

VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS IRREGULARES COM REBENTAÇÃO, DREAMS_CR_S

Ana Catarina Zózimo, Conceição Juana Fortes, Maria da Graça Neves
LNEC, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel: +351.21.8443758, Fax: +351.21.8443019
aczozimo@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, gneves@lnec.pt

Sumário

Nesta comunicação é apresentado o modelo de propagação de ondas irregulares baseado no método da sobreposição linear, DREAMS_CR_S. Este modelo permite o estudo da propagação e deformação de ondas irregulares em zonas costeiras abrigadas, tais como portos ou baías, tendo em conta os fenómenos de refacção, difracção, reflexão e rebentação da onda.

A estrutura do modelo é constituída por três módulos, que são responsáveis pela definição do espectro direccional incidente, pela propagação das componentes espectrais e pela sobreposição linear final dos resultados de cada componente. O módulo de propagação de cada componente espectral é baseado na forma elíptica da equação de declive suave (Berkhoff, 1972) que tem em conta a dissipação de energia por rebentação (Booij, 1981).

O modelo é aplicado aos casos de teste estudados em laboratório por Vincent e Briggs (1989), para as situações em que ocorre a rebentação da onda. Os resultados do modelo são comparados, quer com resultados experimentais, quer com resultados numéricos obtidos com o modelo REF/DIF S (Kirby e Ozkan, 1994). Avaliou-se ainda a influência das características do espectro incidente nos resultados do modelo.

1 Introdução

Usualmente, a determinação das características da agitação marítima em zonas costeiras é feita através de modelos numéricos de propagação de ondas regulares. Tal implica que a agitação marítima real (que é irregular) seja substituída por uma onda regular. No entanto, os trabalhos de diversos autores, entre os quais Goda (1985), Vincent e Briggs (1989) e, mais recentemente, Yu *et al.* (2000), demonstraram por via analítica e experimental, que a caracterização de um estado de agitação por uma onda monocromática pode conduzir a erros na caracterização da agitação marítima em certas zonas, e que a consideração da irregularidade da agitação marítima levaria a uma melhoria dos resultados obtidos pelos modelos numéricos. De modo a simular a irregularidade da agitação marítima, foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, o modelo DREAMS_S (Zózimo, 2003), que efectua a propagação e deformação de ondas irregulares em zonas costeiras abrigadas, como portos ou baías, através do método da sobreposição linear.

O método da sobreposição linear assume que a propagação do espectro da onda possui um comportamento linear, pelo que a elevação da superfície do mar pode ser representada pela sobreposição linear de várias harmónicas, que se movem em diferentes direcções. Assim, este método consiste na decomposição do espectro direccional incidente num conjunto de componentes espectrais em frequência e em direcção (ondas regulares), na posterior propagação de cada componente na zona em estudo por um modelo de propagação de ondas regulares e, finalmente, na sobreposição linear das soluções obtidas pelo referido modelo para cada componente.

Para a aplicação do método da sobreposição linear, a estrutura de DREAMS_S é modular, sendo constituído por três módulos principais, que são responsáveis pela construção do espectro direccional incidente, pela sua posterior divisão em componentes de igual energia, pela propagação de cada componente individual através de um modelo de ondas regulares, e na sobreposição linear final dos resultados obtidos para as várias componentes. Em DREAMS_S, o modelo que efectua a propagação de cada componente espectral é o modelo DREAMS (Fortes, 1993), baseado na forma elíptica da equação de declive suave (Berkhoff, 1972), e tem em conta os fenómenos da refacção, difracção e reflexão das ondas. Os resultados do modelo de ondas irregulares já foram comparados com resultados de laboratório e de outros modelos numéricos, e com dados de campo, Zózimo (2003), obtendo-se uma boa concordância entre eles.

Uma das limitações do modelo DREAMS_S é o facto de não ter em conta a dissipação de energia por rebentação da onda, fenómeno importante em certas zonas costeiras (principalmente em zonas de baixa profundidade, tais como praias, portos, etc.), pois modifica significativamente todo o campo de ondas.

Uma das formas de resolver este problema, é substituir o modelo de propagação de cada componente espectral, modelo de ondas regulares DREAMS, pelo modelo DREAMS_CR (Fortes, 2001), que contempla a dissipação de energia por rebentação das ondas.

Nesta comunicação apresentam-se as alterações realizadas no modelo de ondas irregulares DREAMS_S, de modo a incorporar o modelo DREAMS_CR. O modelo de ondas irregulares resultante, DREAMS_CR_S, já tem então em conta a dissipação de energia por rebentação das ondas.

Para a primeira validação deste novo modelo, recorreu-se aos testes apresentados em Vincent e Briggs (1989), que consistem em ensaios físicos de laboratório de propagação de agitação irregular sobre uma batimetria complexa, com e sem a rebentação da onda. O modelo DREAMS_CR_S é aplicado aos casos em que se verifica a rebentação da onda e os seus resultados são comparados com resultados experimentais. Complementarmente, os resultados do modelo serão também comparados com os resultados de REF/DIF S, Kirby e Ozkan (1994), que é um modelo de ondas irregulares que resolve a forma parabólica da equação de declive suave e que também tem em conta a dissipação de energia por rebentação da onda.

Nesta comunicação, descrevem-se os modelos DREAMS_CR_S e REF/DIF S (embora este último de uma forma bastante sucinta) e apresentam-se o domínio e as condições de cálculo dos dois modelos para os diversos casos de teste, os resultados obtidos e respectiva análise.

2 Descrição do modelo DREAMS_CR_S

O modelo DREAMS_CR_S é, como referido, uma extensão do modelo DREAMS_S, de forma a incluir o fenómeno de rebentação das ondas. O modelo é constituído por três módulos principais. Tanto o módulo de definição do espectro direccional incidente, como o módulo de sobreposição dos resultados obtidos para cada componente são descritos pormenorizadamente em Zózimo (2003), pelo que nesta comunicação será dada uma maior atenção ao módulo constituído pelo modelo de propagação de cada componente espectral, DREAMS_CR, e à sua articulação com os restantes módulos do modelo de ondas irregulares.

2.1 Definição do espectro direccional incidente

A primeira etapa do modelo corresponde à aplicação do módulo responsável pelo cálculo do espectro direccional incidente, $S_{Total}(f, \theta)$, e pela determinação das componentes de igual variância em que este é dividido, segundo o procedimento equienergético, Grassa (1992). O espectro direccional, $S_{Total}(f, \theta)$ é calculado pela seguinte relação empírica:

$$S_{Total}(f, \theta) = S(f)D(\theta)$$

em que $S(f)$ é o espectro em frequência e $D(\theta)$ é uma função de dispersão em direcção. Esta relação é utilizada frequentemente e tem por base a hipótese de que o espectro direccionado incidente é bem representado pelo produto de um espectro em frequência por uma função de dispersão em direcção.

As funções utilizadas para a descrição do espectro em frequência, $S(f)$, e da dispersão em direcção, $D(\theta)$, implementadas no modelo são, respectivamente, o espectro TMA (Bouws *et al.*, 1985), e a função de distribuição direccionada de Borgman (conforme apresentada em Kirby e Ozkan (1994)). No entanto, poderão também ser introduzidas as funções que se pretenderem, tal como um espectro medido *in situ*, embora esta função não esteja actualmente desenvolvida.

Após a definição do espectro direccionado incidente, procede-se à sua divisão em componentes de igual energia, tendo em conta o número de componentes em frequência e em direcção (N_f e N_θ) necessários para obter uma boa aproximação aos respectivos espectros.

2.2 Propagação de cada componente espectral

A propagação de cada componente espectral, tendo em conta o fenómeno da rebentação, é efectuada pelo modelo DREAMS_CR (Fortes, 2001). Este modelo é 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 então 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. Em Dingemans (1997), são apresentadas e discutidas diferentes expressões para V . 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 dado 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) (ver Eq. 4); 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 probabilidade de ocorrência de ondas em rebentação, Q_b , é dada por Dingemans (1997):

$$Q_b = 2.4 \left(\frac{H_{rms}}{H_{max}} \right)^7 \quad (4)$$

em que H_{rms} é a altura da onda média quadrática, $H_{rms} = \sqrt{8m_0}$, sendo m_0 o momento de ordem zero do espectro, e H_{max} é calculada através do critério modificado de Miche.

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, que será apresentado de seguida.

1.ª iteração:

Cálculo da altura da onda, H , e do número de onda k em todos os pontos do domínio não considerando a dissipação de energia por rebentação. Para tal, utiliza-se a equação conservativa de declive suave:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + k^2 CC_g \eta = 0 \quad (5)$$

2ª iteração e seguintes:

- Determinação, através do critério de rebentação de Miche modificado, Eq. (3), da altura máxima da onda compatível com a profundidade dos vários pontos do domínio;
- Comparação de H com H_{max} para todos os pontos do domínio e substituição de H por H_{max} nos pontos em que $H_{max} < H$;
- Cálculo do termo correspondente à inclusão dos efeitos dissipativos, isto é, $i\omega V$, em que V corresponde à taxa de dissipação de energia, nos pontos do domínio onde não se verificou o critério de rebentação;
- Resolução da equação de declive suave que inclui a dissipação de energia por rebentação, Eq. (1).

Este processo iterativo decorre enquanto a altura de onda em 1.0% dos pontos do domínio for superior a H_{max} . Escolheu-se este limite pois considerou-se que, o acréscimo em tempo de corrida do modelo para que em todos os pontos do domínio H fosse menor que H_{max} , não compensava a precisão da solução assim alcançada.

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).

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.

A validação do modelo matemático (Fortes, 2001) foi feita com casos de teste clássicos da bibliografia, tais como a propagação de ondas sobre uma praia de declive constante e sobre uma praia de declive variável.

2.3 Sobreposição linear dos resultados e cálculo do índice de agitação significativo

Após a propagação de todas as componentes espectrais individualmente pelo modelo DREAMS_CR, procede-se ao cálculo do índice de agitação significativo através da sobreposição linear dos resultados obtidos para cada componente.

Para o caso da onda irregular, o índice de agitação significativo, H_s/H_{s_e} , é dado por:

$$\left(\frac{H_s}{H_{s_e}}\right)^2 = \frac{m_0}{m_{0_e}} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{\sum_{i=1}^N H_{e_i}^2} \quad (6)$$

sendo H_{s_e} a altura significativa à entrada do domínio, m_0 o momento de ordem zero do espectro num ponto do domínio, m_{0_e} o momento de ordem zero do espectro à entrada do domínio e H_i a altura de onda num qualquer ponto do domínio referente à componente i , das N componentes em que o espectro foi dividido.

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_e} , são conhecidos à partida. A aplicação da Eq. (6) permite assim 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.

3 Descrição do Modelo REF/DIF S

REF/DIF 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 REF/DIF (Dalrymple e Kirby, 1991), na propagação de cada componente espectral (onda regular). 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). A equação de Kirby (1986) é uma extensão da equação de Berkhoff (1972), de modo a incluir a presença de correntes no domínio e a dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo.

A modelação da dissipação de energia por rebentação é efectuada através de um modelo estatístico de Thornton e Guza (Chawla *et al.*, 1998).

A vantagem do modelo REF/DIF S é o facto de permitir a propagação e deformação da agitação marítima em grandes áreas costeiras. 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. No entanto, este modelo não pode ser aplicado em zonas onde o fenómeno de reflexão da onda tem um papel importante, e apenas considera a difracção ao longo da direcção transversal à direcção de propagação da onda, não possibilitando uma correcta simulação da difracção da onda em torno de obstáculos. A sua aplicação está limitada também a fundos de declive suave.

REF/DIF S, por ser um modelo baseado no método da sobreposição linear, tal como DREAMS_CR_S, também não tem em conta efeitos não lineares.

4 Batimetria e condições de cálculo dos dois modelos

Na Figura 1 são apresentados o domínio de cálculo e a batimetria que foram utilizados nos cálculos com os dois modelos. Este domínio de cálculo tem 25.0 m de largura e 27.3 m de

comprimento e reproduz a batimetria utilizada por Vincent e Briggs (1989) nos seus ensaios experimentais.

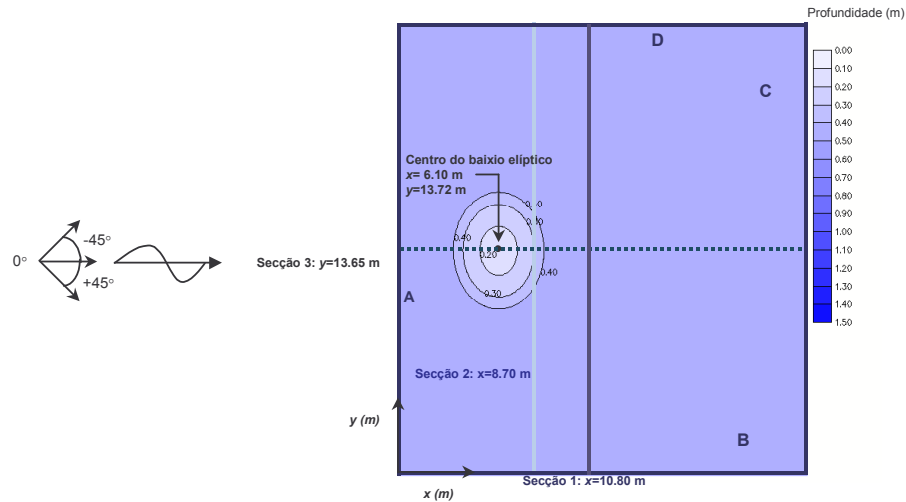


Figura 1 – Domínio de cálculo e batimetria, adaptados de Vincent e Briggs (1989).

A equação do baixo elíptico é dada por, segundo Vincent e Briggs (1989):

$$\left(\frac{x}{3.05}\right)^2 + \left(\frac{y}{3.96}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

em que x e y são a posição do ponto no domínio, e representam o eixo menor e maior, respectivamente (ver Figura 1). A profundidade mínima, 0.165 m, está localizada no centro do baixo e a profundidade no restante domínio é constante e igual a 0.47 m.

O domínio de cálculo de DREAMS_CR_S foi discretizado por uma malha de elementos finitos de espaçamento em x e em y igual a 0.15 m, dando origem a 30561 nós e a 60424 elementos triangulares lineares. O espaçamento em x e em y foi calculado de forma a garantir os 8 pontos por comprimento de onda em todo o domínio, conforme é exigido pelo modelo de propagação de cada componente espectral (DREAMS_CR).

A malha utilizada para o modelo REF/DIF S também tem um espaçamento em x e em y de 0.15 m e as suas dimensões são idênticas às do modelo DREAMS_CR_S.

Nos ensaios realizados em laboratório foram utilizadas condições de agitação incidente caracterizadas por um espectro em frequência TMA de Bouws *et al.* (1985) e uma função de distribuição direccional de Borgman.

No Quadro 1 e no Quadro 2 são apresentadas as características base para o espectro empírico em frequência e para a função de distribuição direccional utilizadas por Vincent e Briggs (1989) e que também são utilizadas nos testes efectuados com os modelos de ondas irregulares, DREAMS_CR_S e REF/DIF S.

Quadro 1 - Características base para o espectro empírico em frequência.

	Função empírica	T_p (s)
Espectro em frequência	Bouws <i>et al.</i> (1985)	1.3

Quadro 2 - Características base para a função de distribuição direccional.

	Função empírica	θ_m (°)
Função de distribuição direccional	Borgman	0

Relativamente à função de distribuição direccional, a dispersão em direcção adoptada em DREAMS_CR e REF/DIF S é de 45° e não é de 90°, como referido em Vincent e Briggs (1989), devido ao facto do modelo REF/DIF S ter algumas limitações na gama de ângulos de incidência da onda.

As condições de fronteira impostas no modelo de propagação de cada componente espectral, DREAMS_CR, variaram consoante o ângulo da onda incidente, conforme se apresenta no Quadro 3. No caso de REF/DIF S, a fronteira de entrada da onda incidente é a fronteira A enquanto nas restantes se admite serem fronteiras abertas, qualquer que seja a direcção da onda incidente.

Quadro 3 – Condições de fronteira para os testes efectuados.

Modelo	Direcções (°)	Condições da Fronteira	
		Geração - radiação	Radiação
DREAMS_CR	[-45,0]	A e B	C e D
]0,45]	D e A	B e C
RED/DIF S	[-45,45]	A	B, C e D

A descrição mais pormenorizada dos testes efectuados em laboratório por Vincent e Briggs e os resultados obtidos para os casos em que não ocorria a rebentação pode ser encontrada em Vincent e Briggs (1989), em Zózimo *et al.* (2001) ou em Zózimo (2003).

Para a validação do modelo de ondas irregulares com dissipação de energia por rebentação, foram utilizados os casos de teste de Vincent e Briggs (1989) em que ocorria a rebentação da onda. Efectuaram-se ainda mais dois casos de teste complementares, de modo a verificar a influência das características do espectro direccional incidente nos resultados dos dois modelos.

As três secções do domínio de cálculo apresentadas na Figura 1 são utilizadas para comparação de resultados entre os dois modelos numéricos. A comparação dos resultados dos modelos numéricos com os resultados de laboratório de Vincent e Briggs (1989) é efectuada apenas na secção 1, por ser a única em que existem resultados experimentais.

5 Casos de teste efectuados

As características dos testes efectuados são apresentadas no Quadro 4. Os testes M3, N5 e B5 correspondem aos testes efectuados por Vincent e Briggs (1989), para os casos em que ocorre a rebentação da onda. Os testes N6 e B6 correspondem aos testes complementares, de verificação da influência do espectro direccional incidente. Os parâmetros γ e σ , relacionam-se, respectivamente, com os graus de dispersão em frequência e em direcção do espectro direccional incidente. Assim, $\gamma = 2$ corresponde a um espectro em frequência largo enquanto que $\gamma = 20$ corresponde a um espectro em frequência estreito. No caso de $\sigma = 10$, o espectro em direcção é estreito e no caso de $\sigma = 30$, o espectro em direcção é largo.

Quadro 4 - Características dos testes realizados.

Caso de teste	Dados experimentais	Parâmetros		$N_p \times N_\theta$	H_e (m)
		γ	σ (°)		
M3	Vincent e Briggs (1989)	-	-	1x1	0.135
N5	Vincent e Briggs (1989)	20	10	20x10	0.190
B5	Vincent e Briggs (1989)	2	30		
N6	-	2	10		
B6	-	20	30		

Os testes efectuados têm como objectivos: 1) comparar os resultados do modelo DREAMS_CR_S com os do modelo REF/DIF S e com os dos ensaios realizados em laboratório por Vincent e Briggs (1989) e 2) verificar a influência, nos resultados do modelo de ondas irregulares, das características do espectro direccionado incidente (efectuado através da variação do grau de dispersão em frequência, γ , e do grau de dispersão em direcção, σ).

6 Apresentação, análise e interpretação de resultados

Os resultados obtidos para os vários testes serão apresentados por secção, de modo a facilitar a sua análise. Em cada secção, são analisadas em primeiro lugar as diferenças encontradas nos resultados dos casos de ondas regulares relativamente aos de ondas irregulares, ver Quadro 4. Seguidamente, são comparados os resultados do modelo DREAMS_CR_S com os do modelo REF/DIF S e com os dados (apenas para a secção 1). Finalmente, são analisados os resultados de DREAMS_CR_S para os diversos casos de teste, de modo a verificar a influência das características do espectro direccionado incidente nos resultados do modelo.

É de notar que os resultados referentes ao caso M3 correspondem a ondas regulares e, portanto, foram obtidos pela aplicação dos modelos de ondas regulares DREAMS_CR e REF/DIF (sub-módulos dos modelos DREAMS_CR_S e REF/DIF S, respectivamente). Todos os resultados são apresentados em termos de índices de agitação.

Antes da aplicação do modelo DREAMS_CR_S foram efectuados alguns testes de sensibilidade para o caso de teste N5 aos parâmetros empíricos que constam na formulação da rebentação, nomeadamente a γ_0 e a B, que estão relacionados com a inclinação da curva de rebentação e com o ponto de rebentação, respectivamente. Assim, efectuaram-se cálculos considerando os seguintes pares de valores para B e γ_0 : (1, 0.6), (1, 0.8), (0.6, 0.8) e (0.8, 0.8). Os resultados desses testes são apresentados na Figura 2.

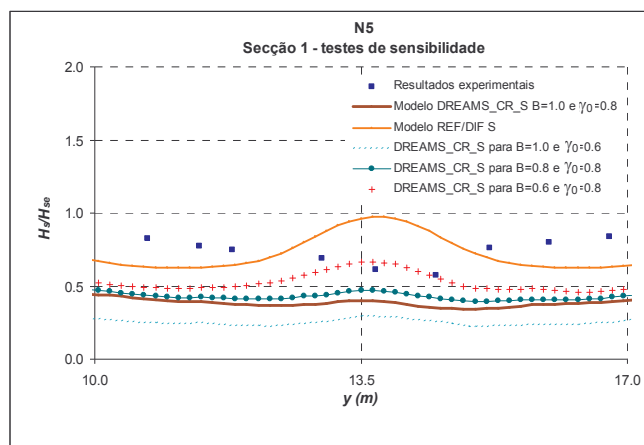


Figura 2 – Secção 1. Caso N5. Testes de sensibilidade.

Da análise dos resultados obtidos para os testes de sensibilidade efectuados para o caso N5, verifica-se que:

- Para qualquer dos valores de B e γ_0 testados, os resultados numéricos de DREAMS_CR_S são, em geral, inferiores aos resultados experimentais;
- A variação dos parâmetros B e γ_0 , traduz-se numa variação significativa dos resultados do modelo;
- Os parâmetros B e γ_0 que conduzem a resultados numéricos mais próximos dos resultados experimentais são 0.6 e 0.8, respectivamente. Estes valores foram utilizados para todos os restantes casos de teste efectuados com DREAMS_CR_S.

Dada a inclusão na formulação da rebanção de parâmetros empíricos e da influência destes nos resultados ser significativa, a utilização do modelo deverá ser precedida sempre de uma fase de calibração destes parâmetros. Isto implica a existência de dados ou valores de referência para cada caso de aplicação do modelo, o que nem sempre é possível.

Da Figura 3 à Figura 5 são apresentados os resultados referentes à secção 1.

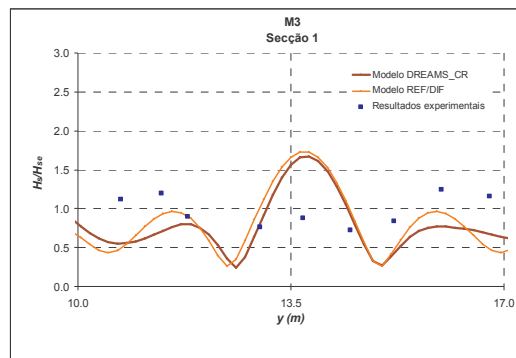


Figura 3 – Secção 1. Caso M3.

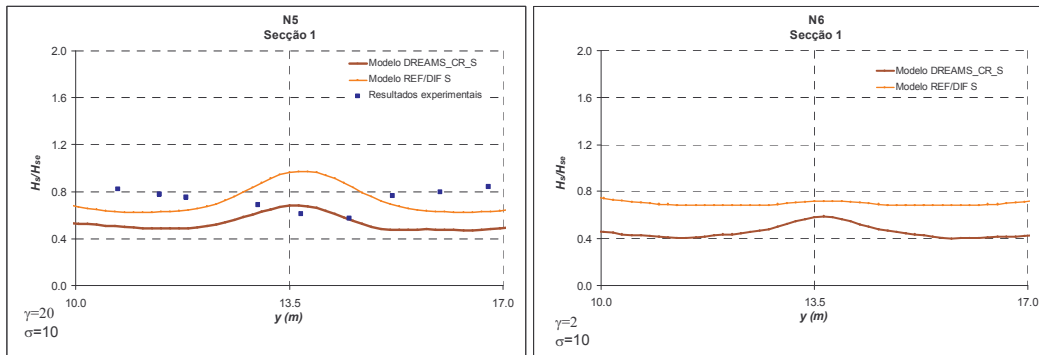


Figura 4 – Secção 1. Casos N5 e N6.

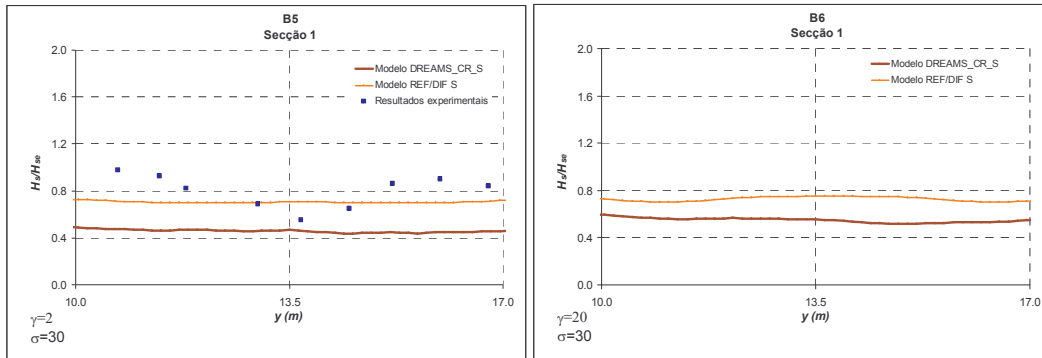


Figura 5 – Secção 1. Casos B5 e B6.

Da análise dos resultados obtidos para a secção 1, verificou-se que:

- Os valores de índices de agitação para a onda regular (M3), têm um comportamento menos suavizado que os valores correspondentes aos casos de ondas irregulares (N5, B5, N6, B6);
- O andamento dos resultados de DREAMS_CR_S é bastante semelhante ao dos resultados de REF/DIF S, embora os valores obtidos por DREAMS_CR_S sejam sistematicamente inferiores;
- Existem diferenças significativas entre os resultados de qualquer dos modelos numéricos e os resultados experimentais. Mais, os resultados dos modelos nos casos N5 e B5 têm um andamento contrário ao dos resultados experimentais. Os melhores resultados são obtidos com a onda regular, onde ambos os modelos têm um comportamento mais próximo ao dos resultados experimentais.

As diferenças entre os resultados do modelo DREAMS_CR_S e REF/DIF S, principalmente nos casos de agitação irregular, (N5, N6, B5, B6), podem ser consequência da reflexão, fenómeno que o modelo DREAMS_CR_S tem em conta enquanto que REF/DIF S não tem. A soma da onda incidente com a reflectida implica, em alguns pontos, que a altura da onda total seja superior ao caso em que não se tem em conta a reflexão. Caso essa nova altura exceda a altura máxima possível, inicia-se o processo da rebentação (e consequentemente da dissipação de energia) mais cedo do que no caso de REF/DIF S.

Além disso, as diferenças encontradas entre DREAMS_CR_S e os valores experimentais podem estar relacionadas com o facto de se ter admitido o mesmo valor para γ_0 e B para todos os períodos da onda regular em que se divide o espectro direccional a propagar, o que não é o mais correcto.

Com efeito, devido à necessidade de calibrar os parâmetros empíricos relativos à formulação da rebentação do modelo DREAMS_CR_S, cada onda regular deveria estar associada a valores previamente calibrados de γ_0 e B. No entanto, esta calibração apenas foi realizada para a onda regular de período correspondente ao período de pico do espectro incidente. Nos restantes períodos, admitiu-se os valores de B e γ_0 correspondentes ao período de pico, o que sem dúvida pode levar a erros.

Relativamente à influência da variação das características do espectro direccional incidente, verificou-se que a variação da largura do espectro em frequência (comparar N5 com N6, Figura 4, ou B5 com B6, Figura 5) não conduziu a alterações significativas no andamento dos resultados do modelo DREAMS_CR_S mas levou a uma variação dos valores do índice de agitação significativo obtidos. Verificou-se que os valores do índice de agitação aumentaram ligeiramente com o aumento de γ , isto é, quando se passa de um espectro em frequência largo, (casos N6 ou B5, $\gamma = 2$), para um espectro estreito (Casos N5 ou B6, $\gamma = 20$).

O mesmo não acontece no caso da variação da largura do espectro em direcção. Com efeito, comparando os casos N5 com B6 e N6 com B5, em que se variou a largura do espectro em direcção, os resultados numéricos apresentam ligeiras diferenças: embora não haja

alterações muito significativas nos valores dos índices de agitação obtidos, o andamento das curvas mostra que o aumento da largura do espectro em direcção (aumento do parâmetro σ) conduziu a um maior alisamento dos resultados. Assim, os casos B5 e B6 correspondentes a espectros em direcção largos, $\sigma = 30$, apresentam curvas mais alisadas do que nos casos N5 e N6 de espectros em direcção estreitos, $\sigma = 10$.

Da Figura 6 à Figura 8 são apresentados os resultados referentes à secção 2.

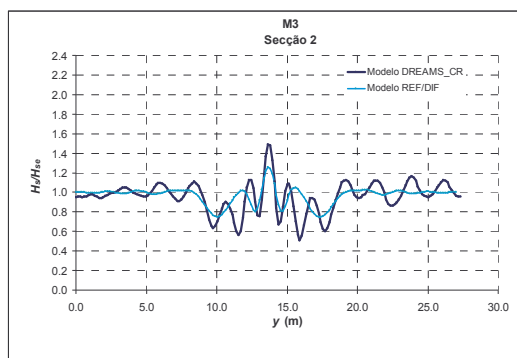


Figura 6 – Secção 2. Caso M3.

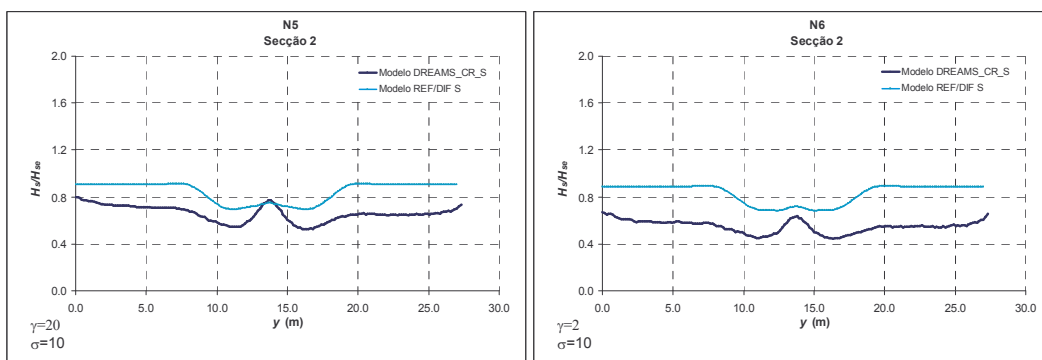


Figura 7 – Secção 2. Casos N5 e N6.

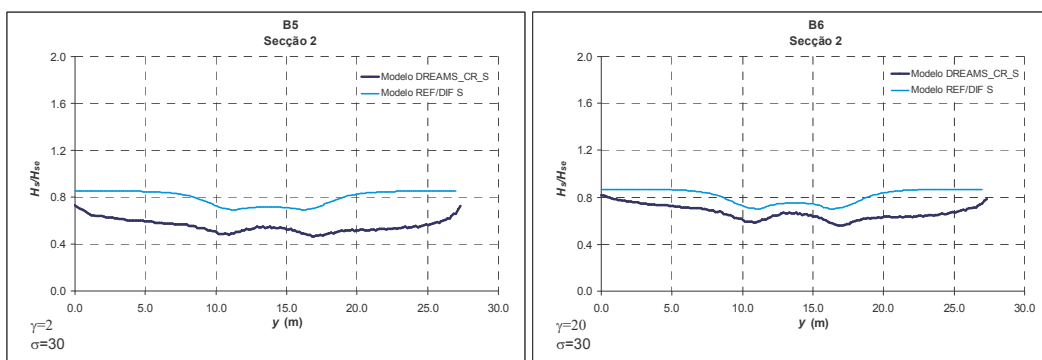


Figura 8 – Secção 2. Casos B5 e B6.

Nesta secção 2, verificou-se novamente que os valores de índices de agitação para a onda regular, têm um comportamento menos suavizado que os valores correspondentes aos casos de ondas irregulares.

No caso do teste M3, os resultados do modelo DREAMS_CR concordam bem com os resultados do modelo REF/DIF, embora se verifiquem oscilações nos resultados de

DREAMS_CR que são consequência deste ter em conta a reflexão da onda enquanto que REF/DIF não tem.

Da comparação dos resultados de DREAMS_CR_S com os de REF/DIF S nos casos de onda irregular, verificou-se que, tal como para a secção 1, o andamento dos valores obtidos é bastante semelhante, embora os valores obtidos por DREAMS_CR_S sejam sistematicamente inferiores. Como já referido, as diferenças estão relacionadas com os seguintes factos: o modelo DREAMS_CR_S tem em conta a reflexão das ondas e REF/DIF S não; os valores de B e γ_0 considerados nos cálculos com DREAMS_CR_S mantiveram-se constantes para todos os períodos da onda em que se dividiu o espectro direccional.

Relativamente à influência da variação das características do espectro direccional incidente, os resultados foram em tudo semelhantes aos obtidos para a secção 1, isto é, a alteração da largura do espectro em frequência levou a uma alteração nos valores dos índices de agitação (dá-se um ligeiro aumento dos valores do índice de agitação quando se passa de um espectro em frequência largo, $\gamma = 2$ para estreito, $\gamma = 20$), enquanto que a alteração da largura do espectro em direcção levou a uma variação no andamento das curvas, tornando-as mais alisadas à medida que aumenta a largura do espectro em direcção (isto é, à medida que σ aumenta).

Da Figura 9 à Figura 11 são apresentados os resultados referentes à secção 3.

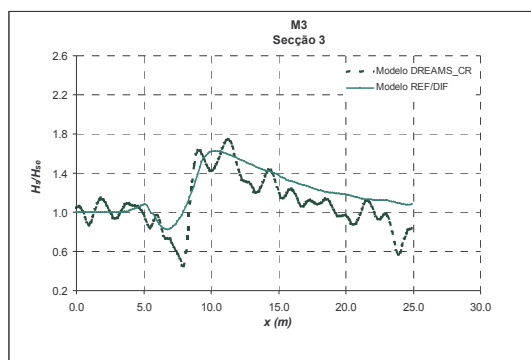


Figura 9 – Secção 3. Caso M3.

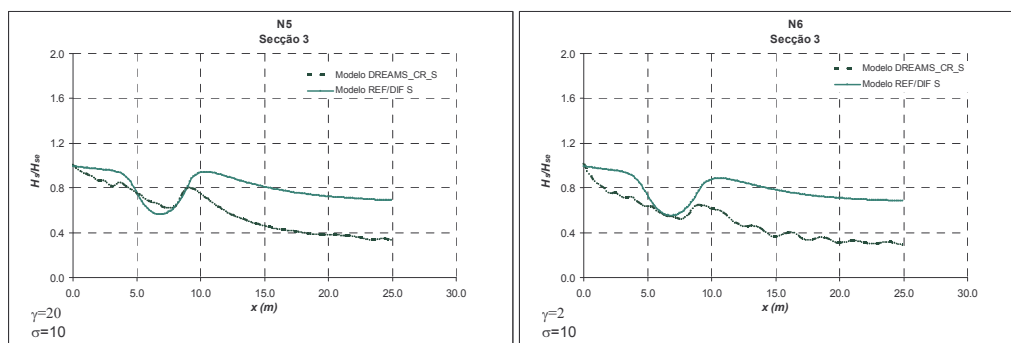


Figura 10 – Secção 3. Casos N5 e N6.

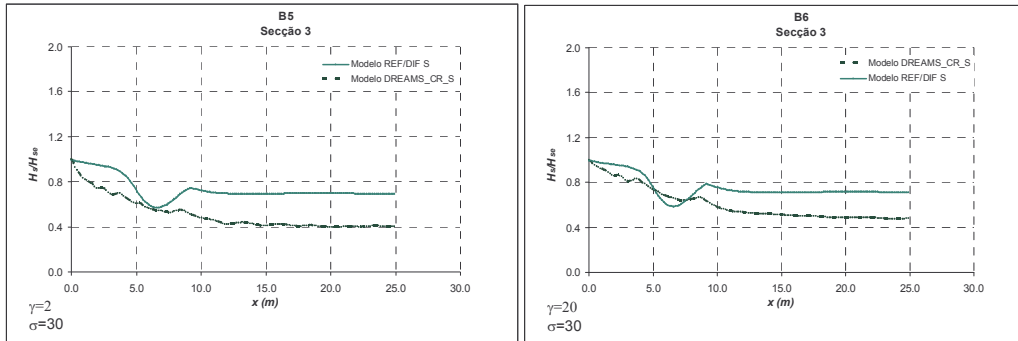


Figura 11 – Secção 3. Casos B5 e B6.

Para qualquer dos testes realizados, nesta secção é possível constatar que, em ambos os modelos:

- ocorre uma primeira rebentação da onda, próximo de $x=5\text{m}$;
- verifica-se uma segunda rebentação próximo de $x=10\text{ m}$.

Tal como para as secções anteriores, verificou-se novamente que os valores de índices de agitação para a onda regular têm um comportamento menos suavizado que os dos casos de ondas irregulares. De qualquer forma, verifica-se que é no caso da onda regular que os resultados de DREAMS_CR se aproximam mais dos resultados de REF/DIF.

Nos casos da onda irregular, a comparação entre os resultados de DREAMS_CR_S e de REF/DIF S demonstrou que o andamento dos valores obtidos é bastante semelhante, embora os valores obtidos por DREAMS_CR_S sejam, em geral, inferiores.

Para esta secção, e relativamente à influência das características do espectro direccional incidente, os resultados não diferem dos obtidos para as secções 1 e 2, isto é, verificou-se que a variação da largura do espectro em frequência (comparar casos N5 com N6, Figura 10, ou Casos B6 com B5, Figura 11) conduziu a uma variação do valor dos índices de agitação obtidos (que aumentaram ligeiramente com o aumento de γ , isto é, quando se passa de um espectro em frequência largo, $\gamma=2$ para estreito, $\gamma=20$) e a variação da largura do espectro em direcção (comparar casos N5 com B6 e N6 com B5) conduziu à variação do andamento das curvas. As curvas tornam-se mais alisadas à medida que aumenta o valor de σ , isto é, quando se passa de um espectro em direcção estreito, $\sigma=10$, para um largo, $\sigma=30$.

7 Conclusões

Nesta comunicação, descreveu-se o modelo de propagação de ondas irregulares baseado no método da sobreposição linear, DREAMS_CR_S, que efectua a propagação e deformação de ondas irregulares em zonas costeiras abrigadas, tais como portos ou baías, tendo em conta os fenómenos de refacção, difracção, reflexão e rebentação da onda.

O modelo foi aplicado aos casos de teste estudados em laboratório por Vincent e Briggs (1989), para as situações em que ocorre a rebentação da onda, e os seus resultados foram comparados com resultados experimentais e com resultados numéricos do REF/DIF S (Kirby e Ozkan, 1994).

Das experiências efectuadas, verificou-se que:

- Os valores de índices de agitação para a onda regular (caso de teste M3), têm um comportamento menos suavizado que os valores correspondentes aos casos de ondas irregulares (N5, B5, N6, B6);

- No caso de propagação da onda regular, teste M3, o andamento e a ordem de grandeza dos resultados de DREAMS_CR_S é bastante semelhante ao dos resultados de REF/DIF S;
- Nos casos de propagação da onda irregular, testes N5, N6, B5 e B6, o andamento dos resultados de DREAMS_CR_S é bastante semelhante ao dos resultados de REF/DIF S, embora os valores obtidos por DREAMS_CR_S sejam sistematicamente inferiores;
- Existem diferenças significativas entre os resultados de qualquer dos modelos numéricos e os resultados experimentais. Mais, os resultados dos modelos nos casos N5 e B5 têm um andamento contrário ao dos resultados experimentais;
- A variação da largura do espectro em frequência conduziu a uma variação dos valores do índice de agitação significativo enquanto que a variação da largura do espectro em direcção conduziu à variação do andamento das curvas.

A explicação para estas diferenças, quer entre modelos numéricos quer com os resultados experimentais, estão relacionados com os seguintes factores: a) o modelo DREAMS_CR_S tem em conta a reflexão das ondas enquanto tal não acontece com REF/DIF_S; b) nos cálculos realizados com o modelo DREAMS_CR_S, os valores de B e γ_0 foram sempre considerados constantes qualquer que seja o período da onda regular em que se divide o espectro direccional.

Estudos adicionais devem ser realizados de modo a avaliar a influência nos resultados de DREAMS_CR_S, da utilização de diferentes valores de B e γ_0 , para cada um dos períodos em que se divide o espectro direccional.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos experimentadores Franklin Carvalho e Branca Branco pelo apoio na revisão do texto.

Referências

Battjes, J.A. (1986). *Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves*, Report N°. 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.

Booij, N. 1981. *Gravity waves on water with non-uniform depth and current*, Ph. D. Thesis, Technical University of Delft.

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.

Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. 1991. *REF/DIF 1 Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*, CACR Report n° 91-2, University of Delaware, January.

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. (1993). *Modelação matemática da refração e difracção combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos*, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.

Fortes, C.J.E.M. 2001. *Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias*, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Goda, Y. 1985. *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press.

Grassa, J.M. 1992. *Modelos parabólicos de propagação de oleaje*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX, Ministério de Obras Públicas y Transportes, MOPT.

Kirby, J.T. 1986. "Rational approximations in the parabolic equation method for water waves", *Coastal Engineering*, 10, pp. 355-378.

Kirby, J.T., Ozkan, H.T. 1994. *REF/DIF S Version 1.1. Documentation and Users Manual*, CACR Report nº 94-04, University of Delaware.

Chawla, A., Ozkan-Haller, H.T., Kirby, J.T. 1998. "Spectral Model for wave transformation and breaking over irregular bathymetry", *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 124, 4, pp. 189-198.

Vincent, C.L., Briggs, M.J. 1989. "Refraction-Diffraction of irregular waves over a mound", *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 115, 2, March, pp. 269-284.

Yu, Y.-X., Liu, S.-X., Li, Y. S., Wai, Onyx W. H. 2000. "Refraction and diffraction of random waves through breakwater", *Coastal Engineering*, 27, pp. 489-509.

Zózimo, A. C. 2003. *Modelo de elementos finitos para a propagação e deformação de ondas irregulares em zonas costeiras*, Tese de Mestrado, IST.

Zózimo, A.C., Fortes, J.E.M., Neves, M.G., Fernandes, J.L.M. 2001. "Modelo de propagação e deformação de ondas irregulares em zonas portuárias", *Seminário A Hidroinformática em Portugal*, Lisboa, 15 e 16 de Novembro.