



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

COMPARAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS NA SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS SOBRE UM PERFIL DE PRAIA DO TIPO BARRA-FOSSA

João Mil-Homens^{1,2}, Ana Zózimo², Conceição Fortes², António Pires-Silva¹

¹Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1096-001, Lisboa
jmilhomens@Inec.pt, aps@civil.ist.utl.pt

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
aczozimo@Inec.pt, jfortes@Inec.pt

RESUMO

Nesta comunicação, analisa-se o comportamento de modelos numéricos na simulação da propagação de ondas de superfície, regulares e irregulares, ao longo de um canal de fundo variável, representando uma praia de perfil barra-fossa.

Trata-se de um teste de grande complexidade, uma vez que ao longo do domínio intervêm um conjunto de fenómenos que levam ao aumento da altura de onda até à zona da barra, à sua rebentação sobre a mesma, reconstituição na parte da fossa e, finalmente, a uma segunda rebentação mais próxima da praia emersa. Esta complexidade permite avaliar a capacidade de cada modelo em simular os fenómenos envolvidos na propagação de ondas ao longo do domínio e, especialmente, na zona de rebentação.

O estudo envolve modelos do tipo resolução de fase (lineares e não lineares), com diferentes simplificações das equações fundamentais da dinâmica. Assim, a equação de declive suave serve de base aos modelos DREAMS_CR, Fortes (2002) e REFDIF, Kirby e Dalrymple (1994), respectivamente nas suas aproximações elíptica e parabólica. A inclusão de testes com ondas irregulares requer a utilização das versões espectrais dos modelos citados: DREAMS_CR_S, Zózimo *et al.* (2003) e REFDIF_S, Kirby e Ozkan (1994). Por sua vez, o modelo FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998), baseia-se na equação não-linear do tipo Boussinesq.

As simulações numéricas foram comparadas com medições obtidas em modelo físico, Sancho *et al.* (2001), no CIEM (*Canal de Investigación y Experimentación Marítima*) da Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Na verificação levada a cabo foi dado especial ênfase à influência da variação dos parâmetros relacionados com a rebentação das ondas nos resultados de cada modelo.

1. INTRODUÇÃO

Na sua propagação desde o largo até à costa, as ondas sofrem um conjunto de transformações que resultam dos efeitos de refração, difração, empolamento e rebentação, que provocam uma alteração nas suas características (forma, altura, comprimento de onda, celeridade e direcção).

Muitos dos principais processos associados à transformação de ondas em zonas costeiras podem ser descritos pela equação elíptica de declive suave, Berkhoff (1972), que tem em conta os efeitos combinados da refração, difração e reflexão de ondas marítimas



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

propagando-se em fundos de inclinação suave, como os que ocorrem muitas vezes em portos, baías e zonas costeiras. Booij (1981) apresentou uma versão modificada desta equação de modo a incluir os efeitos da dissipação de energia (por rebentação e/ou atrito de fundo). Desde há vários anos se têm desenvolvido modelos numéricos que resolvem essa equação, ou variantes da mesma, por diferentes metodologias numéricas (por exemplo, método dos elementos finitos e método das diferenças finitas) os quais se têm mostrado adequados à realização de estudos de agitação e ressonância em portos, marinas, ou zonas costeiras em geral.

Exemplos deste tipo de modelos são os modelos de ondas regulares DREAMS_CR, Fortes (2002) e REFDIF, Kirby e Dalrymple (1994), que resolvem, respectivamente, a versão elíptica e parabólica da equação de declive suave pelo método dos elementos finitos e diferenças finitas. DREAMS_CR pode ser utilizado em zonas abrigadas pois tem em conta os efeitos da reflexão das ondas, ao contrário de REFDIF. Em contrapartida, REFDIF tem como grande vantagem o facto de poder ser aplicado a grandes áreas costeiras. As versões espectrais destes modelos, nomeadamente, DREAMS_CR_S, Zózimo *et al.* (2003) e REFDIF_S, Kirby e Ozkan (1994) permitem a propagação de ondas irregulares.

No entanto, à medida que a onda se propaga para perto da costa, os efeitos não-lineares tornam-se mais significativos, provocados pela topografia do fundo, interacções onda-onda, ou interacções onda-corrente, e induzem a transferência de energia para diferentes frequências (maiores e menores) do espectro. Estes fenómenos manifestam-se, por exemplo, numa progressiva assimetria vertical do perfil da onda (um maior declive na zona frontal da onda do que na sua traseira) e no aguçamento das cristas e achatamento das cavas. Os modelos atrás referidos não conseguem simular correctamente estas transformações da onda.

No âmbito da modelação numérica, os modelos baseados nas equações estendidas de Boussinesq permitem uma descrição mais precisa da evolução das ondas em zonas costeiras. Um dos modelos mais utilizados é o modelo numérico FUNWAVE, desenvolvido por Kirby *et al.* (1998). Este modelo resolve as equações não-lineares de Boussinesq deduzidas por Wei *et al.* (1995) e permite reproduzir a maioria dos fenómenos intervenientes na transformação da onda em fundos de profundidade variável e na presença de correntes: dispersão de frequência, dispersão de amplitude, empolamento (linear e não-linear), difracção, refracção pelo fundo e devida às correntes, geração de harmónicas e dissipação de energia por rebentação da onda. No entanto, este modelo só pode ser aplicado a zonas de pequena dimensão de fronteiras abertas. Não é possível aplicar em zonas portuárias ou?? abrigadas.

Em todos os modelos, a rebentação é um dos fenómenos mais complexos de modelar e, em geral, é função de um conjunto de parâmetros (mais ou menos empíricos) para os quais é necessário efectuar uma análise de sensibilidade de modo a avaliar qual os valores mais adequados. Essa análise de sensibilidade deve ter por base medições em modelo físico ou protótipo.

Neste âmbito, para efectuar testes de sensibilidade relativos à variação dos parâmetros da rebentação em cada modelo e avaliar o desempenho de cada um dos modelos atrás referidos, decidiu-se aplicar os modelos ao caso de teste designado por praia Barra-Fossa, para o qual existem dados experimentais, Sancho *et al.* (2001). Neste caso de teste, é simulada a propagação de ondas ao longo dum canal de fundo variável, representando uma praia de perfil barra-fossa, para quatro condições de agitação incidente (três correspondentes a ondas regulares ou monocromáticas e uma caracterizada por um grupo de ondas irregulares). Na sua propagação, a onda sofre o efeito do empolamento que leva ao aumento da sua altura até à zona da barra, à sua rebentação sobre a mesma, reconstituição na parte mais profunda da fossa e, finalmente, a uma segunda rebentação próxima da praia emersa. Os ensaios em modelo físico, Sancho *et al.* (2001), (pq senão estava mto repetido, isto já tinha sido dito no parágrafo anterior) permitiram obter valores experimentais da elevação da superfície livre e velocidade horizontal ao longo do canal, para as quatro diferentes condições de agitação incidente. Este conjunto de dados é importante na validação de cada um dos modelos atrás referidos e na análise da variação dos parâmetros de rebentação. Trata-se, pois, dum excelente caso de teste para todos os modelos de modo a avaliar as potencialidades e limitações dos mesmos.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Nas próximas secções, apresentam-se primeira e sucintamente as características gerais dos cinco modelos. Seguidamente, são descritas as condições dos ensaios em modelo físico e as condições de cálculo dos modelos numéricos. Os resultados obtidos são discutidos e é feita uma análise da influência da variação dos parâmetros relacionados com a rebentação das ondas nos resultados do modelo. Finalmente, são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

2. MODELOS NUMÉRICOS

Nas secções seguintes apresenta-se uma descrição sumária dos modelos numéricos DREAMS_CR, Fortes (2002), REFDIF, Kirby e Dalrymple (1994), DREAMS_CR_S, Zóximo *et al.* (2003), REFDIF_S, Kirby e Ozkan (1994) e FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998).

2.1 DREAMS_CR

DREAMS_CR, Fortes (2002), é um modelo de elementos finitos baseado na equação elíptica de declive suave modificada por Booij (1981), de modo a incluir os efeitos da dissipação de energia (por rebentação e/ou atrito de fundo). Para ondas monocromáticas, a referida equação é dada, em termos da elevação da superfície livre, η , por:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + k^2 CC_g \eta = -i\omega V \eta \quad (1)$$

em que C é a velocidade de fase da onda, C_g é a velocidade de grupo, k é o número de onda, ω é a frequência angular da onda, V é o coeficiente de dissipação de energia, $V=D/E$, sendo D a taxa de dissipação de energia por unidade de área e E a energia da onda. Esta equação é aqui denominada de equação de declive suave modificada. Neste modelo, no termo $i\omega V$ é contabilizada apenas a dissipação de energia por rebentação.

A função de dissipação de energia, V , é definida empiricamente e, por ser uma função da altura de onda, leva a que a equação de declive suave modificada se torne não-linear. No modelo DREAMS_CR, a formulação utilizada para quantificar a dissipação de energia por rebentação, V , é baseada nos trabalhos de Battjes e Janssen (1978) e Battjes (1986, 1988). A expressão obtida por estes autores para o coeficiente V para ondas irregulares, é dada por:

$$V = 4BQ_b \left(\frac{H_{max}}{H} \right)^2 \frac{1}{T_p} \quad (2)$$

em que B é uma constante, de ordem 1, H_{max} é a máxima altura da onda à profundidade h , antes de ocorrer a rebentação da onda, calculada através do critério de rebentação modificado de Miche (ver Eq. (3)); H é a altura de onda num determinado ponto do domínio; Q_b é a probabilidade de ocorrência de ondas em rebentação, ou seja, a probabilidade da altura da onda num determinado ponto estar associada a uma onda rebentada ou a rebentar ($H \geq H_{max}$) e é dada por Dingemans (1997); T_p é o período de pico.

A altura máxima da onda, H_{max} , compatível com a profundidade dos vários pontos do domínio é calculada através do critério de Miche modificado, que tem em conta o declive do fundo e a declividade da onda através do parâmetro γ_0 :

$$H_{max} = 0.88k^{-1} \tanh \left(\frac{\gamma_0 kh}{0.88} \right) \quad (3)$$

em que o valor de γ_0 está contido no intervalo entre 0.6 e 0.8.

A determinação da altura de onda em todos os pontos do domínio, tendo em conta o efeito da dissipação de energia por rebentação das ondas, é feita recorrendo a um processo iterativo.



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

As condições de fronteira implementadas no modelo são as *condições de radiação*, que permitem a saída de perturbações geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito, as *condições de geração e radiação combinadas*, como as relativas a fronteiras abertas e que permitem a entrada da agitação incidente e a saída das perturbações geradas no domínio e as *condições de reflexão* (total ou parcial), referentes aos contornos sólidos da zona em estudo (praias, falésias, molhes, entre outros). Este modelo não apresenta qualquer limitação quanto ao ângulo de incidência da onda na entrada do domínio de cálculo.

De forma a obter uma solução com uma precisão adequada, é necessário garantir, no mínimo, 8 pontos por comprimento de onda em todo o domínio de DREAMS_CR.

O modelo DREAMS_CR requer como dados de entrada, as características da agitação incidente (altura, período e direcção da onda e nível de maré) e as características da malha de elementos finitos com que foi discretizado o domínio em estudo e da fronteira desse domínio. Os resultados do modelo DREAMS_CR são os índices de agitação (H/H_0), relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0 , ou coeficientes de amplificação (em estudos de ressonância portuária) e direcções de propagação da onda. Tem como resultados opcionais o campo de velocidades horizontais na superfície livre e as cristas das ondas (linhas de igual fase).

2.2 DREAMS_CR_S

O modelo DREAMS_CR_S, Zózimo *et al.* (2003), é versão espectral do modelo DREAMS_CR, que permite a propagação de ondas irregulares. O método utilizado para a propagação da agitação irregular é o método da sobreposição linear. Segundo este método, a agitação irregular é caracterizada por um espectro direccional incidente, que é dividido em componentes espectrais. Estas componentes são posteriormente propagadas individualmente através de um modelo de ondas regulares, sendo finalmente sobrepostos linearmente os resultados da propagação de cada componente. No modelo DREAMS_CR_S, o espectro direccional incidente foi dividido através do método equienergético, ou seja, em componentes de igual energia. O modelo é assim baseado em três módulos: a) definição do espectro direccional incidente e divisão em componentes espectrais de igual energia; b) propagação de cada componente individual utilizando o modelo DREAMS_CR; c) sobreposição linear dos resultados obtidos para cada componente. O modelo DREAMS_CR_S tem em conta os efeitos da refacção, difracção e reflexão e rebentação de ondas irregulares.

As alturas de onda, H_i , são obtidas através da aplicação de DREAMS_CR para cada uma das N componentes espectrais em que foi dividido o espectro. Os valores da altura de onda significativa à entrada do domínio de cálculo, H_e , são conhecidos à partida. A razão entre estes valores permite obter os índices de agitação em cada ponto do domínio de cálculo, tendo em conta a dissipação de energia por rebentação das ondas.

DREAMS_CR_S, por ser um modelo baseado no método da sobreposição linear, não tem em conta efeitos não lineares como a interacção entre componentes de onda, geração de outras harmónicas, transferências de energia entre frequências, ou galgamentos sobre estruturas.

2.3 MODELO REFDIF

REFDIF é um modelo de diferenças finitas de propagação e deformação da agitação marítima em zonas de profundidade variável, desenvolvido por Kirby e Dalrymple (1994). Este modelo efectua a propagação de ondas regulares em zonas de declive suave e na presença de correntes, tendo em conta os efeitos da refacção e difracção (apenas na direcção perpendicular à direcção principal de propagação da onda), empolamento, dissipação de energia (por atrito ou por percolação do fundo e rebentação das ondas), e efeitos não-lineares.

Este modelo é baseado na aproximação parabólica de ângulo largo da equação de declive suave, estendida por Kirby (1986), o que permite o estudo da propagação de ondas cujo ângulo de incidência não exceda $\pm 45^\circ$, Kirby e Ozkan (1994).



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

A modelação da dissipação de energia por rebentação é efectuada através do modelo de Dally *et al.* (1985). Este modelo foi testado com dados de ensaios em modelo físico para vários declives de fundo e prevê bastante bem a altura da onda na zona de rebentação, Dalrymple e Kirby (1991). A dissipação de energia, w , devido à rebentação da onda é dada por, Kirby e Dalrymple (1986):

$$w = \frac{KC_g(1 - (\gamma h/H)^2)}{h} \quad (4)$$

em que K e γ são constantes empíricas, determinadas por Dally *et al.* (1985). H é a altura de onda definida como duas vezes a amplitude da onda. Os valores recomendados no manual para estes parâmetros são de 0.4, 0.15 e 0.78, para γ , K e H/h , respectivamente.

Quanto às condições de fronteira lateral, o modelo permite a utilização de uma condição de reflexão total ou, em alternativa, uma condição de fronteira aberta; em relação às condições iniciais pode especificar-se um campo de ondas monocromáticas. Este modelo, por ser parabólico, não deve ser aplicado a zonas onde os efeitos da reflexão sejam importantes, pois a componente de onda reflectida é desprezada.

A vantagem do modelo REFDIF é o facto de permitir a propagação e deformação da agitação marítima em grandes áreas costeiras, da ordem da dezena de quilómetros. Tal é devido ao facto da propagação de ondas regulares ser efectuada com um modelo baseado na aproximação parabólica da equação de declive suave que leva a modelos mais rápidos e eficientes, com pequenos requerimentos em termos de memória computacional. A sua aplicação está limitada também a fundos de declive suave.

Para a aplicação do modelo REFDIF são necessários os dados de batimetria da zona a modelar, as características das malhas de diferenças finitas, as condições de agitação incidente (período, direcção e altura de onda) e um conjunto de parâmetros gerais do modelo que devem ser definidos pelo utilizador. O modelo fornece, entre outros, as alturas e as direcções de propagação da onda e valores da superfície livre em qualquer zona, incluindo a de rebentação.

2.4 REFDIF_S

REFDIF_S é um modelo parabólico espectral, que simula a propagação e a deformação da agitação irregular em fundos de profundidade variável e foi desenvolvido por Kirby e Ozkan (1994). Utiliza o modelo de diferenças finitas REFDIF (Dalrymple e Kirby, 1991), na propagação de cada componente espectral (onda regular).

REFDIF_S é baseado no método da sobreposição linear, tal como DREAMS_CR_S, ver 2.2.

A modelação da dissipação de energia por rebentação é efectuada através do modelo estatístico de Thornton e Guza (1983). Estes autores demonstraram que a dissipação de energia por rebentação pode ser expressa por:

$$\frac{\partial EC_{gn}}{\partial x} = -\varepsilon_b \quad (5)$$

em que E é a energia dada por $E = 1/8(\rho g H_{rms}^2)$. ε_b é a dissipação do ressalto dada por:

$$\varepsilon_b = \frac{3\sqrt{\pi}\rho g f B^3}{16\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad (6)$$

em que f é a frequência de pico do espectro em frequência, h é a profundidade local, B e γ são constantes empíricas, determinadas por Thornton e Guza (1983). H_{rms} está relacionada com a altura de onda pela expressão $H_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_s$. Este modelo apenas tem em conta o fluxo de



energia na direcção de propagação da onda, enquanto que o fluxo na direcção perpendicular é considerado constante.

Os valores recomendados no manual para estes parâmetros são de 0.4 e 1.0 para γ e B , respectivamente.

2.5 FUNWAVE

O FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998) e Chen *et al.*, (2000), é um modelo de propagação de ondas baseado nas equações de Boussinesq estendidas, derivadas por Wei *et al.* (1995). O modelo resolve as equações de conservação de massa (1) e quantidade de movimento (2):

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[\mathbf{u}_\alpha + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla(\nabla \cdot (h \mathbf{u}_\alpha)) \right] + \left(\frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6} (h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) \right\} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{u}_{\alpha t} + (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) \mathbf{u}_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t}) + \nabla(\nabla \cdot (h \mathbf{u}_{\alpha t})) \right\} + \\ & \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (h \mathbf{u}_\alpha) + \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha]^2 \right\} + \\ & \nabla \left\{ (z_\alpha - \eta) (\mathbf{u}_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot (h \mathbf{u}_\alpha)) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot \mathbf{u}_{\alpha t} + \nabla \cdot (h \mathbf{u}_{\alpha t}) \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

onde η é a elevação da superfície livre, h é a profundidade, \mathbf{u}_α é o vector de velocidade horizontal à profundidade de, g é a aceleração gravítica e o índice t representa a derivada parcial em relação ao tempo. As equações (7) e (8) descrevem a evolução de ondas sobre um fundo inclinado e impermeável, sem considerar rebentação.

No desenvolvimento do programa FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998) foram introduzidas importantes modificações nas anteriores equações, e entre elas a inclusão de um modelo de rebentação das ondas. Na simulação da hidrodinâmica da zona de rebentação, a dissipação de energia devido à rebentação é tratada através da inclusão de termos de viscosidade turbulenta nas equações de conservação da quantidade de movimento, Kennedy *et al.* (2000).

$$F_{br} = \frac{1}{h + \eta} \left[(v((h + \eta) u_\alpha)_x)_x + \frac{1}{2} (v(((h + \eta) u_\alpha)_y + ((h + \eta) v_\alpha)_x))_y \right] \quad (9)$$

$$G_{br} = \frac{1}{h + \eta} \left[\frac{1}{2} (v(((h + \eta) v_\alpha)_x + ((h + \eta) u_\alpha)_y))_x + (v((h + \eta) v_\alpha)_y)_y \right] \quad (10)$$

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

$$v = B \delta^2 |(h + \eta) \nabla \cdot M| \quad (11)$$

em que δ (denominado como c_{brk} nos testes de sensibilidade dos parâmetros de rebentação) é o coeficiente do comprimento de mistura, ao qual se atribui normalmente o valor empírico de 1.2. A quantidade B controla a ocorrência de dissipação de energia.

O início e fim da rebentação da onda é determinado utilizando o parâmetro η_t^* definido por:

$$\eta_t^* = \begin{cases} \eta_t^{(F)}, & t \geq T^* \\ \eta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^*} (\eta_t^{(F)} - \eta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 < T^* \end{cases} \quad (12)$$



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

em que T^* é o tempo de transição, t_0 é o instante de tempo em que a rebentação da onda ocorre e t é o tempo de ocorrência da rebentação. O parâmetro c_{bkv} é definido por:

$$c_{bkv} = \frac{\eta_t^{(l)}}{\sqrt{gh}} \quad (13)$$

O valor de c_{bkv} varia entre 0.27 e 0.65. Experiências realizadas por D'Alessandro *et al.* (2004) e Vieira (2004) mostraram que os resultados do modelo dependem significativamente deste parâmetro. Em geral, à medida que se aumenta o valor de c_{bkv} a rebentação da onda passa a verificar-se em profundidades menores.

O esquema numérico de diferenças finitas utilizado para a discretização temporal das equações é o método "previsor-corrector" de Adams-Bashforth-Moulton de 4^a ordem, que utiliza um passo de previsão de 3^a ordem Adams-Bashforth e de 4^a ordem Adams-Moulton para o passo da correcção. As derivadas espaciais de 1^a ordem são discretizadas por diferenças finitas centrais, utilizando uma fórmula de 5 pontos, com uma precisão de 4^a ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efectuados com uma precisão de 2^a ordem.

O modelo FUNWAVE foi desenvolvido para aplicações a uma e duas dimensões, apresentando estas últimas algumas limitações, tais como, a existência de problemas na geração e propagação de ondas com direcções diferentes daquela definida pela perpendicular à fronteira de entrada do domínio de cálculo e a impossibilidade de geração de agitação irregular entre outras. Estes condicionantes limitam um pouco a aplicabilidade desta versão bidimensional a casos reais de estudo

Os dados de entrada do modelo FUNWAVE são os valores de batimetria, da série temporal de elevação da superfície livre no "gerador de ondas" ou função fonte interno do domínio, da condição inicial para a elevação da superfície livre e velocidade em todos os pontos do domínio e um ficheiro com os parâmetros do modelo, Kirby *et al.* (1998). Este ficheiro contém os parâmetros do modelo atrás descritos e os correspondentes às características da onda a propagar, às características do domínio de cálculo, ao passo de tempo temporal e ao tempo total de cálculo.

Os resultados fornecidos pelo modelo constam de séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

3. CASO DE TESTE – PRAIA BARRA-FOSSA

3.1 Ensaio em modelo físico

Os testes em modelo físico, Sancho *et al.* (2001), foram efectuados num canal (100 m de comprimento, 3 m de largura e 5 m de profundidade), existente na Universidade Politécnica da Catalunha. O perfil longitudinal do fundo do canal é mostrado na Figura 1, sendo x a distancia horizontal até ao batedor, ou seja, o batedor está posicionado em $x=0$ m, e z a coordenada vertical.

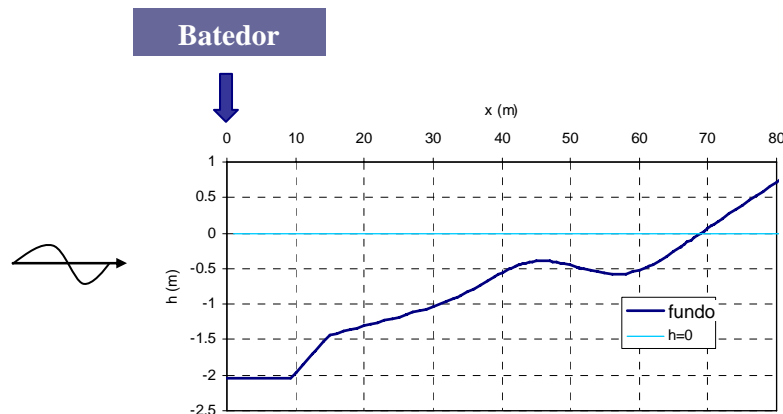


Figura 1 – Praia Barra-Fossa. Geometria e batimetria.

Os ensaios foram realizados para um conjunto de ondas incidentes pré-definidas e obtiveram-se valores da elevação da superfície livre em 49 localizações diferentes, através da combinação de 8 sondas de medição. Durante os ensaios, três das sondas mantinham-se na mesma posição em frente ao gerador de ondas para garantir a repetibilidade e o controle de qualidade dos ensaios efectuados. As restantes sondas iam sendo mudadas de posição consoante os testes efectuados.

3.2 Condições de teste

Foram escolhidas quatro condições de agitação incidente (3 monocromáticas, designadas por A, B e C, e uma irregular, designada por D), de modo a que as ondas rebentassem antes da barra, reformassem na zona da fossa e rebentassem de novo na praia. Para a ondulação incidente irregular, foi usado um espectro JONSWAP, com um factor de pico de $\gamma=3.3$.

Quadro 1. Condições de agitação dos ensaios realizados.

Caso de Teste	H , $H_{rms}(m)$	T , $T_p(s)$	$x_b(m)$	$H_b(m)$	$h_b(m)$	Tipo de rebentação
A (regular)	0.21	2.50	45.5	0.30	0.393	Progressiva
B (regular)	0.21	3.50	44.0	0.35	0.410	Mergulhante
C (regular)	0.38	3.50	39.5	0.56	0.585	Mergulhante
D (irregular)	0.21	2.50	41.0	0.23	0.510	Ambas

No Quadro 1 estão indicadas as quatro condições de agitação incidente consideradas nos ensaios experimentais, onde H e H_{rms} são as alturas (regular e média quadrática) pretendidas em frente ao batedor, T e T_p são o período (da onda regular) e o período de pico, x_b , H_b e h_b são o local, a altura e profundidade de rebentação. Os valores para a condição irregular D correspondem aos associados ao período de pico.

Note-se que a posição de rebentação foi estimada através da observação do local onde H ou H_{rms} atingiram valores máximos (Sancho *et al.*, 2001). Para as ondas monocromáticas, a posição estimada coincide com os máximos locais de assimetria e curtose da elevação da superfície livre. Para as ondas irregulares os máximos locais de assimetria e curtose ocorrem depois do local onde o valor de H_{rms} é máximo.

As condições de agitação incidente A, B, C e D foram repetidas várias vezes conduzindo a 230 ensaios no total, correspondentes a cerca de 57 ensaios para cada uma das quatro condições de agitação incidentes. Em cada ensaio, foram obtidos resultados da elevação da superfície livre e da velocidade ao longo do canal. Com estes valores, foi possível determinar



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

as variações longitudinais da elevação média da superfície livre, da assimetria (μ_3) e curtose (μ_4), altura média quadrática e o período de onda médio ao longo do domínio, Sancho *et al.* (2001).

4. APLICAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Condições de cálculo dos modelos numéricos

Para os testes numéricos, dos vários ensaios em modelo físico, seleccionaram-se quatro para serem reproduzidos com os modelos numéricos. As suas características na posição $x=12.4$ m (admitidas para os cálculos com os modelos da série DREAMS_CR e da série REFDIF) são apresentadas no Quadro 2, assim como as características admitidas na função-fonte do modelo FUNWAVE.

Quadro 2. Posição $x=12.4$ m. Características da agitação marítima (H_{rms} e T_p) nos ensaios experimentais e utilizados na aplicação dos modelos numéricos.

Testes	$H, H_{rms}(m)$		$T, T_p(s)$	
	Valores admitidos em DREAMS-CR(S) e REFDIF(S)	Valores admitidos no FUNWAVE	Valores admitidos em DREAMS-CR(S) e REFDIF(S)	Valores admitidos no FUNWAVE
A	0.210	0.205	2.5	2.48
B	0.210	0.210	3.50	3.50
C	0.380	0.380	3.50	3.50
D	0.210	0.210	2.45	2.45

Os modelos numéricos foram aplicados para as condições de agitação incidente apresentadas no Quadro 2. Os modelos de ondas regulares DREAMS_CR e REFDIF foram aplicados para as condições A a C enquanto que os modelos de ondas irregulares DREAMS_CR_S e REFDIF S foram aplicados para a condição de agitação incidente D.

A batimetria considerada nos cálculos efectuados com os modelos numéricos encontra-se representada na Figura 1. Nos modelos da série DREAMS_CR e REFDIF, por limitações inerentes aos modelos, foi acrescentada uma extensão de 40 m na zona da batimetria de profundidade igual a 2.05 m e a profundidade mínima admitida ao longo do domínio foi de 0.006 m.

É de notar que tanto os modelos REFDIF e REFDIF_S, como DREAMS_CR e DREAMS_CR_S permitem a propagação de ondas no espaço bidimensional (2D), enquanto que o modelo FUNWAVE só permite numa única dimensão (1D). Assim, o domínio computacional dos modelos da série DREAMS_CR e REFDIF tem as dimensões de 110 m na direcção de propagação da onda e de 1 m na direcção perpendicular à propagação.

O domínio considerado pelos modelos REFDIF e REFDIF_S foi discretizado com uma malha de diferenças finitas com $dx=0.25$ m e $dy=0.1$ m. Tal corresponde a 5450 nós. O domínio considerado pelos modelos DREAMS_CR e DREAMS_CR_S foi discretizado com uma malha de elementos finitos com o mesmo espaçamento, i.e., $dx=0.25$ m e $dy=0.1$ m. Tal corresponde a 5450 nós e 8712 elementos triangulares.

Para os modelos DREAMS_CR_S e REFDIF S, as características do espectro direccional incidente (em termos da largura do espectro em frequência e da função de distribuição direccional) foram as de um espectro direccional incidente calculado através do produto de um espectro empírico em frequência e uma função empírica de dispersão em direcção. Como espectro em frequência utilizou-se o espectro TMA, Bouws *et al.* (1985) e como função de dispersão em direcção utilizou-se a função de distribuição direccional de Borgman (conforme apresentada em Kirby e Ozkan, 1994). A dispersão em frequência



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

adoptada para o espectro TMA foi de 3.3 e a dispersão em direcção para a função de distribuição direccional de Borgman foi de 30°. O espectro direccional incidente foi dividido em 20 frequências e apenas 1 direcção, para que os seus resultados fossem comparáveis com os resultados do modelo FUNWAVE.

O domínio computacional do modelo FUNWAVE é unidimensional e foi dividido em vários segmentos de igual espaçamento, $dx=0.1$ m, o que corresponde a um total de 811 pontos. Os cálculos foram efectuados para um passo de cálculo temporal de $dt=0.01$ s e $dt=0.02$ s, para os casos de teste A a C e para o caso D, respectivamente. O tempo total de simulação foi de 500 s (i.e. 50000 passos de cálculo temporal) e 600 s (30000 passos de cálculo temporal), para os casos de teste regulares e irregulares, respectivamente.

Para tentar reproduzir estas condições de agitação em modelo numérico, houve que simular ondas regulares e irregulares com valores de altura e período de onda gerada na função-fonte, conforme indicado no Quadro 2. A posição da função-fonte varia entre 6.5 m, nos ensaios A e D e 7.0 m, nos ensaios B e C.

É de salientar que os valores numéricos da altura e período da onda impostos na função-fonte, situada entre 6.5 m e 7.0 m, foram os que conduziram aos valores, na posição $x=12.4$ m do domínio de cálculo, mais semelhantes aos obtidos experimentalmente.

4.2 Testes de sensibilidade aos parâmetros de rebentação

Os primeiros testes efectuados foram no sentido de avaliar para cada um dos casos de teste qual a influência da variação dos parâmetros de rebentação dos modelos nos seus resultados.

Sendo assim, para cada caso de teste e modelo numérico, apresentam-se nas próximas subsecções, os resultados numéricos obtidos variando os valores dos parâmetros de rebentação. Estes resultados são comparados com os experimentais de modo a avaliar qual a combinação de parâmetros que conduz a melhores resultados dos modelos numéricos para cada caso de teste.

4.2.1 Modelo DREAMS_CR e DREAMS_CR_S

Os parâmetros que influenciam o processo de rebentação das ondas nos modelos da série DREAMS_CR são: B e γ_0 , secção 2.1 e 2.2. O parâmetro B controla o ponto de rebentação da onda e o parâmetro γ_0 controla o declive da curva após a rebentação da onda.

Foram efectuadas várias combinações destes parâmetros, com os seguintes valores: B entre 0.5 e 1.3 com um intervalo de 0.1 e γ_0 entre 0.6 e 0.8 com um intervalo de 0.05.

Da Figura 2 à Figura 4 apresentam-se, para os casos A, B e C, a variação dos resultados do modelo DREAMS_CR com os parâmetros B e γ_0 , que influenciam o processo de rebentação das ondas.

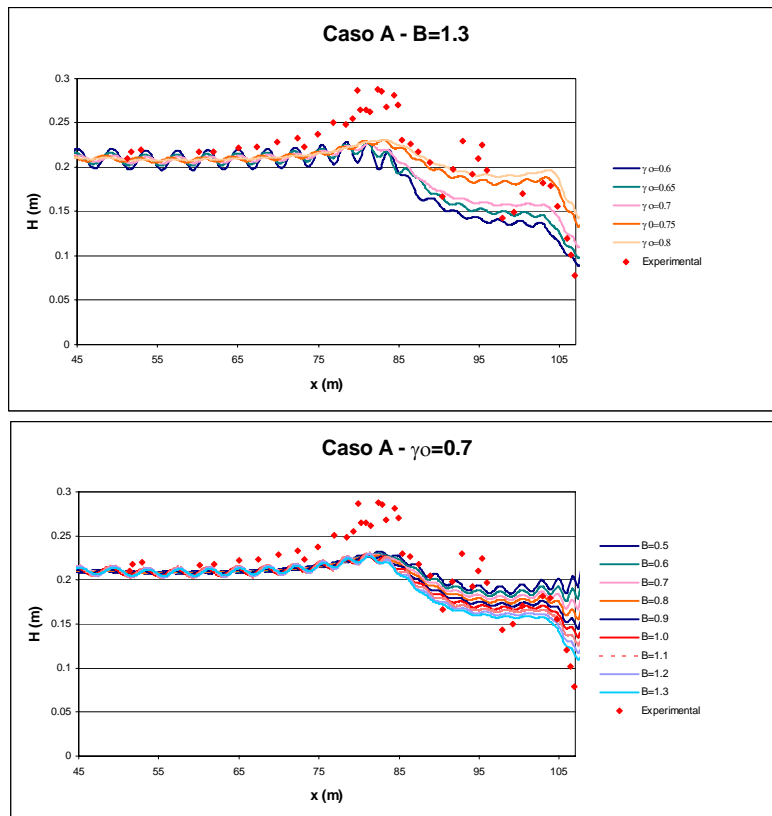


Figura 2. Variação dos resultados do modelo DREAMS_CR com os parâmetros B e γ_0 . Caso A.

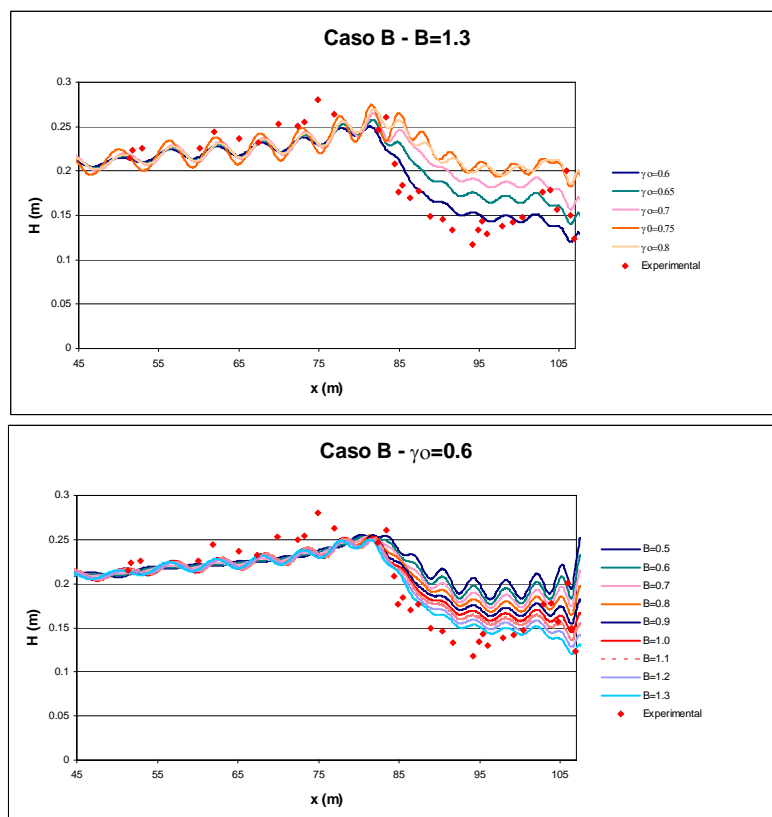


Figura 3. Variação dos resultados do modelo DREAMS_CR com os parâmetros B e γ_0 . Caso B.

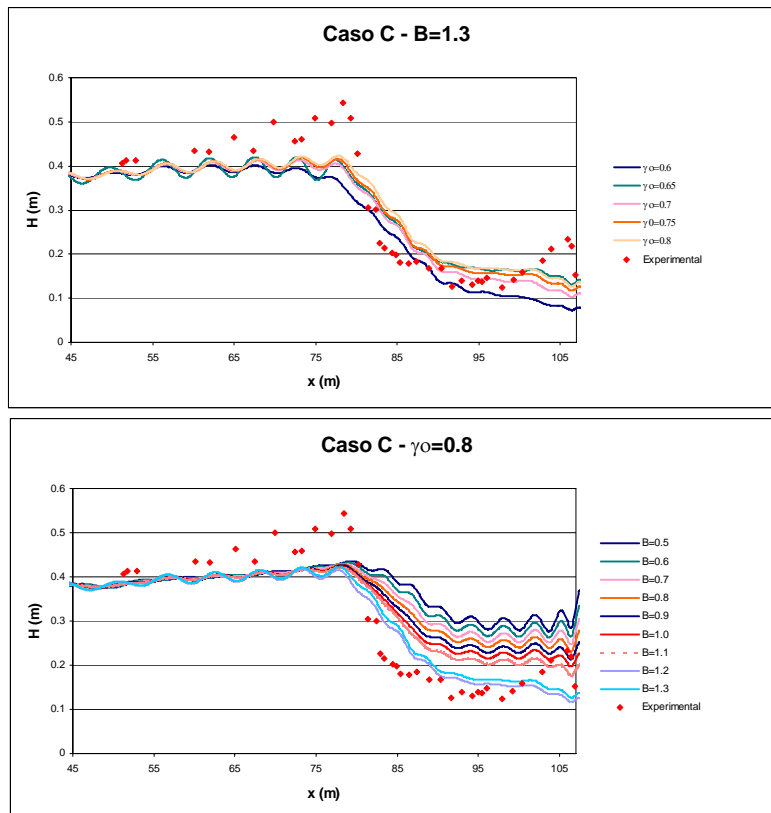


Figura 4. Variação dos resultados do modelo DREAMS_CR com os parâmetros B e γ_0 . Caso C.

Da análise dos resultados dos testes de sensibilidade, podem ser retiradas algumas conclusões:

- À medida que B aumenta, as reflexões nos resultados do modelo aumentam antes da primeira rebentação da onda e diminuem após esse ponto,
- À medida que γ_0 diminui, os valores de altura de onda após o ponto da primeira rebentação diminuem. Também foi verificado que à medida que o período da onda incidente aumenta, o valor mais adequado para γ_0 diminui, enquanto que com o aumento da altura de onda incidente o melhor valor para o parâmetro γ_0 aumenta.

Em todos os casos, verifica-se que o modelo numérico tem o mesmo andamento que os resultados experimentais, mas subestima o valor da altura de onda no ponto da primeira rebentação.

Após a análise destes resultados, foram definidas diversas combinações de B e γ_0 para o caso D, para as diversas ondas regulares em que o espectro incidente foi dividido para os cálculos com o modelo DREAMS_CR_S:

- Ondas de período situado entre 1.0 e 2.0 s: $B = 1.3$ e $\gamma_0 = 0.8$;
- Ondas de período situado entre 2.0 e 2.5 s: $B = 1.3$ e $\gamma_0 = 0.7$;
- Ondas de período situado entre 2.5 e 3.5 s: $B = 1.3$ e $\gamma_0 = 0.6$.

Considerando os anteriores valores de B e γ_0 , apresenta-se na Figura 5 os resultados do modelo DREAMS_CR_S.

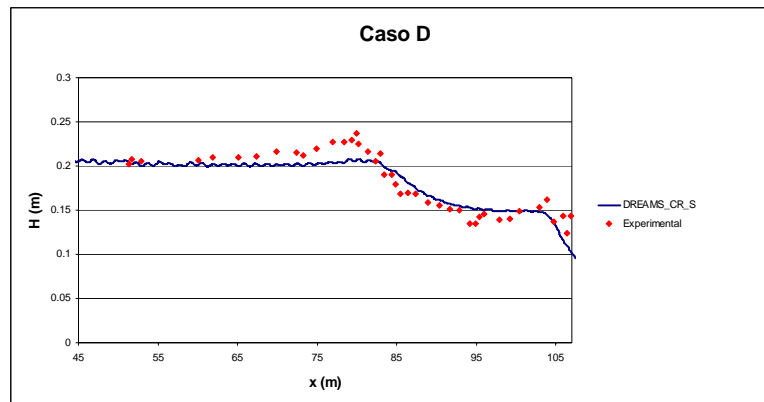


Figura 5. DREAMS_CR_S. Caso de teste D.

No caso D, os resultados do modelo DREAMS_CR_S têm um comportamento bastante semelhante aos resultados experimentais ao longo de todo o domínio. É de salientar que esta concordância é melhor do que a que acontecia nos casos A a C. No entanto, tal como nesses casos, verifica-se que os valores numéricos são inferiores antes da primeira rebentação e um pouco superiores após esta.

4.2.2 Modelo REFDF

Os dois parâmetros empíricos que influenciam o processo de rebentação das ondas no modelo REFDF são K , e γ , secção 2.3. O parâmetro K controla o decaimento do fluxo de energia da onda e γ é um coeficiente adimensional. Adicionalmente, foram também efectuados testes em que se variou o valor do critério de rebentação, dado por H/h . Foram efectuadas cálculos com os seguintes valores dos parâmetros:

- γ de 0,3, 0,355, 0,4, 0,475 e 0,5;
- K de 0,1, 0,115, 0,14 e 0,275;
- H/h de 0,3, 0,5, 0,63, 0,78, 1,0 e 1,5.

Os valores recomendados no manual para estes parâmetros são de 0,4, 0,15 e 0,78, para γ , K e H/h , respectivamente. Os resultados destes cálculos são apresentados da Figura 6 à Figura 8, para os casos de teste A, B e C, respectivamente.

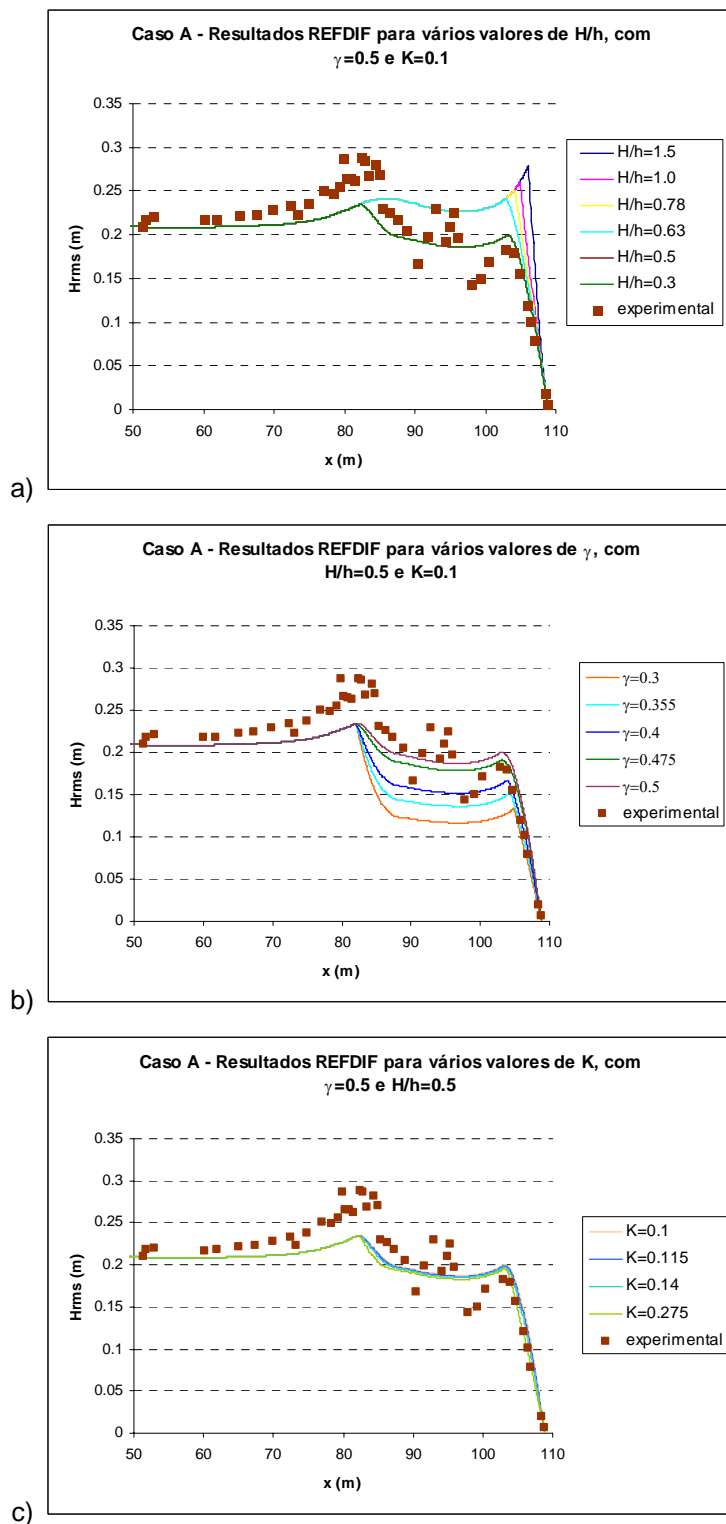


Figura 6. Modelo REFDIF. Caso de teste A: a) Variação dos valores de H/h para valores de $\gamma=0.5$ e $K=0.1$; b) Variação dos valores de γ para $H/h=0.5$ e $K=0.1$; c) Variação dos valores de K para $\gamma=0.5$ e $H/h=0.5$.

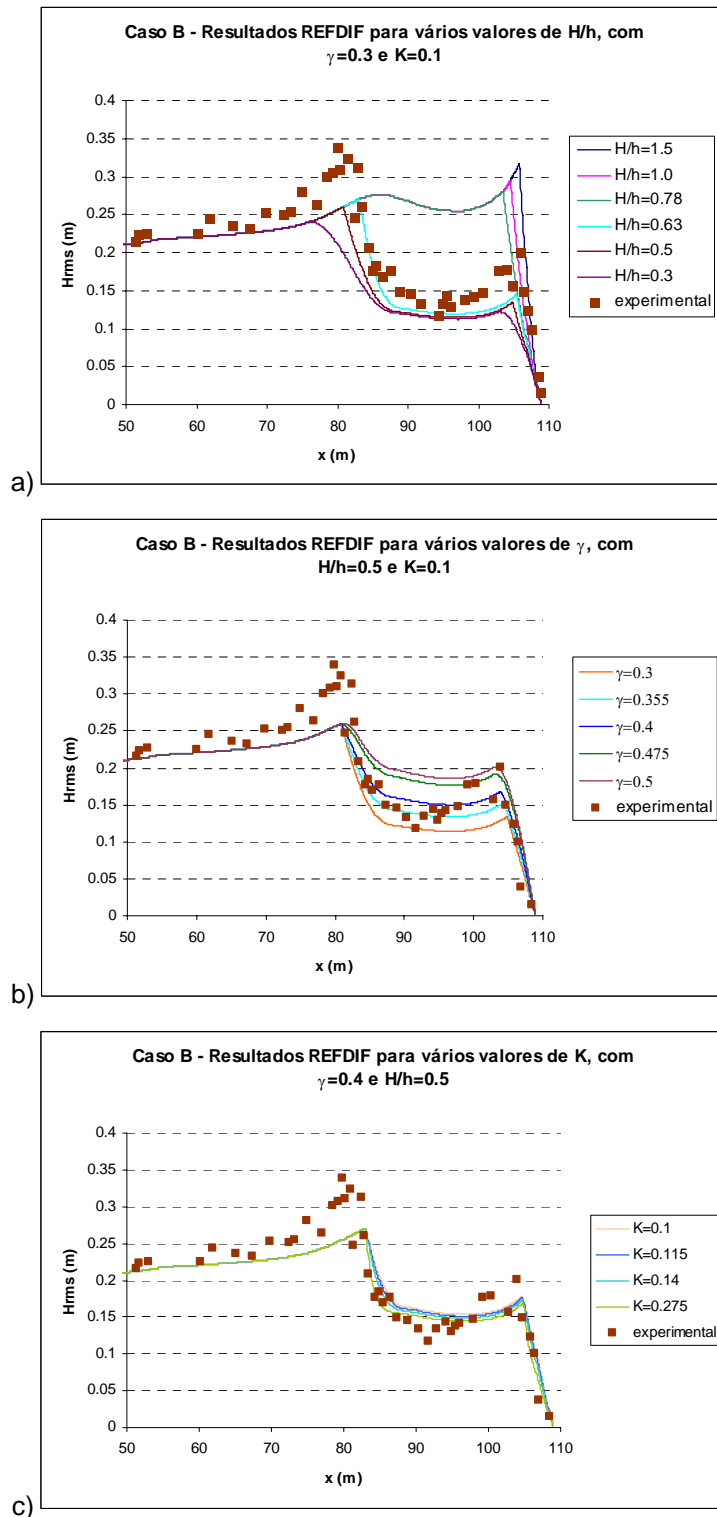


Figura 7. Modelo REFDF. Caso de teste B: a) Variação dos valores de H/h para valores de $\gamma=0.4$ e $K=0.1$; b) Variação dos valores de γ para $H/h=0.5$ e $K=0.1$; c) Variação dos valores de K para $\gamma=0.4$ e $H/h=0.5$.

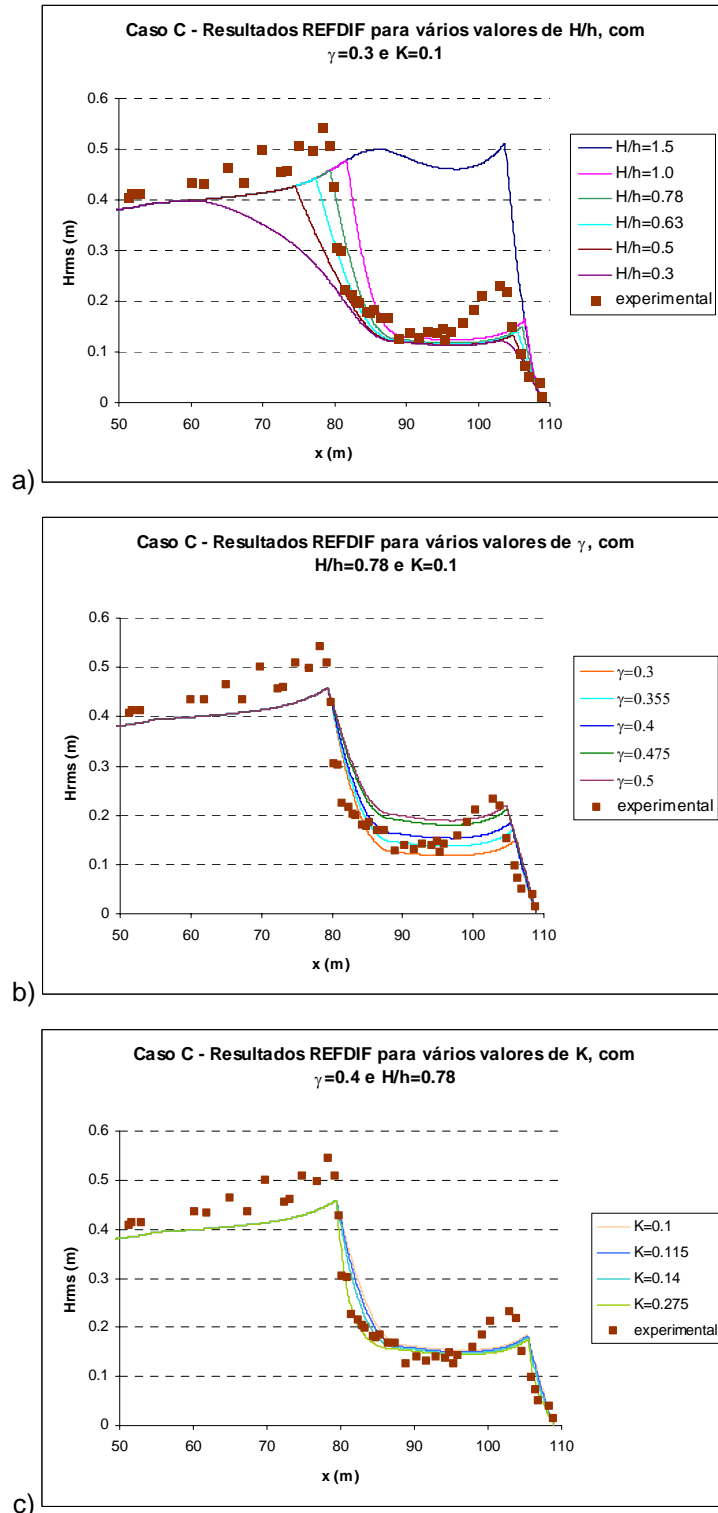


Figura 8. Modelo REFDIF. Caso de teste C: a) Variação dos valores de H/h para valores de $\gamma_0=0.4$ e $K=0.1$; b) Variação dos valores de γ_0 para $K=0.1$ e $H/h=0.78$; c) Variação dos valores de K para $\gamma_0=0.4$ e $H/h=0.78$.

Da análise geral da Figura 6 à Figura 8, verificou-se que, com qualquer dos parâmetros considerados, os resultados do modelo REFDIF subestimam os resultados experimentais até à zona da 1^a rebentação qualquer que seja o caso de teste considerado. A partir da 1^a



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

rebentação é que dependendo do parâmetro H/h ou γ os resultados numéricos são razoavelmente concordantes com os experimentais.

Mais concretamente, verificou-se que:

- Para todos os casos de teste, a variação dos valores de K não teve importância significativa nos resultados do modelo numérico. O valor adoptado foi de 0.1.
- A variação dos valores de H/h influencia significativamente os resultados, nomeadamente no ponto onde ocorre a primeira rebentação. Os valores de H/h limite, para que ocorresse a primeira rebentação, na zona da barra, foram de 0.5 para o Caso A, 0.63 para o Caso B e 1.0 para o Caso C. Os valores considerados como mais adequados para este parâmetro foram os seguintes: Caso A: 0.3, Caso B: 0.63, Caso C: 0.78. Em resumo, mantendo a altura de onda incidente constante, H/h aumenta com o aumento do período da onda incidente e, mantendo o período da onda incidente constante, H/h também aumenta com o aumento da altura de onda incidente;
- A variação do parâmetro γ influenciou significativamente os resultados após a primeira rebentação. Verificou-se que, à medida que este parâmetro aumenta, aumentam os valores de altura de onda a seguir à primeira rebentação. A dispersão dos resultados experimentais torna difícil a determinação do valor mais adequado para γ . O valor adoptado para os casos A, B e C foi, respectivamente, 0.5, 0.4 e 0.4.

É de notar que no manual do modelo o valor aconselhado para o parâmetro H/h é de 0.78 que, para esta batimetria, apenas se verificou adequado para o Caso C.

4.2.3 Modelo REFDIF_S

Como foi referido, os dois parâmetros empíricos que influenciam o processo de rebentação das ondas no modelo REFDIF_S são B e γ , secção 2.4. O parâmetro B é um coeficiente de rebentação de $O(1)$ e tem em conta as diferenças entre os vários tipos de rebentação. É considerado como uma função da proporção da zona com mistura ar-água na parte frontal da onda rebentada.

Foram efectuadas cálculos com os seguintes valores dos parâmetros:

- γ de 0.5, 0.6, 0.65, 0.7 e 0.75, 0.8;
- B de 1.5, 1.3, 1.1, 1.0, 0.9, 0.7;

Conforme já referido, os valores recomendados no manual para estes parâmetros são de 0.4 e 1.0 para γ e B , respectivamente.

Os resultados destes cálculos são apresentados na Figura 9.

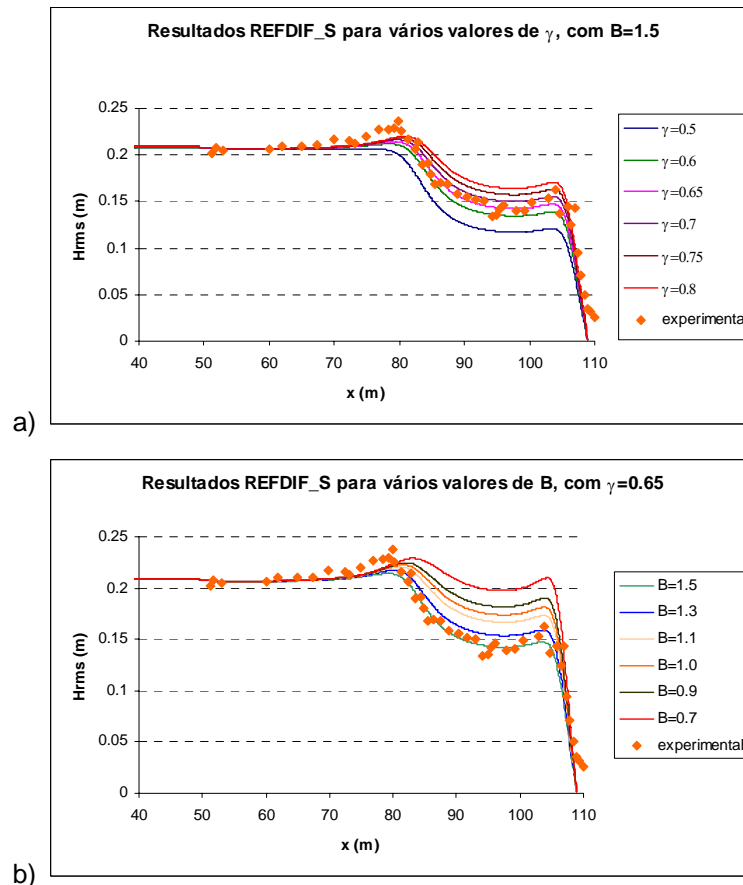


Figura 9. Modelo REFDIF S. Caso de teste D: a) Variação dos valores de γ para $B= 1.5$; b) Variação dos valores de B para $\gamma= 0.65$.

Para o Caso D, quer a variação dos valores de γ , quer de B , influenciam os resultados numéricos após a ocorrência da primeira rebentação. No caso da variação de γ , verifica-se que, para valores até 0.65, os resultados numéricos subestimam os resultados experimentais. A partir daí, passa-se o inverso, isto é, os resultados experimentais são inferiores aos resultados numéricos. No caso da variação de B , verifica-se que, quanto maior o valor de B , maiores são os valores obtidos após a primeira rebentação. Os valores recomendados para estes parâmetros são de 0.65 e 1.3 para γ e B , respectivamente.

4.2.4 Modelo FUNWAVE

No modelo FUNWAVE, dois dos parâmetros que influenciam a rebentação das ondas são $cbkv$ e $cbrk$ (secção 2.5). O primeiro está relacionado com a determinação do início e da cessação da rebentação das ondas, enquanto que o segundo corresponde ao coeficiente da camada de mistura, que normalmente tem o valor empírico de 1.2, e que está incluído na formulação da viscosidade turbulenta de Zelt (1991) como δ .

De forma a determinar a influência destes dois parâmetros nos resultados do modelo FUNWAVE, este foi aplicado para os seguintes valores:

- $cbkv$: 0.20-0.50 com um intervalo de 0.05;
- $cbrk$: 1.0-1.50, com um intervalo de 0.10;

Os valores recomendados no manual para estes parâmetros são de 0.35 (para o perfil batimétrico barra-fossa) e 1.2, para $cbkv$ e $cbrk$, respectivamente.

A Figura 10 apresenta os melhores valores de $cbkv$ para os casos de teste A, B, C e D. Nestes testes, manteve-se constante o valor de $cbrk$ (igual a 1.2). Em testes preliminares,

verificou-se que mantendo constante o valor de $cbkv$, a variação do parâmetro $cbrk$ não introduz alterações nos resultados de H_{rms} , independentemente do caso de teste. Portanto, para futuros casos de teste deveria ser mantido o valor recomendado de $cbrk$: 1.2.

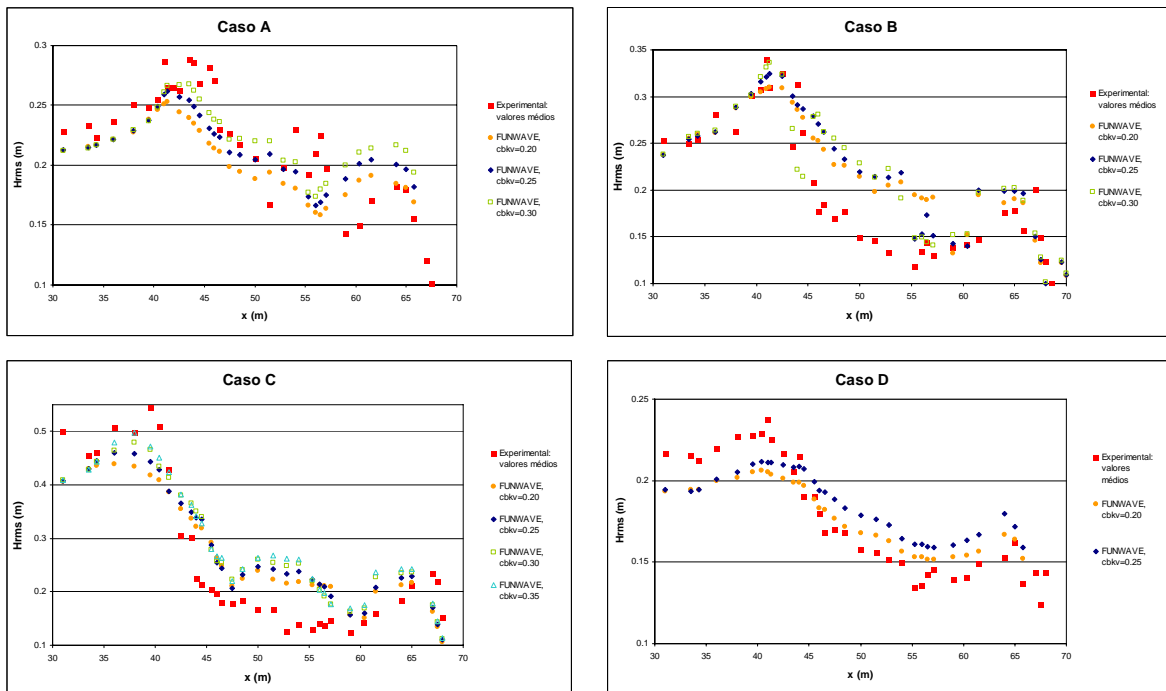


Figura 10. Melhores resultados do modelo FUNWAVE obtidos para os testes de sensibilidade: Casos A, B, C, D.

Para todos os casos de teste, à medida que aumenta o valor de $cbkv$, os valores numéricos aumentam na zona após a 1^a rebentação. No caso C e D, esse aumento também se verifica antes da 1^a rebentação.

No caso A, à medida que se aumenta $cbkv$, os resultados numéricos aproximam-se dos valores experimentais em redor da zona da 1^a rebentação. No entanto, para nenhum dos valores de $cbkv$, o modelo FUNWAVE consegue reproduzir correctamente a zona antes e após a 2^a rebentação. O valor recomendado é para este parâmetro é de 0.3.

Para o caso B, verificou-se que à medida que se diminui $cbkv$, os valores numéricos apresentam melhor concordância com os valores experimentais na zona da 1^a rebentação. Neste caso os valores numéricos após a 1^a rebentação são em geral superiores aos experimentais, qualquer que seja o valor de $cbkv$, o que implica que o modelo não está a dissipar tanta energia quanto o modelo físico. O andamento dos resultados numéricos e experimentais é no entanto bastante semelhante.

Para o caso C, e para valores de $cbkv$ elevados, os resultados numéricos aproximam-se dos experimentais na zona em redor da 1^a rebentação. A partir de $x=50$ m, nenhum dos valores de $cbkv$ conduzem a resultados numéricos muito próximos dos experimentais, embora o andamento seja parecido.

Finalmente, para o caso D, o valor de $cbkv=0.2$ conduz a uma maior proximidade dos resultados numéricos aos experimentais. Neste caso, o modelo FUNWAVE simula bastante melhor o processo de rebentação desde a 1^a até à 2^a rebentação.

Em resumo, mantendo a altura de onda incidente constante, o valor de $cbkv$ que torna os resultados do modelo mais próximos dos experimentais diminui com o aumento do período da onda incidente e, mantendo o período da onda incidente constante, esse valor de $cbkv$ aumenta com o aumento da altura de onda incidente. Para a comparação entre os resultados dos vários modelos e os dados experimentais foram escolhidos os seguintes valores do parâmetro $cbkv$: Caso A: 0.30; Caso B: 0.2; Caso C: 0.35; Caso D: 0.2.

4.2.5 Resumo dos resultados obtidos para os testes de sensibilidade

No Quadro 3 apresenta-se o resumo dos valores recomendados para cada parâmetro de rebentação e para cada caso de teste.

Quadro 3. Resumo dos valores recomendados para cada parâmetro de rebentação.

	Série DREAMS			REFDIF			REFDIF S		FUNWAVE	
	Cond. agitação	B	γ_0	K	γ	H/h	B	γ	$cbkv$	$cbrk$
Caso A	$T=2.5$ s; $H=0.21$ m	1.3	0.7	0.1	0.5	0.3			0.30	1.20
Caso B	$T=3.5$ s; $H=0.21$ m		0.6			0.63			0.20	
Caso C	$T=3.5$ s; $H=0.38$ m		0.8			0.78			0.35	
Caso D	$T=2.5$ s; $H=0.21$ m		$T(1.0-2.0$ s): 0.8 $T(2.0-2.5$ s): 0.7 $T(2.5-3.5$ s): 0.6		1.30	0.65	0.20			

4.3 Comparação de valores de altura de onda média quadrática ao longo do domínio

Para as condições de agitação incidente regulares e para os valores dos parâmetros determinados na secção 4.2, os resultados dos modelos da série DREAMS_CR, da série REFDIF e FUNWAVE foram comparados com os experimentais em termos da onda média quadrática, H_{rms} , ao longo do perfil batimétrico apresentado na Figura 1.

Enquanto que os modelos da série DREAMS_CR e REFDIF fornecem directamente os valores das alturas de onda ao longo do domínio, para o modelo FUNWAVE é necessária uma análise temporal dos resultados. Tal análise foi efectuada através da aplicação do método do zero ascendente para o cálculo das alturas de onda.

Da Figura 11 à Figura 14 apresentam-se as comparações entre os resultados experimentais e numéricos, em diversos pontos do domínio, para os testes A a D.

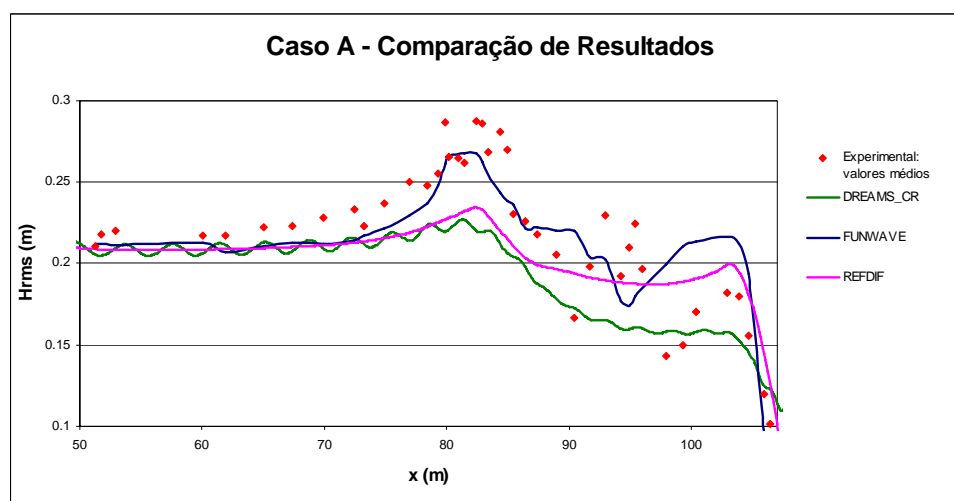


Figura 11 – Caso A: valores de altura de onda significativa ao longo do domínio.

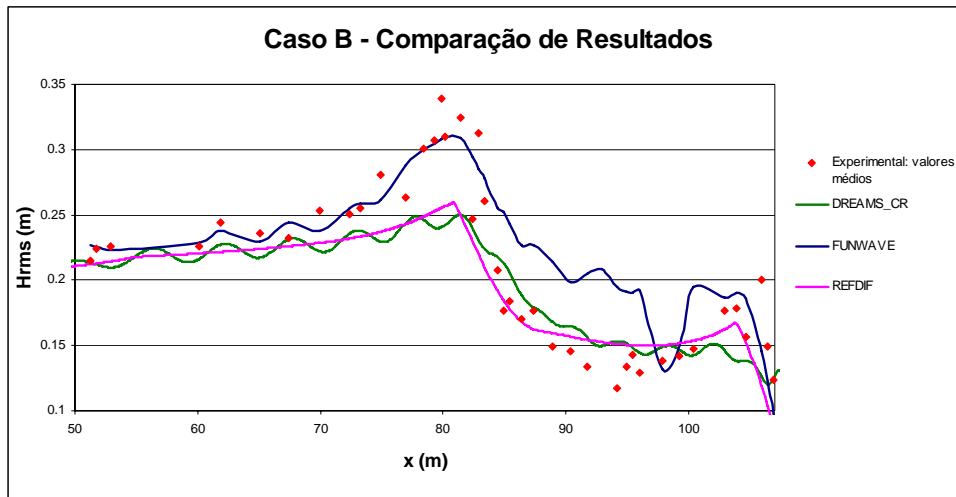


Figura 12 – Caso B: valores de altura de onda significativa ao longo do domínio.

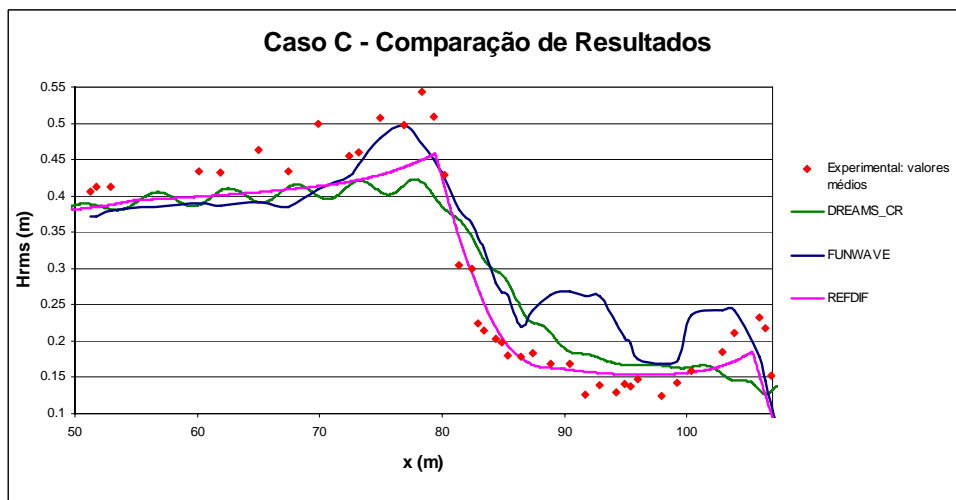


Figura 13 – Caso C: valores de altura de onda significativa ao longo do domínio.

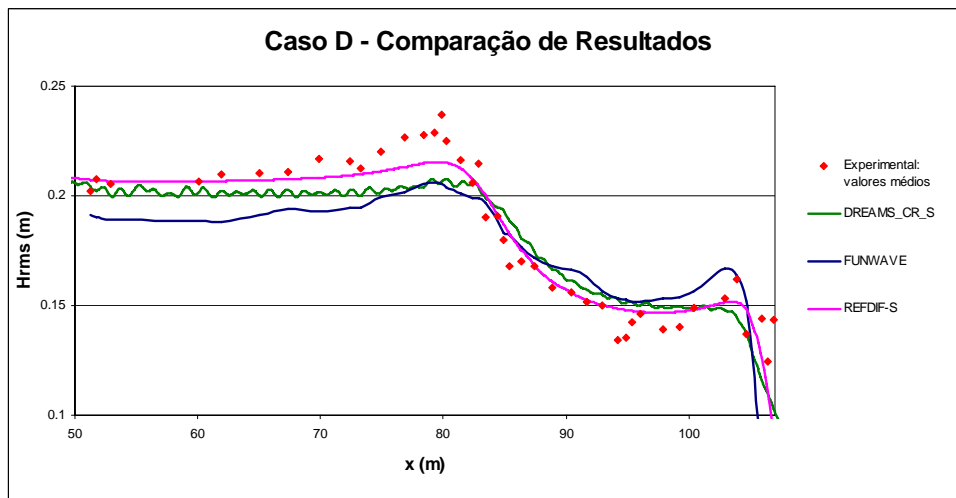


Figura 14 – Caso D: valores de altura de onda significativa ao longo do domínio.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Em geral, verifica-se que o andamento dos resultados numéricos é semelhante ao andamento dos resultados experimentais, embora se verifique que os resultados do modelo FUNWAVE são os que acompanham melhor o andamento dos resultados experimentais. Em todos os casos de teste, os modelos numéricos subestimam os resultados experimentais antes da primeira rebentação.

Para os casos de teste A e B, o modelo DREAMS_CR é o que mais se afasta dos resultados experimentais na zona da primeira rebentação e principalmente na segunda rebentação ou após a mesma. Tal é devido a este ser um modelo linear e, por tal, não tem em conta os efeitos não lineares que acontecem na rebentação e após esta.

No caso A, o modelo que apresenta um melhor comportamento é o modelo FUNWAVE.

No caso B, os resultados do modelo FUNWAVE são semelhantes aos experimentais até à primeira rebentação, tornando-se mais elevados após esta. Em contrapartida, os resultados de DREAMS_CR e REFDIF são inferiores aos experimentais antes da primeira rebentação e acompanham muito bem o andamento dos valores experimentais após a mesma. Inclusive, o modelo REFDIF simula correctamente a segunda rebentação.

No caso C, todos os resultados dos modelos numéricos são inferiores aos experimentais, mas após a primeira rebentação acompanham razoavelmente o andamento dos valores experimentais. No caso dos modelos FUNWAVE e DREAMS_CR existe uma certa sobrestimação dos valores experimentais.

No caso D, o andamento dos resultados numéricos de todos os modelos é muito semelhante ao dos experimentais. Verifica-se, no entanto, que os resultados numéricos são inferiores aos resultados experimentais até à primeira rebentação e, posteriormente, acompanham muito bem os resultados experimentais até à segunda rebentação, onde se verifica também uma boa concordância.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, analisou-se o comportamento de modelos numéricos na simulação da propagação de ondas de superfície, regulares e irregulares, ao longo de um canal de fundo variável, representando uma praia de perfil barra-fossa. Efectuou-se também um teste de sensibilidade à variação dos parâmetros de rebentação correspondentes a cada modelo numérico.

O estudo envolveu os modelos DREAMS_CR, Fortes (2002) e REFDIF, Kirby e Dalrymple (1994), as suas versões espectrais DREAMS_CR_S, Zózimo *et al.* (2003) e REFDIF_S, Kirby e Ozkan (1994) e o modelo FUNWAVE, Kirby *et al.* (1998).

As simulações numéricas mostraram que para todos os modelos, em geral, a influência da variação dos parâmetros de rebentação é significativa nos resultados numéricos. Só no caso da variação do parâmetro K do modelo REFDIF e do parâmetro $cbrk$ do modelo FUNWAVE, se verificou que não existem grandes alterações nos resultados numéricos. Em relação aos restantes parâmetros, verificou-se que dependendo do período e direcção da onda os seus valores diferem, pelo que não podem ser adoptados valores predefinidos em manual em qualquer aplicação dos modelos. Do exposto, conclui-se que deve ser sempre efectuada uma análise de sensibilidade à variação dos valores desses parâmetros nos resultados do modelo.

Em geral, verificou-se que o andamento dos resultados numéricos foi semelhante ao andamento dos resultados experimentais, e que o modelo FUNWAVE foi o que apresentou um melhor desempenho, contrariamente ao modelo DREAMS_CR, que apresentou o pior desempenho para este caso de teste. Tal é devido ao facto deste modelo não ter em conta fenómenos não-lineares, que têm um papel muito importante na propagação de ondas sobre este perfil batimétrico.

No Caso A, verificou-se uma subestimação dos valores de todos os modelos numéricos, em comparação com os experimentais, ao longo de todo o perfil batimétrico. Nos restantes



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

casos, verificou-se uma tendência geral para que todos os modelos apresentassem resultados inferiores aos experimentais até à primeira rebentação e superiores aos experimentais após a mesma. Em geral os resultados numéricos foram mais concordantes com os experimentais no caso da propagação de ondas irregulares, Caso D, do que nos restantes casos.

Estudos semelhantes devem ser realizados com outros casos de teste de modo a ganhar sensibilidade quanto aos valores relacionados com a rebentação que se devem adoptar em cada modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento ao Eng. Francisco Sancho pela cedência dos dados experimentais. Agradecem também o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através dos projectos POCTI/ECM/32446/2000, POCTI/EME/47576/2002 e POCTI/CTA/48065/2002. A autora Catarina Zózimo agradece também à FCT o financiamento da sua bolsa de doutoramento de ref.^a SFRH/BD/18183/2004. O autor João Mil-Homens agradece o financiamento do Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) e da FCT da sua bolsa de investigação.

BIBLIOGRAFIA

- Battjes, J.A. (1986), "Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves", *Report N.º. 86-5, Delft University of Technology*.
- Battjes, J.A. (1988), "Surf zone dynamics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 20, pp. 257-293.
- Battjes, J.A.; Janssen, J.P.F.M. (1978), "Energy loss and set-up due to breaking in random waves", in *Proc. 16th International Conference in Coastal Engineering*, Hamburgo, Alemanha, Vol. 1, pp. 569-587.
- Berkhoff, J.C.W. (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", in *Proc. 13th Int. Conference Coastal Engineering, ASCE, Vancouver (Canadá)*.
- Booij, N. (1981), "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", *Technical University of Delft*, PhD Thesis.
- Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W., Vincent, C, L. (1985), "Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water", *Journal of Geophysical Research*, 90, C1, pp. 975-986
- Chen Q., Kirby, J.T., Darymple, R.A., Kennedy, A.B. & Chawla, A. (2000), "Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. II: Two Horizontal Dimensions." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng.* 126: 48-56.
- D'Alessandro, F.; Fortes, C.J.E.M; Sancho, F. (2004), "Validação do modelo FUNWAVE", *Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia*, Lisboa
- Dally, W.R.; Dean, R.G.; Dalrymple, R.A. (1985) "Modelling wave transformations in the surf zone", *J. Geophysical Research*, Vol. 90, (6), pp. 11917-11927.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. (1991), "REF/DIF 1 Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model", CACR Report n.º 91-2, *University of Delaware*, Janeiro.
- Dingemans, M. W. (1997), "Water wave propagation over uneven bottoms: Part 1 – Linear Wave Propagation", *Advanced Series on Ocean Engineering* Vol.13, Part 1 & 2, World Scientific, Singapore.
- Fortes, C.J.E.M. (2002), "Transformações não lineares de ondas em portos. Análise pelo método dos elementos finitos", *Tese de Doutoramento*, IST.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. & Dalrymple, R.A. (2000)., "Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: One Dimension", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng* 126: 39-47.
- Kirby, J.T. (1986), "Rational approximations in the parabolic equation method for water waves", *Coastal Engineering*, 10, pp. 355-378.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A. (1986), "Modelling waves in surf zones and around islands", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng*, 112, Nº 1 Janeiro.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A. (1994), "REFDIF 1: Combined Refraction/Diffraction Model. Version 2.5", *Research Report No. CACR 94-22*, University of Delaware.
- Kirby, J.T., Ozkan, H.T. (1994), "REFDIF S Version 1.1. Documentation and Users Manual", *Research Report No. CACR 94-04*, University of Delaware.
- Kirby, J.T.; Wei, G.; Chen, Q.; Kennedy, A. B.; Dalrymple, R. A. (1998), "FUNWAVE 1.0 – Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual", *Research Report No. CACR 98-06*, University of Delaware.
- Sancho F.E, Mendes, P.A., Carmo, J.A., Neves, M.G., Tomasicchio, G.R., Archetti, R., Damiani, L., Mossa, M., Rinaldi, A., Gironella, X., Sanchez-Arcilla, A. (2001), "Wave hydrodynamics over a barred beach", *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis - Waves 2001*, S. Francisco, ASCE, 1170-1179.
- Thornton, E.B., Guza, R.T., (1983), "Transformation of wave height distribution", *J. Geophys. Res.*, vol. 88, no. C10, pp. 5925-5938.
- Wei, G. and Kirby, J.T. (1995), "Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations", *J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, pp. 251-261.
- Vieira, F., (2004), "Aplicação do modelo FUNWAVE na propagação de agitação marítima", *Relatório de estágio 226/04 - NPE, LNEC*, Lisboa
- Zelt, J. A., (1991), "The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves", *Coastal Engng.*, 15, 205-246.
- Zózimo, A. C., Fortes, C. J. E. M., Neves, M. G. O. (2003), "Validação de um modelo de propagação de ondas irregulares com rebentação, DREAMS_CR_S", *Actas 3^a Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. Aveiro, 13 e 14 de Novembro.