

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS NÃO LINEARES DE BOUSSINESQ E DE RANS NA SIMULAÇÃO DA REBENTAÇÃO DE ONDAS NUM PERFIL DE PRAIA TIPO BARRA-FOSSA

Teixeira P.^{1*}, Didier E.², Fortes C.J.E.M.², Pinheiro L.V.² e Okamoto T.³

1: Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Avenida Itália, km8, Campus Carreiros, Rio Grande, 96201-900
e-mail: pauloteixeira@furg.br web: <http://www.furg.br>

2: Departamento de Hidráulica e Ambiente – DHA
Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC
Avenida do Brasil, 101, Lisboa
e-mail: {edidier, jfortes, lpinheiro, tokamoto}@lnec.pt web: <http://www.lnec.pt>

3: Hiroshima University
1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8529, Japan
e-mail: tokamoto@hiroshima-u.ac.jp

Palavras-chave: Propagação não-linear de ondas, Modelos de Boussinesq, Modelos de RANS

Resumo. *O objectivo desta comunicação é a análise comparativa dos modelos do tipo Boussinesq COULWAVE e BOUSS3W e do modelo baseado nas equações de Navier-Stokes FLUENT na simulação da rebentação de ondas num canal. As principais diferenças entre os modelos estão associadas às equações base, ao método numérico, à precisão e ao domínio de aplicabilidade associados e ao custo computacional. O caso seleccionado consiste num estudo experimental da propagação de ondas num canal de ondas cujo perfil de fundo é do tipo barra-fossa. Este caso envolve para além da rebentação das ondas, diversos fenómenos físicos, nomeadamente, o empolamento, a refração, a difração e a dispersão não-linear. Por isso, constitui um óptimo teste para a validação e comparação dos modelos aqui apresentados.*

O teste escolhido correspondeu a uma onda incidente de altura $H=0.08m$ e período $T=1.5$ s. Foram comparados os valores numéricos dos três modelos numéricos e experimentais correspondentes às séries temporais de elevação da superfície livre e da velocidade das partículas. Depois procedeu-se com base nessas séries à: a) análise no tempo para determinação dos valores da altura de onda significativa, HS e velocidade máxima, mínima e média de cada registo; b) análise estatística com base nos valores de HS e das velocidades; c) análise espectral para avaliação do comportamento não-linear dos modelos. São, deste modo, avaliadas as capacidades e limitações de cada modelo testado.

1. INTRODUÇÃO

À medida que as ondas se propagam para zonas de águas pouco profundas, sofrem transformações significativas na sua altura, direção, velocidade e forma. Os fenómenos de refração, difração, reflexão e rebentação, assim como os fenómenos não-lineares associados a interações onda-onda e onda-corrente são algumas das causas dessas alterações.

Nas últimas décadas, os modelos numéricos desenvolvidos a partir das equações de Boussinesq foram os instrumentos numéricos adoptados na simulação dos problemas de propagação de ondas não lineares típicos da engenharia costeira. Dentre dos vários modelos do tipo Boussinesq, neste trabalho utilizam-se os modelos BOUSS3W e COULWAVE.

O modelo BOUSS3W permite simular a propagação de ondas não lineares e dispersivas em zonas abrigadas de profundidade variável e tem em conta os fenómenos de refração, difração, emolamento, dispersão em frequência, dispersão em direcção, geração de harmónicas, reflexão e dissipação de energia por atrito de fundo e por rebentação da onda. Este modelo resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu [1] com termos adicionais para modelar a geração das ondas no interior do domínio, a absorção e reflexão das ondas nas fronteiras, para controlar as oscilações numéricas e para dissipação de energia. É válido desde águas de profundidade intermédia a águas pouco profundas. O modelo usa o método de Galerkin com uma malha não estruturada de elementos finitos para a discretização espacial e foi desenvolvido para aplicações a uma ou duas dimensões (em planta), permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (representativa) em cada ponto do domínio de aplicação.

Um modelo mais complexo completamente não linear e dispersivo é o modelo COULWAVE. Este é um modelo numérico de diferenças finitas desenvolvido por Lynett e Liu [2], [3], [4] e [5], que resolve as equações não-lineares de Boussinesq deduzidas por Wei *et al.* [6]. Este modelo utiliza o conceito de “*multi-layer*” (multi-camada) em que a coluna de água é dividida em várias camadas. A precisão do modelo, assim desenvolvido, depende do número de camadas que se considera, permitindo a sua utilização em águas muito profundas. Deste modo, o modelo é melhor do ponto de vista das características lineares de dispersão. Além disso, foram incluídos termos adicionais associados à dissipação de energia (rebentação, atrito de fundo, espraiamento), à variação no tempo da profundidade, para ter em conta o deslizamento de camadas de terreno emerso ou a ocorrência de sismos que são a causa de tsunamis. O tratamento numérico dessas equações é semelhante ao de Wei *et al.* [6] com excepção de alguns termos não lineares dispersivos.

Face ao modelo BOUSS3W, COULWAVE permite simular um leque maior de fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes, tais como refração devida às correntes e espraiamento (*run-up*). No entanto, o modelo BOUSS3W apresenta um maior potencial na aplicação a zonas portuárias ou confinadas com fronteiras irregulares, pois a malha de elementos finitos e a consideração de diversos coeficientes de reflexão ao longo da fronteira permitem uma simulação mais adequada da reflexão das ondas do que o que acontece com o modelo COULWAVE. Com efeito, o COULWAVE não considera condições de reflexão parcial.

No entanto, em ambos os modelos, se admite um dado perfil de velocidade num dado

ponto ou para cada camada em que se divide a coluna de água. Assim, 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 fenômenos 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, que é dependente de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Estes parâmetros têm de ser calibrados para cada caso de estudo, tornando-se assim uma limitação do modelo numérico.

Em contrapartida, os modelos de simulação baseados nas equações completas de Navier-Stokes, permitem actualmente, graças à evolução dos meios de cálculo, simular com precisão a transformação das ondas em domínios compatíveis com as dimensões de pequenas regiões costeiras.

Um exemplo deste tipo de modelo é o FLUENT [7] que aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes. Neste código, as variáveis são definidas no centro de cada elemento. Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Estão disponíveis diferentes esquemas de interpolação para os termos convectivos (*Upwind* de primeira ordem, lei de potência de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, MUSCL e QUICK), diferentes algoritmos de resolução (Acoplado, SIMPLE, SIMPLEC e PISO) e diferentes modelos de turbulência. A modelação da superfície livre é feita utilizando o método VoF. Este método, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [8], identifica a posição da superfície livre a partir de um indicador escalar, a fracção de volume, que toma o valor de 0 no ar e 1 na água. A posição da superfície livre é definida arbitrariamente pelo valor 0,5. A principal limitação deste modelo é o alto custo computacional envolvido, principalmente quando o comportamento do escoamento é tridimensional.

De modo a analisar o comportamento destes modelos, com diferentes graus de complexidade, na simulação de propagação de ondas sobre um fundo de batimetria complexa, decidiu-se aplicá-los ao caso de estudo experimental, Okamoto e Fortes [9], [10], [11]. Este caso consiste na simulação da propagação de ondas num canal cujo perfil de fundo é do tipo barra-fossa e que apresenta variações da sua largura nos trechos iniciais. A propagação de ondas ao longo desta topografia envolve diversos fenômenos físicos, nomeadamente, o empolamento, a refração, a difração e a dispersão não-linear. Por isso, constitui um óptimo teste para a validação e comparação dos modelos aqui apresentados.

O canal tem 32m de comprimento, a largura varia de 1.0m a 0.6m e a profundidade inicial é de 0.56m. Dos casos apresentados em [9], [10], [11], para este estudo, será analisado o caso da onda de altura $H=0.08\text{m}$ e período $T=1.5\text{s}$. Os resultados numéricos dos três modelos são comparados com os resultados experimentais, no que se refere à elevação da superfície livre e às velocidades horizontais ao longo do canal. É também realizada uma análise espectral de modo a caracterizar o desempenho das simulações e a influência das variações de largura do canal.

Depois desta introdução, descrevem-se na secção 2 os modelos numéricos utilizados e na secção 3 os ensaios em modelo físico. Na secção 4, apresentam-se os testes numéricos

realizados, as condições de teste, as condições de cada modelo, os resultados e a análise comparativa efectuada.

2. MODELOS NUMÉRICOS

2.1. O modelo BOUSS3W

O modelo BOUSS3W resolve as equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu [1]. Estas equações são válidas desde águas de profundidade intermédia a águas pouco profundas, e é um modelo indicado para a propagação de ondas não lineares e dispersivas pois permite reproduzir alguns dos processos mais importantes presentes em regiões costeiras de média a baixa profundidade: a difracção, a refracção, a reflexão, o empolamento, a dispersão de energia para as harmónicas. Para a integração na vertical, foi admitido um perfil de velocidades tipo a uma profundidade pré-definida.

A resolução espacial destas equações é efectuada pelo método dos elementos finitos Galerkin com uma malha não estruturada de elementos finitos. As malhas de elementos finitos são geradas com o gerador automático GMALHA, Pinheiro et al. [12], especialmente criado para modelos de propagação de ondas marítimas.

O modelo utiliza o pacote de integração temporal SPRINT, Berzins et al. [13]. Este software fornece um método geral de resolução de sistemas de equações diferenciais parciais ordinárias utilizando passos de tempo e ordens de integração variáveis. As matrizes, nos casos bidimensionais são esparsas pelo que o método de resolução passa pela factorização da matriz jacobiana.

Para a geração das ondas (regulares e irregulares) no domínio encontra-se implementada uma condição de geração no interior do domínio por intermédio de uma função fonte, segundo o procedimento de Wei et al. [6]. Esta condição permite não só a geração das ondas mas também que as ondas reflectidas nas fronteiras físicas do domínio e que se propagam na direcção da fonte, possam ser absorvidas evitando a sua permanência no domínio e consequente adulteração das características das ondas.

Como condições de fronteira, são admitidas condições de reflexão total, reflexão parcial ou de absorção total. A condição de absorção total é conseguida através da colocação de uma zona absorvente (“*sponge layer*”). Para a simulação da interacção das ondas com uma fronteira física (como é o caso de um quebra-mar ou um cais, falésias rochosas, etc.) é imposta uma condição de fronteira de reflexão parcial.

Relativamente aos fenómenos de dissipação de energia encontram-se implementados no modelo a dissipação de energia por atrito de fundo e pela rebentação da onda. Para o atrito de fundo, a metodologia utilizada consiste em adicionar um termo de tensão tangencial de fundo à equação de conservação da quantidade de movimento, simulando assim a dissipação de energia causada por uma camada limite turbulenta, seguindo o procedimento adoptado por Nwogu e Demirbilek [14]. No caso da rebentação, a metodologia utilizada consiste em adicionar um termo de viscosidade turbulenta à equação de conservação da quantidade de movimento, simulando assim a dissipação de energia causada pela rebentação da ondas, seguindo o procedimento adoptado por Kennedy et al. [15].

Este modelo foi desenvolvido para aplicações a uma e duas dimensões (em planta), permitindo obter resultados da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (representativa) em cada ponto do domínio de aplicação.

2.2. O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, Lynett e Liu [2], [3], [4] e [5], 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. O modelo permite simular a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes, empolamento (linear e não-linear), difracção, refracção pelo fundo e devida às correntes, dispersão de frequência e de amplitude, espraçamento (*run-up*) e dissipação de energia por rebentação da onda.

As equações do modelo, do tipo de Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (multi-layer). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades. Com estes perfis de velocidade que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzida um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas muito profundas e apresentar características lineares até $kh \sim 8$ e um comportamento não-linear de 2ª ordem até $kh \sim 6$.

Lynett e Liu [3], [4] e [5] introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas, o espraçamento, a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, incluíram termos de profundidade dependentes do tempo para ter em conta a variações do perfil de fundo no tempo devido à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby [17] 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 Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby [16] 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 [16] enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta, um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com Kirby et al. [17] é usado.

É de salientar que o modelo 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.

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu [3] 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.

2.3. O modelo FLUENT

O FLUENT aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes. Neste código as variáveis são definidas no centro de cada elemento. Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Estão disponíveis diferentes esquemas de interpolação para os termos convectivos (*Upwind* de primeira ordem, lei de potência de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, MUSCL e QUICK), diferentes algoritmos de resolução (Acoplado, SIMPLE, SIMPLEC e PISO) e diferentes modelos de turbulência [7]. A modelação da superfície livre é feita utilizando o método VoF. Este método, desenvolvido inicialmente por Hirt e Nichols [8], identifica a posição da superfície livre a partir de um indicador escalar, a fracção de volume, que toma o valor de 0 no ar e 1 na água. A posição da superfície livre é definida arbitrariamente pelo valor 0.5.

3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Okamoto e Fortes [9], [10] e [11]) num canal com 38.3m de comprimento e largura que varia de 1.0m e 0.6m. O canal é equipado com um gerador de ondas regular (Fig. 1). A batimetria do fundo do canal numa extensão de 32.4m, a partir do bater de ondas é constituída por uma zona plana seguida de três rampas de inclinação 1:20, 1:40 e 1:80, conforme se mostra na Fig. 1.

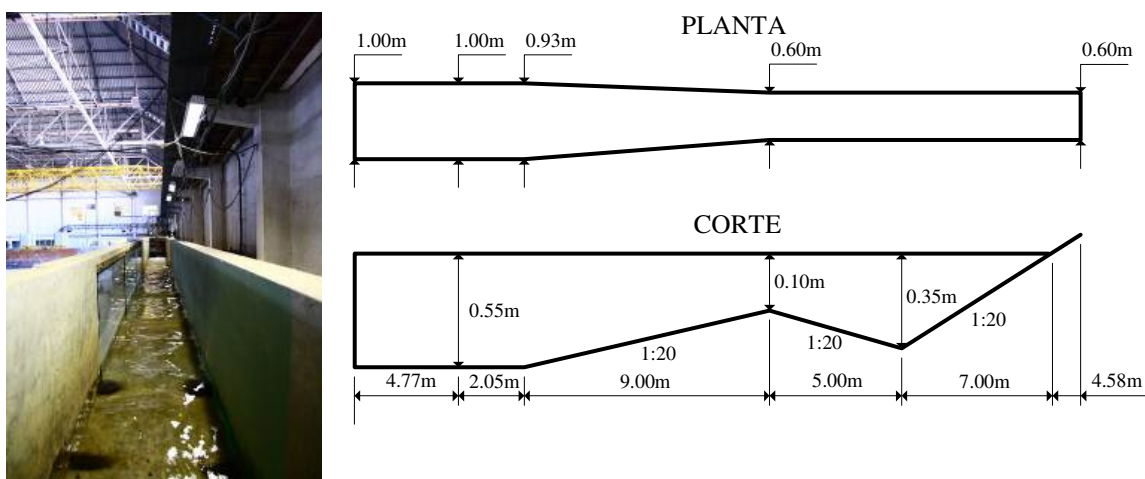


Figura 1. Canal de ensaios experimentais. Fotografia, planta e perfil.

As condições de onda simuladas no canal foram limitadas pelas características do gerador de ondas, que apenas consegue simular um período de onda máximo e correspondente altura de onda máxima de $T=2.7s$ e $H=0.23m$, respectivamente. Assim, apenas foram considerados

os casos correspondentes aos períodos de onda de 1.1, 1.5, 2.0 e 2.5s e alturas de onda de 0.08, 0.10, 0.15 e 0.20 m. Contudo, no caso de $T=1.1s$ e $H=0.20m$, verificou-se que as ondas rebentavam imediatamente após a sua formação devido à declividade da onda, pelo que este teste foi excluído.

Foram instaladas sete sondas resistivas para o cálculo da altura de onda (Fig. 2). A distância entre sondas foi mantida fixa (0.20m). A frequência de amostragem dos ensaios foi de 100Hz. A celeridade da crista de onda foi calculada pela diferença de tempo entre duas sondas separadas por uma distância conhecida (0.20m). Um conjunto de sondas foi posicionado ao longo de 1.20m, quer iniciando em $x=0$ - série 0, 0.20, 0.40, etc., quer iniciando em $x=0.10m$ - série 0.10, 0.30, 0.50, etc..

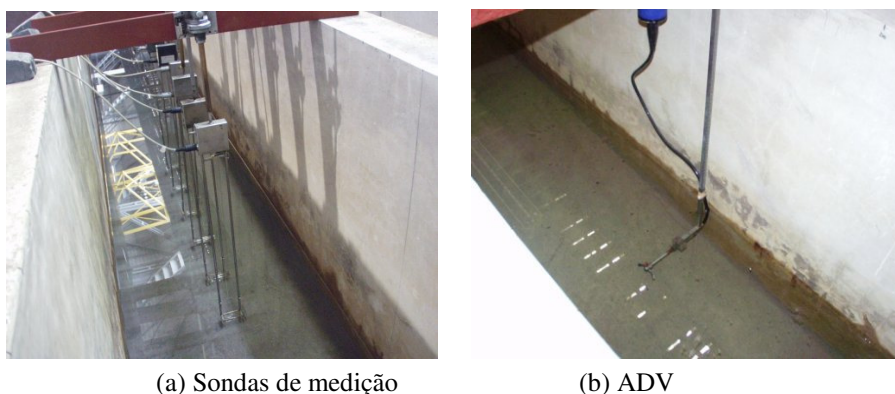


Figura 2. Configuração do canal de ensaios experimentais.

O ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) foi usado para medir a velocidade das partículas (Fig. 2). As velocidades das partículas são medidas desde $x=0.10m$ até, pelo menos, $x=1.00m$ à frente da zona em que termina a rebentação, dependendo do período da onda, pois a localização da crista situa-se à frente da correspondente localização da cava.

Uma vez que as condições de onda impostas são de águas pouco profundas ou de águas de profundidade intermédia, a variação da velocidade na direcção horizontal é pequena ou negligenciável. Assim, o sensor do ADV foi primeiramente colocado no meio da coluna de água. Os testes preliminares mostraram que tal é verdade quando a onda se encontra a rebentar. No entanto, depois da rebentação, mesmo para $T=2.5s$, cuja profundidade relativa é menor que $1/20$ no ponto mais profundo da cava, a velocidade apresenta uma grande variação na vertical. Assim, foram também medidas as velocidades próximo da superfície a partir do término da rebentação. A frequência de amostragem do ADV foi de 25Hz.

Os registos das sondas foram obtidos durante 120s para $T=1.1s$ e $1.5s$ e 150s para $T=2.0s$ e $2.5s$. As velocidades das partículas foram medidas durante 90s para $T=1.1s$ e 120s para os restantes períodos. A medição dos valores só se efectuou após um período de 300s, de modo a estabilizar as condições naturais de oscilação do canal.

A localização do fim da rebentação foi efectuada por observação visual. A zona da crista da onda onde as bolhas desaparecem é considerada o fim da rebentação. Desta forma, foram obtidas cerca de 50 amostras e determinado um valor médio.

4. TESTES NUMÉRICOS

4.1. Introdução

Nas secções seguintes, descrevem-se as simulações numéricas da propagação de ondas sobre o fundo barra-fossa, com especial atenção à rebentação de ondas, efectuadas com os modelos BOUSS3W, COULWAVE e FLUENT para a inclinação de 1/20 a jusante da barra, com profundidade $h=0.1\text{m}$. A condição de agitação aqui testada numericamente corresponde a uma onda de altura $H=0.08\text{m}$ e de período $T=1.5\text{s}$. Este caso foi o escolhido por ser aquele para o qual as velocidades foram medidas detalhadamente: foi medida a velocidade em pontos afastados na vertical de 0.01m , até ao limite em que a sonda do ADV se encontrava completamente submersa e em seis posições ao longo do canal, que vão desde antes até depois da posição da rebentação.

Para esta condição, avaliou-se o desempenho dos modelos numéricos comparando os respectivos resultados com os experimentais. Foram comparados os valores numéricos (BOUSS3W, COULWAVE, FLUENT) e experimentais correspondentes à altura de onda significativa e aos valores mínimo, máximo e médio da velocidade das partículas ao longo do domínio. Para este caso, uma análise do erro permitiu avaliar o desempenho dos modelos. Finalmente, recorrendo à análise espectral, analisou-se o comportamento não-linear dos modelos. Note-se que antes dos cálculos sistemáticos, foi feita uma análise de sensibilidade tanto para as malhas adoptadas como para os parâmetros associados à rebentação, utilizados nos modelos BOUSS3W e COULWAVE.

Os cálculos com os modelos BOUSS3W e COULWAVE foram efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM, demandando um custo computacional de 80s para cada 60s de tempo real, no caso do BOUSS3W e 380s no caso do COULWAVE. O modelo FLUENT foi executado num PC Quadcore intel i7 930, 3.0GHz, com 6GHz de memória RAM. O tempo de cálculo necessário aos códigos não-lineares foi de 24h para cada 60s de tempo real.

4.2. Condições de cálculo do modelo BOUSS3W

Para este caso, o domínio computacional usado pelo modelo numérico BOUSS3W é unidimensional de comprimento 43m (Fig. 3).

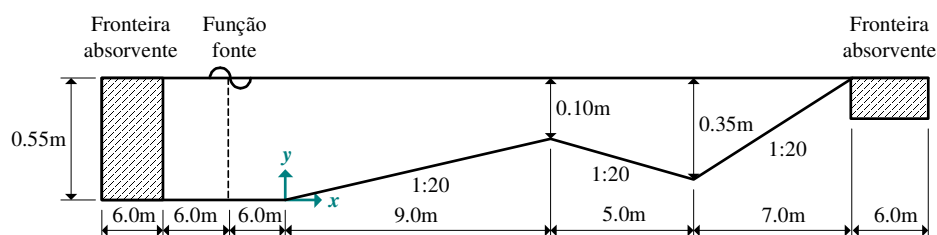


Figura 3. Domínio de cálculo do BOUSS3W. Localização das sondas.

A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de $\Delta x=0.05\text{m}$. O próprio modelo gera uma malha de elementos finitos com base num número mínimo de pontos dado

pelo utilizador, que neste caso, foi de 15. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição $x=12\text{m}$. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos extremos do domínio, com dois comprimentos de onda. Não foi incluído o atrito com o fundo.

Quanto aos valores dos parâmetros relacionados com a rebentação, efectuou-se uma análise de sensibilidade prévia para analisar a sua influência nos resultados numéricos e obter os valores que melhor se adaptam a esta condição experimental. Os valores considerados foram: início da rebentação, $\zeta_i^{(I)} = 0.65\sqrt{gH}$, fim da rebentação, $\zeta_i^{(F)} = 0.15\sqrt{gH}$, duração da rebentação, $T_b = 5\sqrt{g/H}$ e $\delta = 1.2$. O tempo total simulado foi de 50 s. Os resultados numéricos foram obtidos em todos os nós da malha de cálculo e, em particular, nas posições das sondas entre 18m e 32m com intervalos de 0.50m

4.3. Condições de cálculo do modelo COULWAVE

Para este caso, o domínio computacional usado pelo modelo numérico COULWAVE é bidimensional de comprimento 32 m e de largura 1m (Fig. 4).

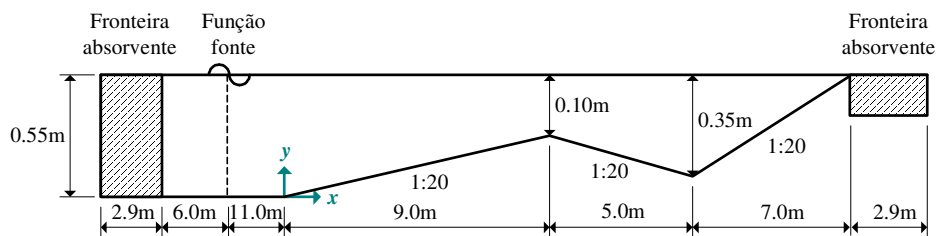


Figura 4. Domínio de cálculo do COULWAVE. Localização das sondas.

A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de $\Delta x = 0.05\text{m}$. O próprio modelo gera uma malha de diferenças finitas com base num número mínimo de pontos dado pelo utilizador, que neste caso, foi de 40. O número de Courant admitido foi igual a 0.25. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição $x = -11\text{m}$. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos extremos do domínio, com um comprimento de onda. Não foi incluído o atrito com o fundo.

Quanto aos valores dos parâmetros relacionados com a rebentação, efectuou-se uma análise de sensibilidade prévia para obter os valores que melhor se adaptam a esta condição experimental. Os valores considerados foram: início da rebentação, $\zeta_i^{(I)} = 0.65\sqrt{gH}$, fim da rebentação, $\zeta_i^{(F)} = 0.08\sqrt{gH}$, duração da rebentação, $T_b = 8\sqrt{g/H}$ e $\delta = 6.5$. O tempo total simulado foi de 300 s. Os resultados numéricos foram obtidos em todos os nós da malha de cálculo e, em particular, nas posições das sondas entre 6m e 20m com intervalos de 0.50 m, Fig. 4.

4.4. Condições de cálculo do modelo FLUENT

O domínio computacional usado pelo FLUENT é tridimensional e está mostrado na Fig. 5. Existem dois trechos iniciais onde o canal possui variações de largura e de profundidade.

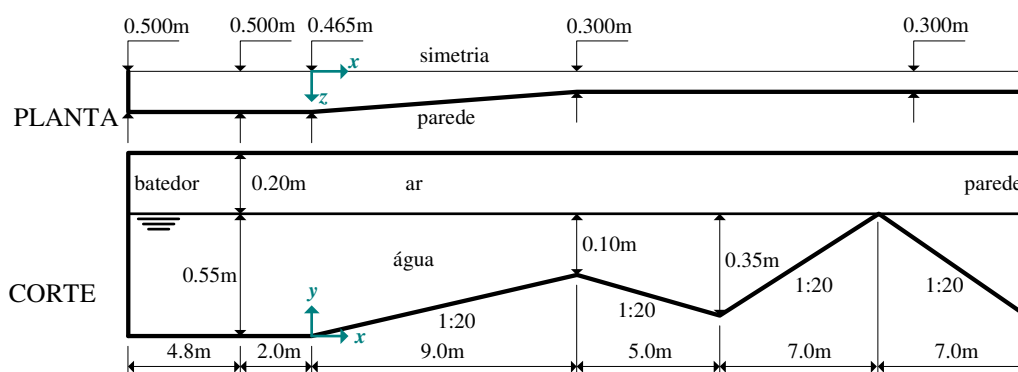


Figura 5. Domínio computacional do FLUENT

O domínio computacional foi discretizado considerando tamanhos das células de hexaedros na direcção horizontal variando a partir da geração da onda de 0.01m (correspondente a aproximadamente $L/290$), 0.005m ($L/580$) na secção de menor profundidade e, no final do canal, 0.10m ($L/30$). Na direcção vertical foram construídas 71 camadas em todos os trechos, com tamanhos das células próximos a linha de repouso de 0.005m (equivalente a $1/16$ da altura da onda). Na direcção transversal foram usadas 15 camadas de igual espaçamento. O número total de células foi de 598000.

O fundo tem a condição de não-deslizamento, enquanto que nas paredes laterais, a componente normal a parede é nula. Para a geração da onda foi construída uma UDF (*User-defined function*) a qual especifica o perfil de velocidades de acordo com a teoria de Stokes de 2ª ordem.

O esquema de integração no tempo é o implícito de primeira ordem, enquanto que para a equação da fracção de volume é adotado um esquema explícito. O método de acoplamento pressão-velocidade usado é o SIMPLEC. As soluções da pressão é simulada pelo esquema PRESTO!, das equações de movimento pelo MUSCL de terceira ordem e da equação da fracção de volume pelo HRIC modificado. O passo de tempo é de 0.002s.

O modelo de turbulência utilizado é o k- ϵ Standard. Para a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta foram adotados os esquemas *upwind* de segunda e primeira ordens, respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Altura média quadrática

Na Figura 6 apresentam-se os valores da altura média quadrática que caracterizam as séries de valores da elevação da superfície da água ao longo do canal a partir da posição $x=7.0m$. Os resultados são comparados com os obtidos experimentalmente.

De um modo geral, observa-se que o andamento geral dos resultados numéricos da altura de onda significativa é semelhante aos correspondentes dos resultados experimentais. Todos os modelos simulam o aumento da altura de onda à medida que a profundidade diminui, a ocorrência de rebentação e o decréscimo da altura de onda depois desta rebentação (entre os

trechos $x=8.4\text{m}$ e 9.5m aproximadamente) e a sua manutenção num valor constante mesmo após o fim da rebentação.

Entre $x=7.0\text{m}$ e $x=8.7\text{m}$ (aproximadamente) observa-se que o COULWAVE apresentou uma maior concordância com os resultados experimentais, enquanto que o modelo BOUSS3W apresentou resultados mais afastados. Tanto o BOUSS3W quanto o FLUENT apresentaram alturas menores que as previstas experimentalmente.

Nas posições acima de $x=8.7\text{m}$, nota-se que as alturas obtidas pelos modelos são maiores que as do experimento, havendo maior discrepância dos resultados do modelo BOUSS3W. Acima de $x=11.3\text{m}$, aproximadamente, os resultados dos modelos tendem a estabilizar e convergir aos resultados experimentais até o final do trecho.

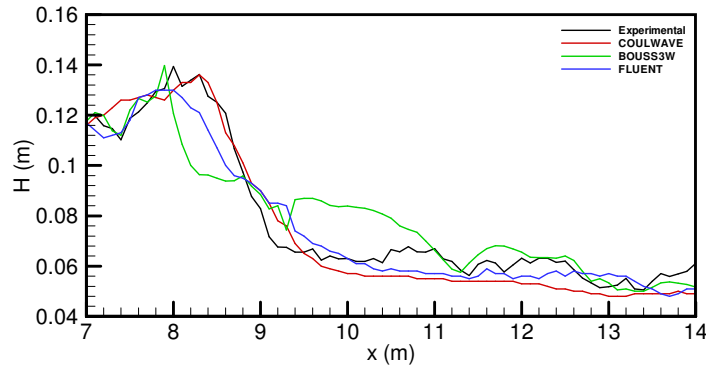


Figura 6. Altura de onda média quadrática.

Na Tabela 1 apresentam-se os erros das alturas médias quadráticas ao longo do canal (a partir de $x=7.0\text{m}$) considerando os resultados experimentais como referência. Nesta Tabela, *bias* é o erro médio absoluto, dado pela equação:

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}, \quad (1)$$

rmse é o erro quadrático médio, calculado da forma:

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad (2)$$

O índice de concordância, *ic*, é expresso como segue

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2}. \quad (3)$$

Nas Eq. (1) a (3), 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. O índice de

concordância ic varia de zero a um, sendo que quanto maior é o valor, maior é a concordância dos valores numéricos com os experimentais. O parâmetro $bias$ quantifica o afastamento dos resultados dos modelos em relação aos de referência, sendo que valores positivos indicam que, na média, os valores numéricos foram maiores que os de referência e no caso de valores negativos ocorre o contrário.

Uma análise na Tab. 1 permite afirmar que os modelos COULWAVE e FLUENT apresentaram erros muito semelhantes. Os parâmetros $bias$ destes dois modelos indicam que os seus valores são ligeiramente menores que os experimentais. O BOUSS3W apresenta índice de concordância, ic , e o parâmetro $rmse$ menores que os outros dois modelos, enquanto que o $bias$ indica que, na média, os valores são um pouco maiores que os experimentais.

MOLELO	$bias$	$rmse$	ic
COULWAVE	-0.0034	0.0073	0.98
BOUSS3W	0.0020	0.0135	0.93
FLUENT	-0.0024	0.0075	0.98

Tabela 1. Erros das alturas médias quadráticas ao longo do canal.

5.2. Série temporal da elevação da superfície livre

Na Fig. 7 apresenta-se os resultados numéricos da elevação da superfície livre ao longo do tempo para sondas em $x=7.5$ m 9.5 m e 11.5 m, obtidas com os três modelos numéricos e os correspondentes experimentais.

Como se pode observar, à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidades 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.

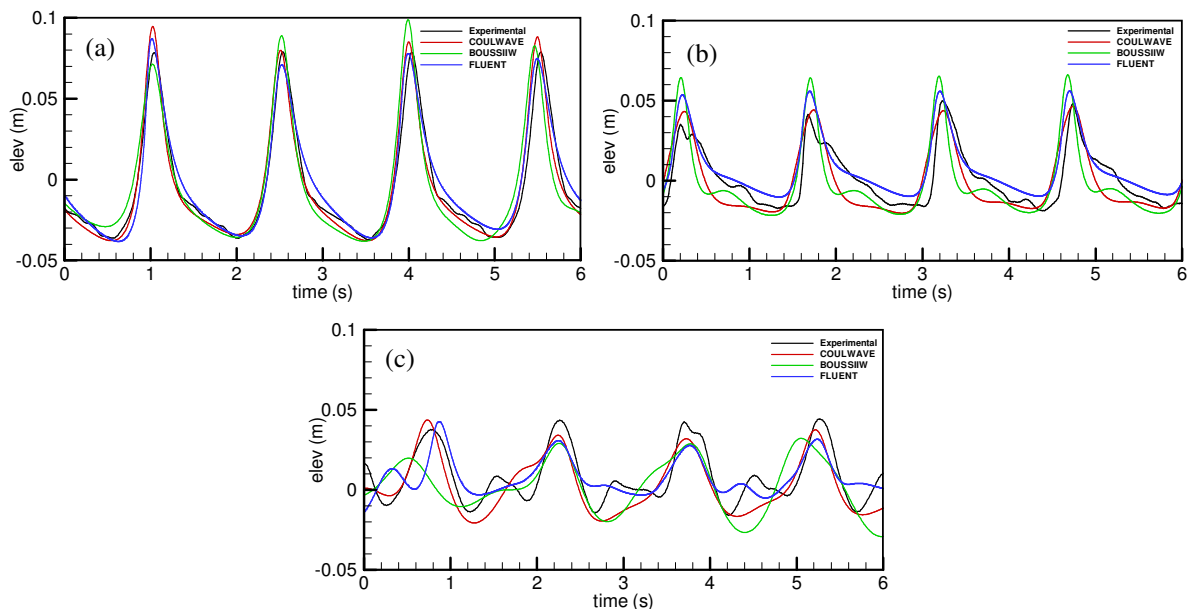


Figura 7. Elevação da superfície livre ao longo do tempo para (a) $x=7.5$ m, (b) 9.5m e (c) 11.5m

De uma forma geral, constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais na posição da sonda em $x=7.5\text{m}$. Com efeito, o andamento das deformadas obtidas com os modelos numéricos é bastante semelhante ao do experimental nesta sonda. Destacam-se os maiores valores das elevações máximas obtidos pelo BOUSS3W em relação aos experimentais.

As sondas em $x=9.5\text{m}$ e $x=11.5\text{m}$ estão localizadas após a rebentação. Assim, além dos efeitos do fundo, existe a influência da turbulência devido a rebentação. Nestes casos, as diferenças entre as elevações obtidas pelos modelos numéricos acentuam-se.

Para a sonda em $x=9.5\text{m}$, os três modelos apresentam formas da elevação ao longo do tempo semelhantes entre si e com as do resultado experimental. O COULWAVE proporcionou valores máximos da elevação mais próximos dos experimentais, enquanto que o BOUSS3W se afastou mais. Quanto aos valores mais próximos das cavas, todos os modelos apresentam razoáveis diferenças em relação aos experimentais. Observa-se que, neste caso, o FLUENT mostrou valores maiores que os experimentais, enquanto que os modelos Boussinesq apresentaram valores menores.

Na sonda em $x=11.5\text{m}$ observa-se uma não linearidade mais acentuada que na anterior. Neste caso, os resultados numéricos diferem mais entre si e com o experimental. Embora com formas diferentes, os modelos COULWAVE e FLUENT conseguem representar melhor os resultados experimentais. Os valores máximos das elevações apresentados pelos modelos são menores que os experimentais, com maior aproximação aqueles obtidos pelo COULWAVE e FLUENT. As não linearidades mostradas nos resultados experimentais não são bem captadas pelos modelos, com maior discrepância do modelo BOUSS3W.

5.3. Série temporal da velocidade horizontal

Na Fig. 8 apresentam-se as séries temporais da velocidade horizontal calculadas com os modelos BOUSS3W, COULWAVE e FLUENT e as séries medidas nos ensaios para $x=7.5\text{m}$ e 0.16m da superfície livre (antes de ocorrer rebentação), para $x=9.5\text{m}$ e 0.10m da superfície livre e 11.5m e 0.12m da superfície livre (ambas depois da rebentação).

Observa-se que, de maneira geral, os modelos reproduzem razoavelmente o comportamento das velocidades horizontais nas localizações indicadas. Particularmente a $x=7.5\text{m}$ e 0.16m da superfície livre, onde a profundidade é 0.175m , os modelos numéricos têm boa concordância com o experimento. Próximo aos valores máximos o BOUSS3W apresenta valores maiores que os experimentais, enquanto que o FLUENT mostra valores menores. Na região próxima aos valores máximos negativos de velocidade, enquanto que o FLUENT apresenta valores maiores que os experimentais, o BOUSS3W resulta em valores menores. O COULWAVE apresentou um comportamento mais próximo ao experimental ao longo do tempo.

Para a sonda em $x=9.5\text{m}$ e 0.10m da superfície livre, onde a profundidade é 0.125m , os modelos numéricos diferem um pouco mais do experimento, possivelmente devido aos efeitos não lineares adicionados pela influência da rebentação. Os modelos COULWAVE e FLUENT se aproximam mais do experimento, enquanto que o primeiro apresenta valores menores na parte negativa, o segundo apresenta valores maiores que os experimentais.

Na sonda em $x=11.5\text{m}$ e 0.12m da superfície livre, onde a profundidade é de 0.225m , nota-se que, tanto na parte negativa quanto na positiva, as amplitudes de velocidade são menores, devido aos efeitos da rebentação. Visivelmente os modelos COULWAVE e FLUENT representam melhor o comportamento da velocidade horizontal apresentado no experimento.

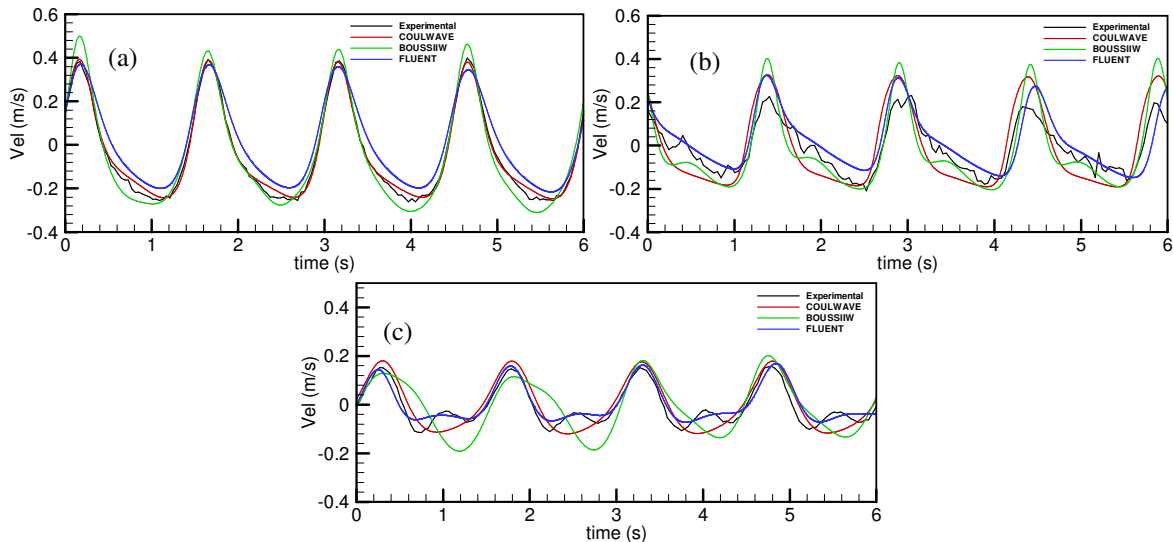


Figura 8. Velocidades horizontais para (a) $x=7.5\text{m}$ e 0.16m da superfície livre, (b) $x=9.5\text{m}$ e 0.10m da superfície livre e (c) $x=11.5\text{m}$ e 0.12m da superfície livre.

5.4. Velocidade das partículas

Na Fig. 9 apresentam-se os valores máximo, mínimo e médio de velocidade das partículas de cada registro correspondentes aos valores dos modelos numéricos e do experimento para uma posição abaixo da superfície livre de 0.10m .

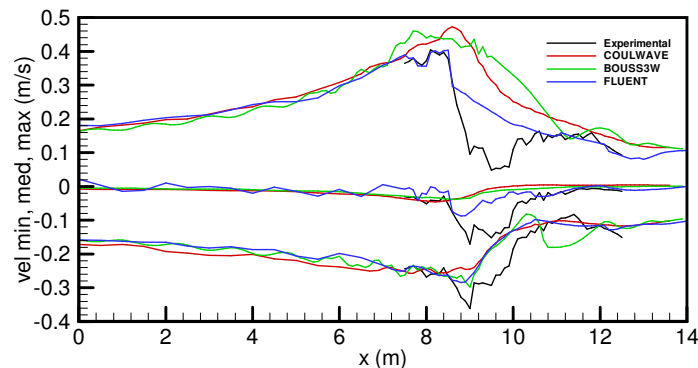


Figura 9. Escoamento médio e envolvente da velocidade das partículas.

Verifica-se que, de uma forma geral, os modelos simulam bastante bem o escoamento médio e envolvente antes da rebentação até $x=9\text{m}$ e depois da crista da barra por volta de $x=11.5\text{m}$. Nestes casos, os valores máximos, mínimos e médios são bem previstos pelos modelos numéricos. Fora dessas secções, as diferenças entre resultados numéricos e

experimentais acentuam-se. Os valores dos resultados numéricos não conseguem reproduzir de forma satisfatória as variações das velocidades mínimas, médias e máximas nesta região. Todos os modelos apresentam valores maiores que os experimentais, com maior ênfase às velocidades máximas. O FLUENT foi o que mais se aproximou do experimento neste trecho.

A quantificação dos erros dos resultados dos modelos numéricos estão mostrados na Tab.2. Nota-se que todos os modelos apresentam os parâmetros *bias* positivos, indicando valores maiores que os experimentais. Os erros dos parâmetros *rmse* mostram que o FLUENT atingiu os valores mais baixos em relação aos outros dois modelos. Os índices de concordâncias, *ic*, obtidos pelo FLUENT, são maiores em comparação aos outros modelos. O COULWAVE apresenta uma ligeira vantagem em relação ao BOUSS3W, atingindo valores maiores para *vmin* e *vmed* e valor equivalente no que se refere ao *vmax*.

MOLELO	<i>bias</i>			<i>rmse</i>			<i>ic</i>		
	<i>vmin</i>	<i>vmed</i>	<i>vmax</i>	<i>vmin</i>	<i>vmed</i>	<i>vmax</i>	<i>vmin</i>	<i>vmed</i>	<i>vmax</i>
COULWAVE	0.028	0.104	0.043	0.048	0.139	0.063	0.89	0.70	0.81
BOUSS3W	0.012	0.121	0.039	0.054	0.162	0.058	0.84	0.65	0.82
FLUENT	0.024	0.037	0.029	0.044	0.069	0.044	0.91	0.89	0.91

Tabela 2. Erros das velocidades mínimas, médias e máximas ao longo do canal.

5.5. Análise espectral

A partir das séries de elevação da superfície livre calculadas numericamente e das experimentais, determinaram-se os valores da densidade espectral de variância e a análise harmônica respectiva para as posições $x=7.5\text{m}$, 9.5m e 11.5m , representados nas Fig. 10, 11 e 12, respectivamente.

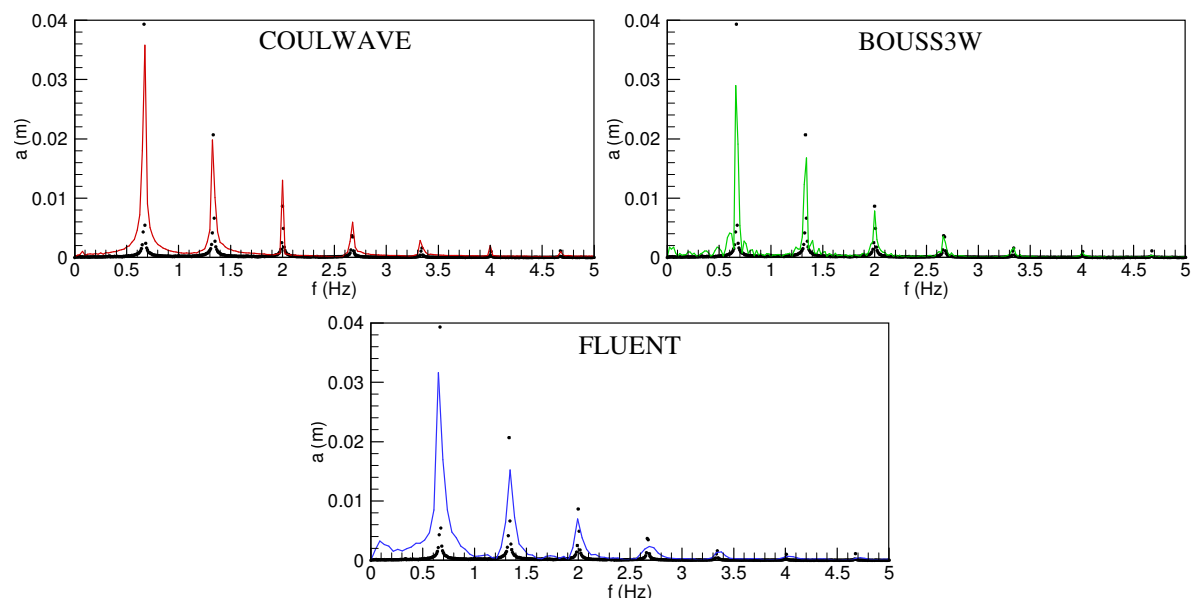


Figura 10. Espectros de energia na sonda em $x=7.5\text{m}$. Comparação dos resultados do COULWAVE, BOUSS3W e FLUENT com o resultado experimental.

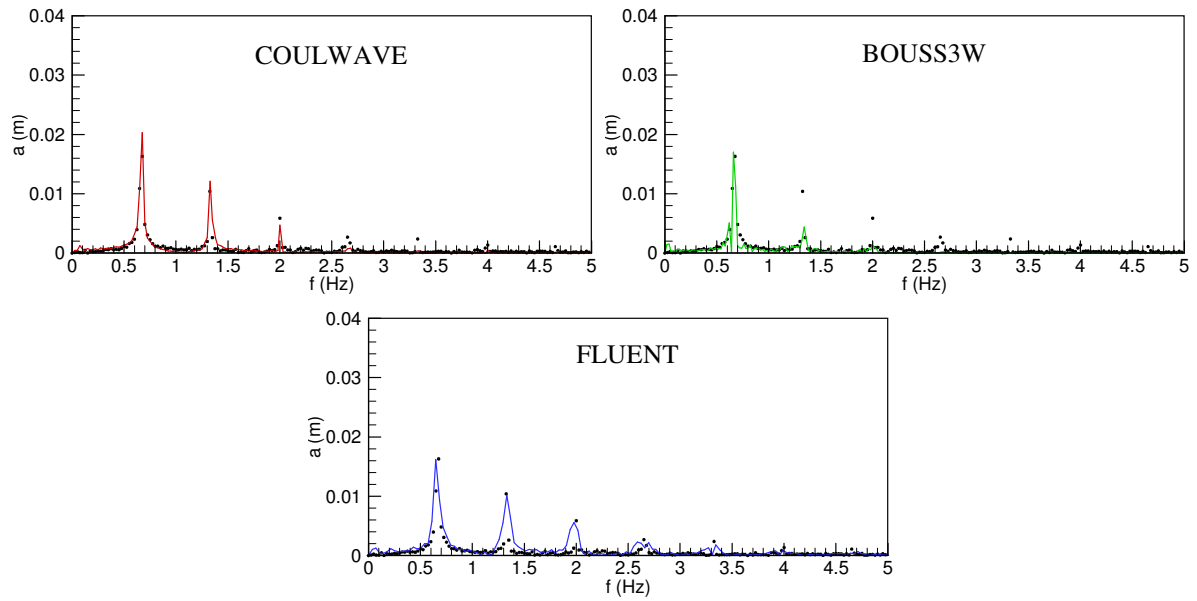


Figura 11. Espectros de energia na sonda em $x=9.5\text{m}$. Comparação dos resultados do COULWAVE, BOUSS3W e FLUENT com o resultado experimental.

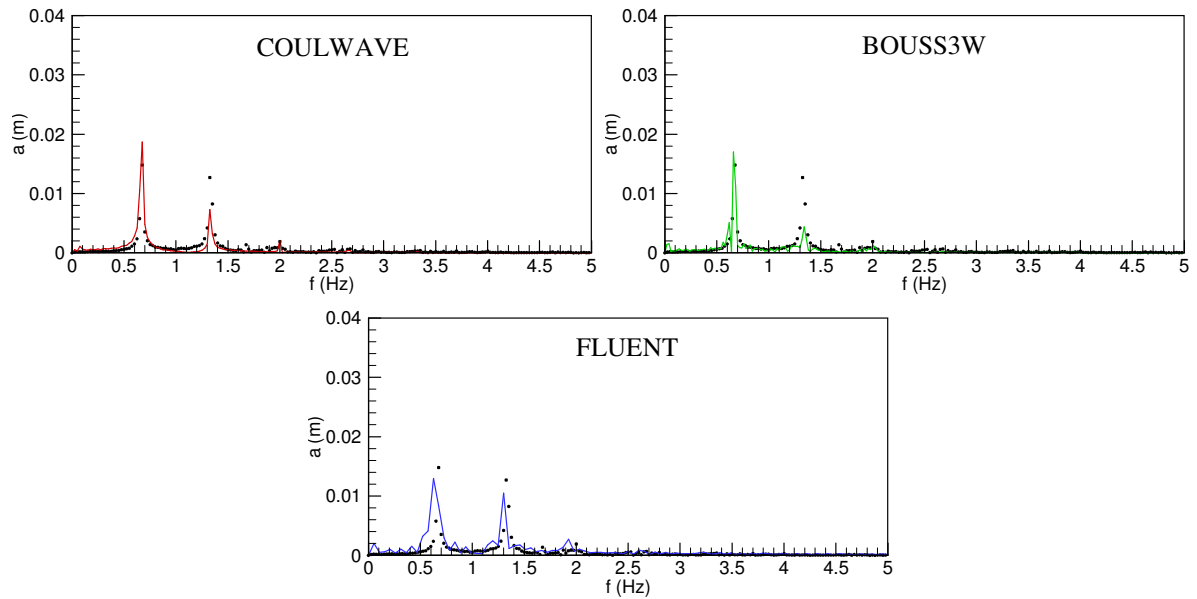


Figura 12. Espectros de energia na sonda em $x=11.5\text{m}$. Comparação dos resultados do COULWAVE, BOUSS3W e FLUENT com o resultado experimental.

Da análise destas figuras, verifica-se uma boa concordância entre os espectros numéricos e experimentais. Com efeito os modelos numéricos conseguem reproduzir as frequências de pico dos espectro, bem como algumas das harmónicas de ordem superior do espectro de energia experimental.

Os espectros da sonda a $x=7.5\text{m}$, antes da rebentação, observa-se picos significativos nas posições da frequência fundamental e harmônicas até a quarta ordem. Dos três modelos, o COULWAVE consegue representar com maior proximidade os resultados experimentais, principalmente a amplitude na frequência fundamental, onde os outros modelos indicam valores menores.

Em $x=9.5\text{m}$, logo após a rebentação, a energia significativa é distribuída até a quinta ordem, indicando uma maior não linearidade em relação a sonda anterior. O COULWAVE apresenta um pico na frequência fundamental maior que o experimental e não consegue reproduzir a quarta e quinta harmônicas. Já o BOUSS3W resulta em um pico na frequência fundamental muito próximo ao do experimental, mas não consegue reproduzir as outras harmônicas. O FLUENT apresenta uma distribuição de energia muito próxima a do experimento, com amplitudes dos picos semelhantes aos experimentais.

Na sonda em $x=11.5\text{m}$ percebe-se que a energia se distribui praticamente até a segunda harmônica e com intensidade menor que a das outras sondas. O FLUENT foi o que melhor representou a distribuição do espectro, enquanto que os outros dois modelos não conseguiram captar a segunda harmônica adequadamente, sendo que o BOUSS3W ficou mais afastado do espectro experimental.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se a aplicação de três modelos numéricos, dois do tipo Boussinesq BOUSS3W e COULWAVE e outro do tipo RANS, FLUENT, à propagação de ondas sobre uma praia com perfil de fundo do tipo barra-fossa, para análise do desempenho destes modelos na simulação. Pretendia-se avaliar o desempenho destes modelos na simulação da rebentação de ondas, i.e., pretendeu-se analisar as diferenças encontradas entre a utilização de um modelo do tipo RANS e diferentes aproximações à equações de Boussinesq, os modelos BOUSS3W e COULWAVE, bidimensionais em planta, mas integrados na vertical e utilizando uma formulação aproximada para a rebentação das ondas.

Os valores da série temporal da elevação da superfície livre e da velocidade horizontal em diversos pontos ao longo do canal foram comparados com os resultados dos ensaios em modelo físico, Okamoto e Fortes [9], [10] e [11]. Também se efectuou uma comparação dos valores de altura média quadrática e dos valores máximo, médio e mínimo das velocidades da partícula ao longo do canal e das componentes espectrais, correspondentes aos resultados numéricos e aos experimentais.

Observou-se que, antes e depois da rebentação, os modelos representam adequadamente o comportamento da onda considerando todas as variáveis envolvidas. Uma maior discrepância ocorre em relação aos resultados experimentais no que se refere ao espectro em frequência após a rebentação, principalmente os resultados dos modelos Boussinesq e com mais ênfase do modelo BOUSS3W.

De maneira geral, pode-se concluir que, enquanto o FLUENT apresentou resultados mais próximos dos experimentais em termos de campo de velocidades e de distribuição de energia devido às não-linearidades provocadas pela rebentação e a presença do fundo nos trechos de $x=8.4\text{m}$ a 9.5m , o modelo COULWAVE foi mais preciso na determinação das alturas

significativas na zona de rebentação. No entanto, nenhum modelo reproduziu a brusca variação de altura significativa neste trecho.

Pode-se concluir que, mesmo considerando as variações de largura do canal através da simulação 3D do FLUENT, os resultados em termos de altura de onda não foram satisfatórios em relação aos modelos Boussinesq, enquanto que em relação ao campo de velocidades e de distribuição no espectro de energia houve melhor precisão. Ressalta-se que o FLUENT tem a grande desvantagem do seu alto consumo de tempo de CPU em relação ao dos modelos Boussinesq.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) concedido pelo projecto 303308/2009-5. Os autores agradecem também à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006. Este trabalho insere-se no âmbito do convénio entre o LNEC e a FURG.

REFERÊNCIAS

- [1] O. Nwogu, “Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation”, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. **119** (6), pp. 618-638, (1993).
- [2] P. Lynett, T. Wu, P.L-F Liu, “Modelling wave run-up with depth-integrated equations”, *Coastal Engineering*, Vol. **46**, pp. 89-107, (2002).
- [3] P. Lynett, P.L-F Liu, “Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations, COULWAVE Code Manual”, Cornell Univ. Long Inter, (2004).
- [4] P. Lynett, P.L-F Liu, “A two-layer approach to water wave modeling”, *Proc. Royal Society of London A*. 460, pp.2637– 2669, (2004).
- [5] P. Lynett, P.L-F Liu, “A numerical study of submarine landslide generated waves and run-up”, *Proceedings of the Royal Society of London A*. 458, pp. 2885–2910, (2002).
- [6] G. Wei, J.T. Kirby, A. Sinha, “Generations of waves in Boussinesq models using a source function method”, *Coastal Engineering*, Vol. **36** (4), pp.271-299, (1999).
- [7] FLUENT 6.3 User’s Guide, Fluent Inc., USA, 2006.
- [8] C.W. Hirt and B.D. Nichols, “Volume of fluid VOF method for the dynamics of free boundaries”, *J. Comp. Phys.*, Vol. **39**, pp. 201-225, (1981).
- [9] T. Okamoto, C.J.E.M. Fortes, “Wave Breaking Termination on Bar-trough Shaped Beaches”, *18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, pp. 811-819, (2008).
- [10] T. Okamoto, C.J.E.M. Fortes, “Desempenho do modelo COULWAVE na simulação da rebentação sobre um perfil barra fossa. Análise de critérios de rebentação”, *Congresso de Metodos Numéricos*. Barcelona, 29 Junho a 5 Julho, (2009).
- [11] T. Okamoto, C.J.E.M. Fortes, M.G. Neves, “Evaluation of the vertical profile of particle velocity in nonlinear numerical models on the wave propagation over a bar

- trough profile beach”, *10th International Coastal Symposium ICS 2009*. Lisboa, Portugal, 13 a 18 de Abril, (2009).
- [12] L. Pinheiro, J.L.M. Fernandes, C.J.E.M. Fortes, “Finite Element Mesh Generator with Local Density Conditioned to Bathymetry for Wave Propagation Models in Coastal Zones”, *Proc. of EUA4X@IAC 06*, Roma Italy, October 2006. IMACS Series in Comp.and Applied Mathematics Vol. **12**, pp. 71-80, (2007).
- [13] M. Berzins, R.M. Furzeland, L.E. Scales, “A user’s manual for SPRINT - a versatile software package for solving systems of algebraic, ordinary and partial differential equations: Part 3 - advanced use of SPRINT”, Technical Report TNER.85.058, Thornton Res. C, Chester, (1985).
- [14] O.E. Nwogu, Z. Demirbilek, “BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors. Report 1 Theoretical Background and Users Manual”, ERDC/CHL TR-01-25, U.S. Army Corps of Engineers, (2001).
- [15] A.B. Kennedy, Q. Chen, J.T. Kirby, R.A. Dalrymple, “Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. I: 1D”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, pp. 39-47, (2000).
- [16] G. Wei, J.T. Kirby, “Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations”, *J. Port Eng.*, Palermo, 7 a 9 de Outubro, (1995).
- [17] J.T. Kirby, G. Wei, Q. Chen, COULWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user’s manual, UD, Newark, Relatório CACR9806, (1998).