

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS NUMÉRICOS NA SIMULAÇÃO DE ONDAS AO LONGO DE UM CANAL DE ONDAS

Luiz A.M. Endres¹, D.R.C.B. Neves², Eric Didier², Conceição J.E.M. Fortes², Takashi Okamoto³

1: Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, 91501-970, Brasil,
e-mail: endres@ufrgs.br

2: Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil 101, Lisboa, Portugal,
e-mail: {dneves, edidier, jfortes}@lneec.pt

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

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

Resumo. *Este trabalho analisa o desempenho do modelo do tipo Boussinesq COULWAVE e modelo RANS (Fluent, versão 6.3.26) na simulação das características das ondas (alturas e velocidade da onda) ao longo da sua propagação num canal com um fundo de batimetria variável, para o qual existem resultados de ensaios experimentais. 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 RANS é um modelo de volumes finitos que usa um método VOF na determinação da posição da superfície livre. Os resultados numéricos de ambos os modelos são comparados com os resultados experimentais, no que se refere às alturas de onda significativas, velocidades horizontais ao longo do canal (a meio da coluna de água), apresentando os valores mínimos, máximos e médios da velocidade das partículas ao longo do domínio. É, também, apresentada uma comparação com perfis de velocidade para o modelo RANS. Determinaram-se parâmetros estatísticos de modo a quantificar a diferença entre os resultados numéricos e experimentais no caso da altura de ondas e da velocidade horizontal. Finalmente, foi também realizada uma análise espectral de modo a caracterizar o desempenho dos modelos e a sua capacidade na simulação dos efeitos não lineares.*

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 refração, difracção, rebentação, geração de harmónicas e interacção não-lineares. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo COULWAVE, Lynett e Liu [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 na equação de Navier-Stokes 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 FLUENT, (*Fluent, versão 6.3.26*), [1], que resolve as equações de Navier-Stokes-Reynolds (*RANS*), ao que se incorporou um método numérico de seguimento da superfície livre do tipo *Volume of Fluid (VOF)*. Este modelo permite simular o escoamento com superfície livre, a rebentação das ondas e a interacção entre ondas e estruturas. Como resultados, podem obter-se valores de diferentes grandezas tais como o campo de velocidades e pressões, a posição da superfície livre, etc.

Do exposto é claro que o modelo FLUENT 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 o elevado tempo de cálculo e esforço computacional a que está associado quando comparado com o modelo COULWAVE.

De modo a avaliar o desempenho destes modelos COULWAVE e de FLUENT na zona de rebentação, e aferir as potencialidades e limitações de cada um deles, ambos os modelos foram aplicados ao caso de teste estudado experimentalmente no LNEC de simulação da propagação de ondas sobre um fundo complexo, Neves *et al.* [12]. Note-se que no caso do modelo FLUENT foram considerados dois domínios computacionais, ambos respeitando a variação de fundo do canal físico: no primeiro o canal é de secção constante e é utilizado o

modelo bidimensional do FLUENT; no segundo o canal é de secção variável, como o canal físico, e é utilizado o modelo tridimensional do FLUENT. No caso do modelo COULWAVE, apenas o domínio de cálculo com secção constante foi considerada.

Os resultados numéricos de ambos os modelos são comparados primeiramente com os resultados experimentais, no que se refere às séries temporais de elevação da superfície livre e da velocidade horizontal (segundo o eixo longitudinal do canal onde foram efectuados os testes experimentais). Seguidamente, 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) ao longo do domínio. 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.

Este procedimento permite avaliar 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 inferir das incertezas dos resultados obtidos.

Nesta comunicação, são primeiramente descritos o modelo COULWAVE e o modelo FLUENT. Seguidamente, no capítulo 3, são descritos resumidamente os ensaios experimentais e apresentados alguns dos seus resultados. No capítulo 4, apresentam-se as condições de cálculo dos modelos COULWAVE e FLUENT e discutem-se os resultados numéricos e experimentais para as diferentes condições experimentais. As conclusões são apresentadas no capítulo 5.

2. MODELOS NUMÉRICOS

2.1. O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, Lynett *et al.* [8] e Lynett e Liu [9], [10] e [11], 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. 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 $kh \sim 6$, sendo k o número de onda e h a profundidade. Para uma camada, as equações de conservação de massa (1) e quantidade de movimento (2) vem:

$$\frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(\varepsilon_o \zeta + h) \mathbf{u}_1] - \mu_o^2 \nabla \cdot \left\{ \left[\frac{\varepsilon_o^3 \zeta^3 + h^3}{6} - \frac{(\varepsilon_o \zeta + h) k_1^2}{2} \right] \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) + \left[\frac{\varepsilon_o^2 \zeta^2 - h^2}{2} - (\varepsilon_o \zeta + h) k_1 \right] \nabla T_1 \right\} = O(\mu_o^4) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \varepsilon_o \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \nabla \zeta + \mu_o^2 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{k_1^2}{2} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) + k_1 \nabla T_1 \right\} + \varepsilon \mu_o^2 \left[\begin{array}{l} (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla k_1) \nabla T_1 + k_1 \nabla (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla T_1) + k_1 (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla k_1) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) \\ + \frac{k_1^2}{2} \nabla (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1)) \end{array} \right] + \varepsilon_o \mu_o^2 \left[T_1 \nabla T_1 - \nabla \left(\zeta \frac{\partial T_1}{\partial t} \right) \right] + \varepsilon_o^2 \mu_o^2 \nabla \left(\zeta S_{T_1} - \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial (\nabla \cdot \mathbf{u}_1)}{\partial t} - \zeta \mathbf{u}_1 \cdot \nabla T_1 \right) + \varepsilon_o^3 \mu_o^2 \nabla \left[\frac{\zeta^2}{2} ((\nabla \cdot \mathbf{u}_1)^2 - \mathbf{u}_1 \cdot \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1)) \right] = O(\mu_o^4) \quad (2)$$

com

$$T_1 = \nabla \cdot (h \mathbf{u}_1) + \frac{1}{\varepsilon_o} \frac{\partial h}{\partial t} ; \quad k_1 = \alpha_1 h + \beta_1 \zeta ; \quad \varepsilon_o = \frac{a_o}{h_o} ; \quad \mu_o = \frac{h_o}{l_o}$$

onde ζ é a elevação da superfície livre, h é a profundidade, $\mathbf{u}_1 = u_1 \mathbf{v}_1$ é o vector de velocidade horizontal à profundidade definida em cada camada, k_1 o número de onda, g é a aceleração gravítica. Os coeficientes α_1 e β_1 são definidos pelo utilizador, a_o é a amplitude da onda, h_o a profundidade e l_o comprimento de onda. O perfil vertical da velocidade horizontal é dado por:

$$U_1 = u_1 - \mu_o^2 \left\{ \frac{z_1^2 - k_1^2}{2} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) + (z_1 - k_1) \nabla T_1 \right\} + O(\mu_o^4) \quad (3)$$

com z_1 escolhido de modo a que as características resultantes do modelo de Boussinesq estejam de acordo com a teoria linear. Nwogu [13] sugere $z_1 = -0.531h$.

Lynett e Liu [9], [10] e [11] 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 [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 [17] 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 [17] enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta, um esquema de fronteira absorvente (*sponge layers*), de acordo com Kirby *et al.* [7] é usado.

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se explicados em Lynett e Liu [9] 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. Simulação da rebentação

Apenas duas formas de dissipação de energia são consideradas no modelo numérico para uma camada e a equação do momento (2) é alterada da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \dots + R_f + R_b = 0 \quad (4)$$

em que R_f e R_b são os termos adicionados para ter em conta a inclusão de fenómenos de atrito de fundo e de rebentação, respectivamente. Neste trabalho é apenas descrito o termo relacionado com a rebentação.

A implementação da rebentação da onda no modelo COULWAVE é baseada em Kennedy *et al.* [6], Chen *et al.* [2] e Dally *et al.* [3] e é tratada através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta nas equações de conservação da quantidade de movimento, sendo R_{bx} e R_{by} as componentes em x e y do termo R_b :

$$R_{bx} = \frac{1}{h + \zeta} \left[(\vartheta((h + \zeta)u_1)_x)_x + \frac{1}{2} (\vartheta(((h + \zeta)u_1)_y + ((h + \zeta)v_1)_x))_y \right] \quad (5)$$

$$R_{by} = \frac{1}{h + \zeta} \left[\frac{1}{2} (\vartheta(((h + \zeta)v_1)_x + ((h + \zeta)u_1)_y))_x + (\vartheta((h + \zeta)v_1)_y)_y \right] \quad (6)$$

em que os índices x e y representam derivadas espaciais e ϑ é o coeficiente de viscosidade turbulenta, localizado na face frontal da onda. Este coeficiente é definido por:

$$\vartheta = B(h + \zeta)\zeta_t \quad (7)$$

A quantidade B , que controla a ocorrência de dissipação de energia e garante uma suave transição entre a rebentação e a zona de não rebentação, é dada por:

$$B = \begin{cases} \delta & \zeta_t \geq 2\zeta_t^b \\ \delta(\zeta_t/\zeta_t^b - 1), & \zeta_t^b \leq \zeta_t \leq 2\zeta_t^b \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^b \end{cases} \quad (8)$$

onde δ é um factor amplificador e o parâmetro ζ_t^b determina o início e fim da rebentação da onda. ζ_t^b é determinado do seguinte modo:

$$\zeta_t^b = \begin{cases} \zeta_t^{(F)} & t - t_0 \geq T^b \\ \zeta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^b} (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 \leq T^b \end{cases} \quad (9)$$

em que $\zeta_t^{(I)}$ define o início da rebentação, i.e., o patamar inicial da elevação da superfície livre que tem de ser excedido para a rebentação acontecer, $\zeta_t^{(F)}$ define o fim de rebentação, i.e., o mínimo valor da elevação da superfície livre para a rebentação continuar, t é o instante local, t_0 é o instante de tempo em que a rebentação da onda ocorre, $t - t_0$ é a idade do evento de rebentação e T^b é o tempo de transição, ou seja, o instante em que se considera que a rebentação cessa. O início e fim da rebentação da onda são determinados utilizando os parâmetros $\zeta_t^{(I)}$ e $\zeta_t^{(F)}$ e o tempo de transição T^b .

Até este ponto, o modelo é idêntico ao modelo de Kennedy *et al.* [6]. A diferença reside no facto de que em Kennedy a determinação dos parâmetros é efectuada em termos da velocidade da onda longa linear, i.e., $=0.65\sqrt{gh}$. No caso do COULWAVE utiliza-se a velocidade da onda longa não-linear, i.e., $=0.65\sqrt{gH}$, em que $H=h+\zeta$. Assim, os valores de $\zeta_t^{(I)}$ e $\zeta_t^{(F)}$ são dados por $0.65\sqrt{gH}$ e $0.08\sqrt{gH}$. O valor de T^b é dado por $8\sqrt{\frac{H}{g}}$. O valor adoptado para δ é

6.5. Estes parâmetros foram definidos com base em testes sobre fundos de inclinação suave. Noutras situações cujos perfis se afastem desta situação ideal, haverá que proceder ao ajuste do valor destes parâmetros.

2.3. O modelo FLUENT

O código FLUENT (*Fluent*, versão 6.3.26), [1], aplica uma técnica de volumes finitos para resolver a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes-Reynolds (RANS).

As variáveis são definidas no centro de cada elemento da malha, que pode ser estruturada ou mista. Dos vários algoritmos disponíveis para resolver o acoplamento entre a velocidade e a pressão, seleccionou-se o algoritmo SIMPLEC, mais adaptado para simulações não estacionárias que o algoritmo SIMPLE.

A integração no tempo é realizada por um esquema de 2ª ordem. O modelo de turbulência k- ϵ na sua versão *standard* é o escolhido, pois é classicamente utilizado neste tipo de aplicações em engenharia. Os termos difusivos das equações são discretizados pelo esquema de diferenças centrais de segunda ordem. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema MUSCL de terceira ordem. A pressão nas faces dos volumes de controlo é obtida através do esquema de interpolação PRESTO, aconselhado pelo User Guide do FLUENT (*Fluent*, versão 6.3.26), [1], para modelação de escoamentos com superfície livre.

A modelação da superfície livre é realizada usando o método VOF (*Volume of Fluid*), desenvolvido inicialmente em Hirt e Nichols [5], onde a fracção de volume (escalar), C , é transportada por uma equação de transporte.

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(C) = 0 \quad (10)$$

onde \mathbf{u} é o vector velocidade e t o tempo.

Este método consiste em capturar a posição da superfície livre a partir da evolução da fracção de volume, que assume o valor de 0 no ar e 1 na água.

$$C = \begin{cases} 0 & \text{para o ar} \\ 1 & \text{para a água} \end{cases} \quad (11)$$

A posição da superfície livre é assim definida pelo valor 0.5. Os valores intermédios, entre 0 e 1, indicam a presença de uma mistura entre água e ar. A dificuldade deste método reside na conservação duma transição reduzida entre os dois meios fluidos (água e ar).

Em estudos numéricos anteriores, utilizando o modelo FLUENT para modelar dispositivos de energia das ondas e interacção entre ondas e estruturas [1] e [14], foi utilizado o método HRIC, Peric M. e Ferziger [15] 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, Ubbink [16]. 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%.)

É de salientar que recorrendo ao método VOF para modelação de escoamento com superfície livre, as equações do movimento utilizadas são as mesmas para cada fase, mas, as características próprias do fluido, como a massa específica e a viscosidade são devidamente assimiladas no cálculo.

Estudos anteriores bidimensionais e tridimensionais FLUENT [1] e Paixão Conde *et al.* [14] permitiram definir as características da malha. A zona de superfície livre necessita de um cuidado especial na construção da malha. A malha deve ter uma discretização horizontal na ordem dos 50-60 elementos por comprimento de onda e uma discretização vertical de 20 elementos entre a cava e a crista. Tratando-se de casos de propagação de onda, a malha tem de ser do tipo estruturada. Uma malha não estruturada, com elementos triangulares por exemplo na zona da superfície livre, induz instabilidades numéricas.

A geração da onda é feita através de um batedor numérico, Didier *et al.* [4] que é definido através de uma UDF (*User Define Function*), que permite ao utilizador programar as condições limites. O batedor numérico consiste na imposição de uma condição de fronteira nas componentes horizontal e vertical de velocidade e a correspondente amplitude da deformação da superfície livre.

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 0.7.

2.4. 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 de Navier-Stokes-Reynolds (RANS) permitindo simular com precisão escoamentos tridimensionais. O modelo permite obter o perfil vertical da velocidade e de pressão em qualquer secção do domínio de cálculo. O modelo permite modelar a interacção entre ondas e estruturas tornando-se, assim, muito vantajoso na aplicação a diferentes casos de estudo. Neste modelo, a geração da malha é uma etapa primordial da simulação numérica, pois condiciona a estabilidade numérica e a precisão dos resultados. No entanto, para configurações complexas, a construção da malha pode-se revelar 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.

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

3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

3.1. Condições experimentais

Os testes experimentais, Neves *et al.* [12], 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, Figura 1. O comprimento útil do canal é de 32.4 m pois o batedor 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 batedor.

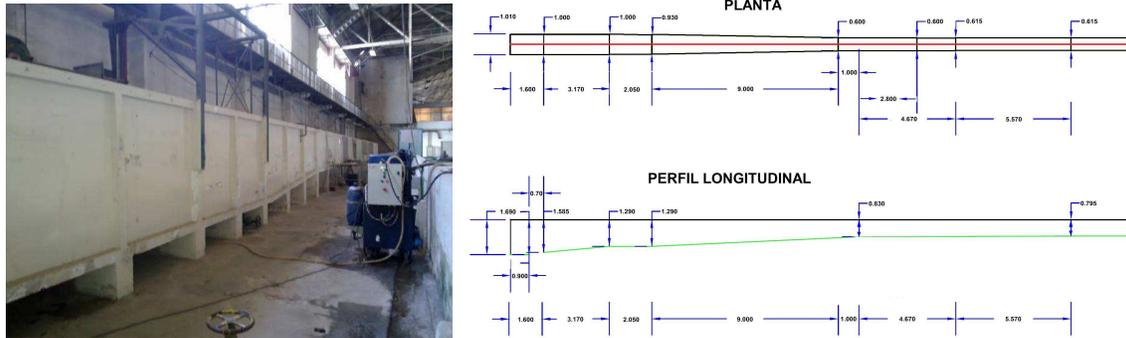


Figura 1 – Vistas do canal de ondas utilizado para os ensaios experimentais. Planta e perfil longitudinal.

O perfil longitudinal do fundo foi implantado no canal à escala 1:1 e é mostrado na Figura 1 e de forma mais simplificada na Figura 2, para uma profundidade de água de $d=0.96$ m (sendo y a coordenada vertical e x a distância horizontal até ao batedor). 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 e posteriormente uma rampa de inclinação de aproximadamente 1:80.

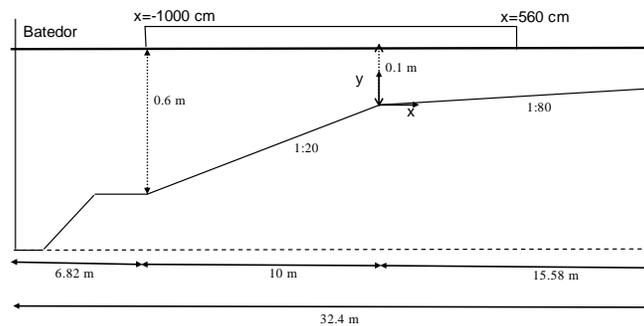


Figura 2 - Perfil do fundo do canal de ensaios experimentais

Os ensaios foram efectuados em diferentes fases e foram designados por:

- Ensaios Tipo I - medição dos valores da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas;
- Ensaios Tipo II - medição da velocidade das partículas e da elevação da superfície livre ao longo do canal;
- Ensaios Tipo III - medição de perfis de velocidade e de elevação da superfície livre em determinados locais do canal.

3.1.1. Equipamento de medição

Em todos os ensaios foi colocada uma sonda junto ao batedor $x=6$ m, Figura 3a, para a caracterização das condições de agitação incidente. Esta sonda foi mantida nesta posição para todas as condições de agitação incidente. A frequência de aquisição foi de 25 Hz. A função desta sonda é a de verificar se o batedor de ondas consegue gerar a altura de onda correcta.

Para os ensaios do Tipo I, de medição da elevação da superfície livre, foram instaladas oito sondas resistivas, separadas de 20 cm entre si, Figura 3b, 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. A frequência de amostragem dos ensaios foi de 25 Hz.

Para os ensaios do Tipo II, de medição da velocidade das partículas a meio da coluna de água, utilizou-se um ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), modelo Vetrino, com sonda *down-looking*, Figura 3c, que fornece três componentes ortogonais da velocidade “instantânea” das partículas em suspensão na água numa posição de análise (volume de medição). Em conjunto com o ADV, foi colocada uma sonda resistiva para medição simultânea da elevação da superfície livre. A posição transversal destes equipamentos é a indicada na Figura 4. A frequência de aquisição foi de 25 Hz. A sua posição variou entre -1000 cm até 560 cm, Figura 2, com um espaçamento de:

- 100 cm no intervalo entre -1000 e -200 cm;
- 10 cm entre os -200 cm e os 200 cm;
- 20 cm entre os 200 cm e os 560 cm.



Figura 3 – Equipamento de medição: a) Sonda junto ao baterdor; b) Conjunto de 8 sondas; c) ADV e sonda resistiva.

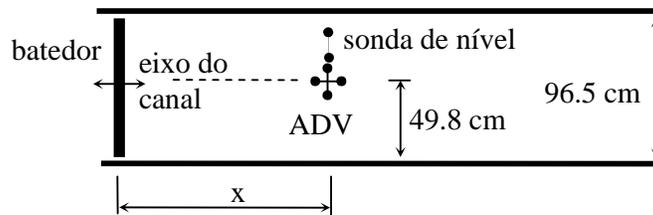


Figura 4 – Posicionamento do ADV em planta.

Finalmente, efectuaram-se os ensaios do tipo III, para medição dos perfis de velocidade. 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 efectuados os ensaios 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, o ensaio considerado já tinha sido realizado nos ensaios Tipo II. A frequência de amostragem do ADV foi de 25Hz.

3.1.2. Condições de ensaio

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, respectivamente.

Assim, para os ensaios do Tipo I e do Tipo II, foram considerados 15 casos, correspondendo 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.

Para os ensaios do Tipo III, a medição da elevação da superfície livre e perfil de velocidades ao longo da coluna de água em locais definidos do eixo x do canal, foram reproduzidas 7 ondas diferentes. Na primeira fase, o período foi mantido constante em 2.0 s e as alturas de onda utilizadas foram 12, 14, 16 e 18 cm. Na segunda fase a altura de onda foi mantida constante em 14 cm e os períodos utilizados foram 1.1, 1.5, e 2.5 s. Os registos das sondas foram obtidos durante 240 s assim como do ADV.

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.

3.2. Resultados experimentais

Para os ensaios efectuados, com as séries temporais de valores da elevação da superfície da água, calcularam-se os valores da altura significativa, altura média e máxima, período médio e período significativo através do método de zero ascendente. A título de exemplo, a Figura 5 representa a evolução da altura de onda e período médio, para o caso de $T=2.0$ s e $H=12$ cm.

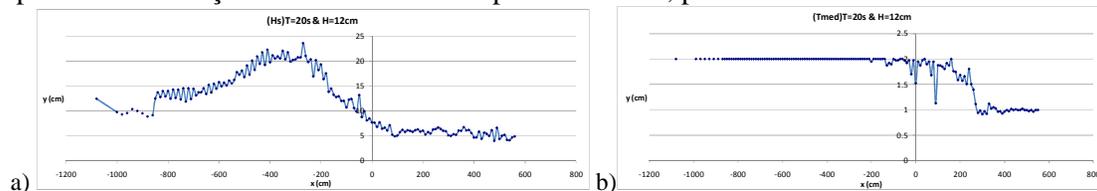


Figura 5. Ensaios do tipo I: a) Altura de onda significativa (H_s) e (b) período médio para o caso de onda incidente com $T=2.0$ s e $H=12$ cm.

Os dados experimentais mostram o aumento da altura de onda até à zona próxima dos $x=-300$ cm devido ao empolamento da onda, embora se verifiquem algumas oscilações. Após a rebentação observa-se uma diminuição significativa da altura de onda no resto do canal. Quanto ao período da onda, verifica-se que se mantém aproximadamente constante ao longo de todo o canal até sofrer perturbações devidas à rebentação da onda apresentando um decréscimo significativo na zona do canal acima dos $x=50$ cm.

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico dos perfis de velocidades registados através do sensor ADV e para as condições de agitação incidente em $x=-1000$ cm, $H=14$ cm e $T=1.1, 1.5, 2.0$ e 2.5 s e $H=12, 14, 16$ e 18 cm e $T=2.0$ s. Nestes gráficos, considera-se que:

- Os valores negativos de velocidade são referentes à média dos valores de velocidade mínima das partículas identificados em cada onda do registo;
- Os valores positivos de velocidade são referentes à média dos valores de velocidade máxima das partículas identificados em cada onda do registo;
- As velocidades médias são referentes à média de todas as velocidades medidas pelo ADV.

Importa referir que nos gráficos da Figura 6 foi considerado como sentido positivo a direcção contrária à da propagação de onda no canal.

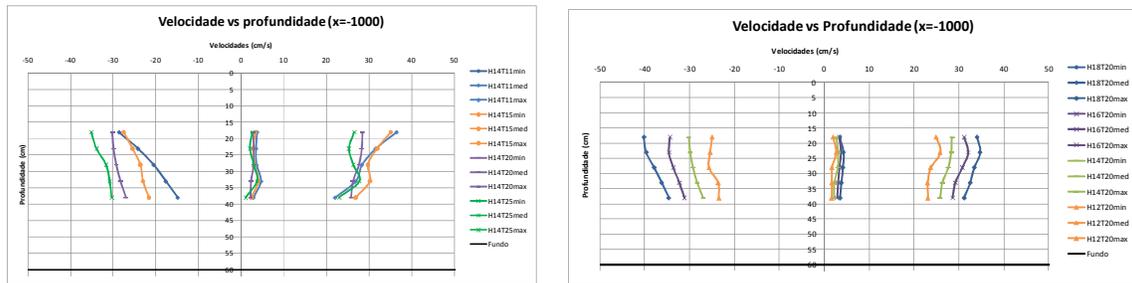


Figura 6 - Ensaio do Tipo III. Perfis de velocidade para as condições de agitação incidente em $x=-1000$:
a) $H = 14$ cm e $T = 1.1, 1.5, 2.0$ e 2.5 s e b) $H=12, 14, 16$ e 18 cm e $T=2.0$ s.

4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.1.Introdução

Nas secções seguintes, descrevem-se as simulações numéricas da propagação de ondas efectuadas com o COULWAVE e com as versões FLUENT 2D e FLUENT 3D, associados à aplicação do modelo FLUENT considerando um domínio de cálculo de secção constante ou variável, respectivamente. As condições de agitação testadas numericamente correspondem à agitação regular e têm as características na zona do bater de apresentadas na Tabela 1.

Este caso foi o escolhido por ser um dos testes em que as velocidades foram medidas detalhadamente, i.e., foi medida a velocidade em pontos afastados na vertical de 5 cm, até ao limite em que a sonda do ADV se encontrava completamente submersa e em sete posições ao longo do canal, que vão desde antes até depois da posição da rebentação da onda.

Tabela 1 – Características dos testes numéricos.

Caso de Teste	H (cm)	T (s)	Tempo de CPU		
			FLUENT 2D	FLUENT 3D	COULWAVE
1	12	2.0	0h38 min por período de onda	5h33 por período de onda	6min/300s

Para esta condição, avaliou-se o desempenho dos modelos numéricos comparando os respectivos resultados numéricos (COULWAVE e das versões FLUENT 2D e FLUENT 3D) com os experimentais correspondentes a:

- Série temporal de elevação da superfície livre e das velocidades horizontais em dois pontos ao longo do canal;
- Altura de onda significativa e a valores mínimo, máximo e médio da velocidade horizontal ao longo do domínio. Para este caso, foi realizada uma análise do erro que permite avaliar o desempenho dos modelos;
- Perfil de velocidades ao longo da coluna de água no caso do modelo FLUENT.

Recorrendo à análise espectral, analisou-se também o comportamento não linear dos modelos. Os cálculos com o modelo COULWAVE foram efectuados num PC Intel Core i5 de 2.80GHz, com 3.46GB de memória RAM. O modelo FLUENT foi executado num PC Intel Core (TM) i7 CPU 920 de 2.67GHz, com 8.0GB de memória RAM, utilizando as opções de paralelização para utilizar os 4 “cores” no caso tridimensional. O tempo de cálculo necessário aos códigos não-lineares está apresentado na Tabela 1.

4.2. Condições de cálculo

O domínio computacional usado pelos modelos numéricos é indicado na Figura 7.

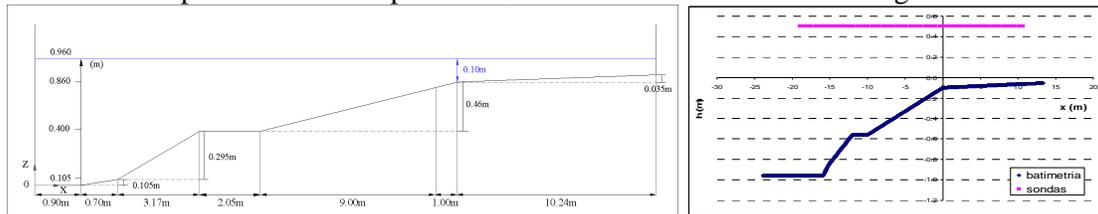


Figura 7 - Domínio de cálculo: FLUENT 2D e FLUENT 3D (esquerda) e COULWAVE com indicação da posição das sondas (direita).

Para o modelo FLUENT, as dimensões e características da geometria experimental foram reproduzidas no modelo, tal como se mostra na Figura 7. No caso de modelação bidimensional apenas existe uma variação do fundo (canal de largura constante). Na configuração tridimensional, o domínio computacional é exactamente igual ao canal físico no que diz respeito a variação do fundo e a variação da largura do canal. No fim do canal numérico é localizada uma praia numérica de absorção para eliminar a reflexão das ondas. O batedor numérico está localizado na fronteira esquerda do domínio. A geração é realizada utilizando perfis de velocidade deduzidos da teoria linear das ondas. Por esse facto o modo de

geração da onda no canal físico difere do realizado por um batedor tipo pistão. A malha computacional é não uniforme na direcção de propagação (refinamento progressivo enquanto a profundidade diminui) e na direcção vertical (refinamento na zona da superfície livre e no fundo). A malha é refinada na zona da superfície livre, com 50 a 60 elementos por comprimento da onda incidente e 20 elementos entre a cava e a crista. O número total de volumes de controlo é de 72206 para o modelo bidimensional e 872160 para o modelo tridimensional (plano de simetria longitudinal na direcção do eixo da canal). O passo de tempo é igual a 0.0025 s 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. As secções onde foram obtidos resultados com o FLUENT foram $x = -1000, -500, -150, -100, 0, 50$ cm.

No modelo COULWAVE, o domínio de cálculo tem as dimensões 37.2 m x 1 m, Figura 7. A discretização da batimetria foi fornecida com um espaçamento de $\Delta x = 0.05$ m. 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 foi igual a 0.2. A função fonte (geração de ondas) foi colocada na posição $x = 0.0$ m. Consideraram-se duas fronteiras de absorção nos extremos do domínio. Não foi incluído o atrito do 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, e deste modo, obter os valores que melhor se adaptam a esta condição experimental. Os valores considerados foram: $\zeta_t^{(I)} = 0.40\sqrt{gH}$, $\zeta_t^{(F)} = 0.20\sqrt{gH}$, $T_b = 8\sqrt{\frac{H}{g}}$ 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 -1890 cm e 1020 cm separadas de 50 cm, Figura 7b.

4.3. Comparação de séries temporais

4.3.1. Série temporal da elevação da superfície livre

Na Figura 8 apresenta-se primeiramente para o caso de teste $T = 2.0$ s e $H = 12$ cm, os resultados numéricos e experimentais da elevação da superfície livre ao longo do tempo para $x = -500$ cm e $x = -100$ cm, que correspondem à situação antes e após a rebentação respectivamente.

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

De uma forma geral, constata-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais em qualquer das posições das sondas, e claramente na localização antes da rebentação $x = -500$ cm. Com efeito, o andamento das deformadas obtidas com ambos os modelos é bastante semelhante ao do experimental nesta sonda. Logo após a rebentação, em $x = -100$ cm, as diferenças acentuam-se.

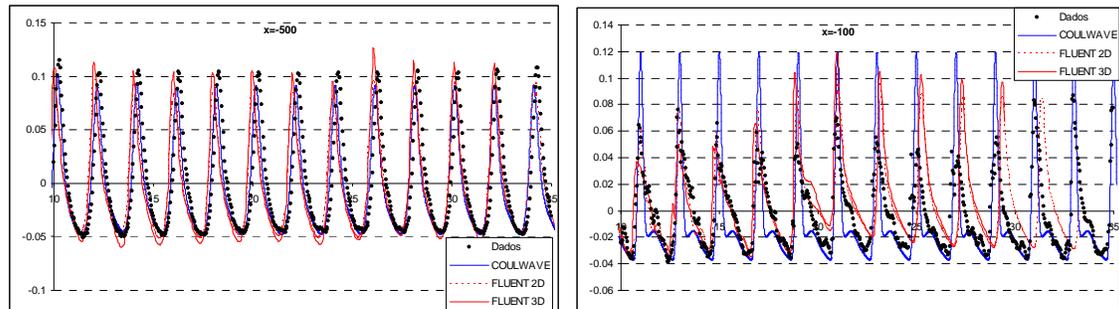


Figura 8 - Elevação da superfície livre ao longo do tempo para $x=-500$ cm e -100 cm. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Em maior detalhe, no caso do modelo COULWAVE, as diferenças entre resultados numéricos e experimentais são primeiramente ao nível da amplitude máxima e mínima da elevação da superfície livre. Em geral, o modelo subestima os valores mais elevados da elevação da superfície livre na primeira secção e sobrestima claramente os valores na secção $x=-100$ cm, embora nesta secção as diferenças sejam mais significativas. Mais ainda, em $x=-100$ cm, embora a deformada da solução numérica apresente características não lineares devidas ao aparecimento de harmónicas, não acompanha tão bem deformada da solução experimental. No caso do modelo FLUENT, verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, para as deformadas da elevação da superfície livre para $x=-500$ cm. A deformada da superfície livre apresenta características não-lineares com aparição de harmónicas. Observa-se que o estreitamento do canal induz uma alteração da elevação da superfície livre. A elevação da superfície livre no canal 3D (secção variável) é superior à elevação da superfície livre no canal 2D (secção constante), como era de esperar. Isso implica que a onda não rebenta no mesmo sitio, o que se verifica na Figura 8, no intervalo de tempo entre 10 s e 18 s, para as secções $x=-500$ cm e $x=-100$ cm. No entanto, após os 20 s, observa-se uma alteração na série temporal da elevação de superfície livre que traduz o facto que a posição da rebentação mudou, provavelmente devido a reflexões quer da batimetria quer das re-reflexões no batedor, e, eventualmente, de algumas reflexões provenientes da praia de absorção. Observa-se um efeito semelhante nos ensaios, particularmente na secção $x=-100$ cm.

Sendo assim, as diferenças entre resultados numéricos e experimentais são mais acentuadas nas secções onde acontece a rebentação devido à variabilidade da posição da rebentação.

4.3.2. Série temporal da velocidade horizontal

Na Figura 9 apresentam-se as séries temporais da velocidade horizontal calculada com os modelos FLUENT (2D e 3D) e COULWAVE e as séries medidas nos ensaios experimentais para $x=-500$ cm (esquerda), antes de ocorrer rebentação, e para $x=-100$ cm (direita), depois da rebentação. Ambos os resultados correspondem a valores de velocidade medidos a meio da coluna de água.

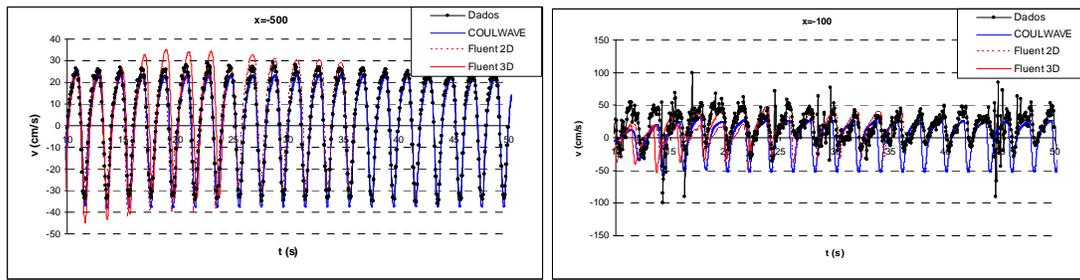


Figura 9. Velocidades horizontais para $x=-500$ cm (esquerda) e $x=-100$ cm (direita). Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Como se pode observar, com ambos os modelos numéricos existe uma melhor concordância com os resultados experimentais para $x=-500$ cm, antes da rebentação, do que para $x=-100$ cm, depois da rebentação, como seria de esperar. Com efeito, para $x=-500$ cm, as séries temporais numéricas são praticamente coincidentes com as experimentais.

Quanto a $x=-100$ cm, as diferenças acentuam-se. Com efeito, para esta localização, apesar do andamento razoável das séries, existem diferenças relativamente à velocidade mínima e máxima e à existência de componentes harmónicas nos resultados experimentais que não são reproduzidas pelos modelos numéricos. O modelo COULWAVE não simula as componentes de ordem superior e subestima significativamente a velocidade mínima. Note-se que o modelo COULWAVE é integrado na vertical.

Com o modelo FLUENT, a concordância global é melhor mas existem diferenças relativamente à amplitude da velocidade da onda, principalmente no que diz respeito à amplitude das harmónicas de ordem superior. A discretização insuficiente da malha nesta zona pode ser a razão destas diferenças. Como já foi referido anteriormente, para a elevação de superfície livre, verifica-se uma variabilidade significativa da amplitude de variação da intensidade da velocidade quer ao nível experimental quer numérico, provavelmente devido à variabilidade da posição da rebentação. Observam-se algumas diferenças entre o modelo 2D e 3D devido à rebentação e ao estreitamento do canal, mas o andamento geral é similar.

4.4. Análise temporal

4.4.1. Altura significativa

Na Figura 10 apresentam-se os valores da altura significativa que caracterizam as séries (numérica e experimental) de valores da elevação da superfície da água, para o caso em estudo.

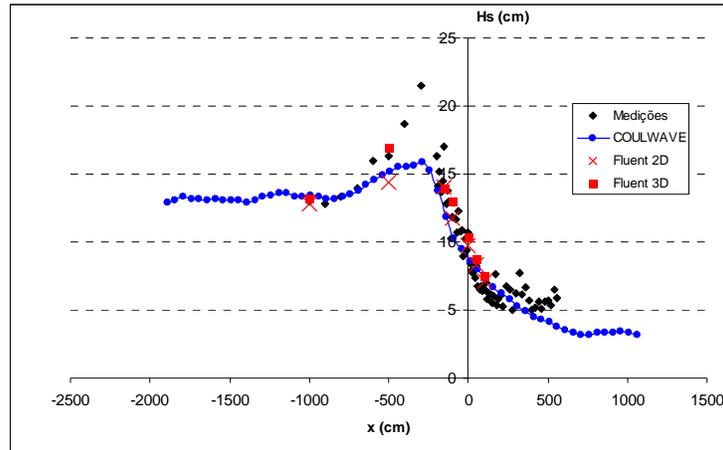


Figura 10. Altura de onda significativa. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

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 experimental de altura de onda na zona à volta da rebentação (entre $x=400$ cm e $x=200$ cm). 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.
- Os modelos FLUENT 2D e 3D reproduzem de forma correcta a variação de altura de onda antes e após rebentação. Verifica-se que o estreitamento do canal (considerado no modelo 3D) 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 (2D e 3D).

As diferenças observadas entre os dois modelos numéricos e o experimental 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 FLUENT a elevação de superfície livre e o perfil de velocidade (componente horizontal e vertical) são impostas na secção do batedor. Estas diferenças nas condições iniciais, e consequentemente de onda incidente (harmónicas e fases), explicam a existência de diferenças antes da rebentação e nas velocidades horizontais depois da rebentação, assim como nas elevações da superfície livre, onde se obtêm

valores inferiores aos medidos.

- O modelo COULWAVE é um modelo integrado em profundidade, em profundidades muito baixas e na zona de rebentação tem as suas limitações.
- 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.
- O canal é caracterizado por um estreitamento progressivo da secção transversal que altera a altura da onda incidente antes da rebentação. Os modelos COULWAVE e FLUENT 2D, para os quais o canal é considerado de secção constante, não podem, como é natural, reproduzir com total fidelidade os ensaios. A zona de rebentação é por consequência, diferente.

4.4.2. *Máximo, mínimo e média de velocidades horizontais e perfis de velocidade*

Na Figura 11 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 (2D e 3D) para $T=2.0$ s e $H=12$ cm, ao longo do canal e a meio da coluna de água.

Verifica-se que 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 da média dos máximos, da média dos mínimos e os 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 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 o próprio andamento dos valores numéricos é bastante diferente do experimental. No caso dos valores da média dos mínimos, o andamento já é mais similar, contudo o modelo numérico continua a sobrestimar os valores nessa zona. 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.

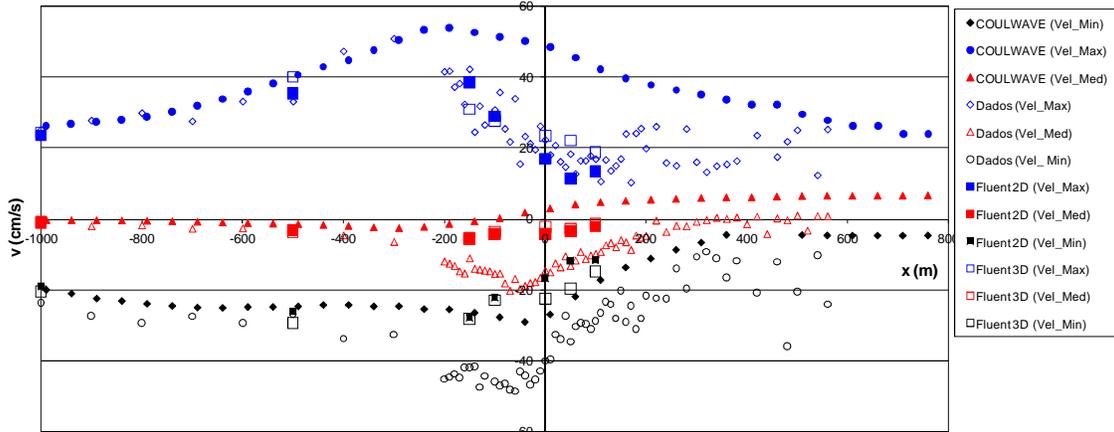


Figura 11. Escoamento médio e envolvente da velocidade das partículas. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

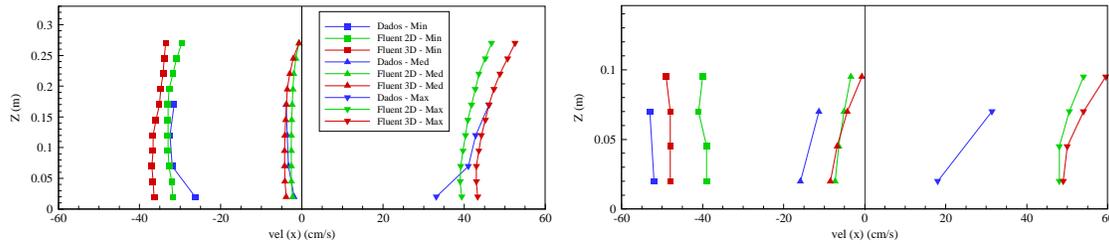


Figura 12. Perfis de velocidade para $x=-500$ cm (esquerda) e -100 cm (direita). Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Para o modelo FLUENT, analisou-se também o perfil de velocidades ao longo da coluna de água, Figura 12, nas secções $x=-500$ cm e -100 cm. São representados os valores máximos e mínimos da velocidade e a média da velocidade de cada registo. Nas duas secções, a intensidade da velocidade é maior na configuração tridimensional que na configuração bidimensional. Esta diferença é devida ao estreitamento do canal, cujo efeito já se verifica na secção $x=-500$ cm, quer para a elevação de superfície livre (Figura 8 e Figura 10) quer para a velocidade (Figura 11). Para a secção $x=-500$ cm, os dois perfis obtidos numericamente são semelhantes ao experimental, mas diferem junto ao fundo. Esta diferença pode ser devida à rugosidade do fundo da canal uma vez que as paredes no modelo numérico foram consideradas lisas. O perfil dos valores médios é similar. Para a secção $x=-100$ cm, as diferenças entre os resultados numéricos e os ensaios são maiores. Os mínimos são largamente sobrestimados e os máximos são subestimados. Nesta secção do canal, onde as ondas rebentam, as medições realizadas com o ADV são mais delicadas, pois o volume de controlo do ADV pode conter uma parte de ar que altera significativamente a determinação da velocidade. Estas diferenças de comportamento com a distância à posição $x=0$ cm podem também indicar a existência nos ensaios experimentais de uma corrente hidrodinâmica que

não é reproduzida no modelo numérico devido à diferença no perfil de velocidades inicial ou ao tempo limitado de simulação do modelo numérico.

4.4.3. 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:

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (8)$$

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 (2D e 3D), i.e., $x = -1000, -500, -150, -100, 0, 50, 100$ cm. Na Tabela 2 apresentam-se os valores do *bias*, *RMSE* e do índice de concordância para os resultados em termos de alturas de onda significativa.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos das alturas de onda.

Modelos	<i>Bias</i> (cm)	<i>RMSE</i> (cm)	<i>ic</i>
FLUENT 2D	-1.011	1.520	0.992
FLUENT 3D	-0.137	1.405	0.992
COULWAVE	-1.652	2.439	0.980

Com base na Tabela 2, verifica-se que os valores obtidos pelo modelo COULWAVE são inferiores aos experimentais (*bias* negativo) e apresentam um erro quadrático superior aos obtidos do 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.

Na Tabela 3 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.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos da velocidade

Velocidade Modelos Parâmetros	<i>Min</i>			<i>Med</i>			<i>Max</i>		
	<i>Bias</i> (cm)	<i>RMSE</i> (cm)	<i>ic</i>	<i>Bias</i> (cm)	<i>RMSE</i> (cm)	<i>ic</i>	<i>Bias</i> (cm)	<i>RMSE</i> (cm)	<i>ic</i>
FLUENT 2D	-2.819	4.067	0.989	-6.309	7.761	0.869	14.871	17.525	0.908
FLUENT 3D	-0.552	5.779	0.975	-6.609	8.456	0.851	11.637	14.468	0.930
COULWAVE	14.375	17.819	0.422	-8.493	9.972	0.822	76.738	78.949	0.572

Com base na Tabela 3, os valores dos parâmetros estatísticos dos resultados do COULWAVE são claramente piores do que os do FLUENT, quer em termos de *bias*, erro médio quadrático ou de índice de concordância. Tal seria de esperar pois o modelo COULWAVE é integrado na profundidade. Mais ainda, verifica-se que é nas velocidades máximas que o modelo COULWAVE têm maiores dificuldades em simular (maiores valores de RMSE). Quanto às versões do FLUENT, verifica-se que a versão 3D apresenta, em geral, melhores resultados estatísticos o que confirma as conclusões anteriormente apresentadas em 4.4.2.

4.5. 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 Figura 13.

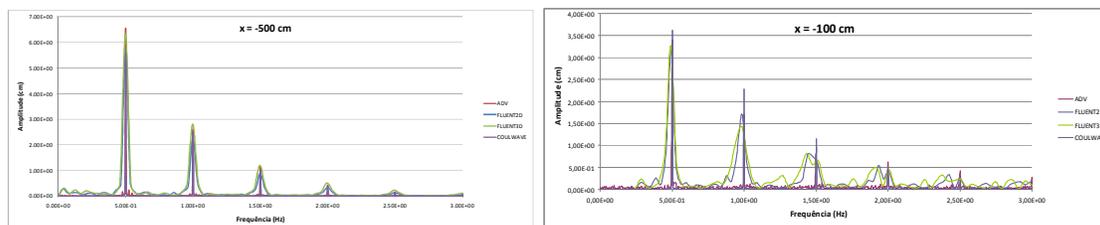


Figura 13. Espectros de energia em duas sondas localizadas em $x=-500$ cm (esquerda) e em $x=-100$ cm (direita).

Da análise destas figuras, verifica-se que o comportamento do modelo FLUENT 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. Na secção $x=-500$ cm existe um muito bom acordo em termos de densidade de energia, entre os dados experimentais e os do modelo FLUENT. Na secção $x=-100$ cm, onde rebenta a onda, o modelo FLUENT subestima a densidade de energia relativamente à frequência fundamental e às harmónicas.

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.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-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: séries temporais de elevação da superfície livre e da velocidade horizontal em diversos pontos; 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. Verifica-se que:

- De uma forma geral, os resultados dos modelos numéricos apresentam um andamento e uma ordem de grandeza semelhante à dos resultados experimentais, quer em relação às séries temporais da elevação da superfície livre ou de velocidade horizontal, embora as diferenças sejam mais acentuadas no caso da velocidade, e especialmente para o modelo COULWAVE.
- Em relação à altura de onda significativa, os resultados dos modelos são bastante semelhantes antes da rebentação. Na zona imediatamente após a rebentação, os valores dos modelos numéricos são inferiores aos resultados experimentais. No caso do modelo COULWAVE 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 indicia que a dissipação da onda está a ser bem simulada no modelo. A análise através dos parâmetros estatísticos indica que o COULWAVE é o modelo que apresenta pior concordância com os valores experimentais e que a versão FLUENT 3D apresenta a melhor, como seria de esperar. ;
- Quanto aos valores das velocidades das partículas (máximos, mínimos e médios), os modelos numéricos simulam razoavelmente o escoamento médio e a envolvente antes da rebentação e depois de $x=0$ cm mas não conseguem reproduzir 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, nenhum dos modelos consegue reproduzir os valores das densidades de energia, nem da frequência de pico nem das componentes de ordem superior, nas secções após a rebentação. O modelo FLUENT subestima a amplitude máxima das varias frequências enquanto o modelo COULWAVE sobrestima-as.
- Em termos do perfil de velocidades, o modelo FLUENT apresenta melhor concordância com os resultados experimentais junto à superfície mas piora quando se aproxima do fundo antes da rebentação. Esta diferença parece estar ligada a uma diferença de rugosidade entre o modelo numérico e o modelo físico. Na zona após a rebentação, as diferenças acentuam-se na superfície, e diferem em todo o perfil no que

diz respeito ao valor máximo e mínimo de velocidade. Nesta secção do canal, onde as ondas rebentam, as medições realizadas com o ADV são mais delicadas, pois o volume de controlo do ADV pode conter uma parte de ar que altera significativamente a determinação da velocidade. Esta diferença de comportamento com a distância à barra pode também indicar a existência de uma corrente nos ensaios experimentais que não é reproduzida no modelo numérico.

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. Para confirmar esta hipótese seria necessário utilizar um modelo numérico do tipo 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 numéricos aos restantes casos experimentais permitirá determinar a aplicabilidade destes modelos numéricos 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 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] FLUENT 6.3 User's Guide, ANSYS-FLUENT 2008.
- [2] Chen, Q., J.T. Kirby, R.A. Dalrymple, A.B. Kennedy, Chawla, A. (2000) - Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Run-up. II:2D. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 126, No. 1, January/February, 44-56.
- [3] Dally, R.D, R.G. Dean, Dalrymple, R.A. (1985) - Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. C6, 11,917-11,927.
- [4] Didier, E., Neves, M.G., Gil, L. (2007) - Modelação numérica da interacção entre uma onda e uma estrutura marginal costeira porosa, Proc. 5as jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, Portugal.

- [5] Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981) - Volume of fluid VoF method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39, pp 201-225.
- [6] Kennedy, A.B., Q. Chen, J.T. Kirby, Dalrymple, R.A. (2000) - Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking and Runup I: 1D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, January/February, 39-47.
- [7] 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.
- [8] Lynett P, Wu T., Liu PL-F (2002) “Modelling wave run-up with depth-integrated equations”. *Coastal Engineering*, 46 (2002) 89-107.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Neves, D., Endres, L.A.M., Fortes, C.J.E.M., Okamoto, T. (2010) - *Rebentação das ondas. Análise e tratamento de dados obtidos em ensaios em modelo físico*. Relatório Brisa 05/2010.
- [13] Nwogu (1993) Alternative form of Boussinesq equations for near-shore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(6), pp. 618-638.
- [14] Paixão Conde, J.M., Teixeira, P.R.F., Didier, E. (2001) - Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos. *Proc. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – IV SEMENGO*, Rio Grande – RG, Brazil.
- [15] Peric M., Ferziger, J.H. (1997), *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Second edition.
- [16] Ubbink O. (1997) – Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces, PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Londres, Reino Unido.
- [17] 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.