

ANÁLISE DAS VELOCIDADES HORIZONTAIS NA SIMULAÇÃO DA REBENTAÇÃO SOBRE UM PERFIL BARRA-FOSSA

Takashi Okamoto¹, Conceição Juana Fortes¹, Maria Graça Neves¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, NPE/DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: tokamoto@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, gneves@lnec.pt
<http://www.dha.lnec.pt/npe/portugues/actividade.html>

Sumário

Nesta comunicação, avalia-se o desempenho dos modelos COBRAS-UC e COULWAVE na simulação da rebentação de ondas sobre um perfil barra-fossa, caso de teste estudado experimentalmente. Os resultados numéricos de ambos os 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 no tempo, espectral e estatística de modo a caracterizar o desempenho dos modelos e a sua capacidade na simulação dos efeitos não lineares. Para o modelo COBRAS-UC é efectuada a caracterização do perfil de velocidades ao longo da coluna de água e comparada com os dados experimentais.

Palavras-chave: Propagação de ondas, Modelo RANS, Modelo de Boussinesq, COBRAS-UC, COULWAVE

1 Introdução

A determinação da zona de rebentação e do perfil de velocidades associado é especialmente importante em estudos de hidrodinâmica e transporte de sedimentos.

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 dispersão em amplitude. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo COULWAVE, Lynett e Liu [4], que é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do 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 tem de ser calibrados para cada caso de estudo.

De forma a resolver este problema, os modelos baseados na equação de Navier-Stokes (RANS) são frequentemente utilizados e mostram um excelente desempenho na simulação das características da onda em fundos de batimetria complexa. Um exemplo deste tipo de modelos, é o modelo COBRAS-UC, Lara *et al.* [2], resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência $k-\epsilon$ e um método de seguimento da superfície livre do tipo “Volume of Fluid” (VOF). Este modelo permite simular o escoamento em estruturas porosas, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. Como resultados, podem obter-se valores de diferentes grandezas tais como o volume galgado, campo de velocidades e pressões, etc.

Do exposto é claro que o modelo COBRAS-UC permite uma descrição mais adequada e precisa da propagação de ondas sobre fundos de profundidade variável ou 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 facto de se tratar de um modelo unidimensional enquanto COULWAVE é um modelo bidimensional em planta, e principalmente ao elevado tempo de cálculo e esforço computacional a que está associado quando comparado com o modelo COULWAVE.

Em Okamoto e Fortes [8], avaliou-se o desempenho do modelo COULWAVE na simulação da rebentação de ondas sobre um perfil barra-fossa, caso de teste estudado experimentalmente por Okamoto e Fortes [7]. Mais concretamente, foi efectuada um estudo de sensibilidade dos resultados numéricos à variação dos critérios de rebentação (início, fim, duração) incluídos no modelo, para quatro condições de ensaio distintas. Os resultados numéricos foram comparados com os experimentais, em termos dos valores de altura de onda, ao longo do canal.

Verificou-se que o modelo simula de forma adequada a transformação não linear das ondas ao longo de um fundo do tipo barra-fossa, mas é muito sensível aos parâmetros que controlam a rebentação. Mais ainda, nessas zonas de rebentação, as diferenças entre resultados numéricos e experimentais acentuam-se, dadas as características tridimensionais do escoamento. Note-se que o modelo resolve equações integradas na profundidade para as quais foi necessário admitir um determinado perfil de velocidades em cada camada.

Em Okamoto *et al.* [9], foi efectuado uma comparação, em termos qualitativos, entre os resultados do modelo COBRAS-UC e do modelo COULWAVE, para o mesmo perfil barra-fossa atrás referido. Os resultados em termos da altura de onda e das séries da velocidade horizontal foram comparados com as medições para uma onda de período $T=1.5s$ e altura de $H=8cm$. Verificou-se que ambos os modelos, e em especial o modelo COBRAS-UC, conseguem prever as alterações da altura de onda ao longo do canal, até à rebentação. Depois da rebentação as diferenças entre resultados numéricos e experimentais acentuam-se, especialmente para o caso do modelo COULWAVE. Os resultados do modelo COBRAS-UC de velocidade horizontal junto à superfície livre são bastante semelhantes aos experimentais, o que não acontece em relação junto ao fundo. A razão poderá estar relacionada com o facto de não se conhecer o perfil de velocidades junto ao batedor, e que, por conseguinte, pode não ser o imposto no modelo COBRAS-UC. Note-se ainda que este modelo requer um forte esforço computacional.

O presente trabalho surge no seguimento dos trabalhos anteriores. Pretende-se aprofundar a análise anteriormente efectuada do desempenho do modelo COULWAVE e de COBRAS-UC, 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 inferir das incertezas dos resultados obtidos. Assim, é realizada uma análise no tempo com os valores numéricos e experimentais (em termos da altura de onda e das velocidades) e uma análise espectral de modo a avaliar a capacidade dos modelos na simulação dos efeitos não lineares. Determinam-se também parâmetros estatísticos de modo a quantificar a diferença entre os resultados numéricos e experimentais no caso da velocidade das partículas. Finalmente, para o modelo COBRAS-UC é efectuada a caracterização do perfil de velocidades ao longo da coluna de água e compara-se com os dados experimentais.

2 Modelos numéricos

2.1 O modelo COBRAS-UC

O modelo COBRAS-UC (Lara *et al.* [2]) resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$, tridimensional (“two-equation”) e um método de seguimento da superfície livre do tipo “Volume of Fluid” (VOF). Desta forma, a superfície livre pode comportar-se de maneira arbitrária, o que permite que existam zonas desconexas, formação de gotas, etc. Os métodos utilizados para resolver as equações são os métodos interactivos de diferenças finitas, melhorando assim a precisão dos resultados. O modelo permite simular o escoamento em estruturas porosas, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. Como resultados, podem obter-se valores de diferentes grandezas, tais como o volume galgado, campo de velocidades e pressões, etc.

O modelo COBRAS-UC é baseado no modelo RIPLLE, originalmente desenvolvido pela NASA, e modificado na Universidade de Cornell, dando origem ao modelo COBRAS (*Cornell BReaking waves And Structures*), especificamente para tratar dos fenómenos da rebentação e ter em conta as estruturas porosas. Finalmente o modelo foi melhorado na Universidade de Cantábria no que respeita à optimização de cálculo e à melhoria dos sistemas de entrada e saída do modelo, dando origem ao modelo COBRAS-UC.

COBRAS-UC é um modelo numérico bidimensional em perfil, que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS), ao que se incorporou um modelo não linear de turbulência, $k-\epsilon$.

Para o escoamento em meios porosos inclui-se um modelo de dissipação de energia não linear, que corresponde a uma variação das equações RANS e que se obtêm a partir de uma integração num volume de controle no meio poroso, considerando-se assim o meio poroso como um meio contínuo. Implementou-se ainda um modelo $k-\epsilon$ no interior do meio poroso.

O modelo incorpora um método de seguimento da superfície livre do tipo “Volume of Fluid” (VOF). Desta forma, a superfície livre pode comportar-se de maneira arbitrária, o que permite que existam zonas desconexas, formação de gotas, etc. Os métodos utilizados para resolver as equações são interactivos de diferenças finitas, melhorando assim a precisão dos resultados.

Para a execução de uma simulação numérica, é gerada uma malha formada por elementos rectangulares, cuja dimensão pode variar de forma não linear, podendo formar uma malha fina na zona de interesse do estudo e uma malha grosseira onde não seja necessário um cálculo tão preciso.

Os obstáculos e zonas de diferentes porosidades são definidos através de funções contínuas. Para o cálculo do escoamento no meio poroso é necessário definir as propriedades do meio, tais como a porosidade e o tamanho

dos elementos que o compõe e uma série de parâmetros adicionais que dependem do escoamento e que precisam de ser calibrados.

O modelo permite obter informação completa de pressão, vorticidade, viscosidade turbulenta, velocidades horizontais e verticais, posição da superfície livre, conservação de massa, volume galgado, etc. e foi já validado em diferentes casos de engenharia costeira com bons resultados na simulação de escoamentos em estruturas porosas.

2.2 O Modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, Lynett e Liu [3] [4], [5] e [6], 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, refração pelo fundo e devida às correntes, dispersão de frequência e de amplitude, espraiamento (*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 [4], [5] e [6] introduziram termos adicionais nas equações de modo a ter em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas, o espraiamento, 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 [10] 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 [10] 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 [10] enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta, um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com Kirby *et al.* [1] 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 [4] 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 Vantagens e desvantagens dos modelos COULWAVE e COBRAS-UC

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 em que se divide a 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 tem de ser calibrados para cada caso de estudo, tornando-se assim uma limitação do modelo numérico.

Quanto ao modelo COBRAS-UC é um modelo unidimensional em planta, resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS) permitindo simular com precisão o escoamento em profundidade em estruturas porosas, a rebentação e diferentes tipos de agitação incidente. Além disso, permite obter a estrutura vertical da

velocidade da partícula ao longo do domínio de cálculo. Neste modelo, após o estabelecimento da malha de cálculo e das condições de agitação incidente, o único parâmetro a calibrar é o parâmetro relacionado com o modelo de turbulência. Torna-se, assim, muito vantajoso na aplicação a diferentes casos de estudo.

Face ao exposto, é claro que o modelo COBRAS-UC apresenta grandes vantagens face ao modelo COULWAVE nos estudos do escoamento sobre fundo de profundidade variável ou de interacção ondas-estrutura. Mas por outro lado, o facto de se tratar de um modelo unidimensional enquanto COULWAVE é um modelo bidimensional em planta, e o elevado tempo de cálculo e esforço computacional a que está associado quando comparado com o modelo COULWAVE, restringe um pouco a sua aplicação genérica.

3 Ensaios em modelo físico

3.1 Condições experimentais

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) num canal com 32 m de comprimento e equipado com um gerador de ondas regular, Figura 1. A batimetria do fundo do canal é constituída por uma zona plana seguida de três rampas de inclinação 1:20, 1:40 e 1:80, conforme se mostra na Figura 2.

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 $T=2.7$ s e $H=23$ cm. Assim, apenas foram considerados os casos, correspondendo a períodos de onda de: 1.1, 1.5, 2.0 e 2.5 s e alturas de onda de 8, 10, 15 e 20 cm. Contudo, no caso de $T=1.1$ s e $H=20$ cm, verificou-se que as ondas rebentavam imediatamente após a sua formação devido à declividade da onda, pelo que este teste foi excluído.

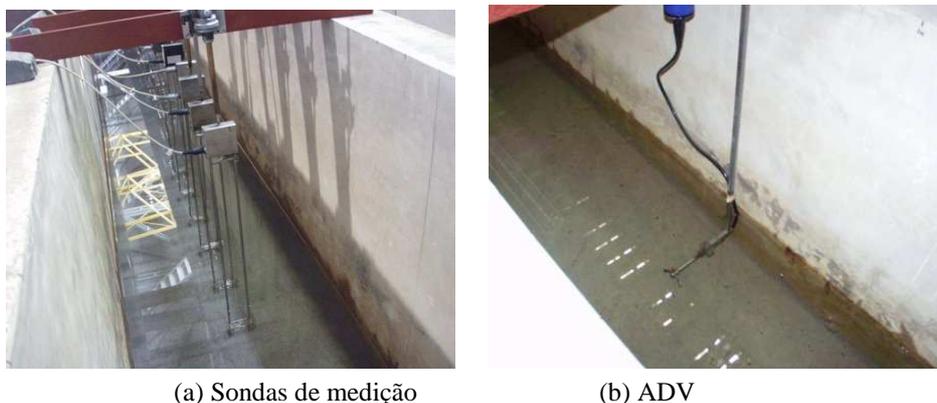


Figura 1. Canal de ensaios experimentais.

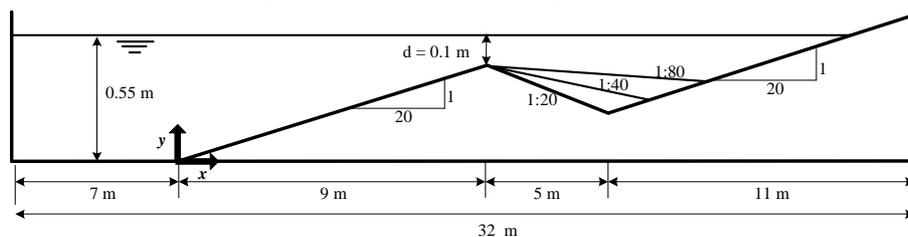


Figura 2. Perfil do fundo do canal de ensaios experimentais.

Foram instaladas sete sondas resistivas para o cálculo da altura de onda. A distância entre sondas foi mantida fixa (20 cm). A frequência de amostragem dos ensaios foi de 100 Hz. A celeridade da crista de onda foi calculada pela diferença de tempo entre duas sondas separadas por uma distância conhecida (20 cm). Um conjunto de sondas foi posicionado ao longo de 120 cm quer iniciando em $x=0$ - série par de valores (0, 20, 40, etc.) quer iniciando em $x=10$ cm - série ímpar de valores (10, 30, 50, etc.).

O ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) foi usado para medir a velocidade das partículas. A medição da velocidade é feita através do enviar de um pulso acústico que se reflecte ao encontrar matéria em suspensão (traçador). Através da transformação das frequências emitidas pelo ADV nas frequências recebidas pelo aparelho após a reflexão é possível calcular as três componentes da velocidade das partículas. As velocidades das partículas são medidas desde $x=10$ cm até, pelo menos, $x=100$ cm 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 $T=2.5$ s, cujo d/L_0 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 120 s para $T=1.1$ s e 1.5 s e 150s para $T=2.0$ s e 2.5s. As velocidades das partículas foram medidas durante 90 s para $T=1.1$ s e 120 s para os restantes períodos. A medição dos valores só se efectuou após um período de 300 s, 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 Ensaios numéricos

Nas secções seguintes, descrevem-se as simulações numéricas da propagação de ondas sobre o fundo barra-fossa, efectuadas com o COULWAVE e COBRAS-UC, para a inclinação de $1/20$ a jusante da barra, com $d=10$ cm. A condição de agitação aqui testada numericamente corresponde a agitação regular e têm as características na zona do batedor apresentadas na Tabela 1.

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 1 cm, 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.

Tabela 1 – Características dos testes numéricos.

Caso de Teste	H (m)	T (s)	Tempo de CPU	
			COBRAS-UC	COULWAVE
1	0.08	1.5	24h/60s de simulação	6min/300s

Para esta condição, avaliou-se o desempenho dos modelos numérico comparando os respectivos resultados com os experimentais. Foram comparados os valores numéricos (COULWAVE e COBRAS-UC) e experimentais correspondentes à altura de onda significativa e aos valores mínimo, máximo e médio da velocidade das partículas ao longo do domínio e, no caso do modelo COBRAS-UC, analisou-se o perfil de velocidades ao longo da coluna de água. Para este caso, uma análise do erro permite 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 para estabelecer o parâmetro de início de rebentação a utilizar no modelo COULWAVE.

Os cálculos com o modelo COULWAVE foram efectuados numa estação de trabalho LINUX CORVUS com quatro processadores AMD Opteron™ 265 de 2GHz e com 8GB de memória RAM. O modelo COBRAS-UC foi executado num PC Intel E6550, 2.34GHz, com 2.0GB de memória RAM. O tempo de cálculo necessário aos códigos não-lineares está representado na Tabela 1.

4.1 Condições de cálculo

Para este caso, o domínio computacional usado pelos modelos numéricos é bidimensional de comprimento 32 m e de largura 1 m, Figura.

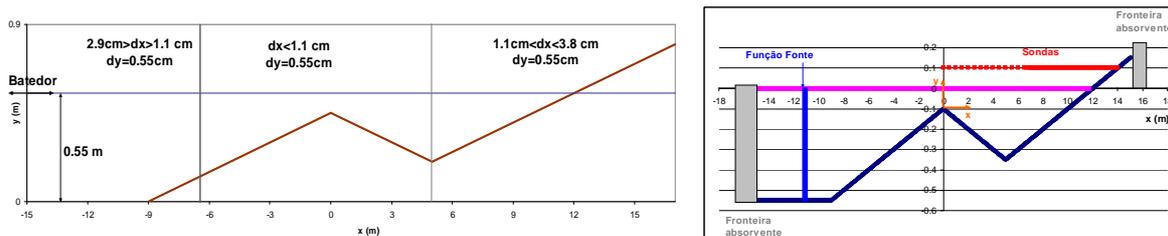


Figura 3. Domínio de cálculo: a) COBRAS-UC; b) COULWAVE. Localização das sondas.

Para o modelo COBRAS-UC, as dimensões e características da geometria experimental foram reproduzidas no

modelo, tal como se mostra na Figuraa. No entanto, a posição do batedor não é a mesma nos dois casos: o canal experimental é mais longo que o numérico. Além disso, o canal experimental apresenta um estreitamento de secção que não pode ser representado num modelo bi-dimensional e que pode levar a resultados diferentes no modelo e nos ensaios. O domínio computacional é de 32 m de comprimento por 0.8 m de profundidade e o batedor está localizado na fronteira esquerda do domínio. A malha foi dividida em três regiões de diferente resolução, correspondendo à zona de geração, a zona próxima da rebentação e uma zona final na praia. A malha é não uniforme na direcção de propagação (direcção x) e a dimensão da malha (Δx) varia de 1.1 cm na zona de rebentação a 3.8 cm na zona da praia (Figuraa). Na direcção y, a malha é uniforme com $\Delta y=0.55$ cm em todo o domínio. O número total de células é de $1903 \times 145=27985$. O modelo de turbulência utilizado no COBRAS-UC foi o modelo k- ϵ . Foram colocadas diversas sondas numéricas: uma junto ao batedor para controlar a geração de ondas, quatro entre o batedor e a primeira sonda dos ensaios e mais cinco nas posições onde houve medições com o ADV, de forma a calcular o perfil vertical de velocidade.

Para o modelo COULWAVE, o domínio de cálculo têm as dimensões 32mx1m, Figurab. A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de $\Delta x=0.05$ 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 $x=-11$ 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 de $\zeta_t^{(I)}$, $\zeta_t^{(F)}$, δ e do tempo de transição T^b efectuou-se uma análise de sensibilidade prévia para analisar a sua influência nos resultados numéricos, Okamoto e Fortes [8], e, deste modo, obter os valores que melhor se adaptam a esta condição experimental. Os valores considerados foram: $\zeta_t^{(I)}=0.65\sqrt{gH}$, $\zeta_t^{(F)}=0.08\sqrt{gH}$, $T_b=8\sqrt{\frac{H}{g}}$ 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 6 m e 20 m com intervalos de 50 cm, Figurab.

4.2 Série temporal da elevação da superfície livre

Na Figura 3 apresenta-se primeiramente para o caso de teste $T=1.5$ s e $H=0.08$ m, os resultados numéricos da elevação da superfície livre ao longo do tempo para $x=-150$ cm, $x=50$ cm e $x=250$ cm. Estes resultados são comparados com os correspondentes experimentais nos casos de $x=7.1$ m e 9 m, pois para o caso de $x=0$ m não se efectuaram medições.

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.

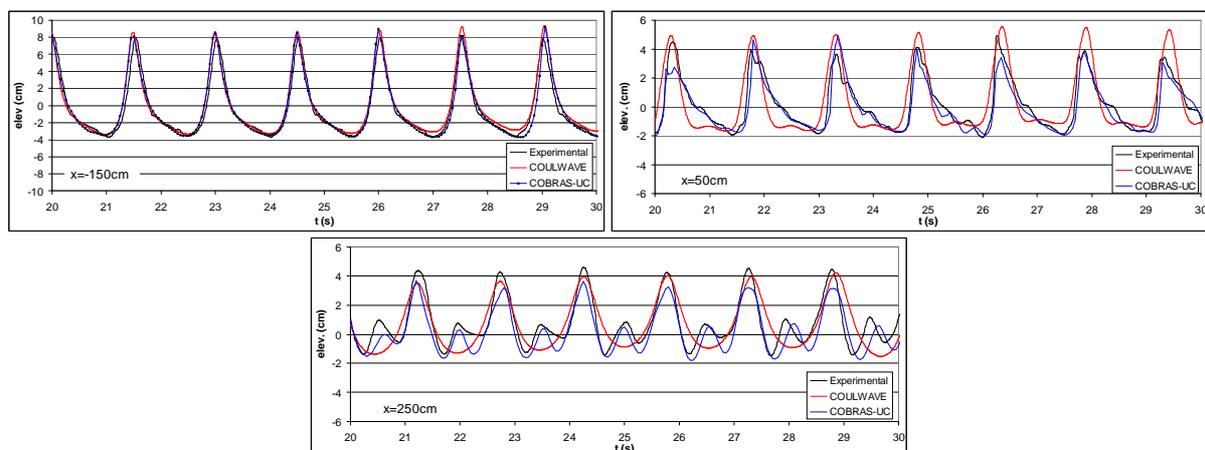


Figura 3. Elevação da superfície livre ao longo do tempo para $x=-150$ cm, 50 cm e 250 cm. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

De uma forma geral, constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais em qualquer das posições das sondas, principalmente na localização antes da rebentação $x=-150$ cm. Com efeito, o

andamento das deformadas obtidas com o modelo numérico é bastante semelhante ao do experimental nestas sondas. Depois nas secções, imediatamente após a rebentação $x=50$ cm, e mais afastada desta, $x=250$ cm, as diferenças acentuam-se especialmente no caso do modelo COULWAVE. Estas diferenças para o modelo COULWAVE são quer ao nível da amplitude máxima e mínima da elevação da superfície livre quer da ausência de componentes de ordem superior da frequência que se observam na deformada experimental.

No caso do modelo COBRAS-UC, as diferenças são menores do que as observadas com o modelo COULWAVE, conseguindo reproduzir bastante bem as deformadas da elevação da superfície livre para $x=-150$ cm e $x=50$ cm. As diferenças acentuam-se com os resultados experimentais para $x=250$ cm, no que diz respeito essencialmente à amplitude máxima e mínima e à fase das ondas, verificando-se que o modelo tende a subestimar esses valores da amplitude. O modelo consegue reproduzir as componentes de ordem superior.

4.3 Série temporal da velocidade horizontal

Na Figura 4 apresenta-se as séries temporais da velocidade horizontal calculada com os modelos COBRAS-UC e COULWAVE e as séries medidas nos ensaios para $x=-150$ cm (esquerda), antes de ocorrer rebentação, e para $x=250$ cm (direita), depois da rebentação. Para $x=-150$ cm, apresentam-se os resultados para a profundidade $d=8$ cm, medida a partir da superfície livre, que, devido à superfície na cava e às dimensões do ADV, é o limite superior para o qual há medições e ainda para $d=10$ cm e $d=16$ cm, ou seja, próximo do fundo. Para $x=250$ cm, apresentam-se resultados para as profundidades, d , de 5 cm, 12 cm e 20 cm.

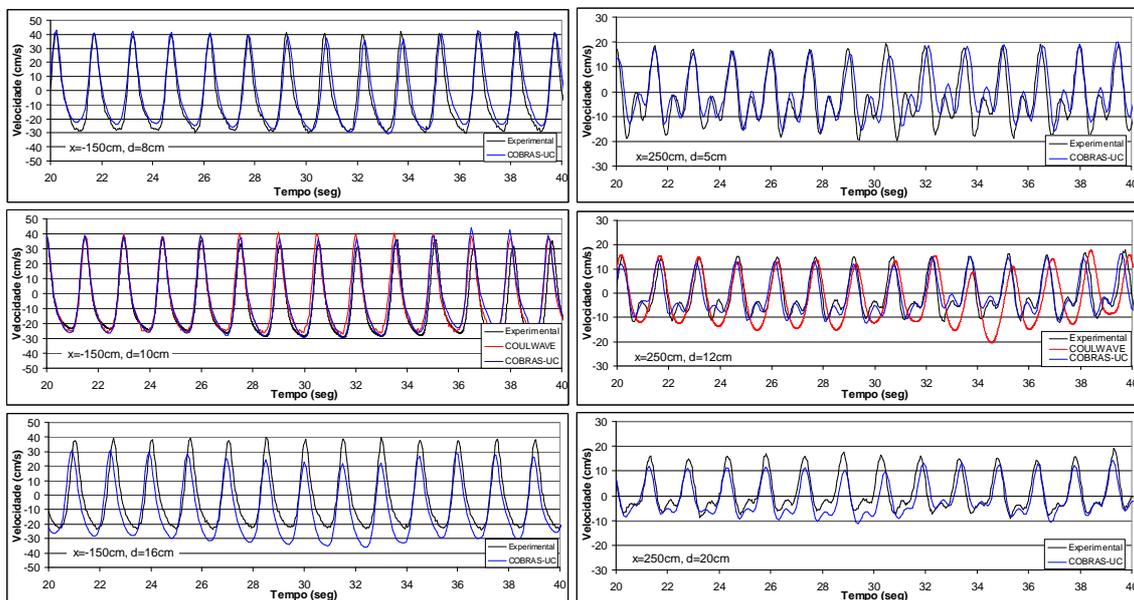


Figura 4. Velocidades horizontais para $x=-150$ cm e $x=250$ cm. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Como se pode observar, com ambos os modelos existe uma melhor concordância com os resultados experimentais, para $x=-150$ cm, antes da rebentação, do que para $x=250$ cm, secção esta depois da rebentação. Com efeito, para $x=-150$ cm, as séries temporais numéricas são praticamente coincidentes com as experimentais, com excepção da série obtida para $d=16$ cm respeitante a COBRAS-UC. Para esta secção os resultados numéricos são inferiores aos resultados experimentais, quer no que diz respeito à amplitude máxima como à mínima. Quanto a $x=250$ cm, a concordância é pior com ambos os modelos face a $x=-150$ cm. O modelo COULWAVE continua a não simular as componentes de ordem superior. Com COBRAS-UC, a concordância é melhor mas existem diferenças relativamente à amplitude da onda, principalmente no que diz respeito à amplitude das harmónicas de ordem superior.

4.4 Altura média quadrática

Na Figura 5 apresentam-se os valores da altura média quadrática que caracterizam as séries (numérica e experimental) de valores da elevação da superfície da água, para o caso em estudo.

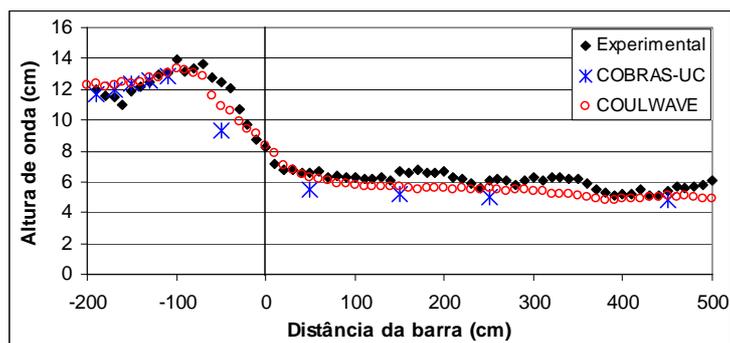


Figura 5. Altura de onda média quadrática. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

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. Ambos os modelos simulam o aumento da altura de onda H_{rms} à medida que a profundidade diminui, a ocorrência de rebentação e o decréscimo de H_{rms} depois desta rebentação e a sua manutenção num valor constante mesmo após o fim da rebentação.

Embora os valores da altura de onda antes da rebentação sejam semelhantes, após a rebentação os valores de H_{rms} obtidos com os modelos são semelhantes entre si mas inferiores aos experimentais. A diferença de resultados numéricos e experimentais na zona de rebentação deve estar relacionada com o facto das condições de entrada dos modelos serem diferentes da do batedor. É de referir que, em ambos modelos, as condições iniciais no batedor – H_{rms} para o COULWAVE e elevação da superfície e perfis de velocidade (vertical e horizontal, calculados usando a teoria de Stokes II) para o COBRAS-UC, não são iguais às que ocorrem no batedor no canal experimental. De facto, o perfil de velocidades no batedor não foi medido e por isso não se pode comparar com o numérico e estas diferenças podem ter uma forte influência nos resultados.

Estas diferenças nas condições iniciais explicam que existam diferenças antes da rebentação e também nas velocidades horizontais depois da rebentação, assim como nas elevações da superfície livre, onde se obtém valores inferiores aos medidos.

4.5 Velocidades das partículas

Na Figura 6 apresenta-se os valores máximo, mínimo e médio de velocidade das partículas de cada registo correspondentes aos valores numéricos obtidos com os modelos COULWAVE e COBRAS-UC, para $d=10$ cm, $T=1.5$ s e $H=8$ cm. Verifica-se que ambos os modelos simulam bastante bem o escoamento médio e envolvente antes da rebentação até $x=-70$ cm e depois da crista da barra por volta de $x=150$ cm. 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 especialmente no que diz respeito ao valor máximo da velocidade das partículas. Para este caso o próprio andamento dos valores numéricos é bastante diferente do experimental. Não há diferenças muito significativas entre os dois modelos numéricos.

Para o modelo COBRAS-UC, analisa-se também o perfil de velocidades ao longo da coluna de água, Figura 7. Para o caso de $x=-150$ cm, os dois perfis são próximos junto à superfície mas as diferenças vão-se acentuando junto ao fundo. No entanto, para $x=250$ cm, as diferenças acentuam-se na superfície, e diferem em todo o perfil no que diz respeito ao valor máximo. Esta diferença de comportamento com a distância à barra pode indicar a existência de uma corrente nos ensaios experimentais que não é reproduzida no modelo numérico, devido à diferença no perfil de velocidades inicial.

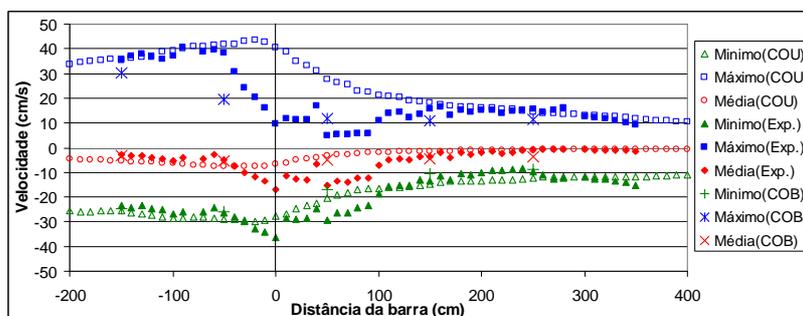


Figura 6. Escoamento médio e envolvente da velocidade das partículas. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

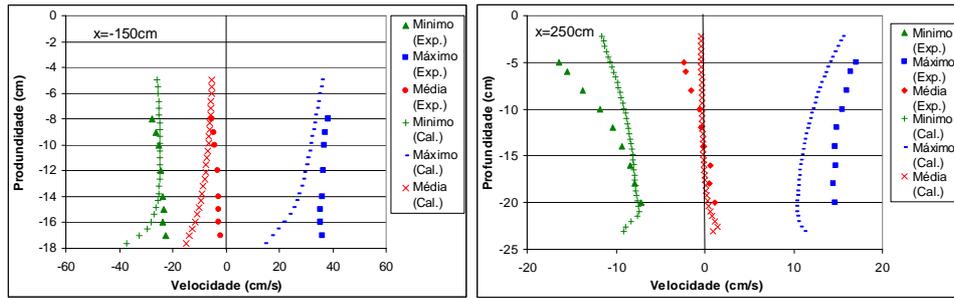


Figura 7. Perfil de velocidade para $x=-150$ cm e 250 cm. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

4.5.1 Análise estatística

Apresenta-se nesta secção, a análise estatística realizada com base nos valores máximo, médio e mínimo da velocidade das partículas numéricos e experimentais obtidos ao longo do domínio. Assim, foram calculados os parâmetros estatísticos como o erro médio quadrático, *RMSE*, e o erro médio absoluto, *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 o caso do modelo COULWAVE, as estatísticas foram calculadas de duas maneiras: usando os valores em todas as sondas de teste (Figurab) ou apenas usando os dados correspondentes às cinco localizações para as quais se obteve dados com o modelo COULWAVE e COBRAS-UC. Na Tabela 2 apresentam-se os valores do *bias*, erro médio quadrático e do índice de concordância para os resultados (máximo, média, mínimo da velocidade das partículas) dos dois modelos.

Em geral, os valores obtidos pelo modelo COULWAVE considerando todas as sondas ou apenas as 5 antes referidas são da mesma ordem de grandeza excepto para o caso dos valores de *bias* respeitantes à máxima velocidade. Como mostrado na Figura 7, a máxima velocidade sofre uma diminuição significativa durante a rebentação. Considerando no cálculo de *ic* o conjunto total de resultados, verifica-se que este índice tem um valor menor do que o o valor de *ic* usando apenas 5 valores, pois as diferenças verificadas entre resultados numéricos e experimentais na zona de rebentação são significativas, excepto para as velocidades médias. Quando se despreza um número de amostras (que diferem significativamente dos valores experimentais), o valor de *ic* torna-se maior, e indicia uma maior concordância para o caso da máxima velocidade do que para a velocidade média. Isto claramente induz em erro e não está de acordo com a Figura 6.

O valor da *RMSE* para a velocidade máxima (ou a velocidade na crista) é duas vezes superior aos valores correspondentes à velocidade média e mínima, qualquer que seja o método de cálculo. Com base em todos os índices, pode-se concluir que a concordância entre resultados experimentais e numéricos no que diz respeito à velocidade máxima é o maior problema neste tipo de modelos numéricos.

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos.

	COULWAVE						COBRAS-UC		
	(todas as sondas)			(5 localizações)			(5 localizações)		
	Máx.	Médio	Min.	Máx.	Médio	Min.	Máx.	Médio	Min.
<i>bias</i>	7.315	2.162	0.326	5.597	1.789	0.036	-5.109	1.177	3.133
<i>RMSE</i>	11.911	4.695	3.691	10.437	5.715	4.565	9.679	4.713	5.768
<i>ic</i>	0.747	0.873	0.982	0.851	0.832	0.973	0.932	0.865	0.965

4.3. 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 harmónica respectiva que se apresenta na Figura 8, respectivamente.

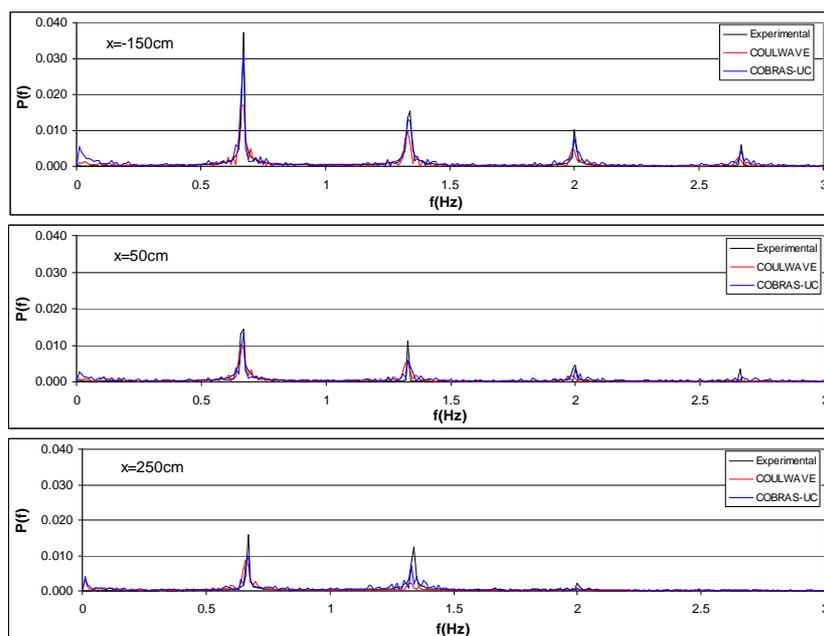


Figura 8. Espectros de energia em diferentes sondas ($x=-150$ cm, 50 cm e 250 cm) ao longo do domínio.

Da análise destas figuras, verifica-se que o comportamento do modelo COBRAS-UC é semelhante ao 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. O modelo distribui a energia pela frequência fundamental e pelas harmónicas seguintes, à medida que a onda se propaga para zonas de menor profundidade. No entanto, este modelo dá valores de energia sistematicamente inferiores aos obtidos nos ensaios em todas as harmónicas.

Relativamente ao modelo COULWAVE, e como já era esperado da observação das séries de elevação da superfície livre e das velocidades horizontais, o espectro de energia apresenta valores muito baixos para as frequências de ordem superior e não contém frequências de ordem superior para o caso de $x=250$ cm.

5 CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se a aplicação de dois modelos numéricos, COULWAVE e COBRAS-UC, à propagação de ondas sobre uma praia com perfil barra-fossa. Os valores da série temporal 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. 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. Finalmente, calcularam-se os parâmetros estatísticos (RMSE, bias e índice de concordância) relativo aos valores da velocidade das partículas.

Os resultados mostraram que os modelos simulam adequadamente a maioria das transformações das características das ondas ao longo da sua propagação. Verifica-se que, numa forma geral, os resultados dos modelos numéricos apresentam um andamento semelhante ao dos resultados experimentais, quer em relação às séries temporais da elevação da superfície livre quer da velocidade horizontal. Em relação à altura média quadrática, os resultados dos modelos são bastante semelhantes antes da rebentação apresentando pequenas diferenças após esta ocorrer. Nessa zona, os valores dos modelos são inferiores aos resultados experimentais.

Quanto aos valores das velocidades das partículas (máximo, mínimo e médio), os modelos simulam bastante bem o escoamento médio e a envolvente antes da rebentação e depois da crista da barra mas não conseguem reproduzir a amplitude máxima da velocidade horizontal na zona de rebentação. Este aspecto foi confirmado na análise estatística efectuada, em que se concluiu que a concordância entre resultados experimentais e numéricos no que diz respeito à velocidade máxima é o maior problema neste tipo de modelos numéricos. Relativamente à análise espectral, o modelo COULWAVE não conseguiu reproduzir as componentes de ordem superior nas secções após a rebentação. O modelo COBRAS-UC, conseguiu reproduzir a frequência fundamental e as harmónicas ao longo do domínio, mas em geral subestima a amplitude máxima. Verificou-se também que em termos do perfil de velocidades o modelo COBRAS-UC apresenta melhor concordância com os resultados experimentais junto à superfície mas piora quando se aproxima do fundo antes da rebentação. Na zona após a

rebentação, as diferenças acentuam-se na superfície, e diferem em todo o perfil no que diz respeito ao valor máximo. Esta diferença de comportamento com a distância à barra pode indicar a existência de uma corrente nos ensaios experimentais que não é reproduzida no modelo numérico.

A diferença de resultados numéricos e experimentais na zona de rebentação pode estar relacionada com o facto das condições de entrada dos modelos serem diferentes da do batedor, especialmente no que se refere ao perfil de velocidades imposto na fronteira de entrada. Para confirmar esta hipótese seria necessário utilizar um modelo RANS 3D para analisar as diferenças no perfil de velocidades ao longo da zona do canal onde há variação da sua largura. Seria também desejável realizar um estudo de sensibilidade das dimensões das malhas e do perfil inicial de velocidades nos resultados do modelo na zona de rebentação.

A aplicação destes modelos aos restantes casos experimentais permitirão determinar a aplicabilidade destes modelos a casos práticos de engenharia onde a rebentação tenha um papel preponderante, como é o caso dos estudos de galgamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através projectos PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/67411/2006 e a bolsa de pos-doutoramento SFRH/BPD/20508/2004. Agradecem ainda ao Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantábria) a permissão para a utilização do modelo COBRAS-UC.

REFERÊNCIAS

- [1] Kirby, J.T., G. Wei, Q. Chen, (1998) COULWAVE 1.0 Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user's manual, UD, Newark, Relatório CACR 98 06.
- [2] Lara, J.L.; Garcia, N.; Losada, I.J. (2006) RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53 (5-6), 395-417.
- [3] Lynett P, Wu T., Liu PL-F (2002) Modelling wave run-up with depth-integrated equations. *Coastal Engineering*, 46 (2002) 89-107.
- [4] 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.
- [5] Lynett P, Liu PL-F (2004) A two-layer approach to water wave modelling. *Proc. Royal Society of London A*; 460:2637– 2669.
- [6] 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.
- [7] Okamoto, T., C.J. E.M. Fortes (2008) Wave Breaking Termination on Bar-trough Shaped Beaches. *18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, pp. 811-819.
- [8] Okamoto T., C.J.E.M. Fortes (2009) Desempenho do modelo COULWAVE na simulação da rebentação sobre um perfil barra fossa. Análise de critérios de rebentação. *Congresso de Metodos Numéricos*. Barcelona, 29 a 5 Julho.
- [9] Okamoto T., C.J.E.M. Fortes, Neves, M.G. (2009) 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
- [10] 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.