



AVALIAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO DA DISSIPACÃO POR ATRITO NO FUNDO NO MODELO SWAN

António Alberto Pires Silva

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa

Oleg Makarynsky¹

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa

Carlos Ventura Soares

Divisão de Oceanografia, Instituto Hidrográfico, Marinha
Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa

Emanuel Ferreira Coelho

Divisão de Oceanografia, Instituto Hidrográfico, Marinha
Rua das Trinas 49, 1249-093 Lisboa

SUMÁRIO

Nesta comunicação apresenta-se uma verificação da forma de representação da dissipação de energia por atrito no fundo, num modelo numérico espectral de simulação da agitação marítima em águas pouco profundas. Trata-se de um modelo de 3ª geração, o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft) e que incorpora todos os mecanismos físicos relevantes na propagação em zonas costeiras, onde a interação com o fundo ganha importância.

Foram ensaiadas a expressão associada à campanha JONSWAP e as fórmulas de *Collins* (1972), *Madsen et al.* (1988). Estas duas últimas estão associadas a diferentes modelos para a parametrização da tensão tangencial de atrito no fundo. Para cada aproximação experimentaram-se diferentes valores para os parâmetros envolvidos.

O estudo centrou-se numa área adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, a norte de Sines, tendo sido utilizadas como condição fronteira de mar as medições obtidas com bóia direccional tipo "WAVEC", explorada pelo I.H. As previsões do modelo foram comparadas com dados de campo provenientes de um sensor de pressão fundeado a 10 m (ZH). Os parâmetros de comparação foram a altura significativa e o período médio. Os resultados mostram que não se registam diferenças significativas entre os modelos ensaiados. No entanto, existe forte sensibilidade aos valores dos parâmetros.

¹ Bolseiro FCT de pós-doutoramento

INTRODUÇÃO

O recurso à modelação numérica para simular a agitação marítima junto à costa tem vindo a registar um progresso acentuado nos tempos recentes. O conhecido aumento, quase exponencial, das capacidades de cálculo dos meios informáticos, a par da diminuição dos respectivos custos, estimulou o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos matemáticos de propagação das ondas de vento, e consequentes aproximações numéricas. Em escalas regionais/locais, que envolvam, tipicamente, a propagação na plataforma continental, os modelos espectrais de média em fase são os mais apropriados e usados. Os modelos de média em fase pressupõem que as propriedades associadas à onda variam pouco à escala de um comprimento de onda, permitindo, assim, malhas de menor resolução e, por consequência, aplicações estendidas a áreas maiores. A base comum deste tipo de modelos assenta na solução da equação de balanço da densidade espectral de energia numa malha regular, em coordenadas eulerianas.

A diminuição da profundidade, que se regista na propagação das ondas de vento junto à costa, implica, fundamentalmente, dois efeitos. Por um lado, a relação de dispersão passa a incorporar também a dimensão da coluna de fluido, o que contribui para os fenómenos da refacção e do empolamento. Por outro, o movimento das partículas de fluido, associado à passagem da onda, estende-se até à fronteira sólida inferior. Deste modo, ocorre uma zona de acentuado gradiente vertical da velocidade horizontal junto a esta fronteira. Esta circunstância dá origem a um conjunto de fenómenos de sub-escala que, como tal, requerem cuidada parametrização de modo a figurarem na equação de balanço acima referida.

Nesta comunicação apresenta-se um estudo preliminar de avaliação da representação da dissipação de energia por atrito no fundo, no comportamento do modelo SWAN. O modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), é um modelo espectral de média em fase, de terceira geração, que permite simular a evolução das ondas de gravidade geradas pelo vento na superfície livre do mar na zona costeira, desde a plataforma continental até à zona de rebentação.

Foram ensaiadas as fórmulas de *Collins* (1972), *Madsen et al.* (1988) e a proposta associada à experiência JONSWAP. O estudo centrou-se numa área adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, a norte de Sines, tendo sido utilizadas como condição fronteira de mar as medições obtidas com bóia direccionada tipo "WAVEC", explorada pelo I.H. As previsões do modelo foram comparadas com dados de campo provenientes de um sensor de pressão fundeado a 10 m (ZH). Os parâmetros de comparação foram a altura significativa e o período médio T_{02} . O intervalo de tempo de medições que se apresenta correspondeu a um estado de mar moderado, o que de certo modo limita o âmbito das conclusões. Estão em curso aplicações com dados referentes a situações de tempestade.

As diferenças associadas às várias formulações experimentadas não são significativas. Todavia, os valores numéricos escolhidos para os coeficientes envolvidos afectam os resultados de modo vincado.

A investigação descrita insere-se num projecto iniciado em 1999 (*Pires Silva et al.*, 1999 e *Ventura Soares et al.*, 1999) e financiado pelo Ministério da Defesa. No seu âmbito foi abordada a influência das condições de fronteira laterais (*Pires Silva et al.*, 2000a), e proposta uma estratégia de domínios encaixados com diferentes resoluções, que foi testada com medições em águas de profundidade finita (*Pires Silva et al.*, 2000b). Foi ainda desenvolvido um protótipo de um sistema de previsão em tempo real das condições de agitação, a partir da informação da bóia direccionada de Sines, junto à praia de Pinheiro da Cruz (*Ventura Soares et al.*, 2000).

De entre os objectivos e linhas de acção do projecto acima mencionado salienta-se a validação e calibração de modelos espectrais na zona em causa. Este conjunto de observações, juntamente com os dados de ADCP (ver comunicações presentes nestas Jornadas) (*Santos et al.*, 2001 e *Pires Silva et al.*, 2001), apresentam-se como uma ferramenta muito valiosa na prossecução do objectivo enunciado, e constituem verificações pioneiras na costa portuguesa, para este tipo de modelos, em águas pouco profundas.

O MODELO SWAN E CONDIÇÕES LOCAIS

O modelo SWAN (*Ris et al.*, 1994; *Booij et al.*, 1996 e *Ris*, 1997) foi desenvolvido na sequência do projecto internacional que deu origem ao modelo oceânico WAM (*Komen et al.*, 1994). Estabeleceu-se então um consórcio de investigadores de diferentes países, o grupo WISE (*W*aves *i*n *S*hallow *E*nvironments) (*Cavaleri e Holthuijsen*, 1998), onde a extensão para águas pouco profundas foi abordada. Deste modo, estão representados nele de uma forma explícita os mecanismos físicos que assumem relevância na propagação junto à costa, como sejam: a refacção, o empolamento, a dissipação por atrito e a rebentação induzida pelo fundo, as interacções ressonantes a três ondas e a interacção com as correntes na forma de refacção, de empolamento e de variação da frequência. Está dotado de um esquema numérico implícito, e portanto incondicionalmente estável, permitindo altas resoluções espaciais sem o constrangimento da condição CFL.

A equação de balanço espectral da acção de onda $N(\sigma, \theta)$ (densidade espectral de variância a dividir pela frequência intrínseca) escreve-se

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

em que t é o tempo, x e y as variáveis espaciais, σ a frequência intrínseca (frequência relativa, medida num sistema de referência que se desloca com a corrente) e θ a direcção. No lado direito da equação encontram-se os termos fonte e sumidouro

$$S(\mathbf{s}, \mathbf{q}) = S_{in}(\mathbf{s}, \mathbf{q}) + S_{ds}(\mathbf{s}, \mathbf{q}) + S_{nl}(\mathbf{s}, \mathbf{q}). \quad (2)$$

$S_{in}(\sigma, \theta)$ representa a aquisição de energia devido à acção do vento, $S_{ds}(\sigma, \theta)$ a dissipação por rebentação parcial, por atrito no fundo e por rebentação induzida pelo fundo e $S_{nl}(\sigma, \theta)$ a transferência de energia entre componentes espectrais por interacções ressonantes a quatro e três ondas. Em *Ris* (1997) e *Pires Silva et al.* (1999) são discutidos os significados das diferentes parcelas de (1) e (2), bem como as opções de parametrização e numéricas utilizadas.

O termo $S_{ds}(\sigma, \theta)$ contém os fenómenos que vão ser objecto da presente comunicação e discutido mais em pormenor no ponto seguinte.

As características morfológicas da zona de aplicação do modelo estão descritas em *Pires Silva et al.* (1999). Todavia, o domínio geográfico é agora substancialmente maior. A influência das fronteiras laterais (*Pires Silva et al.*, 2000a) e o efeito de sombra do Cabo Espichel, levaram a colocar a fronteira de mar mais ao largo, juntamente com uma exploração de corridas encaixadas do modelo, com diferentes resoluções e domínios (*Pires Silva et al.*, 2000b). A necessidade deste último tipo de simulações prendia-se, também, com o limite máximo de 25 km para a dimensão normal à linha de costa. Este limite, presente na versão do SWAN à data disponível, era resultado do esquema de discretização das equações, que induzia difusão numérica. Actualmente, encontra-se implementada a versão 40.11 (Cycle III) do SWAN. Esta, ao utilizar esquemas numéricos de ordem superior, que não geram difusão numérica, permite aplicações em escalas espaciais alargadas.

Assim, foi adoptado um só domínio computacional, representado na Figura 1, em que o eixo x está alinhado com a direcção Este-Oeste e o eixo y com a direcção Norte-Sul, e com extensões de 45000,00 m e 57000,00 m, respectivamente. Este espaço foi discretizado com uma malha com células de dimensões $\Delta x=200,00$ m e $\Delta y=1000,00$ m. A informação batimétrica foi fornecida pelo Instituto Hidrográfico numa grelha de $200,00 \times 200,00$.

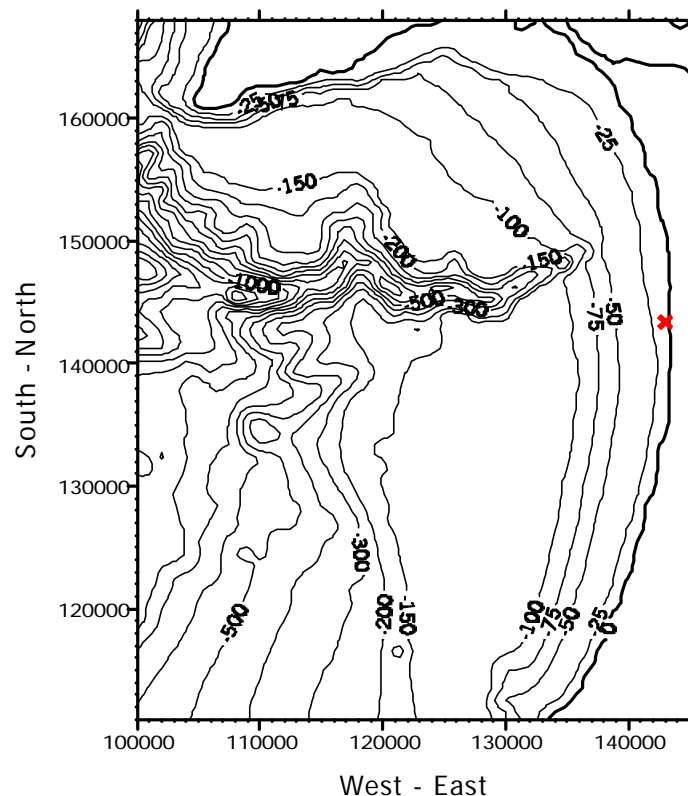


Figura 1. Batimetria e domínio computacional usado nas simulações. O símbolo × indica a posição do sensor de pressão.

Nas condições de fronteira ao largo foram utilizadas as medições obtidas pela bóia ondógrafo fundeada a oeste do porto de Sines em águas profundas (sonda reduzida de 97m). Esta bóia está localizada a sul do domínio de cálculo, fora da influência do Cabo Espichel.

DISSIPACÃO POR ATRITO NO FUNDO

Numerosos estudos (*Bouws e Komen, 1983; Weber, 1988; 1991a; Luo e Monbaliu, 1994; Tolman, 1994; Johnson e Kofoed-Hansen, 2000*) mostraram que a componente de dissipação por atrito no fundo, no termo $S_{ds}(\sigma, \theta)$, torna-se relevante no balanço de energia em águas de profundidade finita, em comparação com o que se verifica em águas profundas.

A interação do movimento do mar, induzido pelas ondas de vento, com a fronteira sólida inferior é traduzida pelos seguintes mecanismos: difusão da energia, especialmente em rugosidades de mesoescala, movimento do próprio solo, no caso de fundos lodosos e macios, percolação em fundos permeáveis e resistência por atrito na camada limite. Os últimos três acarretam dissipação de energia. A importância relativa de cada um depende da morfologia e do tipo de solo (*Shemdin et al., 1978*). Nesta referência, que apresenta uma revisão pormenorizada da acção destes mecanismos, conclui-se que a dissipação por atrito na camada limite é preponderante, para solos de areias finas ($0,10 \text{ mm} < d_{50} < 0,40 \text{ mm}$) e quando estão presentes rugas. Este tipo de condições é, provavelmente, o dominante na plataforma continental da maior parte das costas. Acresce que, sob estas mesmas condições, o escoamento, na camada limite que se forma, é turbulento.

Na camada limite turbulenta a dissipação ocorre no trabalho realizado pelo escoamento contra a tensão tangencial no fundo. Todavia, a tensão de origem turbulenta não apresenta

relação única, essencial, com as variáveis cinemáticas do escoamento médio. Assim, torna-se necessário adoptar modelos para parametrizar esta tensão.

Weber (1989) mostrou que o termo sumidouro (taxa de diminuição da densidade espectral de varância), associado ao mecanismo em causa, pode ser escrito de uma forma generalizada

$$S(\vec{k}) = C \frac{k}{\sinh 2kh} F(\mathbf{s}, \mathbf{q}) \quad (3)$$

C é um coeficiente com dimensão de velocidade, k é o módulo do vector número de onda ($k\cos\theta, k\sin\theta$), que se relaciona com a frequência f e a direcção \mathbf{q} pela relação de dispersão, h é a profundidade e $F(\mathbf{s}, \mathbf{q})$ o espectro direccional. Os factores que multiplicam C representam o espectro da velocidade orbital junto ao fundo.

O modo de avaliar o coeficiente C caracteriza as diferentes aproximações, ao problema da dissipação por atrito na camada limite turbulenta, originada pela agitação marítima na fronteira sólida inferior.

Na formulação empregue durante a extensa campanha de medições no Mar do Norte no final da década de sessenta, que recebeu a designação de JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), C foi considerado constante, sem relação com os modelos de parametrização da tensão tangencial, e sua expressão, em termos do coeficiente empírico, c , originalmente empregue, é

$$C_J = \frac{2c}{g} \quad (4)$$

Os valores estimados para c durante a referida campanha apresentaram uma variação de duas ordens de grandeza, com um valor médio de $c=0,038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ($C=0,008 \text{ ms}^{-1}$).

De um modo geral, o coeficiente C, em vez de ser uma constante universal, deve depender das condições hidrodinâmicas do escoamento, da profundidade e das características morfológicas e sedimentares do fundo. Vários modelos têm sido propostos para incorporar, em maior ou menor grau, esta variabilidade. Todos assentam em uma de duas hipóteses de base, para a relação entre a tensão tangencial de atrito (τ_0) e as variáveis cinemáticas: um modelo baseado numa lei de resistência quadrática e um modelo de viscosidade turbulenta.

Neste último, por analogia com o regime laminar, τ_0 é proporcional ao gradiente transversal da velocidade horizontal, definindo-se um coeficiente de “viscosidade turbulenta”, constituindo, assim, uma solução de ordem zero para o problema de fecho da turbulência.

No anterior, a análise dimensional conduz a τ_0 proporcional ao quadrado de uma velocidade representativa, sendo o coeficiente de proporcionalidade o factor de resistência, que tem de ser determinado experimentalmente.

Apresentam-se de seguida as duas soluções implementadas no SWAN, em conjunto com (4). Collins (1972) propôs uma expressão para C baseada numa lei de resistência quadrática

$$C_C = 2f_r U_{rms} \quad (5)$$

em que f_r representa o factor de resistência, considerado constante, e U_{rms} indica o valor médio quadrático da velocidade junto ao fundo

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2p} \int_0^{\infty} \frac{2gk}{\sinh kh} F(\mathbf{s}, \mathbf{q}) d\mathbf{s} d\mathbf{q} \quad (6)$$

Madsen *et al.* (1988) desenvolveram uma expressão a partir de um modelo de viscosidade turbulenta

$$C_M = f_r \sqrt{2} U_{rms} \quad (7)$$

em que U_{rms} é dado por (6) e o factor de resistência depende da rugosidade equivalente e das condições de agitação através de

$$\frac{1}{4\sqrt{f_r}} + \log_{10} \left[\frac{1}{4\sqrt{f_r}} \right] = m_f + \log_{10} \left[\frac{a_b}{K_N} \right] \quad (8)$$

em que m_f foi experimentalmente com valor igual a $-0,08$, a_b é a amplitude do movimento junto ao fundo e dada por

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2p} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sinh^2 kh} F(\mathbf{s}, \mathbf{q}) d\mathbf{s} d\mathbf{q} \quad (9)$$

e K_N é a rugosidade equivalente, considerada constante.

ANÁLISE DE RESULTADOS

A solução de (1) pressupõe a discretização da função densidade espectral de variância, nas variáveis independentes frequência e direcção. A discretização do espectro no espaço θ compreendeu um sector de 190° a 350° , com 32 bandas. No domínio da frequência, foram consideradas componentes espectrais situadas entre um mínimo de 0.05 Hz e um máximo de 0.39 Hz, e em número de 34, com um incremento logarítmico.

Nos cálculos foi utilizado o modo estacionário, e a equação de balanço foi resolvida numa malha regular em coordenadas cartesianas. Nesta fase não foram consideradas a acção das correntes e do vento. Como consequência deste último facto foi desactivado o módulo das interacções a quatro ondas, mas mantido o processo de interacção não linear ressonante de três ondas.

O conjunto de simulações que se apresentam correspondem ao período compreendido entre as 3:00 h do dia 25 de Dezembro de 1999, e as 3:00 h do dia 26 de Dezembro de 1999. Foram obtidos resultados do modelo com intervalos de três horas, tendo sido incluídos os correspondentes valores do nível de maré nas condições iniciais. Neste período a agitação marítima ao largo apresentou uma direcção média de Oeste, e a evolução de H_S e T_{02} , estimados a partir dos dados da bóia, está representada na Figura 2.

Junto à costa esteve instalado um sensor de pressão a uma profundidade de 10 m (ZH). Este sensor regista a série temporal da variação da pressão, que é convertida, através da

teoria linear, em série de elevações da superfície livre. Na posse desta informação é estimada a densidade espectral de variância, e calculados os valores da altura significativa e do período médio de zero ascendente. Todavia, dadas as suas características, apenas são gravados estes parâmetros integrais. O período total de medição decorreu de 9 de Dezembro de 1999 a 13 de Janeiro de 2000. Este intervalo de tempo esteve associado a situações de mar fraco a moderado, tendo o período objecto do presente estudo correspondido ao valores mais elevados de H_s .

Na Figura 2, além dos já mencionados valores dos parâmetros integrais estimados ao largo, apresenta-se a comparação de H_s e T_{02} calculados pelo SWAN e estimados com base nos dados do sensor de pressão.

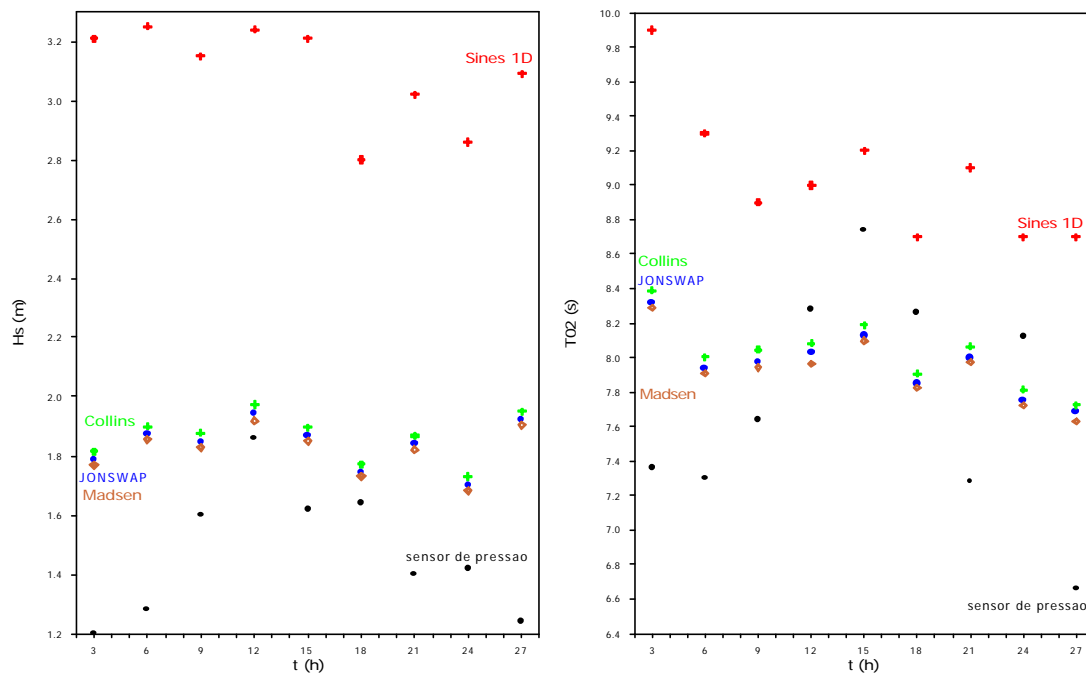


Figura 2. Comparação de H_s e T_{02} , simulados com diferentes formulações para C (JONSWAP - \bullet , Collins - $+$, Madsen - \diamond), e os valores estimados com base nos dados do sensor de pressão. Estão também incluídos os valores destes parâmetros integrais medidos ao largo.

Nos resultados da Figura 2 usaram-se os valores por defeito para as diferentes parametrizações ensaiadas: $c=0,038 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ para a aproximação JONSWAP; $f_r=0,015$ na fórmula de Collins (1972) e $K_N=0,015 \text{ cm}$ na expressão de Madsen *et al.* (1988).

As diferentes aproximações para o cálculo do coeficiente C , com os valores por defeito acima referidos, não provocam mudanças apreciáveis, apenas uma ligeira melhoria com a expressão de Madsen *et al.* (1988), especialmente no que diz respeito à altura significativa. Todas exibem previsões de H_s por excesso, ao contrário de T_{02} que apresenta maior variabilidade, e todas seguem o padrão de evolução temporal destes dois parâmetros na parte inicial do período de observação.

A série de figuras que se seguem correspondem a simulações em que se experimentaram diferentes valores numéricos de c , f_r e K_N . Como foi mencionado, durante a experiência associada ao projecto JONSWAP registou-se uma dispersão acentuada para c , que alcançou duas ordens de grandeza. Por outro lado, Shemdin *et al.* (1978) indicam uma elevada variação na taxa de dissipação medida, em particular porque a dissipação por atrito no fundo depende em grande medida da rugosidade devida às ondulações de fundo. Deste modo, a referida experimentação correspondeu a uma escolha empírica da gama de variação para as parametrizações em causa.

A Figura 3 mostra a comparação entre simulações e medições, usando a aproximação JONSWAP com c a tomar os valores 0,038, 0,067, 0,140, 0,405 e 0,670 m^2s^{-3} .

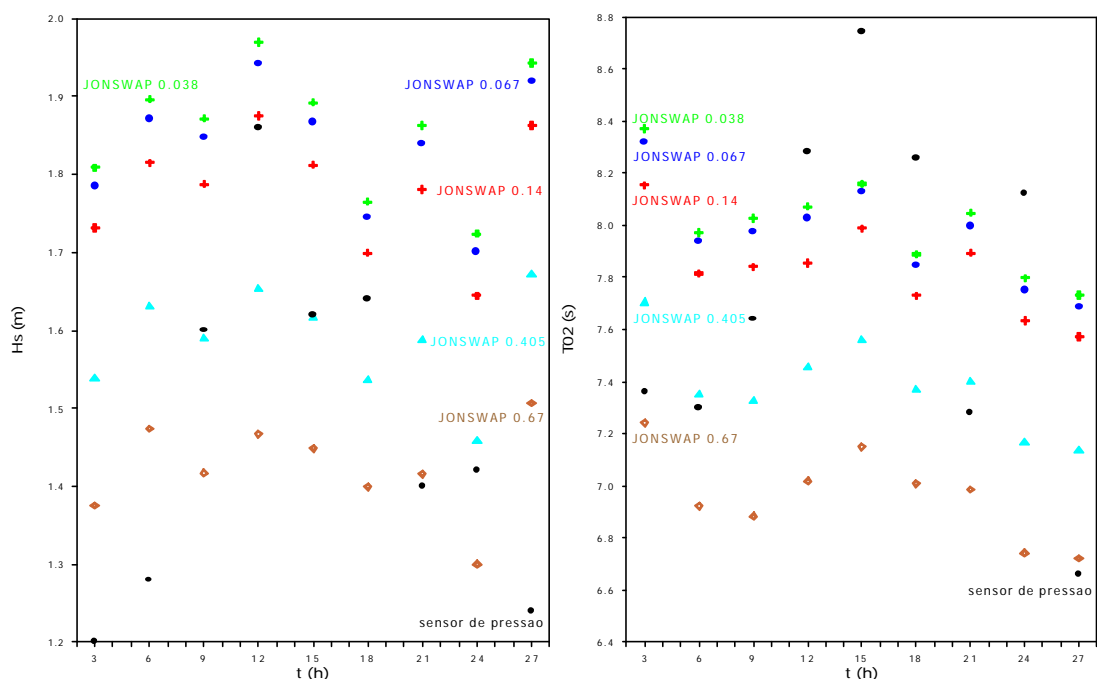


Figura 3. Comparação de H_s e T_{02} , simulados com a aproximação JONSWAP, e diferentes valores para c (0,038 - +, 0,067 - ●, 0,140 - +, 0,405 - ▲, 0,670 - ◇), e os valores estimados com base nos dados do sensor de pressão.

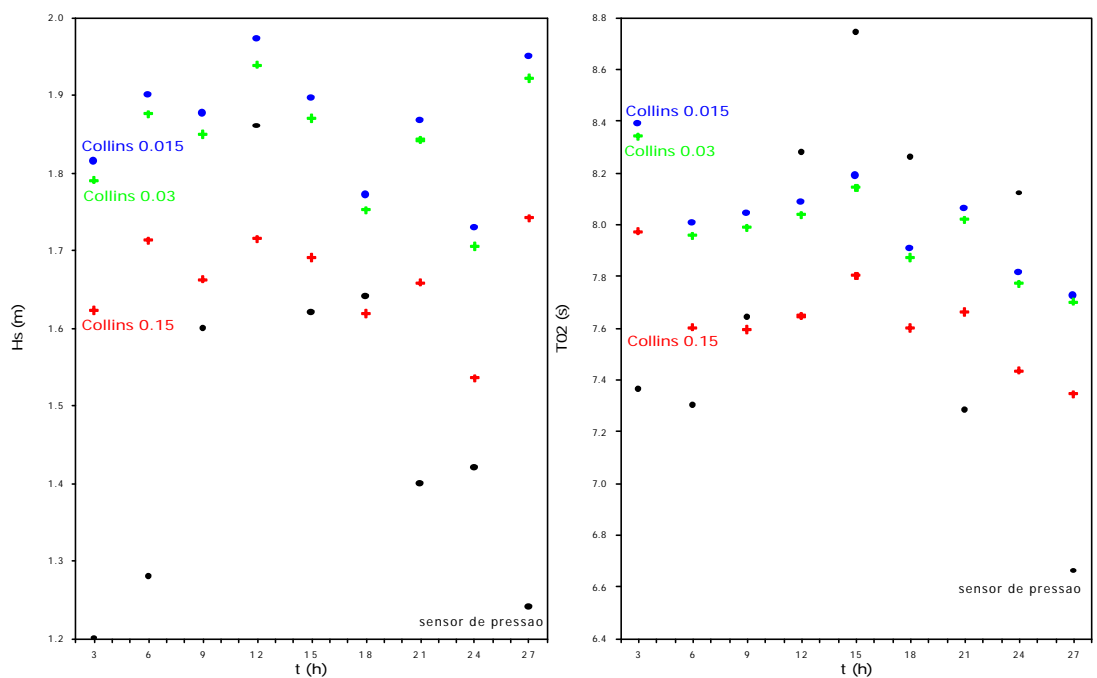


Figura 4. Comparação de H_s e T_{02} , simulados com a aproximação Collins (1972), e diferentes valores para f_r (0,015 - ●, 0,03 - +, 0,15 - +), e os valores estimados com base nos dados do sensor de pressão.

Em relação à Figura 3 constata-se que o aumento de c é acompanhado de um aumento da dissipação, com os valores de H_S calculados a diminuir. O aumento referido faz-se sentir primordialmente nos períodos altos, que estão associados a grandes comprimentos de onda, os primeiros a “sentir o fundo”. Deste modo, observa-se uma diminuição de T_{02} . A simulação obtida com $c=0,140 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ainda apresenta valores de H_S acima dos medidos. Para c superior a distorção de T_{02} é significativa, e o pico de H_S não é reproduzido.

A Figura 4 suscita o mesmo tipo de considerações das despendidas com a Figura 3. Em particular, a simulação obtida com $f_r = 0,15$ também não reproduz o valor de H_S registado às 12:00 h do dia 26.

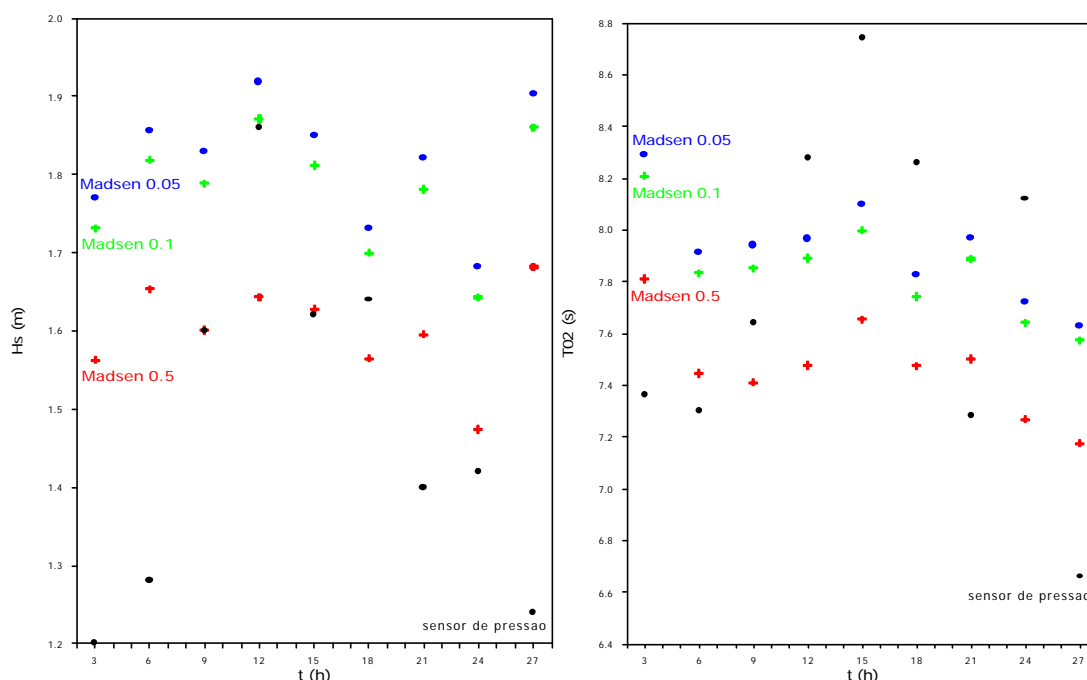


Figura 5. Comparação de H_S e T_{02} , simulados com a aproximação *Madsen et al.* (1988), e diferentes valores para K_W (0,05 - \bullet , 0,10 - $+$, 0,50 - $+$), e os valores estimados com base nos dados do sensor de pressão.

A Figura 5 mostra que a simulação obtida com $K_W = 0,10 \text{ m}$ exibe resultados muito semelhantes aos da realizada com a aproximação JONSWAP de $c=0,140 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ (Figura 3). Também aqui o valor de $K_W = 0,50 \text{ m}$ é muito desajustado e conduz a desvios importantes na modelação de H_S e T_{02} .

APRECIÇÕES FINAIS

Simulou-se a propagação das ondas geradas pelo vento na praia de Pinheiro da Cruz, costa sudoeste de Portugal, utilizando um modelo numérico espectral de 3ª geração. O modelo em causa (SWAN) trata explicitamente a física dos processos característicos da evolução da agitação em águas pouco profundas. De entre estes, salienta-se a dissipação de energia por atrito na camada limite turbulenta que se forma na fronteira sólida inferior.

Avaliou-se a influência deste mecanismo, e as diferentes formas de o incorporar nos modelos espectrais de média em fase. Foram ensaiadas a expressão associada à campanha JONSWAP e as fórmulas de *Collins* (1972), *Madsen et al.* (1988). Estas duas últimas estão associadas a diferentes modelos para a parametrização da tensão tangencial de atrito no

fundo. Para cada aproximação experimentaram-se diferentes valores para os parâmetros envolvidos.

As simulações do modelo SWAN foram comparadas com dados medidos por um sensor de pressão, localizado numa sonda reduzida de 10 m. As variáveis de comparação foram a altura significativa e o período médio de zero ascendente. O período, pouco extenso, de tempo da experiência e o tipo de agitação prevalecente limitam as conclusões. As expressões ensaiadas não mostraram diferenças relevantes entre si, apenas um comportamento marginalmente melhor da expressão de *Madsen et al.* (1988). Todavia, o processo de dissipação de energia, devido ao trabalho das tensões tangenciais de origem turbulenta, tem importância em águas de profundidade finita. A modificação das condições de parametrização, em especial os valores numéricos do factor de resistência, altera de modo apreciável os valores simulados de H_b e T_{02} .

As diferenças verificadas justificam um estudo mais aprofundado, com uma gama de situações de mar mais alargada, e com o recurso a descritores estatísticos para quantificar as várias opções.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado enquadra-se no projecto *Previsão da Agitação Marítima Junto à Costa: Aplicação de Modelos Espectrais*, financiado pelo Ministério da Defesa no âmbito do Programa "Ambiente e Defesa - Os Oceanos e as suas Margens". Oleg Makarynskyy é bolseiro de pós-doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (SFRH/BDP/1507/2000), a quem se agradece.

Agradece-se ao Instituto Hidrográfico da Marinha a disponibilidade dos dados da bóia de Sines, especialmente a Dr.^a Mariana Costa, bem como os dados do sensor de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Booij, N., Holthuijsen, L.H., Ris, R.C. (1996), The "SWAN" Wave Model for Shallow Water, *Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engng.*, Orlando, USA, 668-676.
- Bouws, E., Komen, G.J., (1983), On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1653-1658
- Cavaleri, L e Holthuijsen, L.H (1998), Wave modelling in the WISE group, *Proc. 26^o Int. Conf. Coastal Engng.*, Copenhagen, ASCE, 498-508.
- Collins, J.I., (1972), Prediction of shallow water spectra, *J. Geophys. Res.*, **77**, (15), 2693-2707.
- Johnson, H.K., Kofoed-Hansen, H., (2000), Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling, *J.Phys. Oceanogr.*, **30** (7), 1743-1756.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. e Jansen, P.A.E.M. (1994), *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge Univ. Press.
- Luo, W., Monbaliu, J., (1994), Effects of the bottom friction formulation on the energy balance for gravity waves in shallow water, *J.Geophys. Res.*, **99**, (C9), 18501-18511.
- Madsen, O.S., Poon, Y.-K., Graber, H.C., (1988), Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory, *Proc. 21 th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, 492-504.
- Pires Silva, A.A., Makarynskyy, O., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (1999), Propagação da agitação marítima ao largo de Pinheiro da Cruz: Aplicação do modelo SWAN, *Actas 1^o Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária*, PIANC-DP, Porto, 47-57.

- Pires Silva, A.A., Makarynskyy, O., Rusu, E., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2000a), Exploração de modelos encaixados na simulação da agitação marítima junto à costa, in *O Mar e os Desafios do Futuro*, C. Guedes Soares e J. Beirão Reis (Eds.), Edições Salamandra, Lda., Lisboa, 27-35.
- Pires Silva, A.A., Makarynskyy, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2000b), Modelling wave transformation in an open beach on the west coast of Portugal, *Proc. COASTAL WAVE MEETING*, A. Sanchez-Arcilla, S. Ponce de Leon (Eds.) Technical University of Catalonia, Barcelona, 4.3.
- Pires Silva, A.A., Makarynskyy, O., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2001), Verificação do modelo SWAN com dados ADCP na costa oeste portuguesa, *Actas 2º Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária*, PIANC-DP, Sines, (aceite para publicação).
- Ris, R.C. , Holthuijsen, L.H., Booij, N. (1994), A Spectral Model for Waves in the Nearshore Zone, *Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng*, Kobe, Japan, 68-78.
- Ris, R.C. (1997), *Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas*, Ph.D. Thesis, Dept. Civil Engng., Delft Univ. Technology.
- Santos, L.Q., Ventura Soares, C. e Onofre, J.M. (2001), Utilização de equipamentos acústicos para a medição de parâmetros de agitação marítima, *Actas 2º Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária*, PIANC-DP, Sines, (aceite para publicação).
- Shemdin, O., Hasselmann, K., Hsio, S.V., Herterich, K., (1978), Nonlinear and linear bottom interaction effects in shallow water, *Turbulent fluxes through the sea surface, Wave dynamics and prediction*, Plenum, 647-665.
- Tolman, H.L., (1994), Wind-waves and movable bed bottom friction, *J.Phys.Oceanogr.*, **24**, 994-1009.
- Ventura Soares, C., Coelho, E., Pires Silva, A.A. e Makarynskyy, O. (1999), PAMMELA: previsão da agitação marítima em águas pouco profundas, *Actas 1º Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária*, PIANC-DP, Porto, 57-90.
- Ventura Soares, C., Rusu, E, Coelho, E., Pires Silva, A.A. e Makarynskyy, O. (2000) A nowcast tool to assess wave parameters in coastal areas, *Proc. 6º Intern. Workshop on Wave Hindcast and Forecasting*, Monterey, California, Environment Canada, p1-p10.
- Weber, S.L., (1988), The energy balance of finite depth gravity waves, *J.Geophys.Res.*, **93**, 3601-3607.
- Weber, S.L., (1989), Surface gravity waves and turbulent bottom friction, *Ph.D. thesis*, University of Utrecht, The Netherlands.
- Weber, S.L., (1991a), Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations, *J.Phys. Oceanogr.*, **21**, 149-172.
- Weber, S.L., (1991b), Eddy-viscosity and drag-law models for random ocean wave dissipation, *J. Fluid Mech.*, **232**, 73-98.