



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

O modelo SWAN em regime não estacionário: sensibilidade à resolução do campo do vento e às condições de fronteira de mar

Maria João Teles

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais 1049-101, Lisboa

António Alberto Pires Silva

Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais 1049-101, Lisboa

Margarida Belo - Pereira

Centro de Investigação em Meteorologia, Instituto de Meteorologia
Rua C ao Aeroporto 1749-077 Lisboa

Conceição Juana Fortes

Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa

RESUMO

O conhecimento das características da agitação marítima junto à linha de costa é essencial para o dimensionamento e manutenção de estruturas de protecção e abrigo, para o planeamento portuário e para a compreensão da morfodinâmica litoral. Para este fim, utilizam-se modelos espectrais de média em fase, entre eles o modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore), (Booji et al., 1999). O modelo SWAN recorre a esquemas numéricos implícitos, e por isso incondicionalmente estáveis. A sua formulação matemática centra-se na equação de balanço de acção de onda (quociente entre a densidade espectral de variância e a frequência relativa). O modelo tem em conta os processos físicos próprios da propagação da agitação marítima em águas pouco profundas, nomeadamente a refacção, o empolamento, a dissipação por atrito no fundo, a rebentação induzida pelo fundo e as interacções quase ressonantes a três e quatro ondas. Presentemente, o modelo SWAN é amplamente utilizado (incluindo gabinetes de consultoria) mas a sua correcta aplicação está condicionada pelas características dos dados fornecidos ao modelo numérico bem como dos parâmetros admitidos.

No presente estudo o modelo SWAN, em regime não estacionário, é aplicado à zona adjacente a Pinheiro da Cruz, durante dois períodos caracterizados por fortes tempestades geradas no Atlântico Norte. É realizado um estudo de sensibilidade ao impacto da resolução do campo do vento e condições de fronteira de mar. Foram analisadas e comparadas duas implementações do modelo WAM – Puertos del Estado e HIPOCAS (Hindcast of Dynamical Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe). Para a aplicação do regime não estacionário, recorreu-se ao campo do vento proveniente do modelo atmosférico de mesoscala ALADIN, com duas resoluções distintas (5.6 km e 12.9 km).

Os resultados das simulações foram verificados com dados de um perfilador acústico por efeito Doppler (ADCP) fundeado a 17,0 m (Z.H.).



1. INTRODUÇÃO

A capacidade de descrever a geração e transformação das ondas desde o largo até à costa afigura-se crucial para a melhor compreensão dos processos existentes em águas pouco profundas. Neste contexto, as ondas de gravidade geradas pelo vento assumem uma grande relevância, já que as mesmas estão associadas aos fenómenos mais energéticos e por isso potencialmente mais gravosos para a costa. Deste modo, surge a necessidade de simular a sua propagação desde o largo até à costa, uma vez que os resultados obtidos da referida modelação são essenciais para o dimensionamento de obras, nomeadamente obras de protecção costeira e portuária, e também para a compreensão da morfodinâmica litoral, como é exemplo a erosão de dunas e de praias.

Portugal Continental, para além de ter uma plataforma continental bastante estreita, é caracterizado por uma costa aberta, exposta à ondulação proveniente do oceano Atlântico. Estas circunstâncias fazem com que os modelos para aplicações costeiras necessitem de resoluções elevadas de modo a obter descrições de boa qualidade (Pires Silva et al., 2002).

O modelo SWAN (Booji et al., 1999), modelo espectral de média em fase, que utiliza esquemas numéricos implícitos de 2^a ordem, satisfaz tanto a necessidade de resoluções elevadas como de aplicações em áreas extensas.

Nos últimos anos, e de uma forma cada vez mais intensa, os modelos de escala costeira/regional dependem de modelos de escala oceânica para o estabelecimento de condições de fronteira de mar aberto. Especialmente em situações de ondulação propagando-se para o interior do domínio, esta relação entre as duas escalas condiciona o comportamento e as simulações junto à costa. Baseados em estudos de propagação da agitação marítima na Baía da Califórnia, que partilha certas semelhanças e condicionalismos com o trecho da costa portuguesa em análise, Rogers et al. (2007) apontam, justamente, a precisão da definição das condições de fronteira de mar como um dos factores limitativos (porventura o mais decisivo) para estas mesmas simulações.

O objectivo central desta comunicação centrou-se na aplicação e análise de desempenho do modelo SWAN na costa oeste portuguesa, avaliando a qualidade das simulações face quer a condições de fronteira de mar distintas resultantes da aplicação do modelo WAM com dados de ventos de diferentes origens quer ao forçamento do campo do vento com duas resoluções distintas do modelo atmosférico de mesoescala ALADIN.

2. MORFOLOGIA LOCAL E REGISTOS DE OBSERVAÇÕES

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE APLICAÇÃO

O local de aplicação do modelo SWAN compreende a zona marítima adjacente a Pinheiro da Cruz. A praia de Pinheiro da Cruz localiza-se a meio do arco Sado-Sines, sendo

limitada a norte pelo estuário do Sado e a sul pelo porto de Sines. A batimetria desta área é constituída por arcos paralelos à linha da costa, com excepção do canhão de Setúbal (Fig.1).

Estando situada na costa oeste portuguesa, que é uma costa aberta, está exposta, principalmente, a ondas provenientes dos quadrantes NW – W – SW, sendo a agitação marítima, no período em análise, caracterizada por uma forte ondulação gerada no Atlântico Norte.

O cabo Espichel (Fig.1) tem dois efeitos nesta zona: proporciona abrigo para a ondulação proveniente de Norte e em episódios de ventos de norte e noroeste, devido ao fetch limitado, evita o desenvolvimento de vaga local forte.

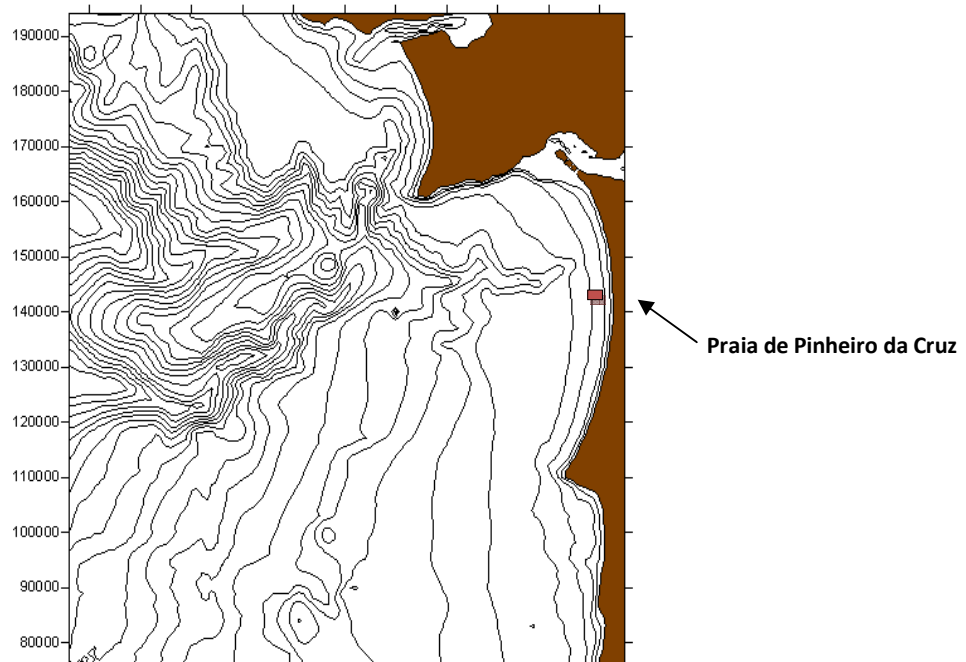


Figura 1 – Localização da zona adjacente a Pinheiro da Cruz e do ADCP (■).

2.2 DADOS DE AGITAÇÃO JUNTO À COSTA

No período de 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001, o Instituto Hidrográfico levou a cabo uma campanha de medições utilizando um perfilador acústico (ADCP) fundeado a 17.5 m de profundidade Z.H. (Fig.1). Informação adicional sobre a campanha de medições pode ser encontrada em Pires-Silva et al. (2001). Santos et al. (2001) descrevem as características técnicas deste sensor, incluindo as diversas opções de configuração.

Os resultados numéricos das simulações, a nível de parâmetros integrais, foram comparados com as observações registadas pelo ADCP. Mulligan et. al (2008), para verificação das suas simulações ao largo da costa leste dos E.U.A., utilizaram aparelhos análogos e apresentam uma recensão critica das vantagens e limitações do ADCP.

A Figura 2 apresenta a evolução temporal dos parâmetros integrais de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direcção média para a frequência de pico (D_p) registados no período de funcionamento do perfilador acústico.

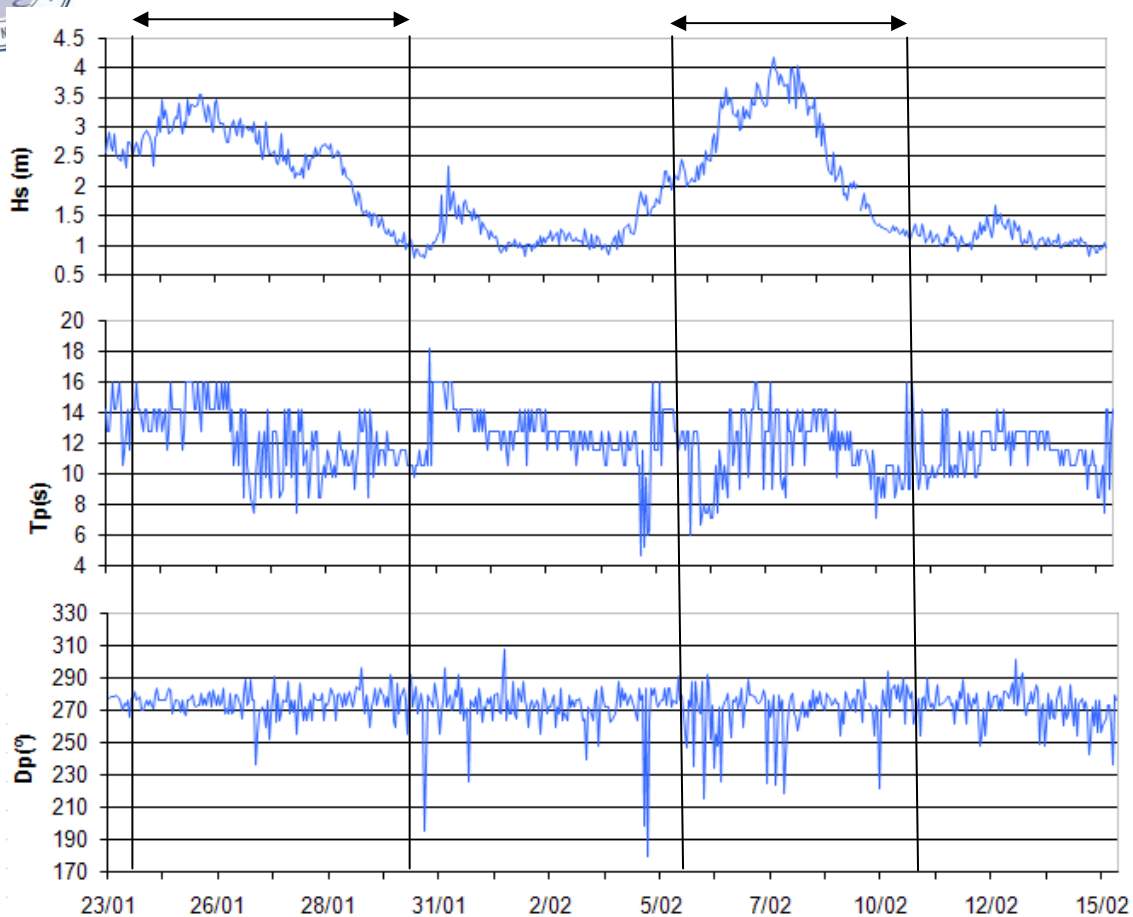


Figura 2 – Evolução temporal das medições de Hs, Tp e Dp, realizadas pelo ADCP, de 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001.

Da Figura 2 observa-se que mesmo a 19.5 m de profundidade registaram-se alturas significativas na ordem dos 4 m, períodos de pico com valores bastante elevados e que as ondas provinham persistentemente de oeste com excepção de alguns episódios de sudoeste

Através da figura acima apresentada, verifica-se também que houve dois períodos onde a altura significativa atingiu valores máximos, um no final do mês de Janeiro, de 24 a 30 de Janeiro, e outro no início de Fevereiro, 5 a 10 de Fevereiro de 2001. Por esta razão, foram estes os períodos escolhidos para a aplicação do modelo SWAN.

3. MODELO SWAN

3.1 INTRODUÇÃO

O **SWAN** (*Simulating Waves Nearshore*) (Booij et al., 1999), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft), Holanda, é um modelo numérico de terceira geração que permite obter parâmetros característicos da agitação marítima em águas pouco profundas.

O SWAN, baseado na equação de balanço espectral de variância (Booij et al., 1999), surge da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais em águas profundas. O modelo propaga, no



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

domínio geográfico, o espectro direccional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras.

A formulação matemática do modelo envolve não só os fenómenos de geração, dissipação e interacção não linear entre quatro ondas associados a propagação em águas profundas, como também os processos existentes em águas pouco profundas, como a dissipação devido ao atrito do fundo e à rebentação parcial, interacção não linear entre três ondas e rebentação induzida pela diminuição de profundidade.

A equação do balanço da acção, definida para coordenadas cartesianas, é expressa por

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma} \quad (3.1)$$

Os termos presentes no lado esquerdo da igualdade referem-se à parte cinemática da equação. O primeiro termo representa a taxa de variação local da densidade de acção no tempo, o segundo e terceiro representam a propagação da acção no espaço geográfico (com velocidades de propagação c_{gx}, c_{gy}), o quarto termo a refração induzida pelas correntes e pela variação de profundidade e finalmente o quinto define a alteração da frequência relativa devido a variações na profundidade e nas correntes. Este último é nulo na ausência de correntes. As quantidades c_{θ} e c_{σ} representam as velocidades de propagação no espaço espectral.

O termo presente no lado direito da equação, $S(\sigma, \theta)$, engloba todos os termos fontes ou sumidouros associados aos fenómenos físicos que geram, dissipam ou redistribuem a energia da onda. $S(\sigma, \theta)$ pode ser subdividido na geração de energia devido ao vento $S_{in}(\sigma, \theta)$, nas interacções não lineares $S_{nl}(\sigma, \theta)$ e na dissipação da energia $S_{diss}(\sigma, \theta)$.

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta) \quad (3.2)$$

O termo $S_{diss}(\sigma, \theta)$ descreve ainda três fenómenos: atrito do fundo $S_{diss,b}(\sigma, \theta)$, rebentação induzida pela diminuição da profundidade $S_{diss,br}(\sigma, \theta)$ e rebentação parcial $S_{diss,w}(\sigma, \theta)$.

O modelo SWAN sendo um modelo *open source* está disponível a qualquer utilizador. Tem sido amplamente utilizado por investigadores e mais recentemente por gabinetes de consultoria. Deste modo, a compreensão e conhecimento das variadas questões e dúvidas com que o utilizador se depara é essencial de forma a obter resultados fiáveis. Quando se recorre ao modelo SWAN, aspectos cruciais nas simulações têm que ser definidos, pelo que os itens seguintes referem-se a características dos dados fornecidos ao modelo bem como a escolhas com que o modelador tem que lidar.

3.2 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Foram analisadas duas diferentes bases de dados constituídas por diferentes implementações do modelo WAM: uma proveniente de Ente Público, Puertos del Estado, Espanha, em que o modelo WAM é forçado por um campo do vento do modelo de mesoescala HIRLAM (Carretero et al., 2000) e outra que esteve integrada no projecto HIPOCAS (*Hindcast of Dynamical Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*) (Pilar et al., 2008), onde forçam o modelo WAM com um campo do vento do NCEP (National Centers for Environmental Prediction).

O modelo WAM é um modelo também de terceira geração que descreve a evolução do espectro à escala oceânica (Komen et al. 1994)

As condições de fronteira foram fornecidas na forma de parâmetros integrais de altura significativa, período médio e direcção média para a frequência de pico, para as coordenadas 38°N 10°W, com um intervalo de saída de 3 horas.

As figuras seguintes são representativas da evolução temporal dos parâmetros integrais que foram forçados no modelo SWAN, das duas diferentes implementações do modelo WAM: Puertos del Estado (PdE) e HIPOCAS.

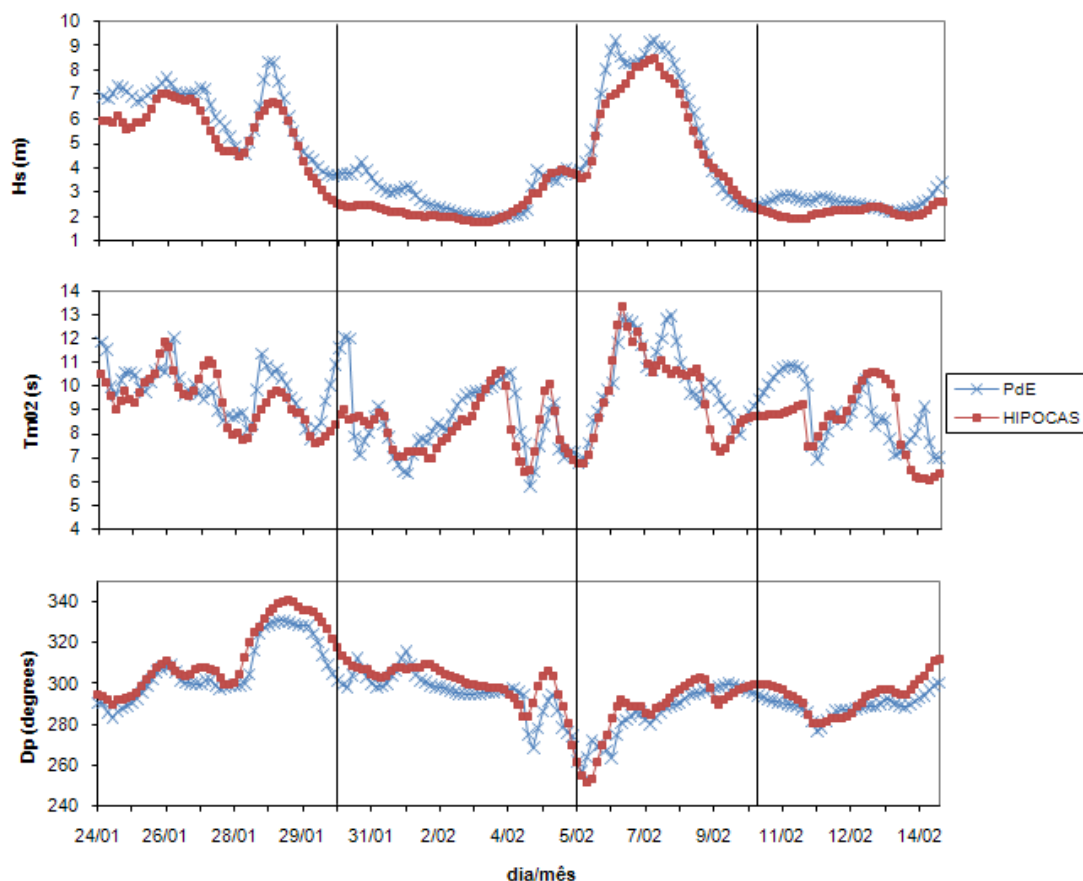


Figura 3 – Representação da altura significativa (H_s), período médio (T_{m02}) e direcção média para a frequência de pico (D_p) a 38°N10°W para as duas bases de dados e respectiva selecção dos períodos em análise

3.3 CAMPO DO VENTO

Os campos de ventos foram simulados pelo modelo ALADIN (*Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational*), com duas diferentes resoluções: uma de 5.6 km e outra de 12.9 km.

O modelo ALADIN (Radnóti et al., 1995) é um modelo espectral de área limitada, desenvolvido em paralelo com o modelo global atmosférico ARPEGE (*Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*).

Por rotina, no Instituto de Meteorologia as previsões do modelo ALADIN/Portugal são analisadas e comparadas com as realizadas no ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

No entanto, no presente estudo, o campo do vento do ALADIN com resoluções diferentes foi avaliado no período de 23 de Janeiro a 15 de Fevereiro de 2001, utilizando como base de comparação observações registadas por duas estações meteorológicas instaladas em Cabo Raso e em Sines.

Nas Figuras 3 e 4 podem ser verificadas as simulações do ALADIN face às observações nas estações de Cabo Raso e Sines, respectivamente. Os vectores nos gráficos representam a direcção para onde o vento sopra e o comprimento reflecte a maior ou menos intensidade do vento.

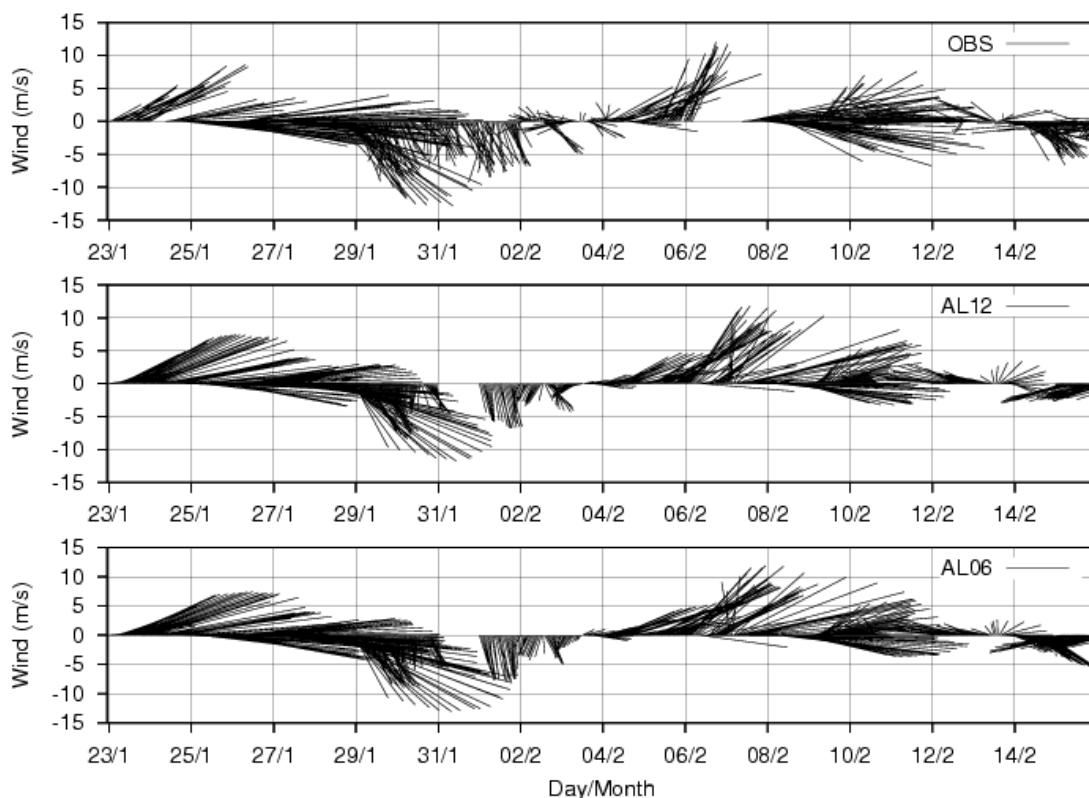


Figura 4 – Observações da estação meteorológica de Cabo Raso e simulações do modelo ALADIN para as duas resoluções de campo de ventos: 12.9 km e 5.6 km

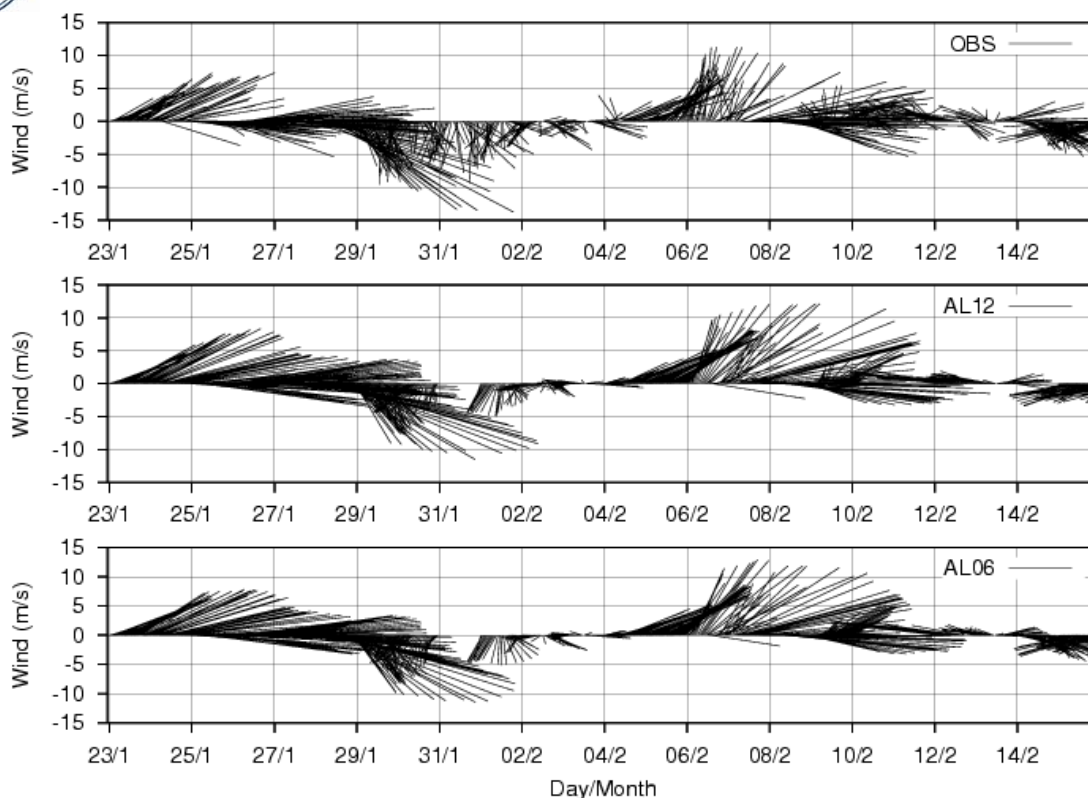


Figura 5 – Observações da estação meteorológica de Sines e simulações do modelo ALADIN para as duas resoluções de campo de ventos: 12.9 km e 5.6 km

Para alguns dias do período em análise foi ainda possível fazer uma avaliação das simulações do ALADIN ao largo com observações realizadas por barcos. Na Figura 6 é possível verificar a boa concordância entre as observações e as simulações do ALADIN para uma resolução de 5.6 km.

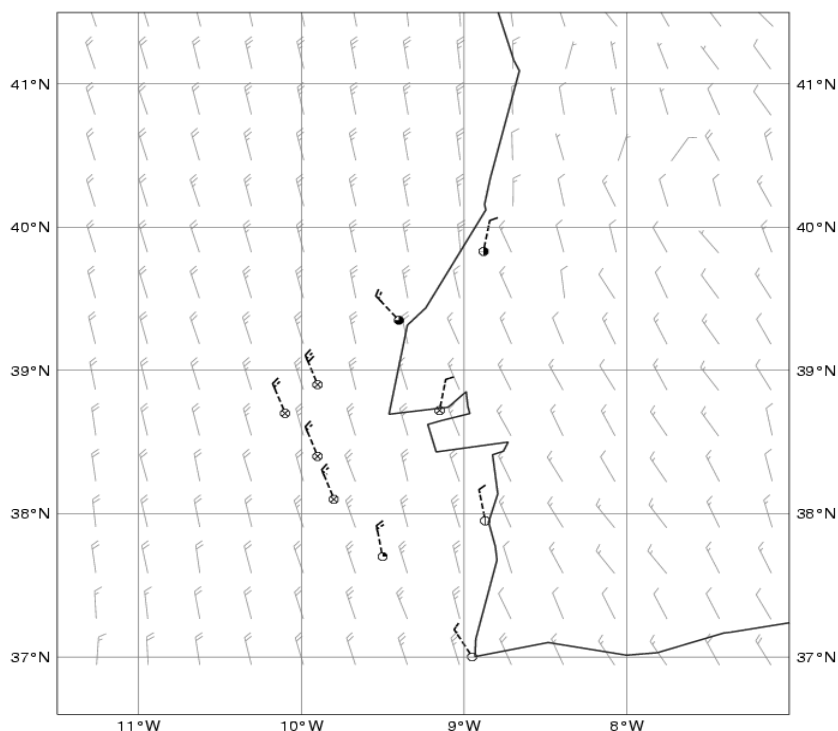


Figura 6 – Vento observado por barcos para 29/1/2001 às 6 UTC. Os ventos simulados e observados são representados pelas bandeiras cinzentas e pretas respectivamente.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Para além da análise qualitativa acima apresentada, foi também realizada uma análise quantitativa, através do cálculo de estatísticas de erro, que se apresenta na Tabela 1.

As estatísticas utilizadas foram as seguintes: valor médio do erro - ME (*Mean Error*), valor médio quadrático do erro - RMSE (*Root Mean Square Error*) e SI (*Scatter Index*), *r* (coeficiente de correlação) e RMSEV (*Root Mean Square Error Vector*). Apresentam-se de seguida as respectivas definições.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta X_i \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta X_i)^2} \quad (3.4)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{X_o}} \quad (3.5)$$

$$RMSEV = \sqrt{\frac{1}{2} (MSE_u + MSE_v)} \quad (3.6)$$

em que N é a dimensão da amostra, $\Delta X = X_o - X_c$ é a diferença entre os valores observados e os valores simulados e $\overline{X_o}$ é o valor médio das observações.

Tabela 1 – Valores das estatísticas de erro para as duas resoluções do campo do vento em Cabo Raso e em Sines

	Cabo Raso (38.72°N, 9.48°W)					Sines-MC (37.95°N, 8.88°W)				
	RMSE (ms ⁻¹)	ME (ms ⁻¹)	SI	r	RMSEV (ms ⁻¹)	RMSE (ms ⁻¹)	ME (ms ⁻¹)	SI	r	RMSEV (ms ⁻¹)
5.6 km	1.69	0.02	0.28	0.85	1.80	1.62	- 0.31	0.30	0.87	1.69
12.9 km	1.87	0.75	0.31	0.85	1.86	1.66	- 0.49	0.31	0.87	1.78

É interessante verificar que para as duas configurações do modelo ALADIN, os coeficientes de correlação entre as previsões e as observações são bastante elevados (entre 0.85 e 0.87). Através do valor médio do erro, constata-se que a configuração de 12.7 km, em Cabo Raso subestima a velocidade do vento enquanto que em Sines sobrestima o mesmo parâmetro.

Em geral, observa-se que o modelo reproduz melhor a intensidade do vento observado quando utilizado com uma resolução maior.

3.4 OPÇÕES DE CONFIGURAÇÃO

Na presente comunicação o modelo SWAN foi implementado com uma batimetria fornecida pelo Instituto Hidrográfico construída por sondas espaçadas irregularmente entre 950m – 1000m. Deste modo, foi definida para o domínio computacional utilizado uma malha regular com coordenadas cartesianas.

Pires Silva et al. (2000) referem no seu estudo que o uso de malhas encaixadas com resoluções diferentes, e progressivamente mais elevadas, melhora os resultados numéricos obtidos no modelo SWAN, tal como possibilita a colocação da fronteira de mar mais ao largo.

Tendo em conta o estudo referido, o domínio espacial foi definido através de um domínio computacional maior que cobre uma área de 100 km na direcção normal à costa (x) e 170 km na direcção ao longo da costa (y), com um espaçamento de $\Delta x = \Delta y = 1000\text{m}$ e duas malhas encaixadas: uma com dimensões de 63 x 66 km e $\Delta x = \Delta y = 500\text{m}$ e a mais pequena com $\Delta x = 50\text{m}$, $\Delta y = 100\text{m}$ cobrindo uma área de 21x29 km (Figura 7 e Tabela 2).

O efeito do forçamento de um campo do vento variável tem sido referido em alguns estudos, do que são exemplos Rogers et al. (2007) e Teles (2008). Nos estudos referidos foram feitos testes de sensibilidade quanto ao facto de usar o modo estacionário ou não e na última hipótese qual a dimensão que o domínio deverá ter, tendo também em conta o custo computacional. Simular a propagação das ondas de vento em regime estacionário implica um tempo de viagem no domínio instantâneo. A principal consequência desta aproximação é uma má caracterização do tempo de chegada da ondulação. Assim, a conclusão é que, para haver influência significativa nos resultados, se deverá utilizar o modo não estacionário somente no domínio de dimensão maior.

Considerando que na presente comunicação a malha maior apresenta uma extensão de 100 km perpendicular à linha de costa, a aplicação da não estacionariedade é justificável, apesar do custo computacional mais elevado.

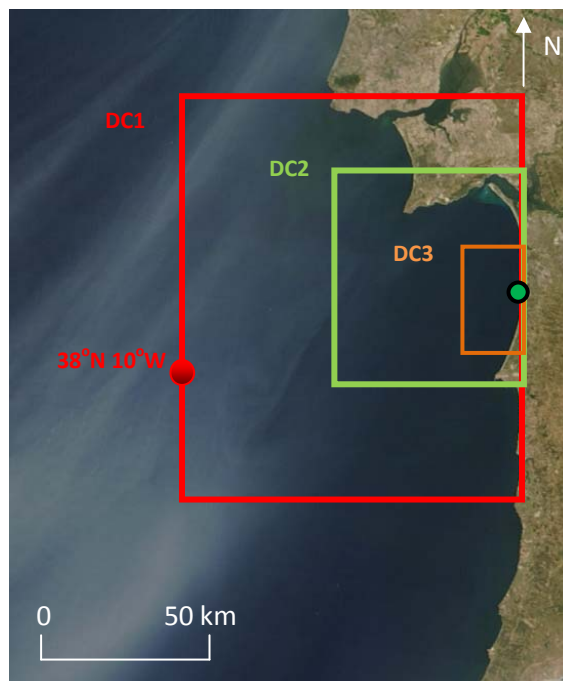


Figura 7 - Domínios computacionais da zona adjacente a Pinheiro da Cruz. Foto NASA adaptada.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Tabela 2 - Dimensão e resolução de cada domínio computacional definido.

Domínios	DC1	DC2	DC3
Origem (km)	(45, 25)	(82, 82)	(124, 124)
Dimensões (km)	100 x 170	63 x 66	21 x 29
Resolução (m)	1000	500	50 x 100
Nº de pontos da malha	18981	16632	12350

O espaço espectral foi definido através de um intervalo de frequências entre 0.04 Hz e 1 Hz com 24 intervalos distribuídos numa escala logarítmica e o espaço direccional foi resolvido com um intervalo $\Delta\theta=4^\circ$ num círculo completo de 360° . Uma vez que o período em análise é caracterizado por uma forte ondulação, a frequência mínima foi definida de modo a que o modelo incluísse as frequências mais baixas, correspondentes à ondulação.

Na descrição dos diferentes processos físicos envolventes na propagação da onda até à costa, foram utilizadas as formulações por omissão do SWAN, com excepção do fenómeno de *whitecapping* onde se optou pela formulação mais recentemente proposta por van der Westhuysen et al. (2007). Mulligan et al. (2008) verificaram esta nova representação e obteve, em geral, melhores resultados numéricos.

4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

4.1 TESTES DE SENSIBILIDADE ÀS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA DE MAR

Duas diferentes implementações do modelo WAM foram utilizadas para o forçamento na fronteira de mar no modelo SWAN: uma proveniente de Puertos del Estado (Carretero et al., 2000) em que o modelo WAM é forçado por um campo do vento do modelo mesoscala HIRLAM, e outra integrada no projecto HIPOCAS (Pilar et al., 2008) em que foi utilizado um campo do vento do NCEP para forçar o modelo WAM. Ambas as bases de dados foram fornecidas a $38^\circ\text{N } 10^\circ\text{W}$, única localização disponível.

Estando disponíveis duas diferentes resoluções do campo do vento, foi escolhida a maior, de 5.6 km.

De modo a fazer uma análise quantitativa dos resultados do modelo SWAN face a diferentes condições de fronteira (PdE e HIPOCAS) foram calculadas estatísticas de erro, apresentadas na Tabela 3.

As estatísticas foram calculadas de 3 em 3 horas, com início as 12 UTC do dia 24 e fim às 12 UTC do dia 30 do mês de Janeiro e entre o dia 5 às 12 UTC e 10 às 21 UTC de Fevereiro do ano de 2001.



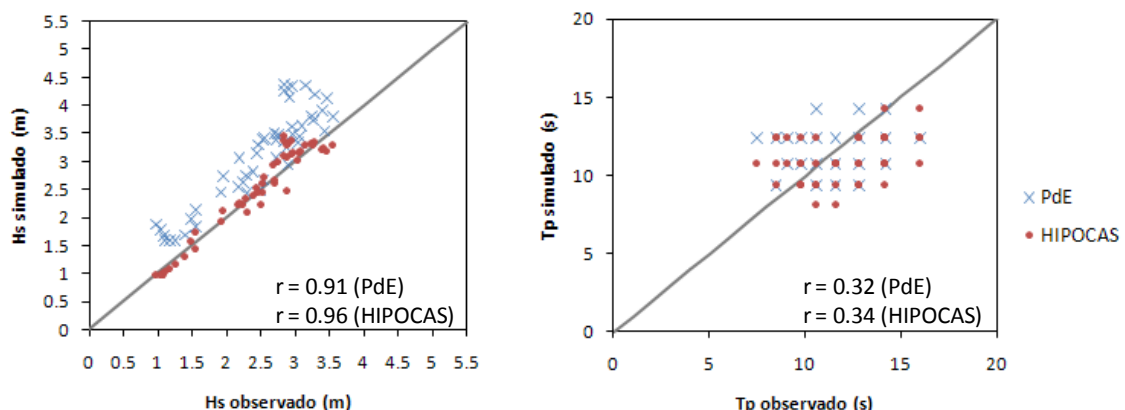
Tabela 3 - Estatísticas de erro para as diferentes implementações do modelo WAM (PdE e HIPOCAS)

		Hs			Tp			Dp	
		RMSE (m)	ME (m)	SI	RMSE (s)	ME (s)	SI	RMSE (°)	ME (°)
Janeiro	PdE	0.72	-0.62	0.29	2.39	0.16	0.20	9.27	-2.47
	HIPOCAS	0.21	-0.04	0.09	2.48	1.05	0.21	10.11	-4.67
Fevereiro	PdE	0.95	-0.55	0.37	2.31	-0.83	0.21	15.62	0.70
	HIPOCAS	0.62	-0.18	0.24	2.31	0.03	0.21	14.93	-0.20

Através das estatísticas de erro calculadas verifica-se que, em geral, os resultados numéricos do modelo SWAN são próximos dos valores medidos pelo ADCP, para os dois tipos de condições de fronteira de mar admitidos.

Para o valor de altura significativa, observa-se que há uma maior concordância quando o SWAN é forçado com os dados do HIPOCAS, facto que pode ser verificado pelos valores do RMSE, ME e SI. Pode ser ainda observado, através do sinal negativo no valor médio do erro que há uma certa sobrestimação dos valores de Hs por parte do modelo em ambas as situações. O Scatter Index é uma estatística adimensional muito utilizada na comparação de modelos de agitação marítima, podendo ser descrita em percentagem. Na literatura constata-se que o valor de SI varia, para a altura significativa, entre os 20% para previsões feitas por modelos de agitação marítima e campos de ventos de boa qualidade e os 60% para previsões realizadas forçando campos de ventos de menos precisão (Howard et al., 2009)

Para além da análise quantitativa, foram ainda realizados gráficos de dispersão (Figura 8) e de evolução temporal (Figura 9) para a altura significativa e período de pico, para os períodos de Janeiro e Fevereiro.





6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

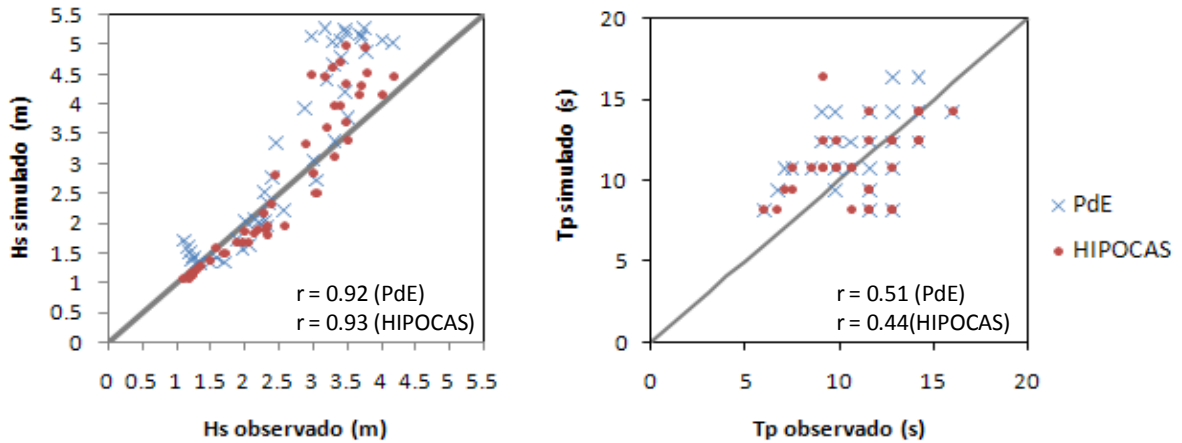


Figura 8 – Gráficos de dispersão dos valores simulados, com as diferentes implementações, e observados da altura significativa (Hs) e período de pico (Tp), para os períodos de Janeiro (em cima) e Fevereiro (em baixo).

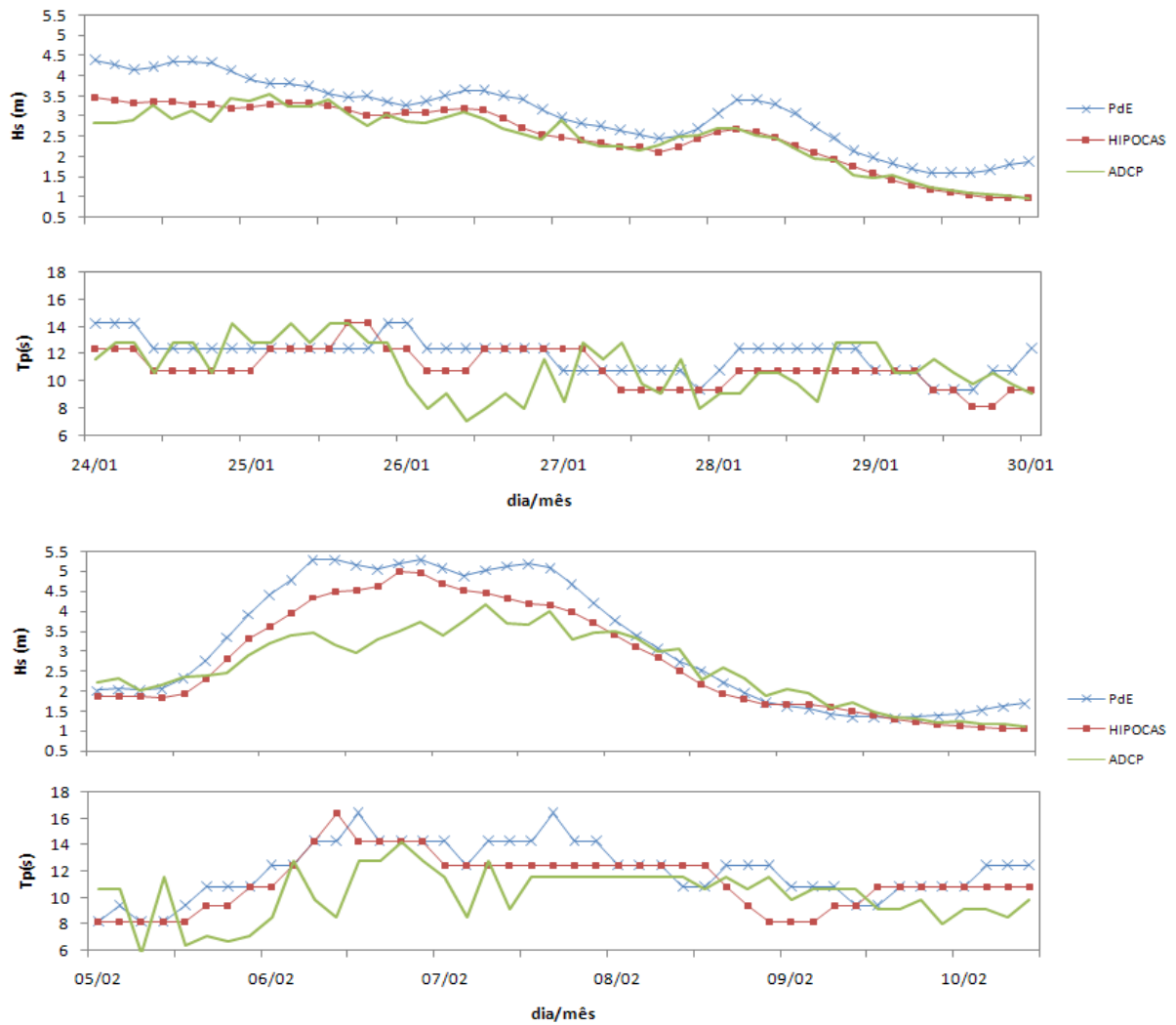


Figura 9 – Evolução temporal da altura significativa (Hs) e período de pico (Tp) resultantes do forçamento na fronteira de mar com diferentes parâmetros integrais e observações, para os períodos de Janeiro (em cima) e Fevereiro (em baixo).



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Através dos gráficos de dispersão e coeficientes de correlação calculados confirmam-se as conclusões anteriormente retiradas, isto é, existe uma boa concordância entre os valores simulados e os valores observados, havendo uma maior precisão quando o SWAN é forçado com os parâmetros integrais do HIPOCAS. É de referir que para o período de pico os valores são menos bons, pois é um parâmetro especial já que é um valor único, susceptível de se agrupar em patamares.

Pode ser ainda observado pela Figura 9, que a evolução temporal dos parâmetros calculados é muita próxima dos valores medidos.

No mês de Fevereiro, a tempestade era mais intensa sendo a resposta do modelo menos eficiente.

4.2 TESTES DE SENSIBILIDADE AO CAMPO DO VENTO

Foram realizadas duas simulações distintas com diferentes resoluções horizontais: uma de 12.9 km e outra de 5.6 km.

No ponto anterior desta comunicação verificou-se que, em geral, ao utilizar na fronteira de mar os parâmetros integrais do modelo WAM resultantes do projecto HIPOCAS, os resultados numéricos obtidos no modelo SWAN são melhores do que forçando o modelo com os dados provenientes de Puertos del Estado.

Deste modo, para a avaliar a sensibilidade do modelo face ao forçamento de diferentes resoluções do campo do vento, utilizaram-se como condição de fronteira de mar os dados oriundos do projecto HIPOCAS.

Foram calculadas estatísticas de erro que podem ser verificadas na Tabela 4 para as simulações com diferentes resoluções e para os períodos em análise, Janeiro e Fevereiro.

Tabela 4 - Verificação das estatísticas de erro da altura significativa, período de pico e direcção média para a frequência de pico

		H_s			T_p			D_p	
		RMSE (m)	ME (m)	SI	RMSE (s)	ME (s)	SI	RMSE (°)	ME (°)
Janeiro	5.6 km	0.21	-0.06	0.09	2.48	1.05	0.21	10.11	-4.67
	12.9 km	0.21	-0.04	0.09	2.48	1.05	0.21	10.11	-4.67
Fevereiro	5.6 km	0.62	-0.18	0.24	2.31	0.03	0.21	14.93	-0.20
	12.9 km	0.62	-0.18	0.24	2.31	0.03	0.21	14.93	-0.20

De modo a obter uma análise qualitativa foram ainda realizados gráficos de dispersão para os valores simulados e medidos de altura significativa e período de pico.

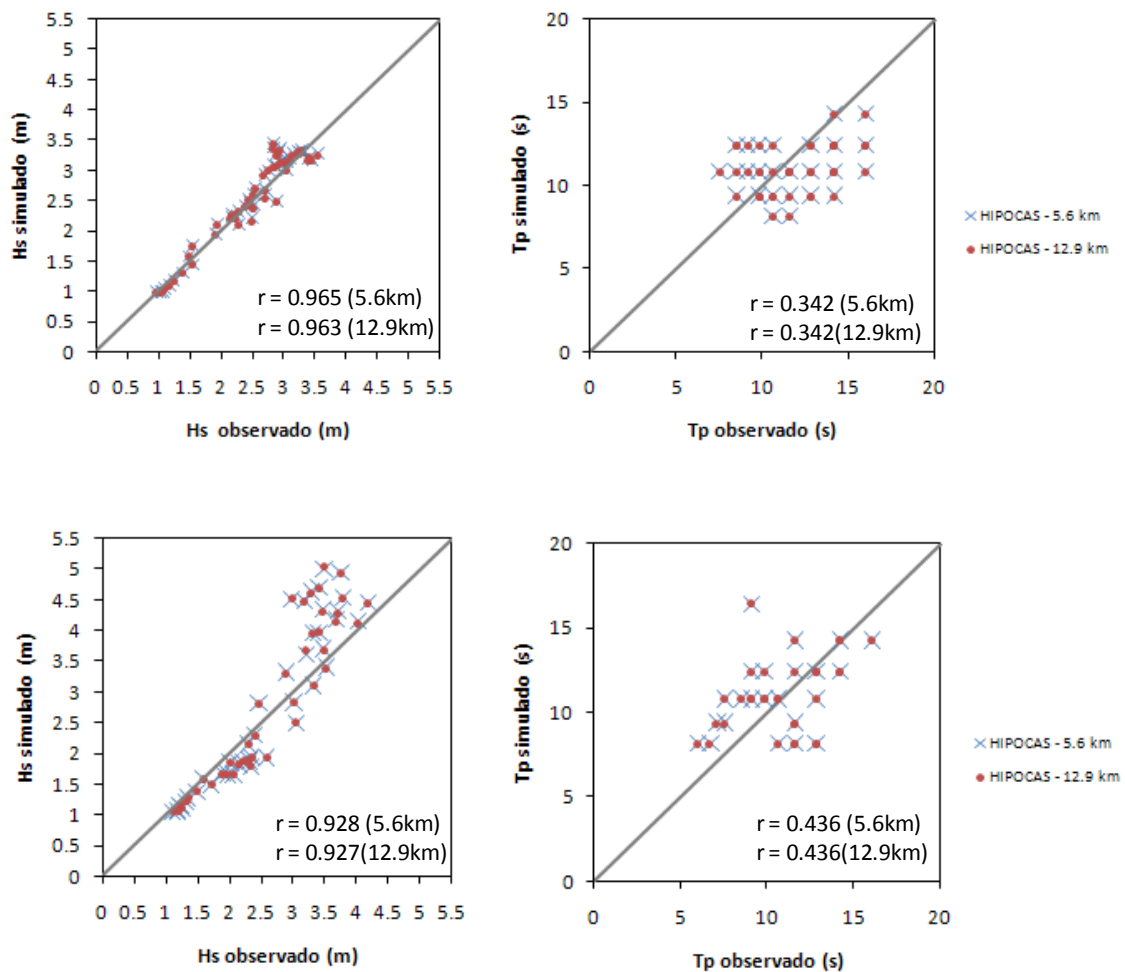


Figura 10 - Gráficos de dispersão dos valores simulados, com as diferentes resoluções do campo do vento, e observados da altura significativa (Hs) e período de pico (Tp), para os períodos de Janeiro (em cima) e Fevereiro (em baixo).

Através das estatísticas de erro calculadas e dos gráficos de dispersão, constata-se que não há diferença significativa nos resultados quando o SWAN é forçado com diferentes resoluções do campo do vento. Para este facto, pode concorrer a circunstância de os episódios apresentados serem caracterizados por fortes tempestades geradas no Atlântico Norte. Nestes casos a vaga perde importância relativa em relação à ondulação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como principal objectivo a aplicação e análise do desempenho do modelo SWAN, na zona adjacente a Pinheiro da Cruz, considerando, especialmente, o



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

regime não estacionário. Tal significou forçar o SWAN com um campo do vento variável e impor na fronteira condições dependentes do tempo.

As condições de fronteira de mar e o campo do vento desempenham um papel essencial no comportamento do modelo SWAN. Deste modo, foi feita uma análise de sensibilidade face ao forçamento na fronteira de duas diferentes implementações do modelo WAM: uma proveniente de Ente Público, Puertos del Estado, Espanha, em que o modelo WAM é forçado pelo campo do vento do modelo de mesoscala HIRLAM (Carretero et al., 2002) e outra que esteve integrada no projecto HIPOCAS (*Hindcast of Dynamical Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*) (Pilar et al., 2008), onde forçam o modelo WAM com um campo do vento do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*).

Utilizaram-se ainda como termos fonte da equação (3.1) campos do vento com diferentes resoluções, e avaliou-se a resposta do modelo. O campo do vento variável foi obtido através de simulações do modelo atmosférico ALADIN com duas diferentes resoluções: 5.6km e 12.9 km.

A comparação com o ADCP envolveu essencialmente parâmetros integrais, nomeadamente altura significativa, período de pico e direcção média para a frequência de pico. É de sublinhar que os dois episódios de verificação correspondiam a duas situações de tempestade no Atlântico Norte, com forte prevalência de ondulação, constituindo um teste muito exigente ao comportamento do modelo SWAN.

Constatou-se nesta análise, que os resultados numéricos do modelo são muito próximos das medições realizadas pelo ADCP, sendo que são melhores, verificando-se especialmente no valor do SI, quando o SWAN é forçado com os parâmetros integrais do HIPOCAS.

Denotou-se que não há impacto significativo do modelo SWAN quando forçado com um campo do vento de resolução mais elevada. Tal facto é importante para estudos futuros análogos já que deste modo não é necessário um custo computacional tão elevado quando se recorre ao modelo ALADIN.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Puertos del Estado e ao Centro de Engenharia e Tecnologia Naval do Instituto Superior Técnico, pela disponibilidade dos dados do modelo WAM.

Os autores agradecem ainda ao Instituto Hidrográfico os dados do ADCP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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*, 104, C4, 7649-7666.



**6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009**

Carretero, J.C., Alvarez, E., Gomez, M., Perez, B., Rodriguez, I., (2000). Ocean forecasting in narrow shelf seas: application to the Spanish coasts, *Coastal Engineering*, **41**, 269-293.

Howard, K., Zarillo, G., Splitt, M., Lazarus, S., Chiao, S., Santos, P., Sharp, D., 2009, *The impact of atmospheric model resolution on a coupled wind /wave forecast system*, Proc. 16th Conf. on Air-Sea Interaction, Phoenix, Arizona, 12-15 January 2009, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM P9.2.

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

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, 532 p.

Mulligan, R. P., Bowen, A. J., Hay, A. E., van der Westhuysen, A. J., and Battjes, J. A., 2008: Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, C03008.

Pilar, P., Guedes Soares, C. e Carretero, J.C., (2008), "44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast", *Coastal Engineering*, Vol. 55 (11), pp. 861-871.

Pires Silva, A.A., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2000), 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., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2001), Verificação do modelo SWAN com dados ADCP na Costa Oeste Portuguesa, *Actas 2^{as} Jornadas Portuguesas Eng. Costeira e Portuária*, PIANC – DP, 17-19 Outubro, Sines.

Pires Silva, A.A., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura Soares, C. e Coelho, E. (2002), Wam/Swan Simulations in an Open Coast: Comparisons with ADCP Measurements, *Littoral 2002, The Changing Coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto – Portugal.

Radnóti, G., R. Ajjaji, R. Bubnová, M. Caian, E. Cordoneanu, K. von der Emde, J.-D. Gril, J. Hoffman, A. Horányi, S. Issara, V. Ivanovici, M. Janousek, A. Joly, P. LeMoigne, and S. Malardel, 1995: The spectral limited area model ARPEGE-ALADIN. PWPR Rep. Series, 7, WMO TD, 699, 111-118.

Rogers, W., J. Kaihatu, L. Hsu, R. Jensen, J. Dykes, and K. Holland (2007), Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight, *Coastal Eng.*, **54**, 1 –15.

Santos, L.Q., Ventura-Soares, C., Onofre, J.M. (2001), Utilização de Equipamentos Acústicos para Medição de Parâmetros de Agitação, *Actas 2^{as} Jornadas Portuguesas Eng. Costeira e Portuária*, PIANC – DP, 17-19 Outubro, Sines.

Teles, M.J. (2008): *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

van der Westhuysen, A., M. Zijlema, and J. Battjes (2007), Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water, *Coastal Eng.*, **54**, 151–170.