



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

RECONSTITUIÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NA COSTA SUL DE PORTUGAL CONTINENTAL

Liliana Rusu, Paula Pilar, Carlos Guedes Soares

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico
Pavilhão Central, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
lrusu@mar.ist.utl.pt, pilar@mar.ist.utl.pt, guedess@mar.ist.utl.pt

RESUMO

Apresentam-se resultados da validação de um modelo de reconstituição da agitação marítima na costa Sul de Portugal Continental, concentrando-se em situações de tempestade. Utiliza-se um esquema baseado em modelos numéricos, que pode ser utilizado também para previsão. Os modelos numéricos utilizados são: WAM para a área de geração e SWAN para a área de transformação.

As simulações com o modelo SWAN foram efectuadas em duas escalas geográficas. A primeira área inclui toda a parte a Oeste da Península Ibérica, encaixada no modelo WAM. A segunda área cobre a parte Sul da costa de Portugal Continental. Os resultados destas simulações foram comparados com os dados de uma bóia ondógrafo localizada na proximidade do Faro. Os campos de vento utilizados foram produzidos no âmbito do projecto HIPOCAS.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições de mar junto à costa é importante para o planeamento das actividades marítimas, quer ligadas à aproximação de navios a portos e à operação de navios de pesca ou de recreio, quer para as actividades económicas e de lazer que se desenvolvem no litoral.

A caracterização destas condições baseou-se no passado em medições de bóias ondógrafo colocadas em locais estratégicos da costa. No entanto este método tem as limitações de só fornecer dados nesse ponto específico e de não ter qualquer capacidade de previsão. Os modelos numéricos que representam a geração e a propagação da agitação marítima permitem conhecer as condições de mar em qualquer ponto de uma dada área geográfica, fornecendo assim uma cobertura bem mais ampla que as bóias. Além disso quando estes modelos se utilizam com previsões de campos de vento têm também a capacidade de prever o estado de mar nos locais de interesse. Por isso, o aperfeiçoamento dos modelos numéricos e o desenvolvimento da capacidade de cálculo veio tornar viável a utilização mais generalizada dos modelos numéricos de reconstituição e previsão.

A utilização dos modelos de geração de vagas quando utilizados com campos de vento passados permitem reconstituir a agitação marítima, o que é útil para validar os modelos com observações. Para além disso a reconstituição de um conjunto grande de dados permite criar uma base de dados que apoie o projecto de estruturas costeiras e sirva de base ao planeamento das operações marítimas junto a costa. Foi com este objectivo que no projecto europeu HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe) se procedeu à reconstituição de 44 anos de dados de vento, marés e agitação marítima nas águas das costas europeias (Guedes Soares *et al.* 2002).

Neste projecto adoptou-se o modelo WAM, que foi desenvolvido pelo WAMDI Group (1988) e que se encontra amplamente testado e em uso em vários institutos meteorológicos.



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

Este modelo foi forçado com campos de vento obtidos por um modelo atmosférico de escala regional que permitiu melhorar a qualidade dos campos de vento disponíveis à escala global e permitiu que estes passassem a ficar definidos numa grelha de 0.5° (em vez de 2°) e com um intervalo de 1 hora (em vez de 6 horas). Estes campos de vento permitem representar o efeito da orografia, o que é especialmente importante junto à costa e dado o espaçamento em tempo permitem uma melhor representação da evolução das tempestades.

A reconstituição da agitação marítima em águas profundas pode ser efectuada com rigor utilizando modelos numéricos, como o WAM, que realizam a integração da equação de balanço da energia, tendo em consideração as forças externas como a acção do vento, as interacções não lineares entre ondas e a dissipação devido a rebentação das ondas. Estes modelos por representarem as condições de águas profundas, permitem reproduzir as condições até batimétricas da ordem dos 100 metros. Para menores profundidades as ondas mais longas vão sentindo cada vez mais o efeito do fundo pelo que para profundidades da ordem dos 20 metros ou menos torna-se necessário utilizar modelos que incorporem também os processos físicos associados à interacção das ondas com o fundo.

Um dos modelos mais utilizados para este objectivo é o SWAN (Simulation WAVes Nearshore), que é um modelo espectral de alta resolução que simula e descreve a propagação, e consequente dissipação, de ondas em águas pouco profundas, (Booij *et al.* 1999). A partir do conhecimento das condições de fronteira, batimetria, campos de vento e correntes, o modelo calcula a evolução do espectro direccionado. O modelo considera todos os processos relevantes para uma descrição adequada da agitação marítima em águas costeiras como a refacção devido à variação da profundidade, a dissipação por atrito no fundo, as interacções não lineares ressonantes e a rebentação.

Este trabalho pretende continuar o estudo reportado por Guedes Soares *et al.* (2002) estendendo as simulações para águas pouco profundas, o que irá assim permitir obter o clima de agitação marítima mesmo junto à costa Portuguesa. A metodologia adoptada consiste em utilizar os resultados obtidos pelo modelo WAM em águas profundas relativamente perto da costa como condições de fronteira para o modelo SWAN que é aplicado para a determinação de condições junto a costa.

Este trabalho pretende validar o procedimento adoptado apresentando uma comparação das previsões com medições de bóia ondógrafo na costa do Algarve. Estes resultados complementam outros que foram obtidos utilizando o mesmo procedimento mas outras grelhas aplicadas à zona Norte de Portugal (Rusu *et al.* 2005a) e à zona de Sines (Rusu *et al.* 2005b) e que demonstraram uma muito boa qualidade das simulações.

2. A APLICAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Neste trabalho apresenta-se a reconstituição da agitação marítima na costa Sul de Portugal Continental associada às situações de temporal que são definidas como tendo uma altura significativa maior de 3.5m, (Costa *et al.* 2001). Utilizam-se o modelo WAM para a área de geração, o qual fornece condições de fronteira para o SWAN que se aplica na área de transformação. Os campos de vento usados no cálculo foram fornecidos pelo projecto HIPOCAS, com uma resolução espacial de 0.5° e temporal de 1 hora.

As simulações foram efectuadas para o mês de Dezembro de 2000 quando foram registados valores de alturas significativas maiores de 5m (como por exemplo nos dias 7 e 22 de Dezembro) e para o intervalo: 1 de Fevereiro de 2001 até 10 de Março de 2001.

2.1 WAM

O modelo WAM foi implementado com diferentes níveis de grelhas encaixadas (Tabela 1e Figura 1). As batimetrias utilizadas foram construídas a partir dos dados originais de ETOPO5.

A resolução espacial das grelhas ($\Delta x \times \Delta y$), o passo do tempo de integração Δt e o número de np pontos correspondente para cada grelha apresentam-se na Tabela 1. A

discretização do espectro realiza-se em 25 frequências espaçadas logaritmicamente desde 0.0418 Hz a 0.4114 Hz e 24 direcções igualmente espaçadas que dá uma resolução de 15°.

Tabela 1 – As grelhas e os parâmetros numéricos dos cálculos do modelo WAM

Grelhas	Latitude/Longitude	$\Delta x \times \Delta y$ (°)	Δt (s)	nf	n θ	ngx \times ngy = np
Grande	70°N-14°N / 64°W-20°E	2° \times 2°	300	25	24	43 \times 29 = 1247
Média	68°N-20°N / 50°W-4°E	1° \times 1°	300	25	24	55 \times 49 = 2695
Pequena	60°N-24°N / 33°W-0°E	0.5° \times 0.5°	300	25	24	67 \times 73 = 4891

Na última grelha do modelo WAM geraram-se condições de fronteira para o modelo SWAN e para realizar o acoplamento WAM \rightarrow SWAN foram transferidos espectros 2D com uma resolução temporal de uma hora ao longo de três fronteiras (Norte, Oeste e Sul), com intervalos de 1°. A transferência dos dados efectua-se numa forma simples e expedita.

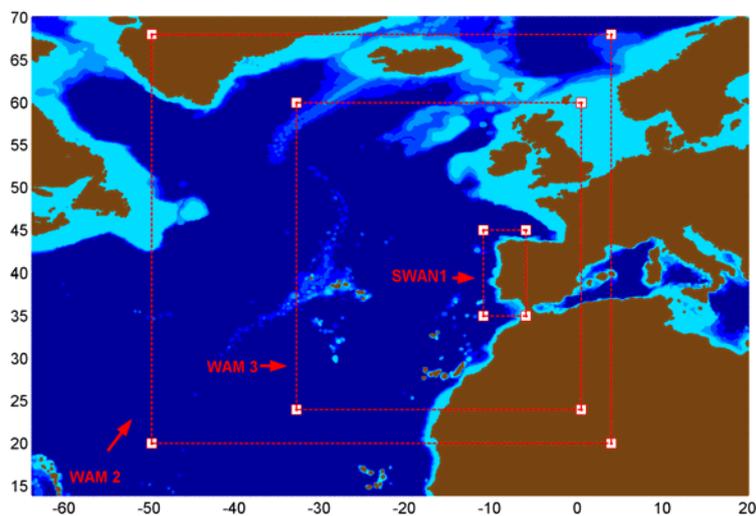


Figura 1 – As áreas do modelo WAM

2.2 SWAN

Para obter uma representação real dos efeitos da batimetria sobre as características das ondas que se propagam nas áreas costeiras é preciso de aumentar a resolução espacial em direcção à costa utilizando grelhas encaixadas. A primeira área (de baixa resolução) alcança toda a parte Oeste da Península Ibérica e a segunda área abrange a região Sul de Portugal, abaixo de Sines como está ilustrado na Figura 2. A batimetria é proveniente da base de dados DBDBV desenvolvida pelo Naval Oceanographic Office.

Os parâmetros numéricos utilizados nos cálculos são apresentados na tabela 2. As frequências são distribuídas logaritmicamente entre 0.05 Hz e 0.6 Hz e as 36 direcções são igualmente espaçadas.

Tabela 2 – As grelhas e os parâmetros numéricos dos cálculos do modelo SWAN

Grelhas	Latitude/Longitude	$\Delta x \times \Delta y$ (°)	Δt (s)	nf	n θ	ngx \times ngy = np
Baixa resolução	45°N-35°N / 11°W-6°W	0.05° \times 0.1°	1200	30	36	101 \times 101 = 10201
Média	37.8°N-36.3°N / 9.8°W-7.6°W	0.02° \times 0.02°	1200	30	36	111 \times 76=8436

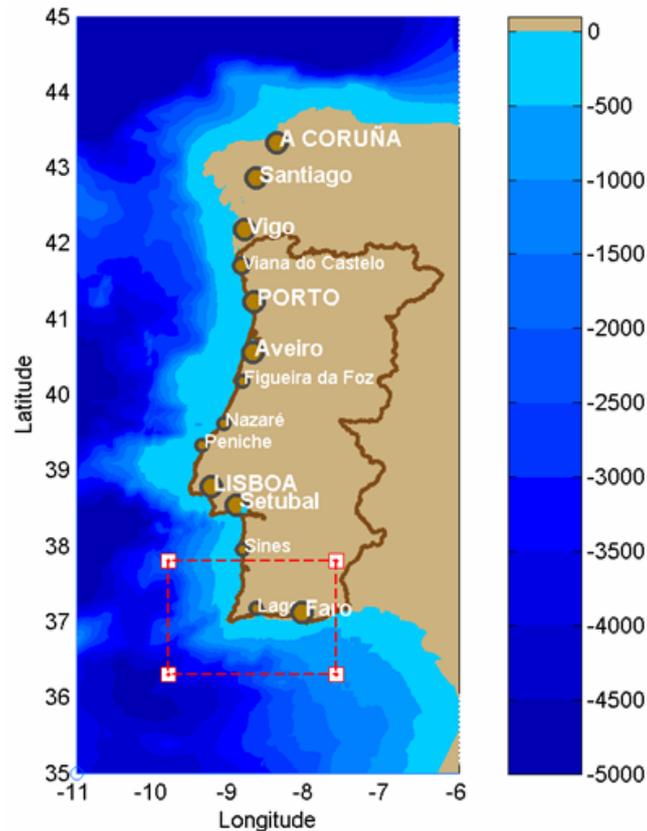


Figura 2 – As áreas do modelo SWAN

Em função da estabilidade do vento e das condições de fronteira, foram definidas diferentes situações: condições altamente não estacionárias, condições quase estacionárias e condições totalmente estacionárias. Dependendo da situação foram escolhidos os parâmetros físicos das corridas do modelo SWAN, relacionados com os três esquemas numéricos do modelo: S&L, SORDUP e BSBT, (Holthuijsen *et al.* 2004).

Foram testados diferentes passos de tempo de cálculo em regime não estacionário para encontrar a melhor eficiência computacional, mas também uma exactidão numérica; foi adoptado o valor de 20 minutos.

Para os dados de entrada do vento considerou-se um crescimento linear do vento com duas formulações: Komen *et al.* (1984) que se utiliza no modelo WAM Cycle3 e Janssen (1991) que é igual a aquela utilizada no modelo WAM Cycle4.

As simulações nas áreas de baixa e média resolução foram efectuadas com o modelo SWAN 40.31, em coordenadas esféricas. Realizaram-se dois dias de simulações representando o fenómeno de difracção com objectivo de testar as possibilidades fornecidas da nova versão do modelo SWAN 40.41 (Booij *et al.* 2004)

Os resultados das simulações foram comparados com os dados on-line de uma bóia direccional do Instituto Hidrográfico, localizada na proximidade do Faro, na posição de 36° 54' N e 7° 54' W à profundidade de 93 m.

No dia 22 de Dezembro 2000 às 00 horas a velocidade do vento atingiu um valor máximo de 23.52 m/s e devido ao centro de baixa pressão situado ao SE de Portugal Continental (Figura 3a) gerou-se um campo de agitação marítima com alturas significativas muito elevadas (Figura 3b). Seis horas mais tarde a bóia ondógrafo registou um valor máximo da altura significativa de 6.2 m.

Os testes com a opção de difracção activada foram efectuados em condições de ondas que vêm de Noroeste, havendo assim a possibilidade de observar melhor a influência do Cabo de São Vicente. Os testes iniciais foram efectuados em coordenadas esféricas mas o modelo não chegava a atingir o critério de convergência de 98% e as alturas significativas tinham valores ilógicos e por isso optou-se por se utilizar as coordenadas cartesianas. Os valores dos parâmetros simulados no local da bóia têm valores semelhantes aos parâmetros simulados anteriormente com o modelo SWAN 40.31.

A Figura 5 apresenta os campos de altura significativa na área de resolução média para o dia 20 de Dezembro de 2000 às 21 horas para as simulações executadas em coordenadas cartesianas e com a opção de difracção activada. Para se observar melhor as direcções das ondas, na área de interesse, que está marcada com um quadrilátero vermelho, apresenta-se na Figura 6 uma ampliação daquela área. Ao mesmo tempo, para a área seleccionada aumentou-se a resolução espacial dos vectores que representa a direcção das ondas, deste modo sendo facilitada a observação da modificação das ondas pelo efeito da difracção e também da refracção (Figura 6).

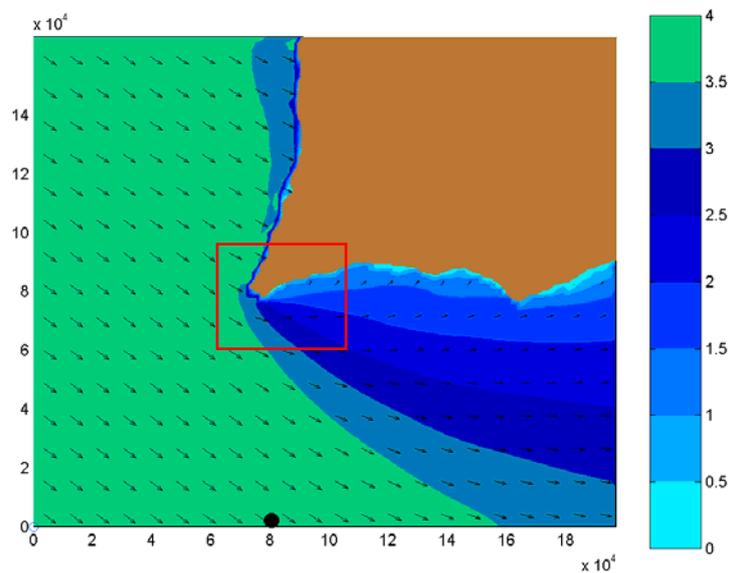


Figura 5 – Área de resolução média (2000/12/20-h21), campos de altura significativa e a direcção das ondas (simulações em coordenadas cartesianas)

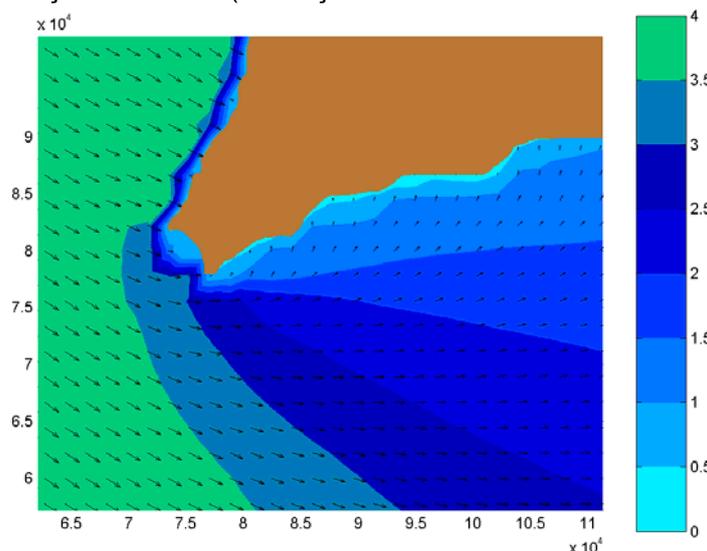


Figura 6 – Área seleccionada com a resolução espacial dos vectores aumentada, campos de altura significativa e a direcção das ondas



3. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

As simulações do modelo SWAN na área intermédia foram validadas com as medições de uma bóia direccional colocada numa profundidade de 93 m. Os dados observados representam valores de alturas significativas, períodos médios calculados e direcção média fornecidas on-line de três em três horas.

Os parâmetros estatísticos utilizados para caracterizar o desempenho relativo do modelo numérico para o período da simulação são os valores médios dos parâmetros medidos e simulados, a tendência (bias), o erro quadrático médio, o índice da dispersão e o coeficiente da correlação, calculados de acordo com as seguintes expressões:

$$X_{med} = \tilde{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\tilde{X}} \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})(Y_i - \tilde{Y})}{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

A comparação estatística para as duas formulações de Janssen e de Komen está apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Comparação estatística

n=494	B_{med}	S_{med}	Bias	RMSE	SI	r	
Hs (m)	1.695	1.723	- 0.029	0.393	0.232	0.931	J
Tm (s)	5.731	5.613	0.118	1.274	0.222	0.723	A
MDir(°)	231.00	239.55	- 8.546	27.219	0.118	0.744	N
Hs (m)	1.695	2.147	- 0.452	0.673	0.397	0.921	K
Tm (s)	5.731	3.933	1.798	2.037	0.356	0.675	O
MDir(°)	231.00	237.923	- 6.915	30.300	0.131	0.697	M

Os erros para as simulações junto à costa podem ter proveniência em varias fontes: os dados de vento, a batimetria, as condições de fronteira ou mesmo do modelo.

Nota-se que geralmente, o modelo numérico tem tendência a sobrestimar os valores medidos, embora em algumas situações observam-se valores estimados inferiores. É necessário sublinhar o facto que os valores dos parâmetros estatísticos indicam um melhor desempenho do modelo com a formulação Janssen, o que também se observa nas figuras seguintes.

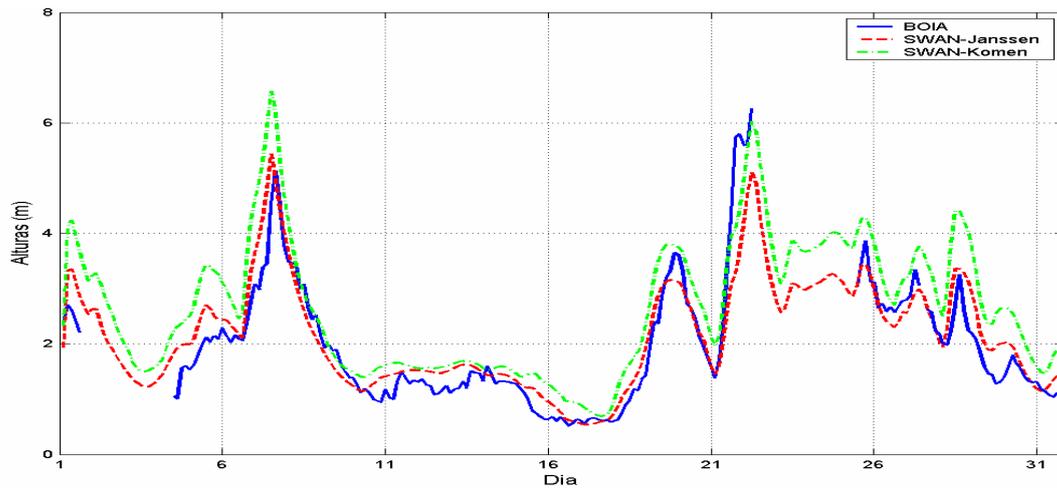


Figura 7 – Comparação das alturas significativas resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, Dezembro de 2000

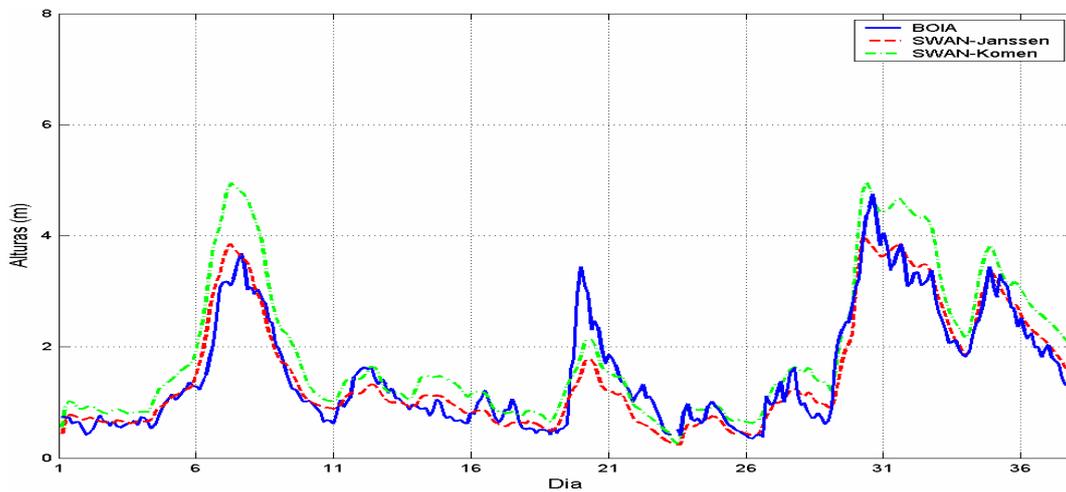


Figura 8 – Comparação das alturas significativas resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, período 01.02.2001 - 10.03.2001

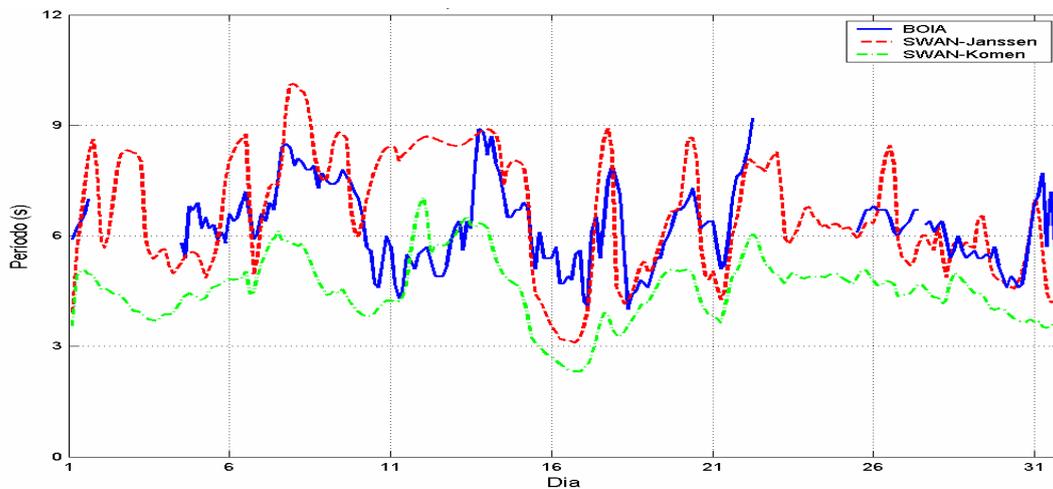


Figura 9 – Comparação dos períodos médios resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, Dezembro de 2000

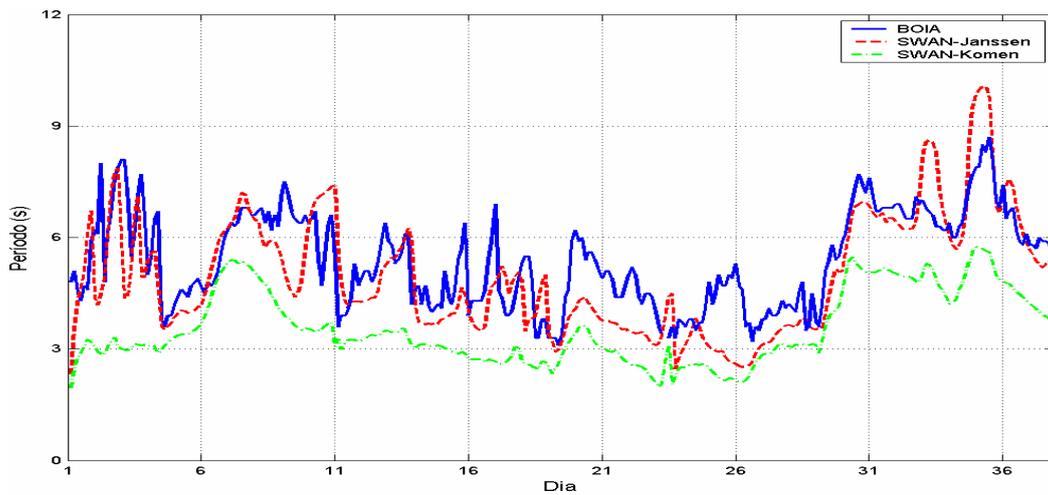


Figura 10 – Comparação dos períodos médios resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, período 01.02.2001 - 10.03.2001

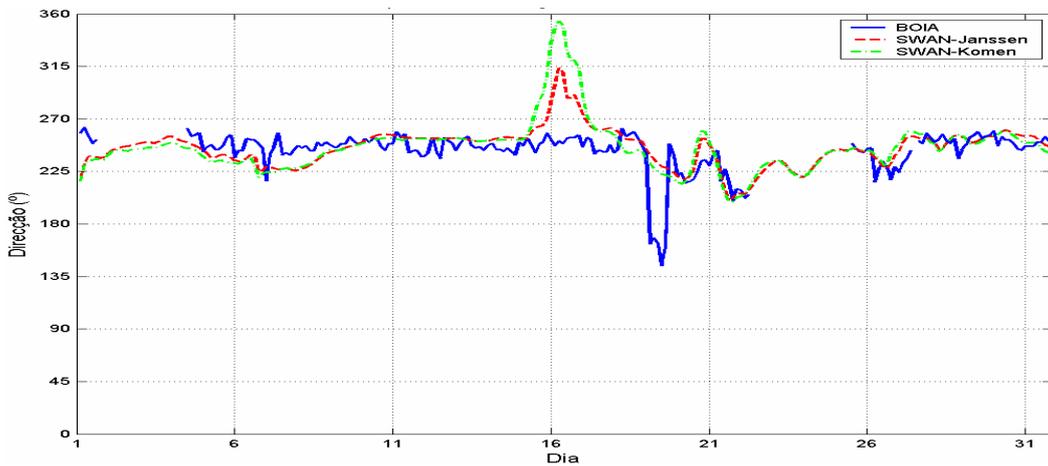


Figura 11 – Comparação das direcções médias resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, Dezembro de 2000

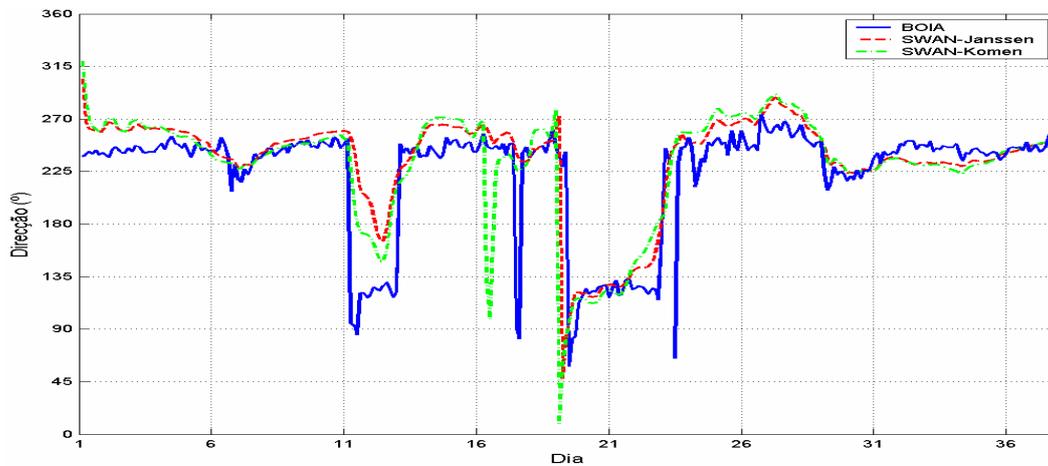


Figura 12 – Comparação das direcções médias resultantes das simulações do modelo SWAN com as medições da bóia de Faro, período 01.02.2001 - 10.03.2001



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

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram uma boa correlação entre as medições da bóia ondógrafo e as simulações do modelo numérico o que significa que as condições de tempestade podem ser reconstituídas com bastante boa aproximação.

Pelo facto de a costa sul se encontrar abrigada dos estados de mar provenientes de NW, o clima de agitação marítima desta área é mais calmo do ponto de vista energético, do que o da costa oeste. Neste caso, os fenómenos dominantes na propagação das ondas são afectadas do efeito combinado da difracção devido ao Cabo de São Vicente e a refracção, o que se conseguiu reproduzir nas simulações efectuadas.

5. RECONHECIMENTO

O presente estudo utilizou resultados produzidos no projecto *Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe* (HIPOCAS – www.mar.ist.utl.pt/hipocas), que foi parcialmente financiado pela União Europeia, através do programa *Environment and Sustainable Development* (EVK2-1999-00248).

A primeira autora foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através de uma bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/13176/2003.

6. REFERÊNCIAS

Booij, N., Haagsma, I.J.G., Holthuijsen, L.H., Kieftenburg, A.T.M.M., Ris, R.C., van der Westhuysen, A.J., and Zijlema, M., 2004: User Manual for SWAN Version 40.41, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 115p.

Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research* C4, 104, 7649-7666.

Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J., 2001: Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa, *Actas das 2^{as} Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines*, 17-19 de Outubro, edição em CD.

Guedes Soares, C., Weisse, R., Carretero, J.C., and E. Alvarez, 2002: A 40 years Hindcast of Wind, Sea Level and Waves in European Waters, *Proceedings of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, Paper OMAE2002-SR8604.

Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C., Haagsma, I.J.G., Kieftenburg, A.T.M.M., Kriezi, E.E., Zijlema M., and van der Westhuysen, A.J., 2004: User Manual for SWAN Version 40.31, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 114p.

Janssen, P.A.E.M., 1991: Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, pp 1631-1642.

Komen, G.J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K., 1984: On the existence of a fully developed wind sea spectrum, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, pp 1271-1285.

Rusu, L., Pilar, P. & Guedes Soares, C., 2005a: Hindcasts of the Wave Conditions in Approaches to Ports of the North of Portugal, *Proceedings Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 2005)*, Madrid, Spain, 3rd-7th July 2005, CD edition, 9p.

Rusu, L., Pilar, P. & Guedes Soares, C., 2005b: Reanalysis of the wave conditions in the approaches to the Portuguese port of Sines, *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*, C. Guedes Soares, Y. Garbatov & N Fonseca (Eds), Taylor and Francis.

WAMDI Group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P. A. E. M. Janssen, G. J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V. C. Cardone, J. A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J. A. Ewing, 1988: The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model, *J. Phys. Ocean.*, Vol. 18, pp. 1775-1810.