

PREVISÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NO ESTUÁRIO DO TEJO UTILIZANDO O MODELO SWAN

João A. SANTOS

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 34 51, jasantos@lnec.pt

Rui CAPITÃO

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 36 88, rcapitao@lnec.pt

Alexandre Braga COLI

Oceanógrafo, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 37 56, abcoli@lnec.pt

Conceição Juana E. FORTES

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351 21 844 34 46, jfortes@lnec.pt

Paula FREIRE

Geóloga, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.21 844 36 37, pfreire@lnec.pt

RESUMO

O estuário do Tejo apresenta na margem esquerda, entre Alcochete e Alfeite, praias de areia que resultam tipicamente da acção da agitação marítima gerada pelo vento no interior do estuário. A génese e a evolução destas praias foram estudadas por Freire (2003) e Freire e Andrade (1999).

Encontra-se actualmente a decorrer um projecto de investigação – BERNAL – que tem como objectivo o estudo da previsão da evolução a curto e médio prazo deste tipo de praias. Para este fim, torna-se necessário conhecer, quer a agitação marítima gerada por ondas de vento em zonas confinadas (como o estuário do Tejo) quer o modo como se efectua a propagação dessas ondas no interior do estuário até à sua rebentação na praia. Um modelo adequado para tratar este tipo de problemas é o modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), pois trata-se de um modelo numérico de geração, propagação e dissipação da agitação marítima irregular em zonas costeiras do tipo da que se pretende estudar.

Nesta comunicação, descreve-se a aplicação do modelo SWAN na previsão da geração de agitação marítima no estuário interno do Tejo por um campo de ventos incidente. Identificam-se os fenómenos passíveis de serem modelados com este modelo (considerados relevantes para a situação em estudo) e faz-se uma análise da sensibilidade dos valores da agitação marítima à velocidade e à direcção do vento no estuário, na vizinhança da praia do Alfeite. Efectuam-se também algumas medições *in situ*, para caracterização da agitação marítima nesse local e comparam-se estas medições com os resultados numéricos obtidos, de modo definir uma metodologia adequada à área em estudo.

Palavras-chave – Praias estuarinas, Geração de Ondas, Modelos Numéricos, Propagação da Agitação Marítima.

1 INTRODUÇÃO

A morfologia particular do estuário do Tejo, caracterizada por uma zona interior extensa, de baixos fundos e alinhada à direcção dominante dos ventos, favorece a presença de praias de areia na sua margem esquerda entre Alcochete e Alfeite. Estas praias resultam exclusivamente da acção da agitação marítima de geração local, ao contrário das que se encontram na embocadura do estuário que são afectadas por ondas oceânicas. A génese e a evolução destas praias foram estudadas por Freire (2003) e Freire e Andrade (1999) estando actualmente em curso o estudo da previsão da evolução a curto e médio prazo deste tipo de praias.

Um dos factores determinantes para alcançar este objectivo é a modelação não só da geração de ondas pelo vento em bacias de dimensões limitadas, mas também da propagação dessas ondas no interior do estuário até à sua rebentação na praia. Embora esteja prevista a acoplagem de um modelo de geração de ondas pelo vento com modelos numéricos de propagação, numa primeira fase decidiu-se averiguar a possibilidade de utilizar um único modelo numérico para resolver todo o problema.

Para tal, optou-se pelo modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1999) que permite caracterizar a agitação marítima gerada pelo vento em zonas costeiras. Este modelo considera os fenómenos de geração, propagação, atenuação e interacção não linear entre ondas e correntes. Este modelo é normalmente utilizado em zonas costeiras abertas, havendo poucas aplicações realizadas em zonas confinadas, como estuários ou lagos.

Pretende-se com esta comunicação ilustrar a aplicação do modelo SWAN na previsão da geração de agitação marítima numa zona confinada, mais concretamente no estuário do Tejo, por um campo de ventos incidente. O trabalho desenvolvido compreendeu as seguintes fases:

- ▶ Realização de alguns testes de sensibilidade com o modelo SWAN, utilizando como forçamento campos de vento e de altura de maré idealizados, de modo a identificar as situações susceptíveis de causar geração e propagação de agitação que afectasse a praia do Alfeite;
- ▶ Caracterização do regime de ventos na zona do Alfeite e, para as situações mais frequentes, aplicação do modelo SWAN de modo a caracterizar a agitação junto à praia do Alfeite;
- ▶ Por último, simulação de um período em 21 de Julho de 2005, dia em que se procedeu a medições no interior do estuário do Tejo, recorrendo a dados de vento do boletim meteorológico do Instituto de Meteorologia e comparação dos resultados das previsões com as referidas medições de agitação marítima *in situ*.

Em Vieira e Bernardino (2005) apresenta-se um estudo de cariz semelhante, utilizando-se também o modelo SWAN para avaliar a agitação marítima gerada pelo vento no interior do estuário, mas com o enfoque na determinação da agitação marítima em frente à Base Naval do Alfeite.

Nesta comunicação, apresenta-se primeiramente uma descrição do modelo SWAN, a descrição do local de estudo e sua caracterização geral em termos de ventos. Seguidamente, apresentam-se as medições realizadas no dia 21 de Julho de 2005. Finalmente, efectuem-se os cálculos com o modelo SWAN para caracterização da agitação marítima junto à praia do Alfeite e apresentam-se e discutem-se os resultados.

2 O MODELO SWAN

O modelo SWAN - acrónimo de *Simulating WAVes Nearshore* - é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento

pela *Delft University of Technology* da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados o que permite a fácil actualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário.

Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona em estudo é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da acção da agitação marítima. Com esta representação, é possível a aplicação do modelo em áreas onde o crescimento da agitação marítima pela acção do vento seja notável ou onde estados de mar, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas, utilizando uma malha “rectangular”.

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, a dispersão direcciona, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional.

3 O ESTUÁRIO DO TEJO

3.1 DESCRIÇÃO

O estuário do Tejo é um dos maiores estuários da Europa ocupando uma superfície aproximada de 320 km², desde a embocadura até Vila Franca de Xira, limite montante da intrusão salina em condições hidrológicas normais, até à foz do rio Tejo. O estuário apresenta uma região interior extensa e pouco profunda, desenvolvendo-se segundo a direcção NNE-SSW, e um canal de embocadura, estreito e profundo, orientado a ENE-WSW (Figura 1).



Figura 1 – Vista aérea do estuário do Tejo (World Wind - NOAA, 2005).

O estuário interno é caracterizado por formas de acumulação longitudinais, cortadas por canais de maré, e extensas zonas de espreiados, principalmente junto à margem esquerda, possibilitando o desenvolvimento de importantes áreas de sapal. A extensão da zona interior e o seu alinhamento à direcção dominante dos ventos na região, do quadrante norte, favorece a presença de praias de areia

na sua margem esquerda entre Alcochete e Alfeite actuadas exclusivamente por ondas de geração local. O estuário do Tejo é um sistema mesotidal sujeito a uma maré com período semi-diurno. A amplitude média no Terreiro do Paço é de 3.2 m em maré viva e 1.5 m em maré morta.

A zona de interesse deste trabalho é a praia do Alfeite que se estende por cerca de 2 500 m, entre o Seixal e a Base Naval do Alfeite (Figura 1). A praia, de areia de grão médio a grosseiro, está instalada na vertente norte de uma restinga e é limitada inferiormente por um raso de maré arenoso com cerca de 300 m de largura.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VENTOS

Em INMG(1991) apresenta-se a distribuição, por rumos, dos valores das frequências anuais de valores médios de velocidade do vento v (km/h), no período de observações de 1954 a 1980 na estação Montijo-Base Aérea, Figura 2a. Nos meses correspondentes ao Verão, verificam-se maiores velocidades de vento associadas a rumos de Norte, os quais podem ser causadores de agitação mais gravosa junto ao local em estudo. Assim, na Figura 2b apresenta-se a distribuição, por rumos, dos valores sazonais – Verão, das frequências acumuladas de valores tri-horários da velocidade do vento no período de 1973 a 1985, mas na estação de Lisboa-Portela, Mendes *et al.* (1989), uma vez que para a estação Montijo-Base Aérea tal informação não está disponível.

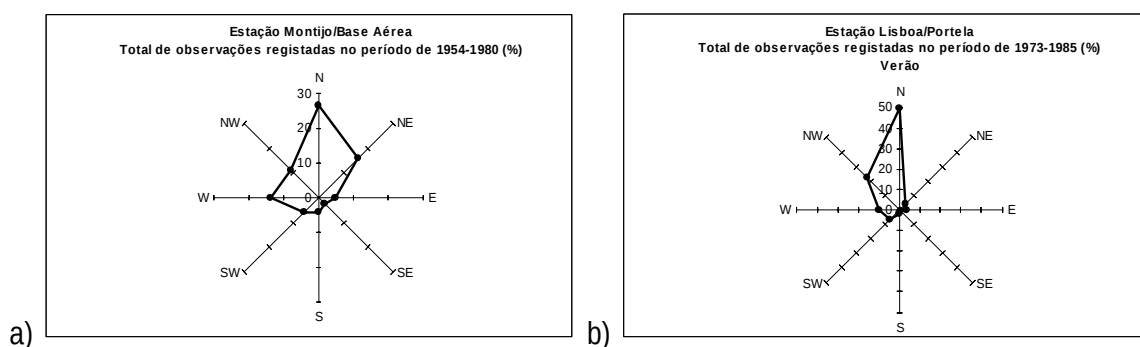


Figura 2 – a) Distribuição, por rumos, das frequências anuais de valores médios de velocidade do vento - Estação Montijo-Base Aérea. b) Distribuição, por rumos, das frequências acumuladas de valores tri-horários da velocidade do vento - Estação Lisboa-Portela. (Verão)

Com base nos dados da estação do Montijo-Base Aérea, verifica-se que os rumos mais frequentes, por ordem decrescente, são: N, NE, W, NW, SW, E, S e SE. Para os rumos de SW, S, N e W verificam-se os maiores valores de velocidades médias, entre 18.8 km/h e 22 km/h. O valor médio do número de dias no ano em que se verificaram velocidades médias superiores a 36 km/h e a 55 km/h é de 21.3 e 1.5 dias respectivamente.

A Figura 2b mostra que no Verão o rumo de N é o mais frequente (50% das observações). Em Mendes *et al.* (1989) indica-se que a velocidade média deste período é 6.3 m/s e a máxima 16.3 m/s.

3.3 MEDIÇÕES REALIZADAS IN SITU

3.3.1 INTRODUÇÃO

A campanha de medições, designada por BERNAL II, envolveu a aquisição de dados de vento, correntes e agitação marítima, para além do levantamento topográfico de perfis de praia e recolha de

sedimentos. A aquisição de dados de agitação marítima incluiu a utilização de uma sonda resistiva, 7 transdutores de pressão e um correntómetro electromagnético. Os resultados discutidos neste trabalho referem-se aos da sonda resistiva obtidos em 3 períodos de tempo em 21 de Julho de 2005, num ponto de coordenadas X=113553.70 m; Y= 187910.50 m, Datum IGOE de Lisboa.

Estes resultados, apesar de obviamente não permitirem o estabelecimento de nenhum regime de agitação marítima, podem, no entanto, servir como indicação do tipo agitação marítima observável no local de estudo.

Quadro 1 – Características dos registos das medições.

Hora Início	Freq. aquisição(Hz)	TR (s)	Nome do Ficheiro
13:16	25	300	Medicao_13h21_5m
13:21	25	1200	Medicao_13h41_20m
19:01	25	1200	Medicao_19h21_20m

Procedeu-se aos registos da elevação da superfície livre cujas características se apresentam no Quadro 1. Estas medições estão representadas nas curvas a azul escuro (designadas “Original”) da Figura 3. Como se pode verificar, nestes sinais estão patentes componentes espúrias que importa eliminar de modo a obter-se o que se pretende da agitação marítima no local. Uma dessas componentes é o nível de maré astronómica (obtido a partir das tabelas de maré para a vizinhança do local de estudo), outra é a sobrelevação devido a efeitos meteorológicos. Estas componentes foram removidas do sinal original e as respectivas resultantes estão apresentadas, respectivamente, nas curvas representadas nas figuras a rosa e a azul claro e por “Sem tendência” e “Final (zero)”.

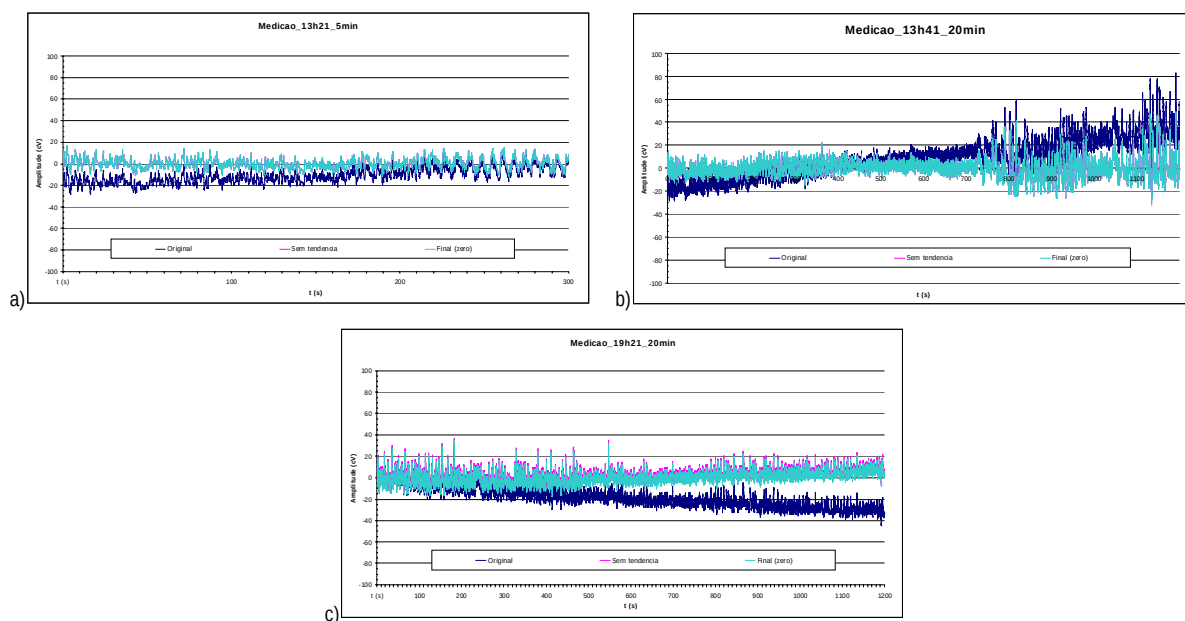


Figura 3 – Medições: a) das 13:16 às 13:21 (5 min); b) das 13:21 às 13:41 (20 min); c) das 19:01 às 19:21 (20 min).

3.3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise espectral dos sinais obtidos em cada um dos registos anteriores permitiu a identificação das principais características da agitação marítima no local para esses períodos. Para isso, foi utilizado o Módulo 7, de análise espectral de sinais, incluído no pacote de software SAM (Capitão, 2002). Assim, para os três períodos considerados, obtiveram-se os valores dos parâmetros HS, TZ e Tp da agitação marítima apresentados da Figura 4 à Figura 6:

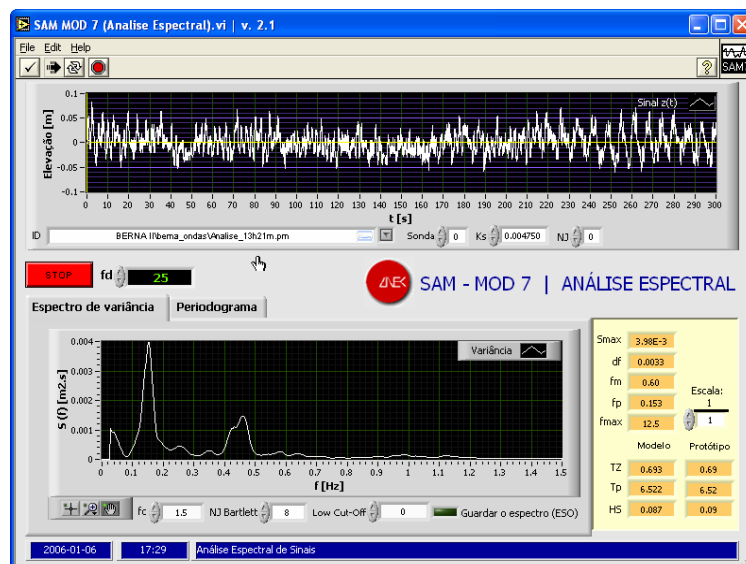


Figura 4 – Análise Espectral do sinal “Medicao_13h21m_5m”.

Para o sinal “Medicao_13h21m_5m”, de 5 minutos de duração, verificou-se, utilizando a constante de calibração da sonda respectiva, $k_s=0.004750$ m/V, e não praticando qualquer alisamento temporal no sinal inicial e um alisamento espectral fraco no espectro obtido, que:

- ▶ O espectro tem dois picos mais pronunciados. O mais intenso destes picos (para a frequência de pico $f_p=0.153$ Hz, $T_p=6.5$ s) refere-se à agitação marítima preponderante. Outro pico, igualmente importante, tem como frequência cerca de 0.46 Hz e período de cerca de 2.17 s. Existe ainda uma componente de longo período resultante provavelmente de passagens de embarcações na vizinhança do local de recolha dos dados durante o período de observação.
- ▶ A segunda parte do sinal (a partir de 150 s) revela algumas diferenças em relação à parte inicial, com a mesma possível causa acima apontada.
- ▶ A altura significativa registada ao longo do período de medição é de 0.09 m.
- ▶ O período médio TZ, de 0.7 s, calculado através dos momentos do espectro, apresenta um valor muito baixo.

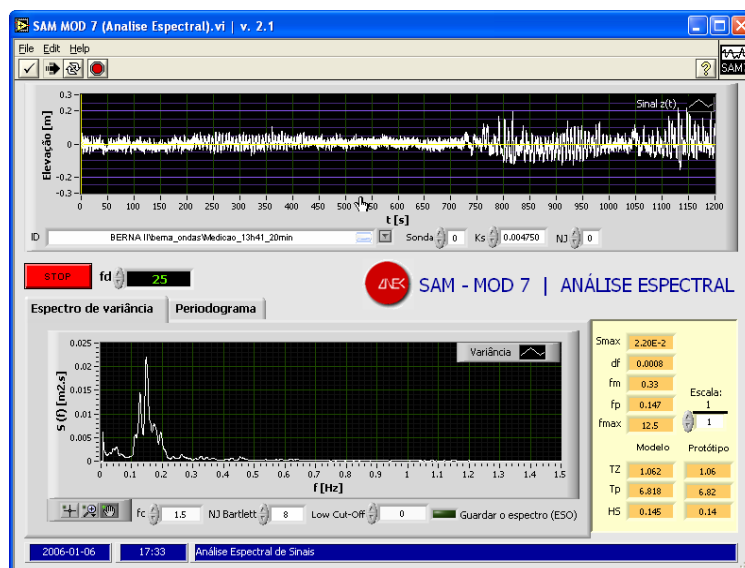


Figura 5 – Análise Espectral do sinal “Medicao_13h41m_20m”.

No registo obtido 20 minutos mais tarde, designado por “Medicao_13h41m_20m”, de 20 minutos de duração, verificou-se uma alteração substancial no estado do mar. Isto confirma a manifesta falta de estacionariedade do estado de mar naquele local, provocada pela passagem das embarcações nas imediações do local de recolha dos dados. Para o mesmo constante de calibração, $kS=0.004750$ m/V, não praticando qualquer alisamento temporal no sinal inicial e um alisamento espectral fraco no espectro obtido, verifica-se que:

- ▶ O espectro tem agora um único pico significativo para a frequência $f_p=0.147$ Hz, i.e., $T_p=6.8$ s, que se refere à agitação marítima preponderante. Este espectro tem uma forma razoavelmente parecida com o espectro empírico de JONSWAP.
- ▶ Também neste sinal (desta vez de maior duração) há uma segunda parte (a partir de 720 s) de características bastante distintas da parte inicial. As causas para esta diferença são as já apontadas.
- ▶ A altura significativa registada ao longo deste período de medição é agora de 0.15 m.
- ▶ O período médio TZ, é agora ligeiramente superior, mas ainda pequeno, 1.1 s.

Igualmente para um sinal de 20 minutos obtido mais tarde, “Analise_19h21m_20m”, de 20 minutos de duração, verificam-se diferenças assinaláveis nas suas características. Para o mesmo $kS=0.004750$ m/V, não praticando qualquer alisamento temporal no sinal inicial e um alisamento espectral fraco no espectro obtido, verifica-se que:

- ▶ O espectro tem um pico significativo para $f_p=0.123$ Hz, $T_p=8.1$ s, que se refere à agitação marítima preponderante mas há ainda um outro pico, de maior frequência, com alguma energia. Aparte esta perturbação do segundo pico, este espectro tem uma forma razoavelmente parecida com o espectro empírico de JONSWAP.
- ▶ Neste sinal nota-se um ligeiro incremento da sobre-elevação do nível médio do mar.
- ▶ A altura significativa registada ao longo do período de medição é agora de 0.10 m.
- ▶ O período médio TZ, é também muito reduzido, 0.78 s.

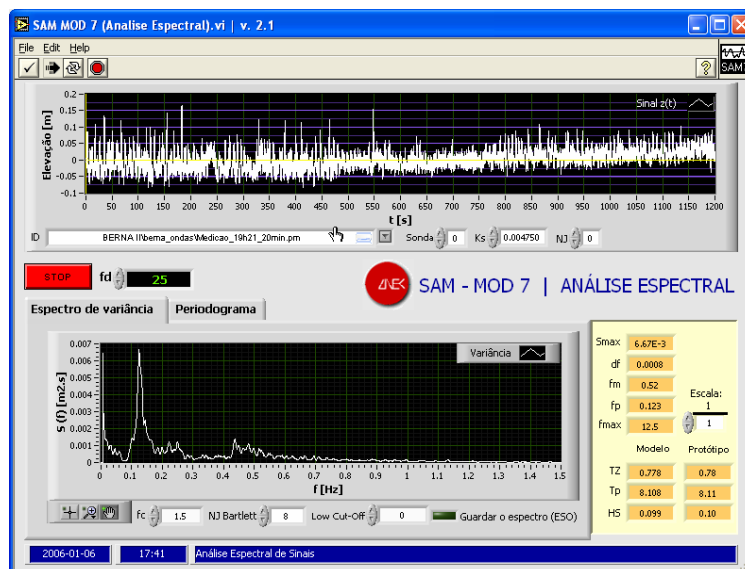


Figura 6 – Análise Espectral de “Analise_19h21m_20m”.

Da análise destes resultados, parece claro que os estados de mar obtidos a partir das medições efectuadas não se mantêm constantes ao longo do mesmo dia. Da observação directa do mar, verifica-se que as variações nas características da agitação marítima no local da recolha dos dados são devidas principalmente ao constante atravessamento do estuário por barcos de passageiros

(catamarans). É importante notar também que, pelo facto de as séries temporais analisadas serem pequenas, os resultados da caracterização da agitação marítima no local são pouco rigorosos e devem servir apenas como indicação geral.

4 APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

4.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO DE CÁLCULO

O domínio de cálculo do modelo SWAN foi discretizado através de duas malhas rectangulares, uma que cobre toda a região do estuário do Tejo, incluindo a sua embocadura e a zona marítima adjacente, e outra menor, encaixada na primeira, que contém a região próxima à Praia do Alfeite (Figura 7). A malha maior (global) possui as dimensões 42 km por 40.2 km, e é composta de unidades quadrangulares de 300 m de lado. A malha menor (encaixada) foi definida com uma resolução de 60 m, cobrindo um quadrado de 9 km por 9 km. Na malha encaixada foram definidos 3 pontos P1, P2 e P3, onde se extraíram resultados das execuções do SWAN (Figura 7).

A execução do SWAN foi realizada em duas etapas: na primeira considerou-se o estuário em repouso e introduziu-se um campo de ventos uniforme sobre todo o domínio; na segunda etapa, os resultados destas simulações serviram como condições de fronteira para a malha encaixada. Os resultados da segunda execução do SWAN foram utilizados para a caracterização da agitação marítima na Praia do Alfeite.

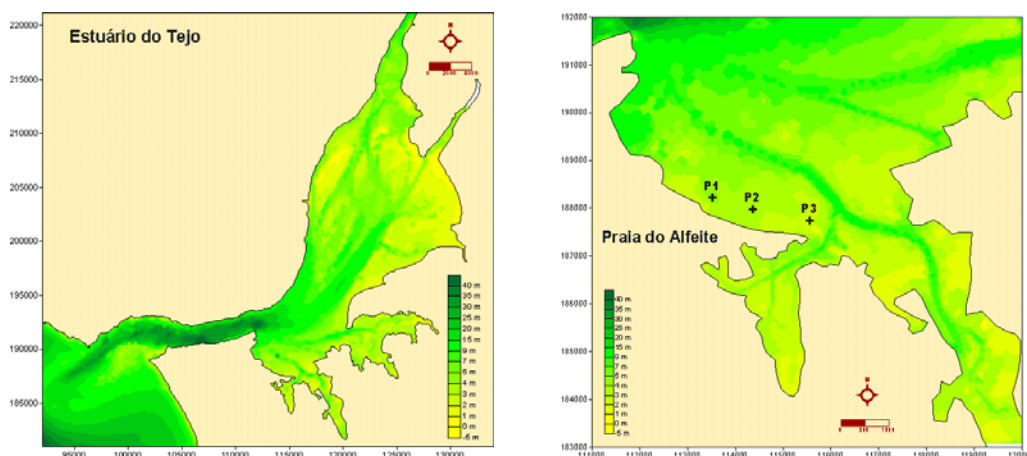


Figura 7 – Definição das malhas global e encaixada do modelo SWAN e localização dos pontos próximos da Praia do Alfeite para a obtenção dos resultados.

4.2 CONDIÇÕES DE CÁLCULO

Após alguns testes de utilização do modelo SWAN quanto à geometria e definição das malhas, do espectro direccional e dos pontos de colecta de dados, procedeu-se à sua execução considerando apenas o vento como variável forçadora do sistema. A execução do SWAN no estuário do Tejo e a caracterização da agitação na zona adjacente à Praia do Alfeite foram realizadas para as seguintes condições:

- ▶ Campo de ventos uniforme actuando sobre todo o domínio com velocidades constantes de 5, 10, 15 e 20 m/s, medidas à altura de 10 m (U_{10}), e rumos segundo as 16 direcções principais (N, NNE, NE, ENE, etc.);
- ▶ Altura de maré, também uniforme, numa situação de preia-mar de águas vivas (+3.8m ZH).

Para os cálculos do SWAN, o espectro direccionado foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica e de uma discretização em direcção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos ($\Delta\Theta = 2.5^\circ$). Todas as execuções, com a versão 40.41 do SWAN, foram realizadas em modo estacionário, sem a presença de correntes ou agitação marítima proveniente da barra do Tejo. Os fenómenos físicos incluídos foram a geração, a refacção, a difracção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (whitecapping). Foram consideradas também as interacções entre tríades de ondas (triad wave-wave interactions) e a geração de harmónicas (frequency shifting).

O SWAN apresenta como resultados, em qualquer ponto do domínio, nos pontos P1, P2 e P3, a altura significativa de onda (HS), os períodos médio (TZ) e de pico (TP), a direcção média (Θ_m) e de pico (Θ), o comprimento de onda (L), o nível de água (η) e a dispersão direccionada.

4.3 TESTE DE SENSIBILIDADE

Foram efectuados cálculos com o modelo numérico para campos de ventos uniformes sobre todo o domínio e com velocidades, medidas a 10 m de altura (U_{10}), iguais a 5, 10, 15, 20 e 25 m/s. Para cada um daqueles valores de velocidade, consideraram-se as dezasseis direcções principais para o rumo do vento (N, NNE, NE, ENE, ..., etc.) e o nível de maré em todo o domínio de cálculo foi o correspondente a uma situação de preia-mar de águas vivas (+ 3,8 m ZH). Assim, no total, foram simuladas 80 condições de cálculo distintas.

Da Figura 8 à Figura 11 apresentam-se os mapas com os vectores representando o produto do versor da direcção de pico do espectro da agitação pela altura significativa da mesma agitação num subconjunto dos pontos de cálculo. Os resultados dizem respeito a ventos cuja velocidade à altura padrão de 10 m é de 10 m/s, e cujos rumos são N, E, S e W. Nas figuras estão representados valores quer para todo o estuário, quer para a zona adjacente à praia do Alfeite.

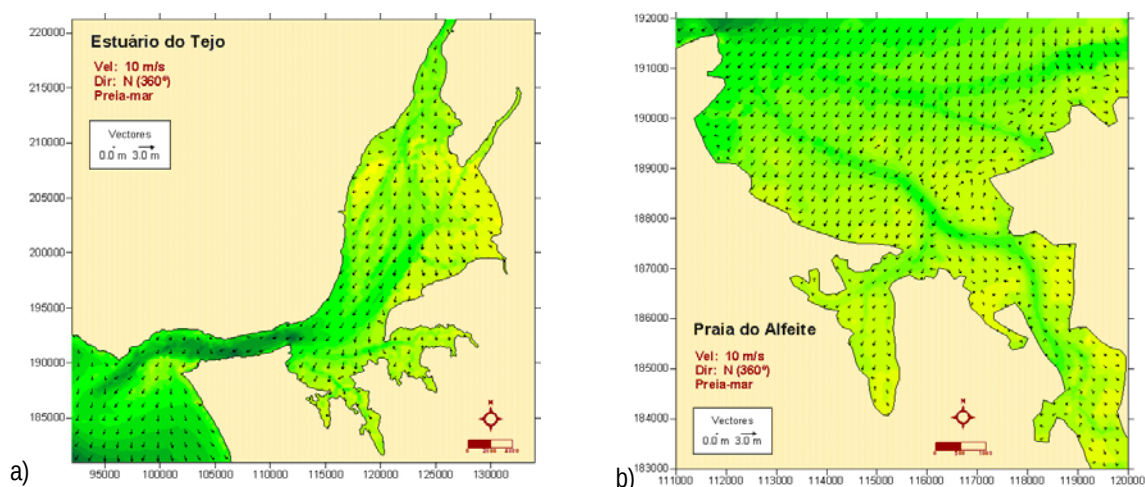


Figura 8 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s e rumo de 0° (N): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

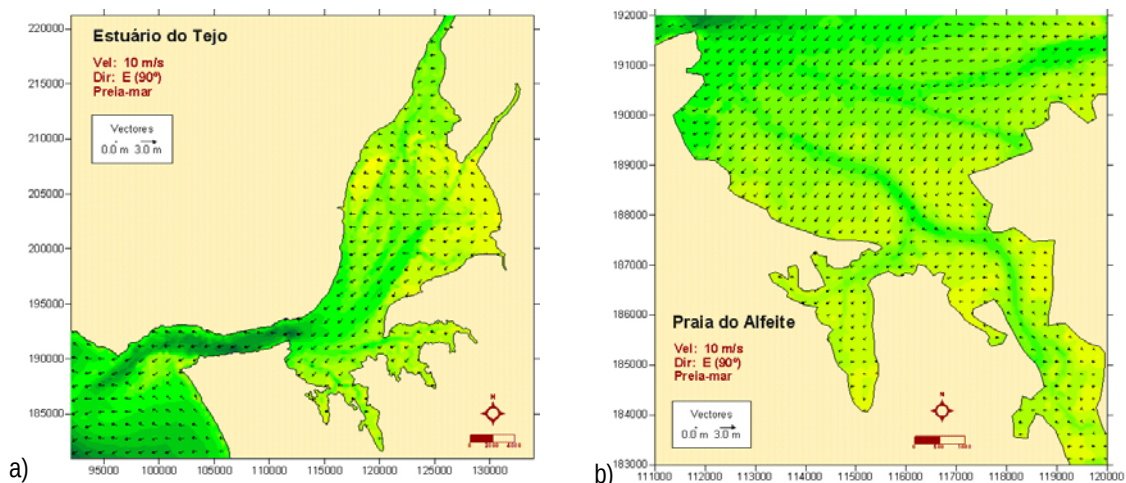


Figura 9 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s e rumo de 90° (E): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

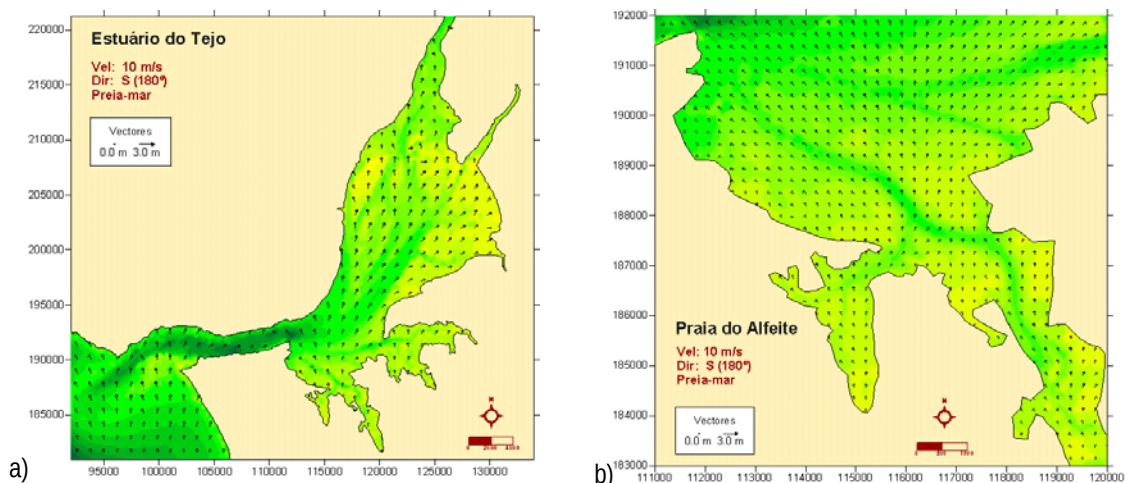


Figura 10 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s e rumo de 180° (S): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

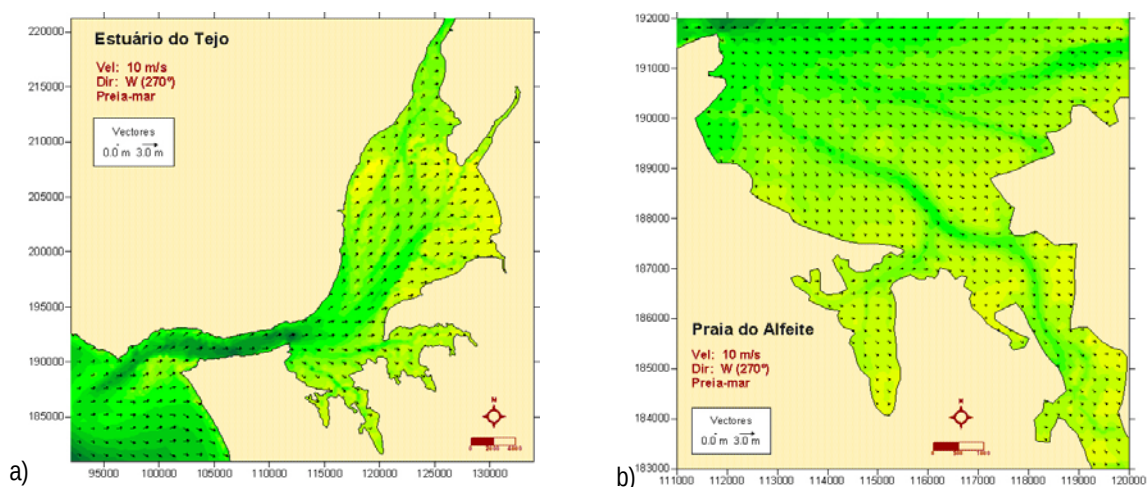


Figura 11 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s e rumo de 270° (W): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

As figuras mostram que o rumo do vento condiciona fortemente as características da agitação no interior do estuário do Tejo. A maior agitação observada no interior do estuário ocorre para os rumos do vento que têm associado o maior fetch. Assim, os rumos de Norte e de Sul produzem agitação com alturas significativas no interior do estuário (0.77 m e 0.74 m, respectivamente) superiores às obtidas com ventos provenientes dos rumos Este e Oeste (0.68 m e 0.66 m), Quadro 2.

Quadro 2 - Influência do rumo do vento nas características da agitação marítima prevista para o interior do estuário do Tejo obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s.

Rumo do vento	N	E	S	W
HS (m)	0.77	0.68	0.74	0.66
Θ_m (°)	339	83	199	266
Tm (s)	2.3	2.0	2.2	2.0

Na proximidade da praia do Alfeite, Quadro 3, verifica-se uma redução da altura significativa referente ao estado de agitação em relação à medida na zona central do estuário. Para o estado de agitação associado ao vento de Norte, tal dever-se-á certamente à refração e à rebentação da onda na sua propagação desde o meio do estuário até esta praia. Para os estados de agitação associados aos ventos de Este, Sul e Oeste é a redução do fetch da praia do Alfeite para esses rumos que pesa mais fortemente nos resultados, para além dos já referidos fenómenos. Com efeito, destes três estados de agitação, o que tem maior altura significativa é o associado ao rumo de Este - neste caso o fetch da praia do Alfeite inclui a bacia do Montijo - e o estado de agitação com a menor altura significativa é o associado ao rumo de Sul, aquele para o qual a praia do Alfeite tem menor fetch associado.

Quadro 3 - Influência do rumo do vento nas características da agitação marítima prevista para as proximidades da praia do Alfeite obtidas com o modelo SWAN vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s.

	Ponto											
	1				2				3			
Rumo	N	E	S	W	N	E	S	W	N	E	S	W
HS (m)	0.61	0.50	0.13	0.17	0.63	0.46	0.13	0.25	0.66	0.40	0.15	0.29
Θ_m (°)	20	56	157	315	13	53	168	308	12	60	154	309
Tm (s)	2.1	1.8	0.7	0.9	2.1	1.7	0.7	1.2	2.2	1.5	0.8	1.4

Da Figura 12 à Figura 14 mostra-se, para o maior fetch em relação à praia do Alfeite (associado ao rumo do vento de NNE, 22.5°), a influência de diferentes valores da velocidade do vento, 5, 10 e 20 m/s, na agitação gerada.

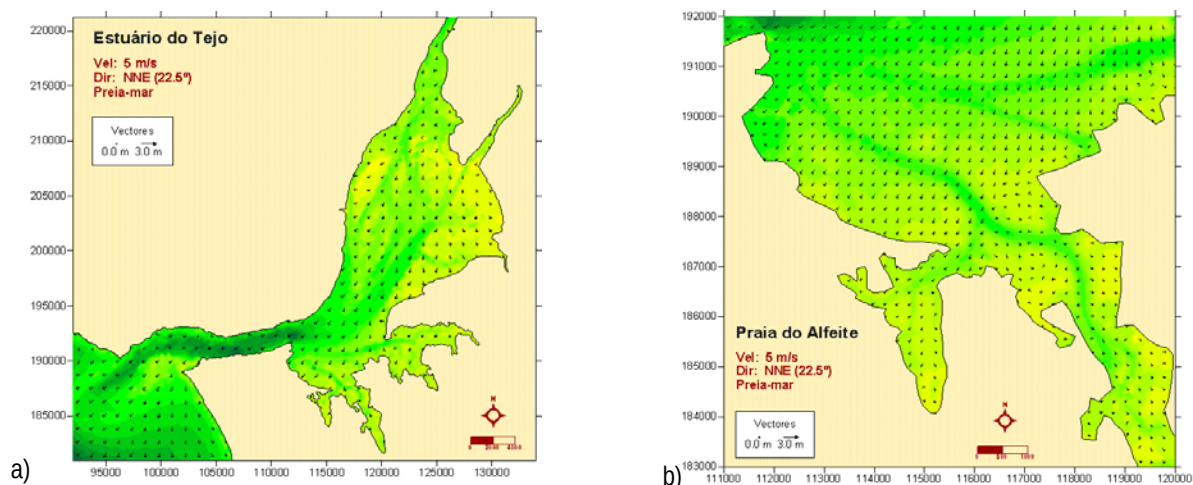


Figura 12 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 5 m/s e rumo de 22.5° (NNE): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

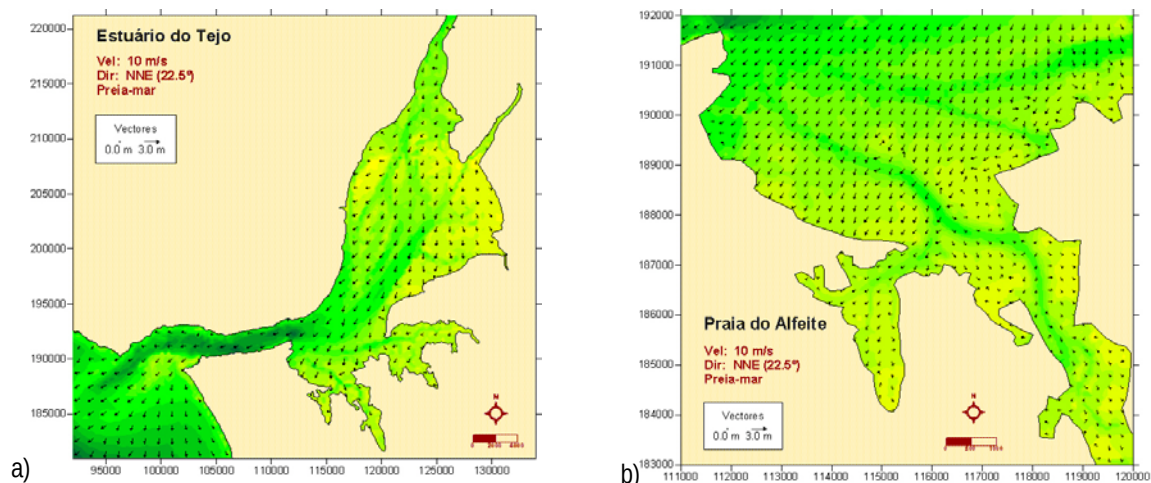


Figura 13 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 10 m/s e rumo de 22.5° (NNE): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

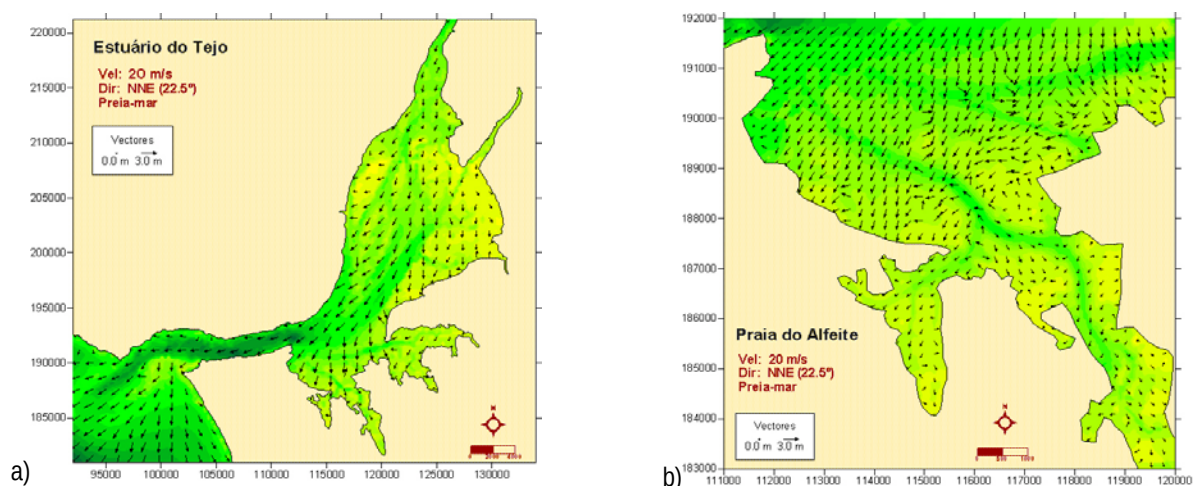


Figura 14 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 20 m/s e rumo de 22.5° (NNE): a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

As figuras anteriores mostram que, no interior do estuário, à medida que aumenta a velocidade do vento, aumentam os valores da altura significativa da agitação marítima correspondente, principalmente na zona central do estuário. A mesma tendência pode ser observada junto à praia do Alfeite, Quadro 4, embora aí as alturas significativas sejam menores devido aos fenómenos de refacção e rebentação.

Quadro 4 – Influência da velocidade do vento nas características da agitação marítima prevista para a zona adjacente à praia do Alfeite obtidas com SWAN para vento com rumo de NNE.

	Ponto								
	1			2			3		
U_{10} (m/s)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
HS (m)	0.29	0.70	1.30	0.29	0.68	1.19	0.28	0.69	1.04
Θ_m (°)	29	26	21	23	20	18	18	13	25
Tm (s)	1.5	2.2	3.2	1.5	2.2	3.0	1.5	2.2	2.8

Importa referir também que as oscilações observadas nos vectores da Figura 14, relativa à velocidade de 20 m/s, podem dever-se à falta de resolução da malha utilizada.

4.4 21 DE JULHO DE 2005

Por último, no conjunto de simulações realizadas inclui-se um caso em que a velocidade do vento é semelhante à observada no dia 21 de Julho de 2005, data em que foram medidas séries temporais da elevação da superfície livre em zona próxima da praia do Alfeite: módulo da velocidade 5 m/s, rumo do vento 315° (NW) (os valores indicados no boletim meteorológico desse dia são: velocidade do vento 4 m/s e rumo 310°). Na Figura 15 apresentam-se os resultados numéricos obtidos com o modelo SWAN para aquelas condições de vento e para um nível de maré de +3.80 m (Z.H.), quer em todo o estuário do Tejo, quer na zona adjacente à praia do Alfeite.

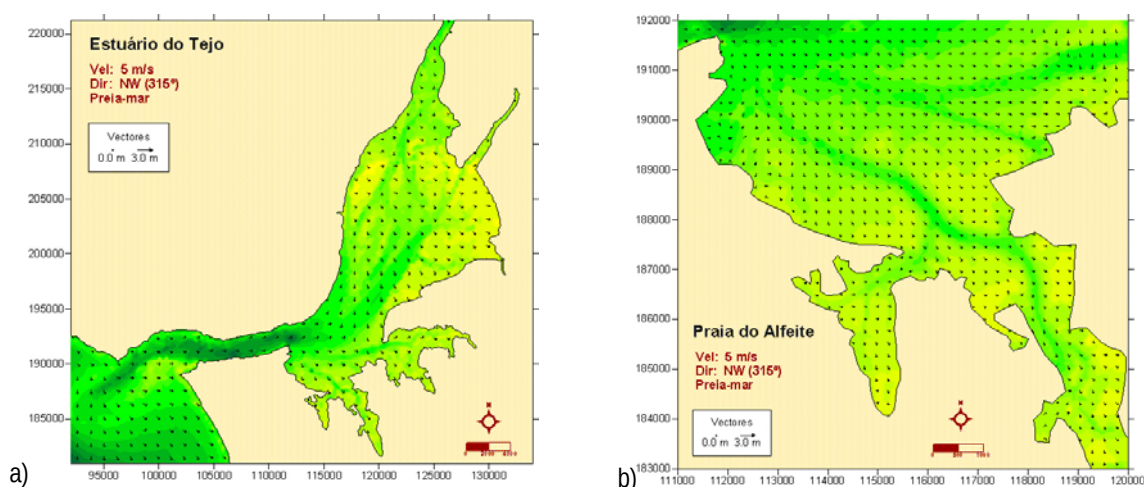


Figura 15 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 5 m/s e rumo de NW: a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

Os valores da altura significativa obtidos nos pontos P1, P2 e P3, estimados com o modelo numérico SWAN para as características de vento já referidas, foram, respectivamente, de 0.15, 0.19 e 0.21 m, Quadro 5. Estes valores são razoavelmente semelhantes aos obtidos na análise do registo “Medicao_13h41m_20m” medido na praia do Alfeite: altura significativa de 0.145 m e período médio de 1.1 s (ver Figura 4).

Quadro 5 - Características da agitação marítima prevista para a zona adjacente à praia do Alfeite obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade (U_{10}) de 5 m/s e rumo de NW.

	Ponto		
	1	2	3
HS (m)	0.15	0.19	0.21
Θ_m (°)	349	336	331
Tm (s)	1.0	1.1	1.2

É de notar que os resultados numéricos obtidos estão condicionados pelos seguintes factos:

- ▶ Não foram consideradas correntes de maré nas corridas do modelo;
- ▶ Admitiu-se um campo de correntes uniforme ao longo de todo o estuário, não se incluindo quaisquer variações devidas a rajadas de vento;
- ▶ O modelo SWAN não considera a difracção de ondas, nem as ondas geradas pelas embarcações que se deslocavam próximo da zona de estudo.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista a caracterização da agitação marítima na praia do Alfeite, uma praia no interior do estuário do Tejo, descreve-se nesta comunicação a utilização do modelo numérico SWAN para simular a geração de agitação marítima pelo vento no interior do estuário do Tejo.

Para verificar o modelo, foram realizadas algumas medições de agitação marítima, em 21 de Julho de 2005. Apesar de os resultados que se obtiveram não permitirem o estabelecimento de regimes de agitação marítima, uma vez que estes dados foram obtidos em condições de estado de mar não estacionário, servem como indicação do tipo de agitação marítima verificada no local de estudo. Assim, ao longo do dia de observações, verificou-se nos parâmetros HS, TZ e Tp a seguinte variação:

Parâmetro/Hora Início	13h16m	13h21m	19h01m
Altura significativa, HS	0.09	0.15	0.10
Período Médio, TZ	0.70	1.10	0.78
Período de pico, Tp	6.50	6.80	8.10

Esta variação é explicada pelo constante atravessamento do estuário por barcos de passageiros (catamarans), resultando assim que os estados de mar obtidos a partir das medições efectuadas não se mantêm constantes ao longo do mesmo dia.

A aplicação do modelo SWAN consistiu em varrer sistematicamente um conjunto de rumos e velocidades para o vento, considerado uniforme sobre a zona em estudo, para avaliar a sensibilidade das características da agitação marítima ao rumo e à velocidade do vento, quer na totalidade do estuário do Tejo, quer na zona adjacente à praia do Alfeite.

Os resultados mostraram que:

- ▶ A maior agitação no interior do estuário ocorre para os rumos do vento que têm associado o maior fetch. Assim, os rumos de Norte e de Sul produzem agitação com alturas significativas, no interior do estuário, da ordem de 0.76 m, superiores às obtidas com ventos provenientes dos rumos Este e Oeste, da ordem de 0.67 m.
- ▶ Na proximidade da praia do Alfeite, verifica-se uma redução da altura significativa referente ao estado de agitação em relação à estimada na zona central do estuário. Para o estado de agitação associado ao vento de Norte, tal dever-se-á certamente à refacção e à rebentação da onda na sua propagação desde a zona central do estuário até esta praia. Para os estados de agitação associados aos ventos de Este, Sul e Oeste, é a redução do fetch da praia do Alfeite para esses rumos que contribui principalmente para os resultados obtidos.

No conjunto de simulações referido, incluía-se também um caso em que a velocidade do vento era semelhante à média observada no dia 21 de Julho de 2005: módulo da velocidade de 5 m/s e rumo de 315° (NW). Para estas condições de vento, os resultados obtidos com o modelo numérico apresentam algumas diferenças em relação aos valores medidos naquela zona. Tal pode dever-se ao facto de nas corridas do modelo numérico não terem sido consideradas correntes de maré e assumir-se um campo de ventos uniforme ao longo de todo o estuário, não se incluindo quaisquer variações

devidas a rajadas. Por último, importa referir que o modelo SWAN não considera a difracção de ondas, nem as ondas geradas pelas embarcações que se deslocavam próximo da zona de estudo.

Finalmente, importa referir que os resultados experimentais alcançados neste trabalho têm carácter preliminar uma vez que se referem a períodos muito curtos e as metodologias, tanto experimentais como numéricas, requerem ainda alguns aperfeiçoamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos a Carlos Galvão e Ana Passarinho pela ajuda nas medições realizadas e a Branca Branco pela ajuda nas figuras e revisão do texto.

Os autores expressam o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos POCTI/CTA/48065/2002.

Este trabalho insere-se no projecto “BERNA – Evolução de praias em zonas de fetch restrito: análise experimental e numérica”, que é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da referência POCTI/CTA/45431/2002. Alexandre Coli agradece à FCT pelo financiamento da bolsa de doutoramento SFRH/BD/12488/2003.

BIBLIOGRAFIA

- Booij, N.R.; Holthuijsen, L.H.; Ris, R.C. (1996) – The SWAN wave model for shallow water, ICCE’96, Orlando, pp. 668-676.
- Capitão, R. (2002) – Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Coli, A.; Fortes, C.J.; Santos, J.A.; Capitão, R.; Carvalho, M.M. (2002). “Metodologia de propagação de regimes de agitação marítima do largo para a costa: análise dos modelos BACKTRACK-REFSPEC e SWAN”. 6º Congresso da Água (APRH), Porto.
- Freire, P. – Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa, LNEC, TPI 28, 380 pp., 2003.
- Freire, P.; Andrade, C. - “Wind-Induced Sand Transport in Tagus Estuarine Beaches. First Results”. Aquatic Ecology, 33, 1999, pp. 225-233.
- INMG (1991) - “O Clima de Portugal. Fascículo XLIX, Volume 2 – 2ª região. Lisboa
- Mendes, J. C.; Coelho, M. F.(1989) – Potencialidades da Energia Eólica (Estudos Preliminares, Volume I). INMG, Lisboa.
- Vieira, F.; Bernardino, M. (2005) - “Estudo da Geração e Propagação de Condições Extremas de Agitação Marítima no Estuário do Tejo”. 4ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Angra do Heroísmo, Outubro.