

PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA AO LARGO DE PINHEIRO DA CRUZ: APLICAÇÃO DO 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

Na presente comunicação, apresenta-se uma aplicação de um modelo numérico espectral de simulação da agitação marítima em águas pouco profundas. O estudo descrito centrou-se na costa sudoeste de Portugal e envolveu, como condição de mar ao largo, situações típicas sazonais. Estas condições foram obtidas pela bóia ondógrafo direccional "Datawell Wavec", explorada pelo Instituto Hidrográfico, e fundeada ao largo do Porto de Sines numa sonda reduzida de 97 m.

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.

A principal variável de prognóstico é a função densidade espectral (f.d.e) de variância, e assim foram obtidos os espectros, bem como parâmetros integrais de interesse, ao longo de uma linha perpendicular à praia, num desenvolvimento de cerca de 9,4 km. Avaliaram-se as contribuições dos diferentes mecanismos físicos na referida evolução, bem como a influência das condições de fronteira laterais do domínio nos resultados.

¹ Odessa Hydrometeorological Institute, Ucrânia – Actualmente bolsheiro NATO de pós-doutoramento no IST

INTRODUÇÃO

A previsão da agitação marítima numa escala oceânica, em águas profundas, é feita, actualmente, de um modo operacional. A base desta previsão assenta em modelos numéricos que realizam a integração da equação de balanço da densidade espectral de energia, sendo o campo de ventos à superfície a principal função forçadora. Estes modelos, dos quais a grande maioria tem como matriz de base o modelo WAM (*Komen et al.*, 1994), encontram-se largamente disseminados nas entidades que em cada país têm a responsabilidade da previsão meteorológica.

Os referidos modelos apresentam como características essenciais a não estacionariedade, o cálculo explícito das interações não lineares a quatro ondas e a dissipação por rebentação parcial (“carneirada”). Estes são de facto os aspectos a ter em conta na evolução do espectro em águas profundas e nas escalas, espaciais e temporais, habituais nas aplicações mencionadas. Desde 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), que se reconheceu a importância, na configuração do espectro, da transferência de energia entre as diferentes componentes espectrais, devidas a interações ressonantes com quatro números de onda. A avaliação desta transferência já tinha sido formulada por *Hasselmann* (1962) e conduz ao cálculo de um integral de Boltzmann. O modo de abordagem a esta problemática define o tipo de modelo espectral. Nos modelos de 3ª geração não há qualquer presunção *a priori* sobre a forma funcional do espectro e o integral de Boltzmann é calculado explicitamente. No modelo WAM tal é conseguido através de uma aproximação numérica proposta por *Hasselmann et al.* (1985), a “Discrete Interaction Approximation” (DIA).

Os modelos de 3ª geração realizaram com sucesso o objectivo de desenvolver um sistema de previsão operacional do estado do mar.

Todavia, a caracterização da agitação marítima em águas pouco profundas requer a consideração de processos de interacção com o meio ambiente adicionais. A referida caracterização constitui elemento primordial nas aplicações de engenharia costeira e portuária e, de um modo geral, na previsão de um conjunto alargado de processos que ocorrem em águas costeiras.

A evolução da agitação marítima junto à costa, que pode incluir morfologias mais ou menos complexas como costas baixas arenosas, litoral rochoso, estuários, embocaduras, ilhas barreira com baixios e canais, é caracterizada, essencialmente, pela forte interacção com o fundo. A sua modelação tem sido realizada, tipicamente, por recurso a dois tipos de modelos (*Battjes*, 1994): espectrais de média em fase e determinísticos de amplitude-fase de resolução de fase.

Os modelos determinísticos de amplitude-fase são apropriados para campos de variação rápida, com resoluções espaciais que são uma fracção pequena do comprimento de onda. Baseiam-se nas equações da conservação da quantidade de movimento e da massa, integradas verticalmente. São exemplos as equações de Boussinesq e do talude suave (“mild slope”). Este tipo de aproximação é muito eficaz em lidar com a difracção e as interações ressonantes a três ondas, possíveis pela forma da relação de dispersão em águas de profundidade intermédia. Apresentam como desvantagens o facto de a sua aplicação ser limitada a áreas relativamente pequenas, devido às altas resoluções espaciais exigidas, e à incapacidade de incorporar os mecanismos de geração devidos ao vento.

Os modelos de média em fase, por seu lado, pressupõe 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 extendidas a áreas maiores. Tradicionalmente, a cinemática desta aproximação era formulada em coordenadas lagrangeanas, conduzindo a modelos de raios. Mais recentemente, a equação de balanço da densidade espectral de energia é resolvida numa malha regular, em coordenadas eulerianas. Nesta abordagem, não é fácil encontrar uma forma de incorporar a difracção na mencionada equação.

Nesta comunicação apresenta-se um estudo da aplicação do modelo SWAN à costa Oeste de Portugal. O modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), é um modelo numérico espectral, de média em fase, de terceira geração. A aplicação descrita centrou-se numa área adjacente à praia de Pinheiro da Cruz, a norte de Sines. Trata-se do principal teatro de treinos de operações de desembarque. A fronteira de mar situa-se no meridiano 8º 55', o que se traduz por cerca de 10 milhas ao largo.

Como condição fronteira de mar foram utilizados os dados medidos pela bóia direccional "Datawell WAVEC", explorada pelo I.H. e situada ao largo de Sines. Foram seleccionadas três situações, duas de tempestade e outra de condições médias.

Foram obtidos os espectros, bem como parâmetros integrais de interesse, ao longo de uma linha perpendicular à praia, num desenvolvimento de cerca de 9,4 km. Avaliaram-se as contribuições dos diferentes mecanismos físicos na referida evolução, bem como a influência das condições de fronteira laterais do domínio nos resultados.

O MODELO SWAN

A partir da versão não estacionária do modelo de 2ª geração HISWA (*Holthuijsen et al.*, 1997), foi desenvolvido na TUDelft o modelo SWAN (*Ris et al.*, 1994; *Booij et al.*, 1996 e *Ris*, 1997). Este, para além de representar de uma forma explícita os mecanismos físicos que assumem relevância na propagação em águas pouco profundas, como sejam: a refração, o empolamento, a dissipação por atrito e a rebentação induzida pelo fundo, as interações ressonantes a três ondas e a interacção com as correntes na forma de refração, de empolamento e de variação da frequência, apresenta 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.

O primeiro termo do lado esquerdo da equação representa a variação local, o segundo e terceiro a propagação no espaço geográfico (com velocidades de propagação c_x e c_y), o quarto a alteração da frequência intrínseca devida a variações da profundidade e correntes (com velocidade c_σ) e o quinto a refração induzida pelo fundo e correntes (com velocidade c_θ). As expressões funcionais usadas nestas velocidades são obtidas das expressões de conservação de grandezas cinemáticas da teoria linear da onda (*Ris*, 1997). No lado direita da equação apresentam-se os termos fonte e sumidouro

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{ds}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta). \quad (2)$$

$S_{in}(\sigma, \theta)$ 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 interações ressonantes a quatro e três ondas.

A formulação usada nos termos de geração, dissipação e interacção não linear a quatro ondas é a do modelo WAM. A rebentação induzida pelo fundo é parametrizada com uma versão espectral do modelo de *Battjes e Janssen* (1978) e a interacção não linear a três ondas com uma aproximação DTA ("Discrete Triad Approximation"), devida a *Eldeberky e Battjes* (1995).

A equação (1) é integrada numericamente com uma técnica de diferenças finitas. A propagação no espaço geográfico é aproximada com diferenças avançadas de primeira ordem, e a propagação no espaço σ e θ com diferenças centradas de segunda ordem. Na discretização dos termos de sumidouro são usados métodos implícitos (excepto as interacções a quatro ondas), e para os termos fonte métodos explícitos.

MORFOLOGIA LOCAL E CONDIÇÕES FRONTEIRA

A praia de Pinheiro da Cruz (também designada da Raposa) situa-se na costa alentejana, sensivelmente a meio do arco Sado-Sines. Trata-se duma costa baixa de extensas praias arenosas. Os fundos marinhos são arenosos e vasosos e constituem um suave talude. Na zona de Pinheiro da Cruz os areais são bordejados por arribas talhadas em formações areníticas. Do ponto de vista da dinâmica sedimentar, o troço encontra-se em equilíbrio, com um trânsito longitudinal predominantemente de Norte. Devido à configuração da linha de costa a norte do estuário do Sado, com a Serra da Arrábida a correr quase perpendicular ao arco Sado-Sines, o troço está abrigado da agitação de norte, estando, portanto, exposto ao quadrante NW-W-SW.

A configuração da batimetria apresenta-se quase paralela à linha de costa, com excepção da extremidade leste do canhão de Setúbal (Figura 1).

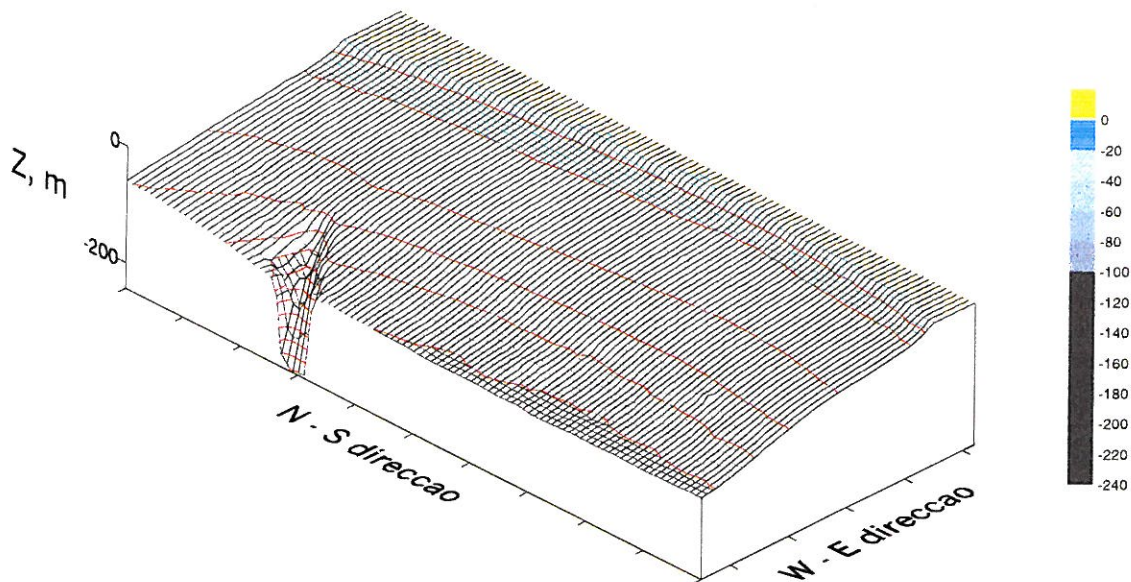


Figura 1. Batimetria da zona adjacente à Praia de Pinheiro.

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). Informação mais pormenorizada sobre a climatologia da agitação marítima na área, bem como sobre as condições fronteira, é apresentada em *Ventura Soares et al.* (1999).

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

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 do vento e das correntes. No quadro exposto, a propagação (essencialmente os efeitos de refacção) e a rebentação induzida pelo fundo constituem as acções preponderantes.

A opção estacionária é considerada aceitável nas situações em que o tempo de propagação das ondas de vento no domínio seja francamente inferior às escalas temporais de variação dos agentes condicionantes exteriores, como as correntes, o vento ou as marés.

Na aplicação em causa, o espaço geográfico tem uma extensão de 9400 m na direcção Este-Oeste e 20000 m na direcção Norte-Sul, tendo sido discretizado com uma malha cujas dimensões das células são $\Delta x = \Delta y = 200$ m. A discretização do espectro no espaço θ compreendeu um sector de 170° a 350° , com um $\Delta\theta = 2^\circ$. 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 42, com um incremento logarítmico.

A Figura 2 indica a localização, sobre a batimetria da zona, de três pontos, um ao largo onde foi especificado o espectro medido, e os outros dois junto à costa foram calculados os espectros.

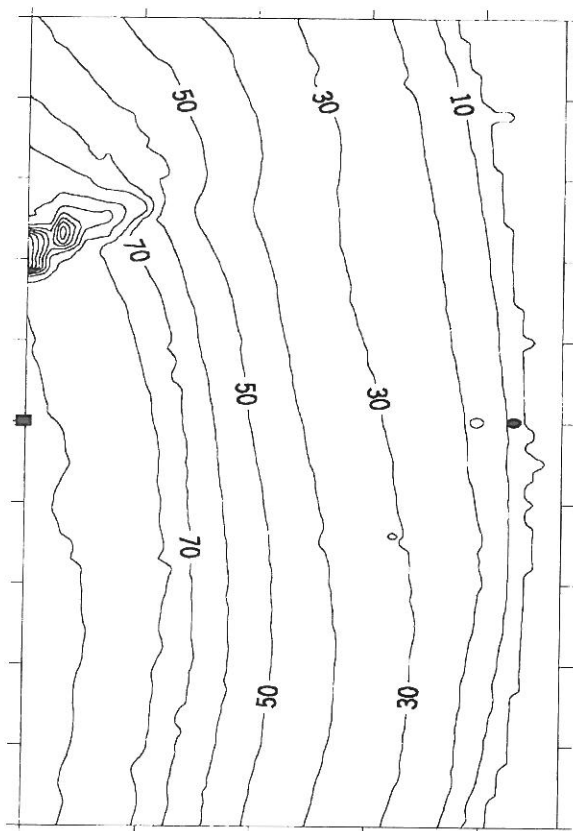


Figura 2. Localização do ponto 1 (□) - espectro medido, dos pontos 2 (°) e 3 (•) - espectros calculados.

As três figuras seguintes dizem respeito a uma situação típica de inverno (Dezembro de 94), com as ondas a aproximarem-se de Oeste, e o espectro unidireccional estimado da informação da bóia apresentando dois picos.

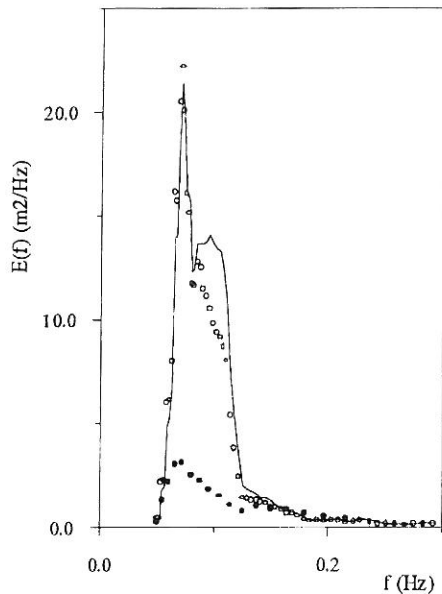


Figura 3. Espectros medido (—) e calculados, de acordo com a chave da Figura 2 (Dez94).

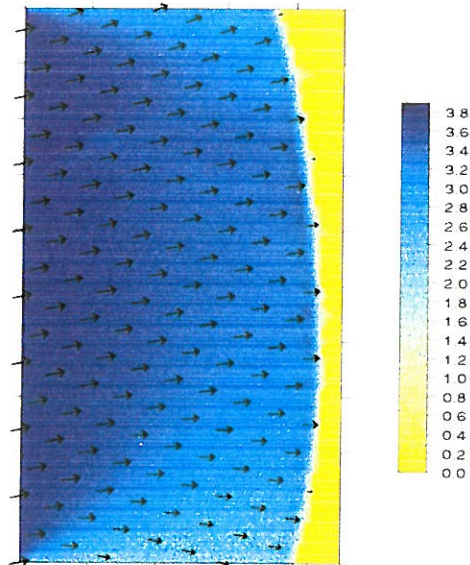


Figura 4. Campo de variação de H_s com escala de cores e vectores proporcionais ao valor na fronteira (Dez94).

A Figura 3 mostra uma forte dissipação no ponto 3, devida a rebentação induzida pelo fundo, assim como o desenvolvimento de um pequeno pico secundário nas altas frequências.

Na Figura 4 observa-se uma ligeira mudança de direcção (a direcção dos vectores é a direcção média), devida à refacção, com as ondas a rodarem para Oeste. Esta figura mostra também o efeito das fronteiras laterais (onde é atribuído um valor nulo para as componentes espectrais). As zonas a azul claro nas fronteiras Norte e Sul não são de considerar. Apenas a zona central corresponde a resultados válidos do modelo.

O Quadro 1 resume a informação relativa a parâmetros integrais nos pontos marcados na Figura 2.

Quadro 1. Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 2 (Dez94).

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	$\bar{\theta}$ (°)	σ_{θ} (°)
1	104.71	3.84	9.88	256	30.77
2	17.28	3.60	10.29	259	20.62
3	3.16	1.91	8.28	262	13.05

H_s é a altura significativa ($H_s=4\sqrt{m_0}$), T_{01} é o inverso da frequência média do espectro ($T_{01}=m_0/m_1$), $\bar{\theta}$ é a direcção média definida a partir da função de distribuição direcciona e σ_{θ} é uma medida da dispersão em torno do valor médio.

A evolução do valor da altura significativa evidencia a forte redução patente nos espectros unidireccionais (Figura 3), assim como o valor da direcção média mostra a ligeira rotação para Oeste. No que diz respeito ao periodo T_{01} , a redução registada no ponto 3 está de acordo com o desenvolvimento do pico secundário nas altas frequências. Este efeito está associado ao termo de interacções não lineares a três ondas, que originam uma transferência de energia entre componentes espectrais no sentido de formação de super-harmónicas.

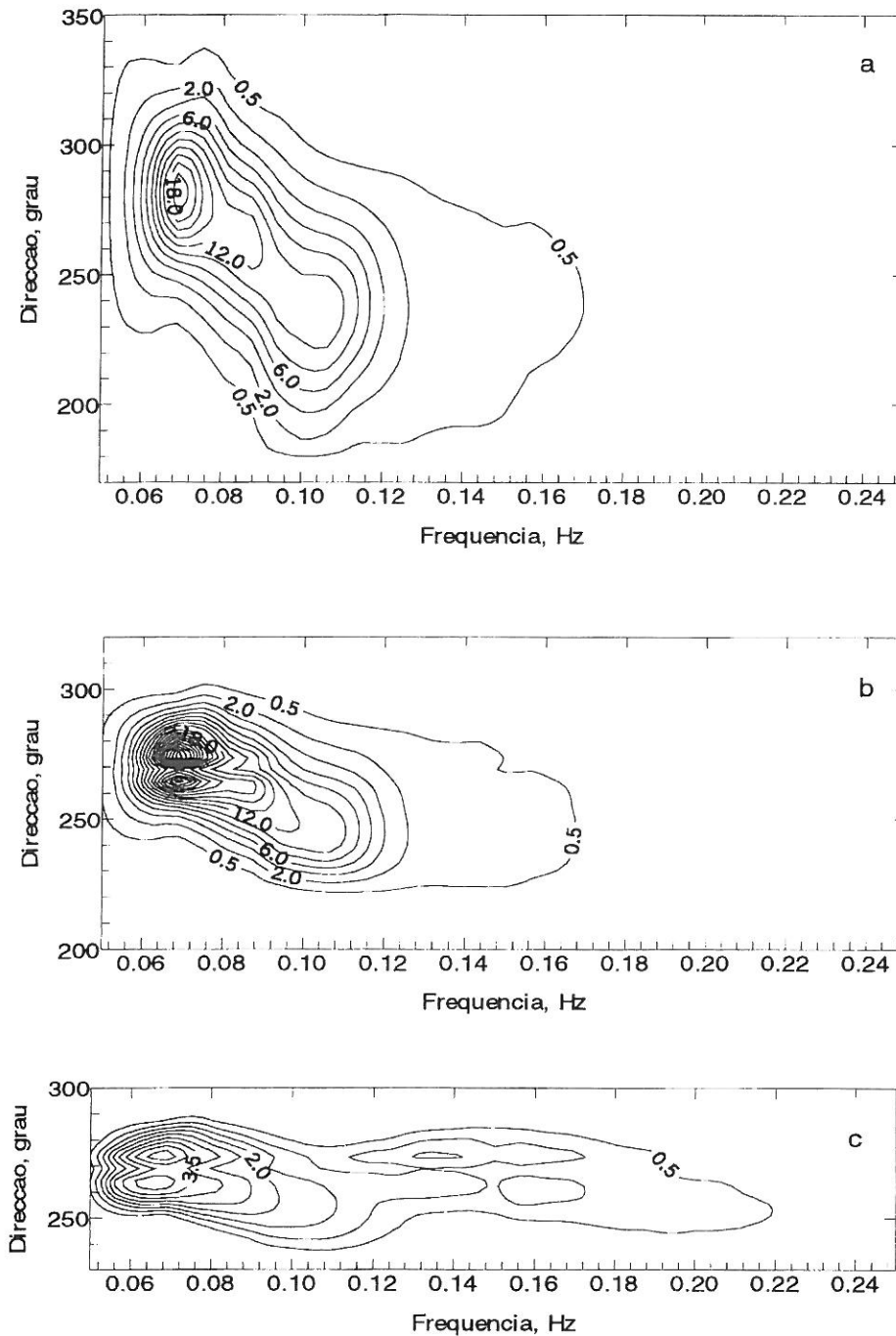


Figura 5. Evolução do espectro direccional: a) corresponde ao ponto 1, b) corresponde ao ponto 2 e c) corresponde ao ponto 3 (Dez94).

A Figura 5 permite observar a diminuição da dispersão, já patente no Quadro 1. A refração tende a alinhar as direcções, e, por consequência, origina o citado efeito. Em b) e c) parece desenvolver-se um segundo pico na função de distribuição direccional. Esta característica carece de estudo mais aprofundado.

O conjunto de resultados, apresentados nas três figuras e no quadro que se seguem, reportam-se a um a temporal de Noroeste, ocorrido em Fevereiro de 94.

A Figura 6 põe em evidência a transformação da f.d.e de variância unidireccional. Tal como na Figura 3, a atenuação só se faz sentir, acentuadamente, no ponto 3.

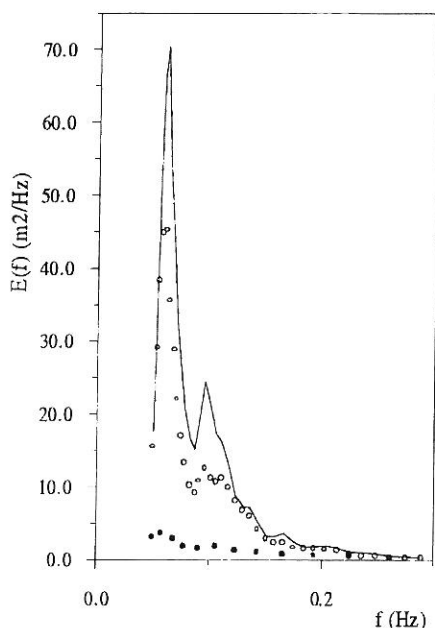


Figura 6. Espectros medido (—) e calculados, de acordo com a chave da Figura 2 (Fev94).

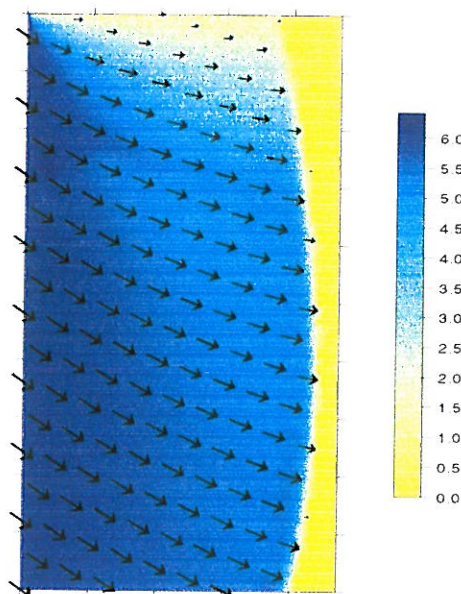


Figura 7. Campo de variação de H_s com escala de cores e vectores proporcionais ao valor na fronteira (Fev94).

O efeito da refacção é mais notório na Figura 7, dada a direcção média de Noroeste do espectro direcional, especificado na fronteira de mar aberto. Neste caso a influência das fronteiras laterais faz-se sentir mais na fronteira Norte.

O Quadro 2 resume a informação relativa a parâmetros integrais nos pontos marcados na Figura 2, relativos ao temporal de Fevereiro de 1994.

Quadro 2. Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 2 (Fev94).

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	$\bar{\theta}$ (°)	σ_{θ} (°)
1	104.71	6.25	10.46	309	20.39
2	17.28	5.12	10.60	285	11.80
3	3.16	2.00	8.42	278	9.33

O valor médio da direcção apresenta uma diminuição superior à que é registada no Quadro 1, o que é consistente com a Figura 7. Na transição do ponto 2 para o ponto 3 observa-se uma redução do valor de H_s superior ao ocorrido na situação de Dezembro de 1994. Esta circunstância pode estar, eventualmente, a reflectir a influência da fronteira lateral. Neste caso, a referida fronteira teria de ser colocada mais a Norte. Estão em curso estudos para confirmar este resultado.

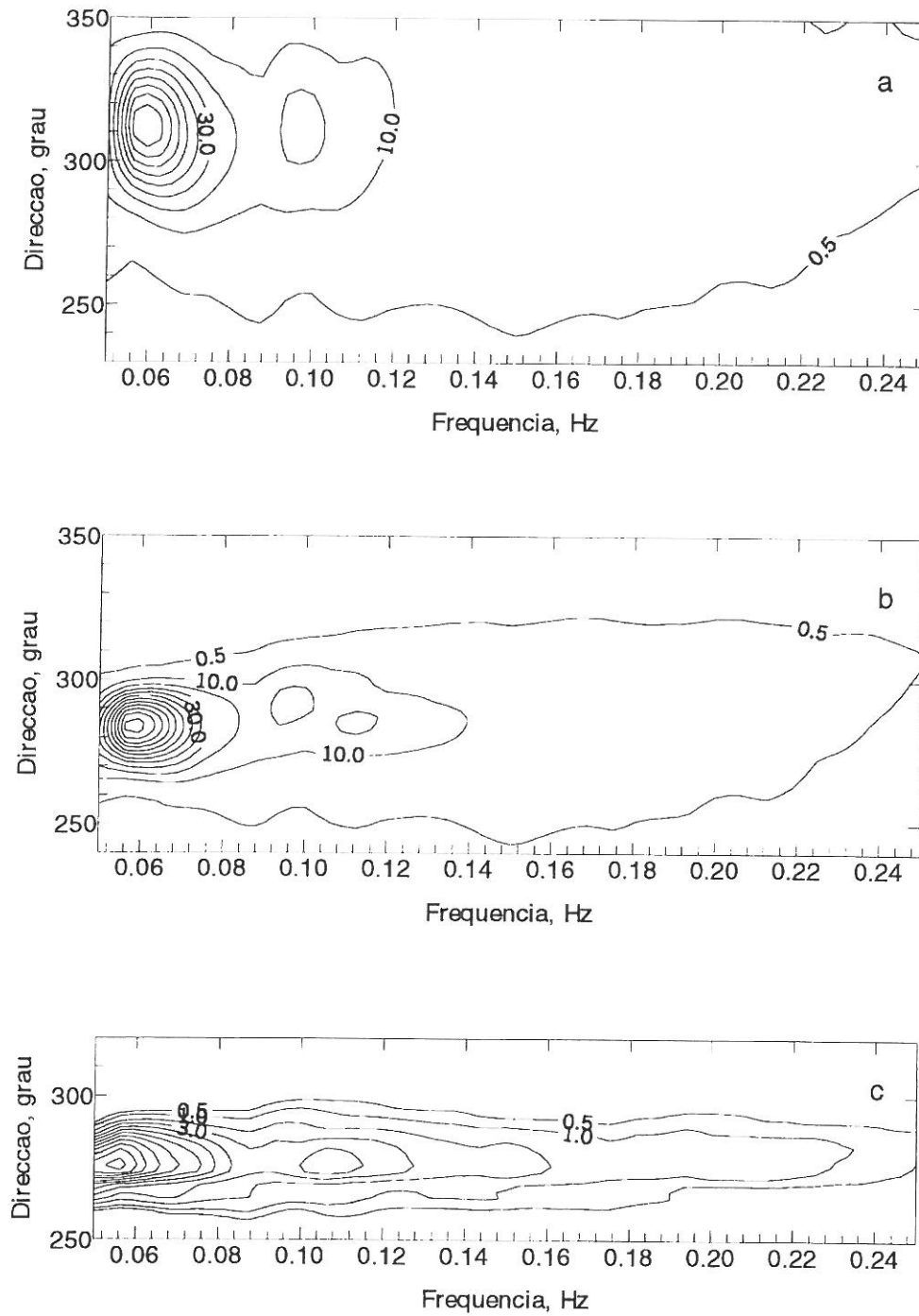


Figura 8. Evolução do espectro direccional: a) corresponde ao ponto 1, b) corresponde ao ponto 2 e c) corresponde ao ponto 3 (Fev94).

De um modo semelhante ao da Figura 5, também a Figura 8 evidencia a redução no valor da dispersão, durante o processo de propagação da agitação marítima em direcção à costa. Por outro lado, esta figura dá conta da ligeira deslocação para as altas frequências de um segundo pico na dependência em frequência. Esta característica não era clara na Figura 6 devida à escala envolvida no gráfico.

A terceira situação simulada (Junho de 1994) representa uma ocorrência típica na costa oeste portuguesa no verão. A depressão de origem térmica que se instala no interior da península ibérica, induz uma circulação de norte ao longo da costa oeste, que recebe a designação de nortada. Consequentemente, a agitação na fronteira de mar aberto tinha uma direcção média de noroeste.

Neste caso optou-se por apresentar apenas o Quadro 3, que resume a informação relativa a parâmetros integrais nos pontos marcados na Figura 2, uma vez que as figuras análogas às duas situações anteriores suscitam comentários semelhantes aos já expandidos.

Quadro 3. Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 2 (Jun94).

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	$\bar{\theta}$ (°)	σ_θ (°)
1	104.71	3.01	7.22	316	19.82
2	17.28	2.11	7.13	294	13.39
3	3.16	1.52	6.77	281	10.12

Os dados do Quadro 3 são consistentes com os resultados expressos nos quadros anteriores. Também neste caso se aplicam as considerações relativas ao valor de H_s na passagem do ponto 2 para o ponto 3.

APRECIACÕES 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 permite obter em cada nó da malha o espectro direccional, e partir deste parâmetros integrais como a altura significativa, o período médio, a direcção média e a dispersão em torno desta última.

O modelo em causa (SWAN) trata explicitamente a física dos processos característicos da evolução da agitação em águas pouco profundas. Está dotado de um esquema numérico implícito, que o torna particularmente apropriado para as escalas necessárias em zonas costeiras.

Nas condições expressas, regime estacionário e ausência de correntes e marés, os efeitos de refração, de dissipação provocada por rebentação induzida pelo fundo e as interacções não lineares a três ondas dominam a propagação junto à costa. Os resultados obtidos, espectros direccionais, espectros unidireccionais, campo de variação de H_s , representado com escala de cores, variação da direcção média, indicada por campo de vectores, mostram a acção destes mecanismos.

O estudo apresentado constitui um primeiro passo na investigação da evolução da agitação marítima em águas pouco profundas, visando a sua correcta parametrização, e como consequência a validação e calibração de modelos espectrais na zona em causa. Para o efeito, está em curso um processo de instalação de sensores de pressão e correntómetros próximo da praia (Ventura Soares *et al.*, 1999). O confronto com medições permitirá apurar certos aspectos, em particular o desenvolvimento da bimodalidade na distribuição direcciona.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Battjes, J.A. (1994), Shallow Water Wave Modelling, *Proc. Intern. Symp. on WAVES - Phys. and Num. Modelling*, IAHR, Vancouver, 1-23, (keynote address).
- Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M. (1978), Energy Loss and Set-up Due to Breaking of Random Waves, *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engng.*, Hamburg, Germany, 569-587.
- 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.
- Eldeberky, Y. Battjes, J.A. (1995), Parametrization of Triad Interactions in Wave Energy Models, *Proc. Coastal Dynamics Conf. '95*, Gdansk, Poland, 140-148.
- Hasselmann, K. (1962), On the Non-Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum, Part 1 General Theory, *J.Fluid Mech*, 12; 481-500.
- Hasselmann, K., Hasselmann, S., Allender, J.H., Barnett, T.P. (1985), Computations and Parametrizations of the Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum. Part II: Parametrizations of the Nonlinear Transfer for Application in Wave Models, *J. Phys. Oceanogr.*, 15(11), 1378-1391.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Padilla-Hernandez, R., (1997), A Nonstationary Parametric Coastal Wave Model, *Proc. 3rd Int. Conf. on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 97)*, Virginia Beach, Virginia, ASCE, vol. 1, 630-638.
- 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.
- 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.
- Ventura Soares, C., Coelho, E., Pires Silva, A.A., Makarynsky, O. (1999), PAMMELA: Previsão da Agitação Marítima em Águas Pouco Profundas, *Actas 1^o Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária*, PIANC-DP, Porto, (aceite para publicação).

