.,  $x = -1000, -500, -150, -100, 0, 50, 100$  cm. No **Quadro 1** apresentam-se os valores do *bias*, *RMSE* e do índice de concordância para os resultados em termos de alturas de onda significativa, para os 4 casos de teste.

Quadro 1 - Parâmetros estatísticos das alturas significativas de onda.

Modelos	T=1.5 s; H=12cm			T=1.5 s; H=14cm			T=2.0 s; H=12 cm			T=2.0 s; H=14 cm		
	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic
FLUENT	-0.015	0.963	1.000	-0.222	1.389	0.999	-0.156	1.389	0.999	0.844	1.361	0.999
COULWAVE	-1.101	1.989	0.998	-1.428	2.576	0.997	-0.933	1.995	0.999	-0.468	1.776	0.999

Com base no **Quadro 1**, verifica-se que os valores obtidos pelo modelo COULWAVE são inferiores aos experimentais (*bias* negativo) e apresentam um erro médio quadrático (*RMSE*) superior aos obtidos pelo FLUENT. Para estas 7 localizações, o valor do índice de concordância é bastante bom com ambos os modelos sendo o FLUENT o que fornece melhores resultados. No entanto, faltam resultados do FLUENT na zona de rebentação.

No **Quadro 2** apresentam-se os valores do *bias*, *RMSE* e do índice de concordância para os resultados em termos do máximo, média e mínimo da velocidade das partículas dos dois modelos numéricos, nos pontos  $x = -1000, -500, -150, -100, 0, 50, 100$  cm.

Quadro 2 - Parâmetros estatísticos da velocidade, para os 4 casos de teste.

Casos	Velocidade Modelos Parâmetros	Min			Med			Max		
		Bias (cm)	RMSE (cm)	ic	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic	Bias (cm)	RMSE (cm)	ic
T=1.5 s, H=12 cm	FLUENT	11.584	12.941	0.916	6.398	7.515	0.962	3.204	6.727	0.989
	COULWAVE	11.045	11.826	0.927	8.766	9.949	0.941	13.041	18.254	0.939
T=1.5 s, H=14 cm	FLUENT	11.866	14.209	0.910	7.199	8.521	0.951	3.452	8.068	0.984
	COULWAVE	11.912	13.134	0.921	10.316	11.588	0.923	15.472	20.786	0.925
T=2.0 s, H=12cm	FLUENT	10.156	12.439	0.922	6.048	7.746	0.959	0.298	5.700	0.993
	COULWAVE	10.732	11.839	0.930	9.283	11.001	0.929	14.413	17.591	0.954
T=2.0 s, H=14 cm	FLUENT	12.029	15.178	0.916	9.246	11.261	0.916	6.786	10.737	0.978
	COULWAVE	14.449	16.517	0.907	13.392	15.796	0.865	18.419	23.184	0.925

Com base no **Quadro 2**, verifica-se que os valores do *bias* da velocidade média, mínima e máxima obtidos com o modelo COULWAVE são positivos (valores numéricos superiores aos experimentais). Os valores do *RMSE* da velocidade média mostram que as velocidades são mais elevadas que as obtidas experimentalmente quer para os valores mínimos quer para os máximos. Finalmente, os valores de *ic* são superiores a 0.91 o que mostra uma boa concordância dos resultados numéricos com experimentais. No entanto, tal concordância é inferior ao que se verificava para as alturas significativas.

O modelo FLUENT sobrestima sistematicamente os valores experimentais (valores do *bias* positivos). Os valores *RMSE* são máximos para a velocidade mínima, onde se verificam as maiores diferenças entre os

resultados numéricos e experimentais, e também o pior índice de concordância, da ordem de 0.91. O *RMSE* da velocidade média é um pouco superior ao valor do *RMSE* da velocidade máxima. Para esta última, o *ic* tem valor entre 0.978 e 0.993 o que indica uma muito boa concordância entre os resultados numéricos e os dados experimentais. No entanto, tal como é indicado para o COULWAVE, a concordância é inferior ao que se verificou para as alturas significativas.

### 4.3 Análise espectral

A partir das séries de dados numéricos e experimentais de elevação da superfície livre, determinaram-se os valores da densidade espectral de variância e a análise harmónica respectiva que se apresenta na Da análise destas figuras, verifica-se que 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.

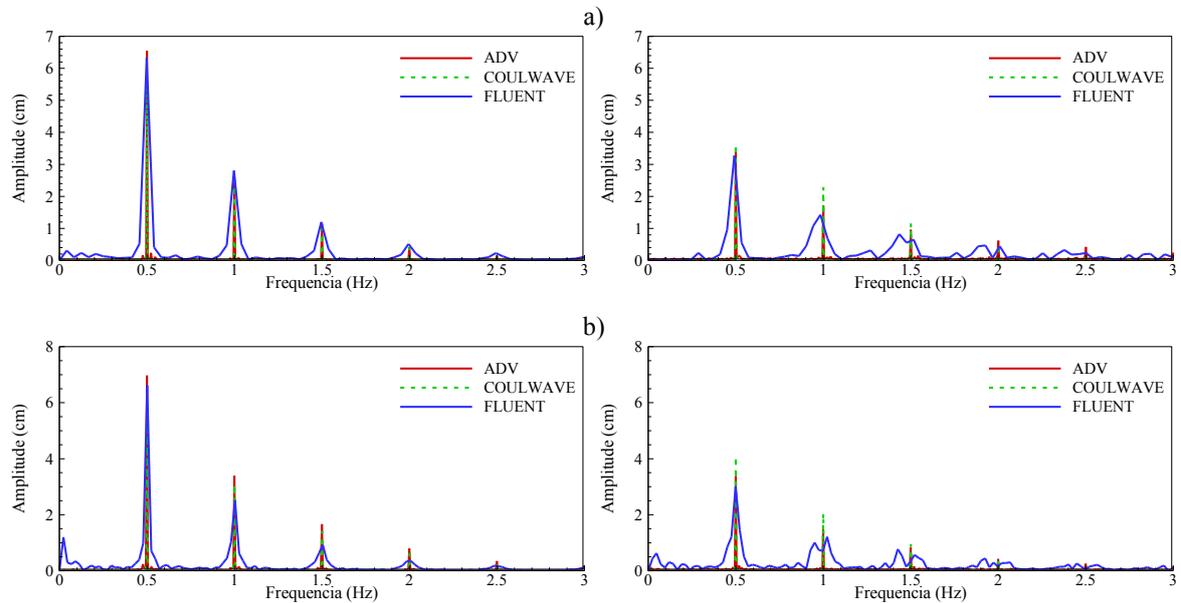
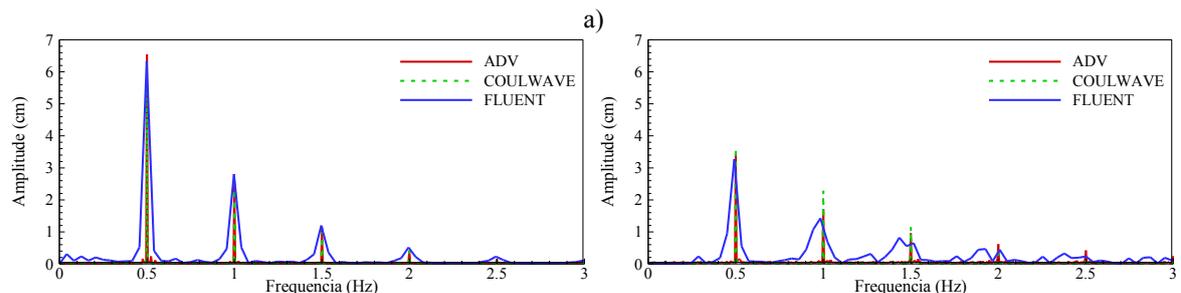


Fig. 5, para duas condições de agitação incidente,  $T=2.0$  s e  $H=12$  e 14 cm.

Da análise destas figuras, verifica-se que 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.



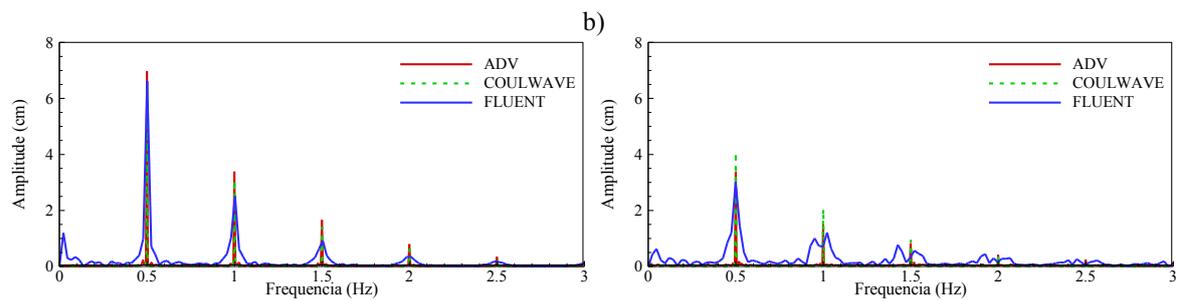


Fig. 5. Espectros de energia em duas sondas localizadas em  $x=-500$  cm (esquerda) e em  $x=-100$  cm (direita).  
a)  $T=2.0$  s;  $H=12$  cm, b)  $T=2.0$  s;  $H=14$  cm.

Em relação ao modelo COULWAVE, o espectro de energia apresenta valores bastante concordantes com os experimentais, particularmente na secção  $x=-500$  cm, para todas as frequências. Para a secção  $x=-100$  cm, a densidade de energia é sobrestimada para todas as frequências.

No caso do modelo FLUENT, na secção  $x=-500$  cm existe um muito bom acordo em termos de densidade de energia, entre os dados experimentais e os resultados numéricos. Na secção  $x=-100$  cm, onde rebenta a onda, o modelo FLUENT subestima a densidade de energia relativamente à frequência fundamental e às harmónicas.

## 5 CONCLUSÕES

Nesta comunicação, descreveu-se a aplicação de dois modelos numéricos, COULWAVE e FLUENT, à propagação de ondas num canal com um fundo de batimetria variável, para o qual existem resultados de ensaios experimentais. Compararam-se resultados numéricos com experimentais, nomeadamente no que se refere: valores de altura de onda significativa, máximos, médios e mínimos das velocidades das partículas ao longo do canal. Calcularam-se os parâmetros estatísticos (*RMSE*, *bias* e índice de concordância) relativos aos valores da altura de onda significativa e da velocidade das partículas. Finalmente, efectuou-se uma análise espectral dos resultados obtidos.

Os resultados mostraram que os modelos simulam adequadamente a maioria das transformações das características das ondas ao longo da sua propagação, o que foi confirmado pelos valores de índice de concordância encontrados.

Em relação à altura de onda, em geral, os modelos simulam bem o andamento dos valores experimentais ao longo do canal. Os valores numéricos antes da zona de rebentação e na zona final desta são bastante semelhantes aos experimentais, em especial no caso do modelo FLUENT. As diferenças acentuam-se na zona à volta da rebentação, em que os valores numéricos são consistentemente inferiores aos resultados experimentais no caso do COULWAVE e para  $T=1.5$  s. Com efeito, com este modelo não foi possível simular a altura de rebentação, embora depois na zona de dissipação de energia, os valores numéricos voltaram a aproximar-se bastante dos experimentais, o que indica que a dissipação da onda está a ser bem simulada no modelo. Como era espectável, a análise através dos parâmetros estatísticos indica que o COULWAVE é o modelo que apresenta menor concordância com os valores experimentais relativamente ao modelo FLUENT.

Quanto aos valores das velocidades das partículas (máximos, mínimos e médios), os modelos numéricos simulam razoavelmente bem o escoamento médio e a envolvente antes da rebentação sendo que após o topo da rampa ( $x=0$  cm) não são capazes de reproduzir com probidade os resultados na zona de rebentação. Claramente o modelo COULWAVE dá piores resultados que o modelo FLUENT, pois trata-se de um modelo integrado na vertical. Note-se que as diferenças face aos resultados experimentais de ambos os modelos em termos de velocidade são bastante mais acentuadas do que as encontradas relativamente à altura de onda significativa.

Relativamente à análise espectral, os modelos COULWAVE e FLUENT conseguem modelar as frequências de pico e as das várias harmónicas de ordem superior. Para a secção antes da rebentação, as densidades de

energia calculadas para ambos os modelos coincidem com as correspondentes dos dados experimentais. No entanto, nas secções após a rebentação, nenhum dos modelos consegue reproduzir os valores das densidades de energia, nem da frequência de pico nem das componentes de ordem superior. O modelo FLUENT subestima a amplitude máxima das várias frequências enquanto o modelo COULWAVE sobrestima-as.

Em termos do perfil vertical de velocidades na secção localizada mais ou menos no meio do declive de 1:20, o modelo FLUENT apresenta uma concordância mitigada com os resultados experimentais. A média da velocidade é correctamente estimada, apresentando uma boa concordância com os valores experimentais e valores um pouco inferior ao valor nulo, indicando a presença de uma corrente no sentido contrário à propagação das ondas. Os resultados numéricos são em relativamente bom acordo com os dados experimentais para o período de 2.0 s mas as diferenças são mais acentuadas para o período de 1.5 s.

As diferenças entre resultados numéricos e experimentais na zona de rebentação para além de estarem relacionadas com limitações da formulação de ambos os modelos, podem também estar relacionadas com o facto das condições de entrada dos modelos serem diferentes das do batedor em modelo físico, especialmente no que se refere ao perfil de velocidades imposto na fronteira de entrada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através da bolsa SFRH/BPD/37901/2007 e através dos projectos PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006, e à CAPES/FCT (cooperação Brasil / Portugal) através do projeto “Construindo uma Base para Pesquisa e Conhecimento em Engenharia Costeira”.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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, 14 a 17 de Junho, Coimbra, Portugal.
- [4] Fluent, *FLUENT 6.3 User's Guide*, ANSYS-FLUENT, 2006.
- [5] Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). *Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries*. J. Comp. Phys., 39 201-225.
- [6] Kirby, J.T., G. Wei, Q. Chen, (1998) – *COULWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model*. Documentation and user's manual, UD, Newark, Rel. CACR 98 06.
- [7] Lynett P, Wu T., Liu PL-F (2002). *Modelling wave run-up with depth-integrated equations*. Coastal Engineering, 46, 89-107.
- [8] Lynett P, Liu PL-F (2004). *Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations*. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.
- [9] Lynett P, Liu PL-F (2004). *A two-layer approach to water wave modelling*. Proceedings of the Royal Society of London A; 460:2637– 2669.
- [10] Lynett P, Liu PL-F (2004). *A numerical study of submarine landslide generated waves and run-up*. Proceedings of the Royal Society of London A; 460:2637– 2669.

- [11] 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*. 7<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária (JPECP). FEUP - Porto.
- [12] 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.
- [13] Peric, M., Ferziger, J.H. (1997). *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Second edition.
- [14] Ubbink, O. (1997). *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces*, PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Londres, Reino Unido.
- [15] Wei, G., Kirby, J.T. (1995). *Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations*. J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng., ASCE, pp. 251-261.