

CONTRIBUIÇÃO PARA A CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NA PRAIA DA GALÉ COM BASE EM DADOS DE CAMPO E MODELAÇÃO NUMÉRICA

¹Rui Reis, ²Selma Gabriel, ¹Conceição J.M.E. Fortes, ²Delminda Moura

¹Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1750-044, Lisboa, Portugal. Email: rreis@lnec.pt, jfortes@lnec.pt.

²Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve, Campus Universitário de Gambelas, 8005-139, Faro, Portugal. Email: smgabriel@ualg.pt, dmoura@ualg.pt.

RESUMO

Esta comunicação apresenta uma análise comparativa entre os dados medidos por diferentes equipamentos, durante uma campanha realizada na Praia da Galé, Algarve, de 6 a 12 de março de 2012 e os resultados obtidos com o modelo espectral SWAN e com o modelo do tipo Boussinesq COULWAVE. Usando os dados da boia do Instituto Hidrográfico (IH) fundeada ao largo de Faro como condições de fronteira do modelo SWAN, os resultados numéricos foram comparados com os dados medidos por um perfilador acústico (ADP) situado a $z=-6.5$ m, referido ao nível médio do mar. Por outro lado, os dados do ADP foram usados como condições de fronteira do modelo COULWAVE e os respetivos resultados numéricos, em termos de altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p) e velocidade horizontal da corrente, foram comparados com os dados medidos por transdutores de pressão e correntómetros eletromagnéticos colocados na zona intertidal. O objetivo final deste trabalho foi avaliar o desempenho de ambos os modelos na simulação das características de agitação marítima na zona em estudo, de modo a utilizar os referidos modelos na previsão de estados de agitação marítima para períodos de tempo maiores. Os modelos SWAN e COULWAVE foram capazes de simular os dados de agitação marítima medidos durante a campanha, tendendo o desempenho destes a piorar para locais mais próximos da costa. O parâmetro H_s foi melhor simulado pelos modelos, comparando com o T_p e a direção média de onda (Dir). Pela aplicação do COULWAVE, a velocidade horizontal foi satisfatoriamente simulada, tendo-se obtido melhores resultados quanto à magnitude dos valores do que à sua variação ao longo do tempo.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da morfodinâmica dos litorais rochosos, com particular ênfase para o conhecimento dos processos de erosão, está em curso o projecto “EROS – *Erosion of Rocky Shores – differences in protection promoted by sandy beaches and shore platforms*”. O principal objetivo deste projecto é comparar o desempenho relativo das plataformas rochosas e das praias arenosas, na protecção das arribas litorais, face à incidência das ondas e correntes. Neste sentido, procura-se estabelecer relações entre as condições de agitação marítima, a orientação dos sectores costeiros e a batimetria dos fundos.

O presente trabalho, recorrendo a dados medidos *in-situ* e a modelação numérica, contribui, no âmbito do projeto EROS, para a caracterização da agitação marítima na zona da praia da Galé (Algarve Central). Nesta zona, as arribas encontram-se em fase crítica de recuo e, nela, ocorrem lado a lado, plataformas litorais e praias arenosas, tornando possível observar a transformação das ondas em ambas as estruturas de sopé, para exatamente as mesmas condições de agitação marítima.

Uma campanha, realizada de 6 a 12 de março de 2012, permitiu a recolha e posterior análise de dados, através da instalação de instrumentos que medem parâmetros característicos da agitação marítima (ondas e correntes): um perfilador acústico (ADP), um velocímetro acústico (ADV), seis transdutores de pressão (PT) e três correntómetros eletromagnéticos (ECM).

Os modelos numéricos, SWAN (Booij *et al.* 1999) e COULWAVE (Lynett e Liu 2008) foram utilizados, neste trabalho, para propagar os dados de agitação marítima (parâmetros altura significativa de onda, H_s , período de pico, T_p , e direção média, Dir) registados no intervalo de tempo da campanha. O modelo SWAN foi aplicado na transferência dos dados ao largo (H_s , T_p e Dir), fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (IH), registados pela boia-ondógrafo de Faro, fundeada a uma profundidade de 93 m, referida ao Zero Hidrográfico (ZH), até à posição onde foi fundeado o ADP à cota $z=-4.5$ m (ZH). O modelo COULWAVE é utilizado para transferir os dados (H_s e T_p), registados pelo ADP, até às posições na zona intertidal onde foram instalados instrumentos PT e ECM. Os parâmetros de ambos os modelos foram calibrados de modo a melhor ajustar os resultados numéricos aos dados medidos. É feita uma análise temporal aos dados *in-situ* e aos resultados numéricos, assim como, uma comparação entre ambos, com base numa análise estatística.

A realização deste trabalho visou essencialmente, avaliar o desempenho dos modelos, SWAN e COULWAVE, para as condições de estudo observadas, bem como, contribuir para uma melhor caracterização da agitação marítima (ondas e correntes) na zona da praia da Galé.

2. ÁREA DE ESTUDO: ENQUADRAMENTO GEOMORFOLÓGICO

A Praia da Galé é a designação geral para um conjunto de pequenas praias encastradas que interrompem a continuidade da plataforma litoral rochosa. A maior extensão desta, perpendicularmente à linha de costa, está associada a protuberâncias rochosas que recebem a designação de pontas na toponímia local. A sucessão destas pontas rochosas com plataformas no sopé e de praias encastradas, conferem uma fisiografia muito crenulada à linha de costa neste sector do litoral rochoso do Algarve (Figura 1). Na área de estudo, as arribas que expõem a formação carbonatada de Lagos-Portimão (Pais *et al.* 2012) não excedem os 6.0 m de altura e estão, na sua maioria, sapadas na base por abrasão marinha. Este facto, associado ao forte controle morfológico da transferência sedimentar por deriva longilitoral, induz um importante recuo das arribas, como o testemunham os numerosos leixões. Assim, o conhecimento do clima de agitação na costa, para várias condições ao largo e para várias escalas temporais é de fundamental importância na gestão deste sector litoral em particular.

O clima de agitação marítima no Algarve é caracterizado por ondas provenientes de WSW, representando 72% das observações e ondas provenientes de SE, com 23% das observações (Costa *et al.*, 2001), sendo designado este último tipo de ondulação de Levante. A altura de onda significativa é, em geral, inferior a 1 m, sendo a ocorrência de tempestades verificada em 2% do ano, quando a $H_s > 3$ m, maioritariamente de SW (Costa *et al.* 2001). O regime de marés na costa algarvia é semidiurno, variando entre 1.3 m em maré morta e 3.5 m em condições de maré viva, respetivamente (Instituto Hidrográfico, 1990).



Figura 1. Localização da Praia da Galé (*Galé beach*) e fotografia da praia. Localização da boia-ondógrafo (*Wave-buoy*) do Instituto Hidrográfico ao largo de Faro.

3. CAMPANHA

3.1 Descrição e Metodologia de pós processamento dos dados

A campanha de medição de ondas e correntes foi realizada, na zona da praia da Galé, no período de 6 a 12 de março de 2012, tendo sido para o efeito, instalados diversos equipamentos quer em águas pouco profundas quer na face da praia (Figura 2 e Figura 3).

Entre os diversos instrumentos, instalados em posições específicas, para medição de parâmetros da agitação marítima, foi fundeado, em frente à praia, um perfilador acústico (ADP) à batimétrica de $z=-6.5$ m referida ao Nível Médio do Mar (NMM), que recolheu dados durante todos os dias da campanha. Os outros instrumentos foram distribuídos, em baixa-mar, por diferentes posições na face da praia da Galé (zona entre marés) ao longo de dois perfis transversais de praia (um dos quais sobre fundo arenoso e o outro sobre a plataforma rochosa), tendo estes, coletado dados, durante dois ciclos de maré, entre 8 e 9 de março. Todos os instrumentos foram georreferenciados (*Datum 73*) através de um sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*) e sincronizados com a hora do Observatório Astronómico de Lisboa.

No presente estudo, apenas foram considerados os dados adquiridos com os instrumentos: ADP, transdutores de pressão PT1, PT2 e PT5, e correntómetros eletromagnéticos ECM1, ECM2 e ECM3, (Figura 2). A Figura 3 destaca o posicionamento destes instrumentos.

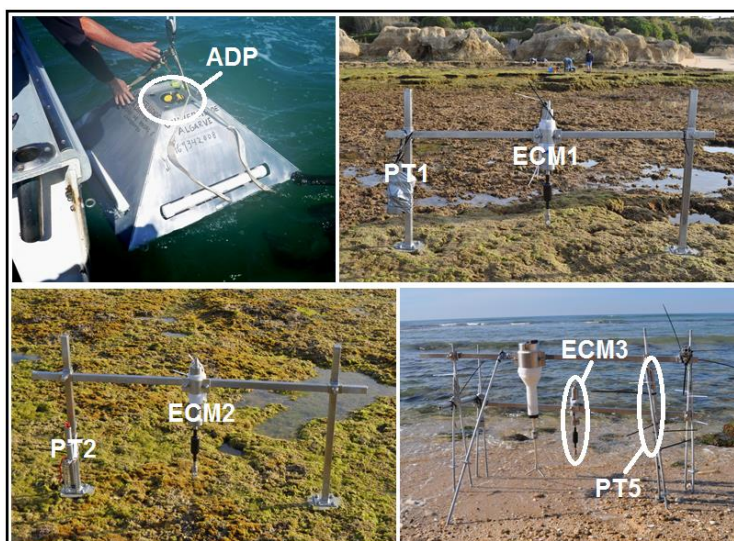


Figura 2. Instrumentos de medição: perfilador acústico ADP, transdutores de pressão PT1, PT2, PT5 e correntómetros eletromagnéticos ECM1, ECM2 e ECM3.

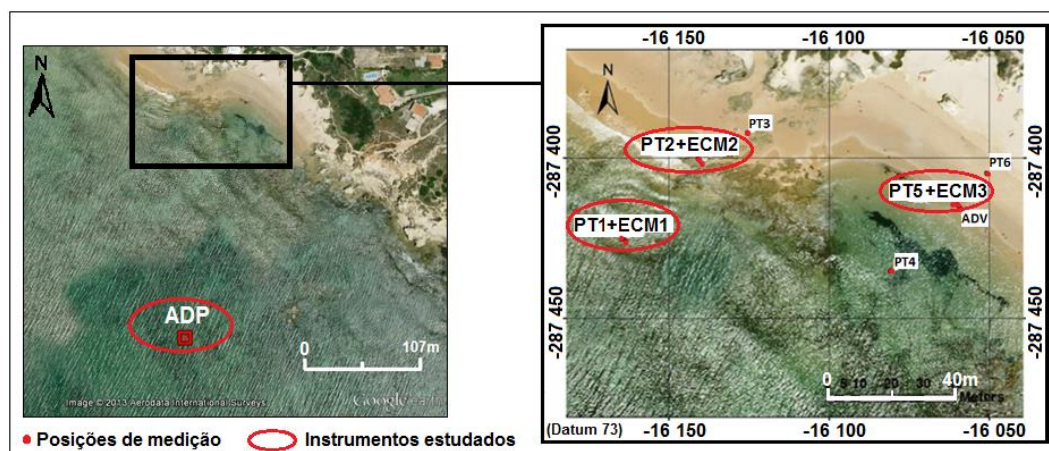


Figura 3. Distribuição dos equipamentos ao longo dos dois perfis (ECM3 e PT5 em fundo arenoso e ECM1, ECM2, PT1 e PT2 em fundo rochoso).

As posições planimétricas dos instrumentos de medição usados (*Datum 73*) e as respetivas cotas batimétricas (NMM e ZH) são apresentadas na Tabela 1. São indicadas também as frequências de aquisição e os períodos de tempo em que foi efetuada a aquisição de dados por cada instrumento.

Tabela 1. Instrumentos em estudo: Posição (x e y) e cota (z), *Datum 73*, frequência de aquisição (Freq.) e período de aquisição.

	x (m) (Sul-Norte)	y (m) (Oeste-Este)	z (m)		Freq. (Hz)	Período de aquisição	
			(NMM)	(ZH)		Início	Fim
ADP	-16139.68	-287630.10	-6.500	-4.500	4	6-3-12 09:00 H	12-3-12 09:00 H
PT1	-16164.40	-287425.05	-0.779	1.221	2	8-3-12 11:30 H	9-3-12 05:10 H
ECM1	-16163.99	-287425.51	-0.793	1.207	10		
PT2	-16141.26	-287400.56	-0.190	1.810	2		
ECM2	-16140.98	-287400.88	-0.120	1.880	2		
PT5	-16059.94	-287414.48	-0.888	1.112	2		
ECM3	-16059.75	-287415.11	-0.931	1.069	10		

3.2 Tratamento e Análise de Dados

Efetuada uma análise temporal aos dados do ADP, PT1, PT2, ECM1, ECM2 e ECM3, durante os respetivos períodos de medição, foram determinados os parâmetros: altura significativa de onda (Hs), período de pico (Tp) e direção média (Dir), para o ADP; Hs, altura de onda média (Hm), período significativo (Ts), período médio (Tm) e Tp, para os transdutores de pressão PT1 e PT2; e as velocidades média (m), média quadrática (rms), mínima (min) e máxima (max) das componentes transversal (U) e longitudinal (V) da velocidade horizontal, para os correntómetros ECM1, ECM2 e ECM3. No caso dos dados do transdutor de pressão PT5 foi determinado o parâmetro Hm também através duma análise temporal, no entanto, recorreu-se à análise espectral com o programa SAM (Capitão, 2002), para a determinação dos parâmetros Hs, Tm e Tp.

3.2.1 Perfilador Acústico – ADP

A Figura 4 apresenta as séries temporais do ADP, a cada 10 minutos, desde 6 de março, às 9:00 H até 12 de março às 9:00 H para os parâmetros de agitação Hs, Tp e Dir, bem como a respetiva rosa das direções.

A partir dos registos do ADP (Figura 4) pode-se observar que, os dados de onda correspondem a condições de baixa energia, com valores de Hs inferiores a 1.6 m e variando, com maior frequência, entre 0.4 e 1.2 m. Os valores de Tp associados, estão entre 4 e 16 s e, os de Dir, predominam em torno de 260° (SW), representando, portanto, ondas geradas no Oceano Atlântico.

É possível identificar nos registos do ADP (Figura 4), duas condições de agitação ligeiramente diferentes: Até 9 de março às 12:00 H – condições de energia muito baixas, onde a Hs tem frequentemente valores entre 0.4 e 0.6 m, associados a uma predominância de valores de Tp que rondam os 10 s; A partir das 12:00 H do dia 9 de março – estado de energia mais elevado, com valores de Hs maioritariamente entre 0.6 e 1.0 s, associados predominantemente a valores de Tp de 16 s.

Também é observável (Figura 4), entre as 12:00 H do dia 9 de março e as 00:00 H do dia 11 de março, uma presumível ocorrência de vaga, que terá sido gerada por ventos em torno da direção sul (180°), verificando-se, para este período, menores valores de T_p (rondando os 7 s) e também um empolamento com valores de H_s na sua maioria entre 0.6 e 1.2 m.

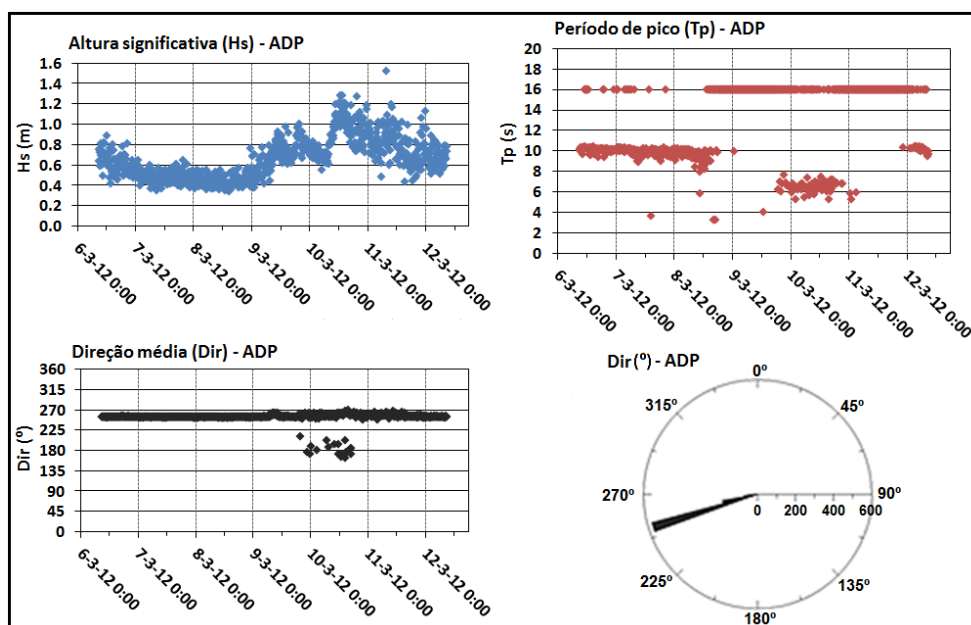


Figura 4. ADP: Altura de onda significativa (H_s), período de pico (T_p), direção média (Dir) e rosa das direções.

3.2.2 Transdutores de Pressão – PT1, PT2 e PT5

A Figura 5 apresenta os valores das séries temporais, a cada 10 minutos, dos parâmetros H_s , H_m , T_s , T_m e T_p , para os PT em estudo, desde as 11:30 H do dia 8 de março de 2012 às 05:10 H de 9 de março de 2012.

Com base nos dados de PT1, PT2 e PT5 apresentados na Figura 5, verifica-se que, entre 8 e 9 de março, as condições de agitação marítima (alturas e períodos de onda) são semelhantes às observadas nos dados do ADP. Com efeito, as condições de agitação marítima em PT1, PT2 e PT5 correspondem também a condições de baixa energia, nomeadamente, os valores de H_s são inferiores a 0.9 m em PT1, 1.2 m em PT2 e 1.0 m em PT5, sendo o valor mínimo igual a 0.2 m em todos os PT. Além disso, também se pode identificar duas condições ligeiramente diferentes das ondas no período em estudo: uma primeira em que H_s é muito baixa, inferior a 0.6 m registada, em todos os PT e uma segunda condição em que a maioria dos valores de H_s , são superiores a 0.6 m. Note-se que PT2, localizado sobre a plataforma rochosa próximo da base da arriba (Figura 3) apresenta valores de H_s mais elevados, consequência do empolamento da onda por interação com o fundo, comparados com os do PT1, sobre a plataforma rochosa, e do PT5, sobre fundo arenoso, com valores de H_s semelhantes entre si, encontrando-se ambos mais afastados da base da arriba, em profundidades superiores e idênticas.

Em relação aos períodos de onda, verifica-se que os valores de T_m se encontram entre 4 e 14 s, enquanto de T_s estão entre 6 e 18 s, para os diferentes PT. Note-se que os valores de T_m e T_s no PT1 (associada a H_s inferiores a 0.6 m) são mais baixos do que os verificados no PT2 (valores de H_s superiores a 0.6 m). Para os valores de T_p , o comportamento não é tão óbvio porque há uma grande variação dos valores.

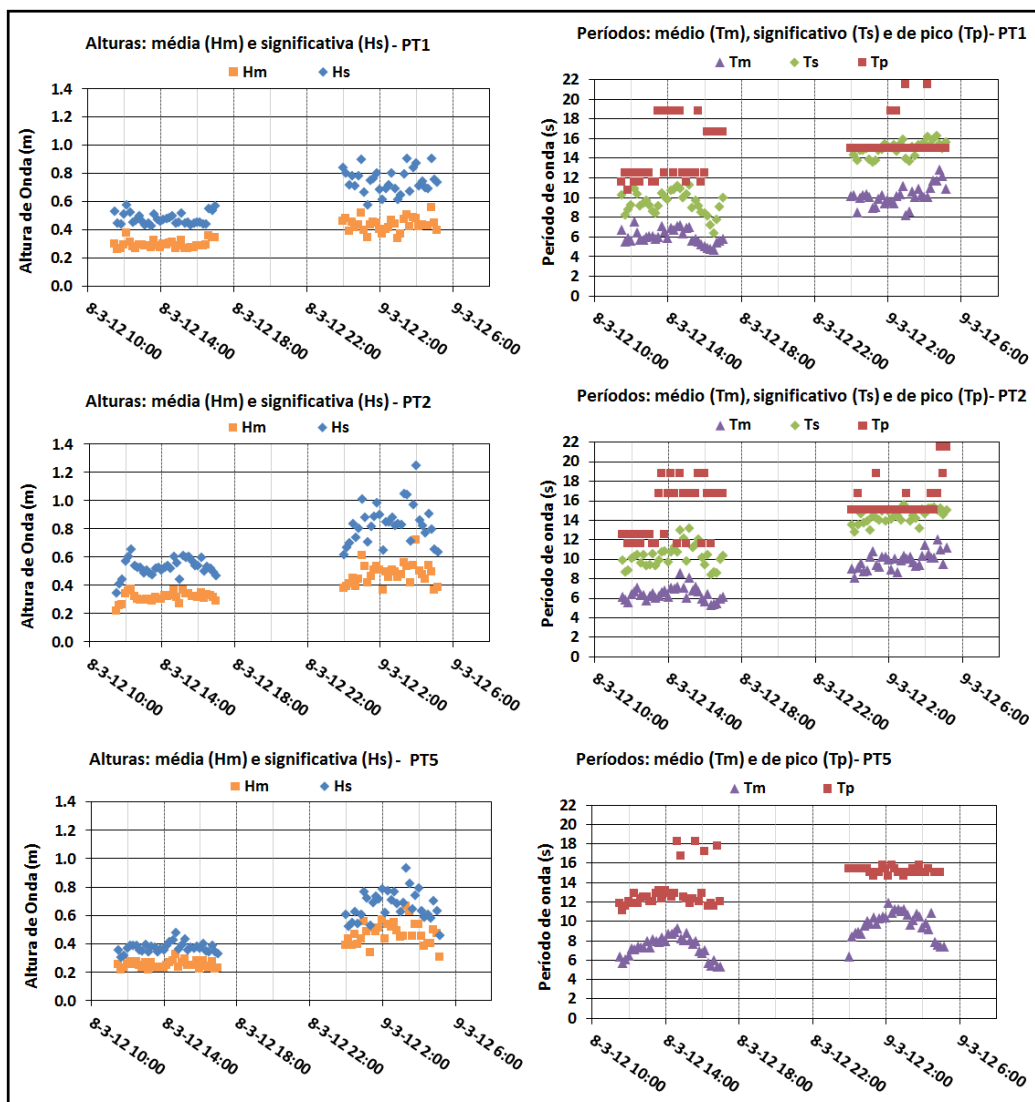


Figura 5. PT1, PT2 e PT5: Altura significativa de onda (Hs), altura média (Hm), período significativo (Ts), período médio (Tm) e período de pico (Tp) (Os períodos sem registo correspondem a intervalos de tempo em que ocorreu emersão dos sensores devido à variação do nível de maré).

3.2.3 Correntómetros Eletromagnéticos – ECM1, ECM2 e ECM3

A Figura 6, apresenta os valores das séries temporais, a cada 10 minutos, da velocidade máxima (max), mínima (min), média (m) e média quadrática (rms), para os correntómetros ECM1, ECM2 e ECM3 (Figura 3 para localização), relativas às componentes transversal (U) e longitudinal (V) da velocidade horizontal da corrente, desde as 11:30 H do dia 8 de março de 2012 às 05:10 H de 9 de março de 2012.

Com base nos dados dos ECM1, ECM2 e ECM3 (Figura 6), cuja localização é idêntica à dos PT1, PT2 e PT5, respetivamente (Figura 3), pode-se observar que:

- os valores máximos (Umax), média quadrática (Urms) da componente transversal U da velocidade horizontal são em geral superiores no primeiro intervalo de valores (condições mais energéticas) do que no segundo;
- em geral, os valores máximos (max) e de média quadrática (rms) da U e V no ECM2 são superiores aos observados no ECM1, à semelhança do comportamento de Hs nos PT2 e PT1, na mesma posição respetivamente, sobre a plataforma rochosa. Isto é, Hs,

U e V são mais elevadas próximo da base da arriba (PT2 e ECM2) que junto ao bordo externo da plataforma litoral (PT1 e ECM1). Porém, é na face da praia arenosa que U e V apresentam valores mais elevados tal como registados em ECM3, embora Hs registado no transdutor PT5 colocado junto a ECM3 (Figura 5 e Figura 3) seja em média inferior ao homólogo sobre a plataforma (PT1);

- a componente V da velocidade horizontal é inferior à componente U bem como a sua variação é muito menor, ao longo do período monitorizado, para qualquer dos correntómetros estudados.

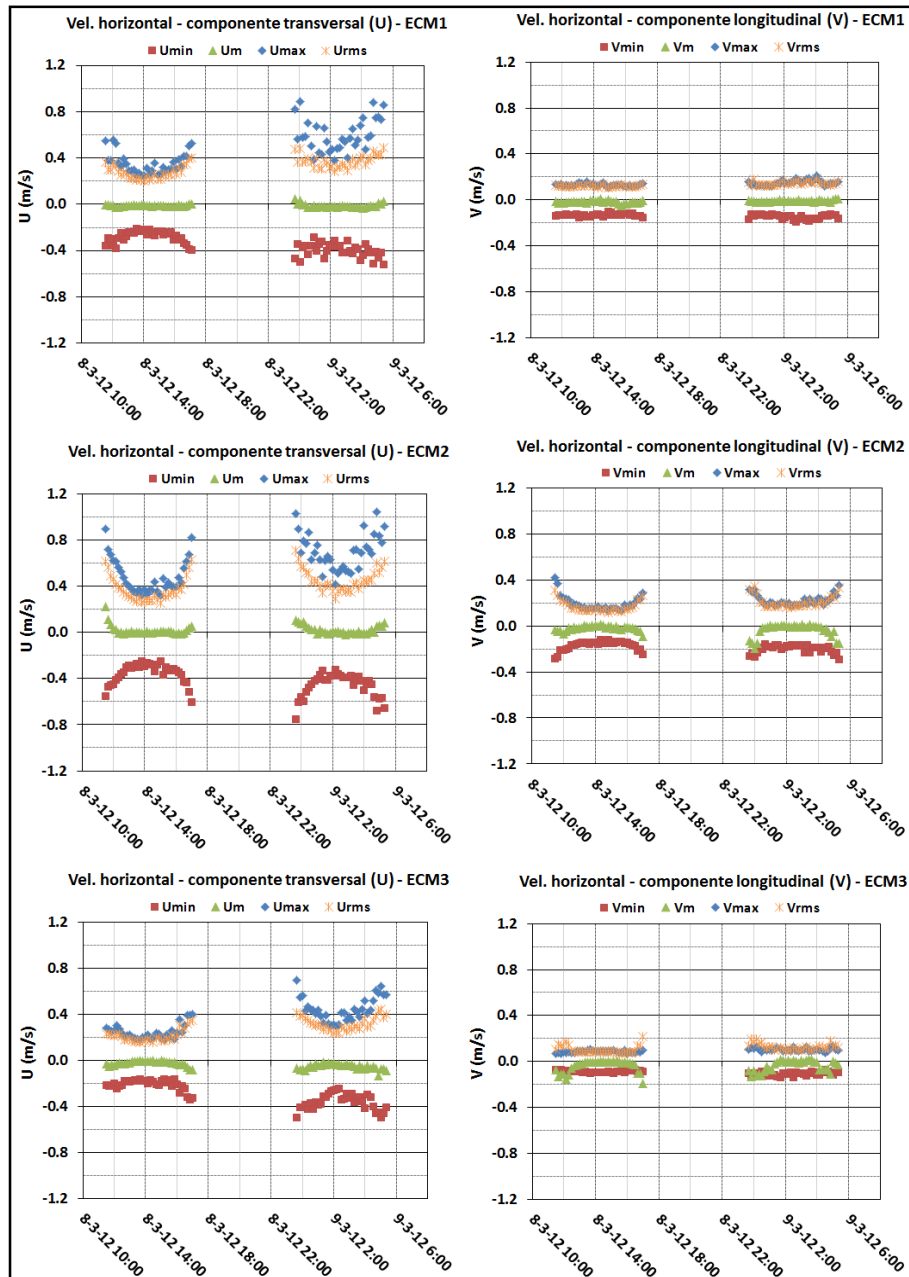


Figura 6. ECM1, ECM2 e ECM3: Valores da velocidade máxima (max), mínima (min), média (m) e média quadrática (rms), para as componentes U e V da velocidade horizontal (Os períodos sem registo correspondem a intervalos de tempo em que ocorreu emersão dos sensores devido à variação do nível de maré).

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Descrição dos Modelos

Os modelos numéricos SWAN e COULWAVE são os modelos utilizados, neste trabalho, para simular a propagação da onda.

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) acrónimo de Simulating WAVes Nearshore é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação 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 atualização 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 refração, difração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação 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 é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da ação da agitação marítima. Com esta representação, é possível a aplicação do modelo em áreas onde o crescimento da agitação marítima pela ação 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 retangular.

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 direções de pico e média, a dispersão direcional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional.

Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo SWAN também se utiliza a ferramenta SOPRO (Fortes *et al.*, 2007).

O modelo COULWAVE (*Cornell University Long and Intermediate Wave Modelling Package*), desenvolvido por Lynett e Liu (2008), é um modelo 2D de diferenças finitas para a simulação da propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas por Wei *et al.* (1995) a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*), cada uma definida com um dado perfil vertical de velocidade. O desempenho do modelo depende então do número de camadas consideradas e a sua aplicabilidade pode estender-se a águas muito profundas, uma vez que apresenta características lineares até $kh \sim 8$ e um comportamento não-linear de 2ª ordem até $kh \sim 6$ (sendo k o número de onda e h a profundidade). Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser corretamente simuladas pelo modelo. Seguindo o procedimento de Kennedy *et al.* (2000), são introduzidos termos adicionais nas equações, para serem simulados o atrito de fundo, a rebentação e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, são incluídos termos de profundidade dependentes do tempo para serem consideradas variações do perfil de fundo no tempo, devidas à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei e Kirby (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efetuadas com uma precisão de 2ª

ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 em tempo e Δx^4 em espaço. A diferença relativamente a Wei e Kirby (1995) refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, são aplicados dois tipos de condições: reflexão e radiação. Para a reflexão é seguida a metodologia de Wei e Kirby (1995) e para a radiação ou condição de fronteira aberta, é utilizado o esquema de fronteira absorvente (*sponge layer*), de acordo com Kirby *et al.* (1998).

Os dados de entrada do modelo encontram-se descritos em Lynett e Liu (2008) e alguns dos resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador, bem como da posição da linha de rebentação.

Em síntese, enquanto o SWAN é um modelo espectral de média em fase adequado para a propagação de ondas em águas profundas e intermediárias, o modelo COULWAVE é um modelo não linear que resolve a fase da onda, baseado nas equações de Boussinesq, e é particularmente adaptado para a caracterização das ondas na zona costeira (zonas de rebentação, *surf* e *swash*), onde a profundidade é um fator importante. O COULWAVE, ao contrário do SWAN, é um modelo bastante exigente em termos de tempo computacional, capacidade de armazenamento e de memória ao contrário SWAN. Em ambos os modelos, alguns parâmetros devem ser calibrados, por exemplo, os relacionados com a rebentação das ondas e com o atrito.

4.2 Metodologia

4.2.1 Métodos Gerais e Condições

Os dois modelos, SWAN e COULWAVE, foram usados para simular a propagação de ondas, durante o período da campanha de campo e os resultados numéricos foram comparados com os dados do campo. Enquanto o modelo SWAN foi usado para propagar as condições das ondas medidas pela boia-ondógrafo de Faro ($z=-93$ m, ZH, $36^\circ 54'17''$ N, $7^\circ 53'54''$ W, Figura 1) até a posição de ADP ($z=-6.5$ m (NMM), Figura 3), o modelo COULWAVE foi usado para a propagação das características das ondas medidas no ADP até aos transdutores de pressão PT1, PT2 e PT5 ($z=-0.779$ m, $z=-0.190$ m e $z=-0.888$ m, NMM, Figura 3).

Em detalhe, foram realizados dois tipos de simulações:

- Uso dos parâmetros registados pela boia-ondógrafo em Faro (valores tri-horários de H_s , T_p e Dir) como condições de fronteira do modelo SWAN, desde as 09:00 H do dia 6 de março até às 9:00 H do dia 12 de março. Os resultados numéricos correspondentes e os valores de parâmetros de ondas medidos são comparados na posição do ADP;
- Uso dos parâmetros de onda medidos pelo ADP (valores a cada 10 minutos, de H_s e T_p) entre as 11:30 H e as 17:00 H do dia 8 de março, Figura 4, como condições de fronteira do modelo COULWAVE. Os valores numéricos medidos foram comparados nas posições PT1, PT2 e PT5.

Os níveis de maré, usados nas simulações com ambos os modelos, foram interpolados a partir dos valores (ZH) para a baixa-mar e preia-mar (ZH) fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (IH). A Figura 7 mostra os valores dados e interpolados de nível de maré (ZH), durante os dias de campanha de campo (6 a 12 de março de 2012).

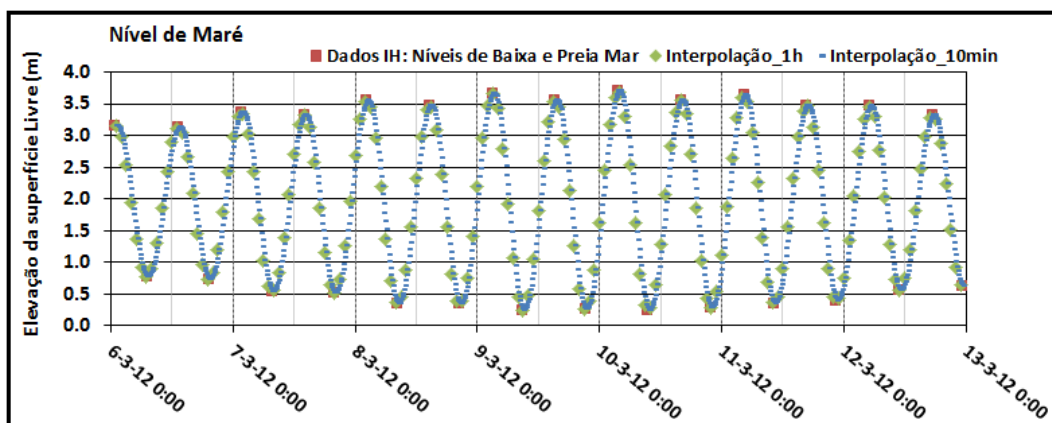


Figura 7. Níveis de maré de baixa-mar e preia-mar (ZH) dados pelo IH e valores interpolados.

Os cálculos foram realizados num computador com dois clusters: um duplo AMD Opteron de seis núcleos 2427, 2,2 GHz, memória RAM de 8 GB e um duplo AMD Opteron dual-core 265, também com 8 GB de memória RAM.

4.2.2 Condições de Aplicação do Modelo SWAN

Para os cálculos com o modelo SWAN, definiu-se o domínio retangular apresentado em coordenadas cartesianas (Datum 73) na Figura 8. Este domínio foi discretizado por meio de três malhas: uma (*Main*) que cobre toda a área de cálculo, incluindo a posição da boia-ondógrafo de Faro, outra malha (*Nested*), encaixada na malha *Main* e, finalmente, a malha menor (*Nested1*), encaixada nas outras duas, que está centrada na praia da Galé (Figura 8).

A maior malha (*main*) tem 73.6 km de comprimento por 34.8 km de largura e tem uma resolução de 800 m. A malha intermédia (*Nested*) tem 45 km de comprimento por 19.4 km de largura, sendo a resolução de 200 m. A malha menor (*Nested 1*) define um quadrado com 5000 m de lado e tem 100 m de resolução. Nesta malha (*Nested 1*) foi definido o ponto onde se extraíram os resultados do SWAN, que corresponde à localização do instrumento ADP.

As malhas batimétricas utilizadas na aplicação do SWAN tiveram por base, uma malha de 50 m x 50 m, representativa de toda a costa algarvia, que resultou de um levantamento batimétrico (referenciado ao NMM) efetuado no ano de 2011, tendo sido a linha de costa constrangida por levantamento do INAG (Instituto da Água).

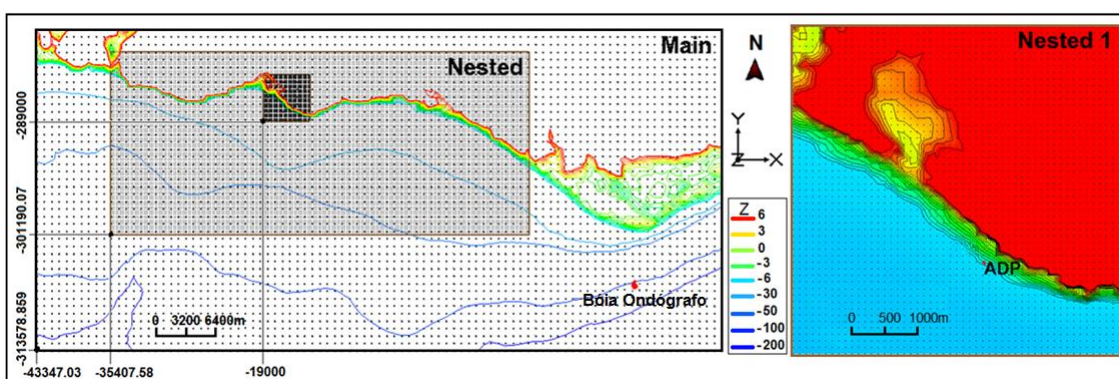


Figura 8. SWAN: Domínio de cálculo: malhas e batimetria.

As características da agitação ao largo, provenientes dos dados medidos na boia-ondógrafo, constituem a condição de fronteira na malha global. Os resultados da malha *Main* fornecem as condições de fronteira para a *Nested*, e os resultados desta malha fornecem as condições de fronteira para a malha *Nested 1*. Foram ainda consideradas as seguintes condições de cálculo:

- Utilização da versão SWAN 40.72, em modo estacionário sem vento nem correntes;

- Utilização dos dados de maré fornecidos pelo IH;
- Utilização de um espectro direcional em frequência de JONSWAP de 21 intervalos, de 0,07 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e de uma discretização em direção de 2.5° cobrindo os 360°, ou seja, 144 intervalos;
- Um coeficiente de rebentação constante de 0.65 para os períodos distintos;
- Foi utilizada a Lei JONSWAP e adaptado como parâmetro de atrito de fundo o valor de 0.015;
- Principais fenómenos considerados: refração de ondas, difração, empolamento e rebentação de ondas devido ao fundo e interações entre grupo de três ondas.

As características de cada espectro são definidas pelos valores tri-horários dos valores medidos de Hs, Tp e Dir na boia-ondógrafo de Faro.

4.2.3 Condições de Aplicação do Modelo COULWAVE

As condições de agitação impostas ao modelo corresponderam a ondas regulares com características baseadas nos valores medidos, durante a campanha, pelo perfilador acústico ADP (Figura 4).

O domínio computacional é apresentado em 2D e 3D (Figura 9) e tem dimensões 450 m x 450 m. Este domínio foi discretizado por uma malha regular, cujos valores de Dx e Dy são diferentes para cada simulação. A discretização espacial e temporal, dependerá do número de Courant e também do período de onda. De facto, o modelo gera uma malha regular, com base no número mínimo de pontos de comprimento de onda fornecidos pelo utilizador (neste caso 40), sendo o número de Courant considerado igual a 0.4.

A batimetria do domínio de cálculo tem uma resolução de 1 m e foi obtida por interpolação feita à malha *Nested 1* utilizada na aplicação do SWAN (Figura 8). De notar que, foi adicionada ao domínio uma zona de profundidade constante, onde as ondas foram geradas pelo método da função-fonte (Wei *et al.*, 1995).

A fonte de geração de ondas foi colocada normal ao eixo x. As fronteiras inicial e final do domínio, foram consideradas como condições fronteira de absorção (com largura igual 1.25 do comprimento de onda), sendo as outras duas definidas como condição refletiva.

Todas as simulações (cada uma com duração de 1000 s) foram realizadas considerando uma única camada, equações totalmente não-lineares, rebentação de onda e atrito de fundo. Considerou-se um coeficiente de atrito igual a 1.0×10^{-2} . O parâmetro de rebentação relacionado com o início da rebentação foi igual a $A=0.65$ para fundos de inclinação suave como é o caso. Para os restantes parâmetros do modelo foi assumido, numa primeira abordagem, os valores sugeridos no manual do utilizador do modelo COULWAVE (Lynett e Liu, 2008).

Tal como referido, as ondas regulares com base nas condições de onda (Hs, Tp) observadas no ADP com intervalo de 10 minutos, desde as 11:30 H às 17:00 H do dia 8 de março foram impostas como condições forçadoras do modelo numérico. Nestes cálculos, uma vez que os dados de direção da onda medidos pelo ADP são praticamente constantes e cerca de 260° (Figura 4), apenas se considerou uma direção incidente e o domínio batimétrico foi rodado de modo que a direção da onda incida perpendicularmente ao domínio. Esta simplificação pode contribuir para algumas diferenças nos resultados do modelo numérico relativamente aos resultados baseados nos dados de campo.

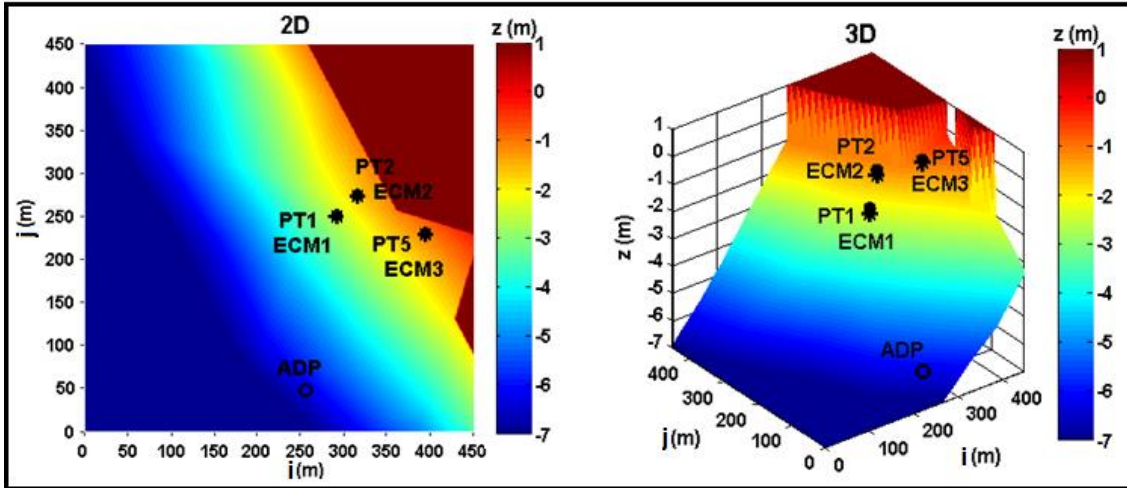


Figura 9. COULWAVE: Representações 2D e 3D do domínio de cálculo e da batimetria. Pontos de cálculo correspondentes aos instrumentos ADP, PT1, ECM1, PT2, ECM2, PT5 e ECM3.

5. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E DE CAMPO

Para a análise do desempenho do modelo SWAN, foram comparados os valores tri-horários numéricos e medidos de H_s , T_p e Dir , desde as 09:00 H do dia 6 de março de 2012 até às 9:00 H do dia 12 de março de 2012, na posição do ADP, recorrendo ao valor médio (Med) e aos parâmetros estatísticos de correlação RMSE (erro quadrático médio), SI (índice de dispersão) e ME (erro médio).

Para a análise do desempenho do modelo COULWAVE, foram comparados os valores numéricos com os medidos de H_s e T_p , desde as 11:30 H às 17:00 H do dia 8 de março de 2012, com um passo de 10 minutos, nas posições PT1, PT2 e PT5, recorrendo ao valor Med e aos parâmetros estatísticos de correlação RMSE, SI e ME. Foram também comparados, no âmbito da aplicação do modelo COULWAVE, os valores numéricos e medidos da velocidade média (m), mínima (min) e máxima (max) para as componentes transversal (U) e longitudinal (V) da velocidade horizontal da corrente, nas posições dos ECM1, ECM2 e ECM3, recorrendo ao valor Med e aos parâmetros estatísticos de correlação RMSE, SI e IC (índice de concordância - Willmott *et al.*, 1985).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_m)_i^2} \quad (1)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}_m} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_n - x_m)_i \quad (3)$$

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_n - x_m|_i^2}{\sum_{i=1}^N (|x_n - \bar{x}_m| + |x_m - \bar{x}_m|)_i^2} \quad (4)$$

em que, N é a dimensão da amostra de valores; x_n representa os valores numéricos, x_m os valores medidos e \bar{x}_m é a média aritmética dos valores medidos.

5.1 Desempenho do Modelo SWAN

A Figura 10 apresenta os valores tri-horários medidos pelo ADP e obtidos numericamente com o SWAN na posição do ADP, para a Hs, o Tp, e a Dir, desde as 09:00 H do dia 6 de março até às 9:00 H do dia 12 de março na posição do ADP. Também são apresentados os dados medidos pela boia-ondógrafo em Faro, que foram utilizados como condições forçadoras do modelo SWAN.

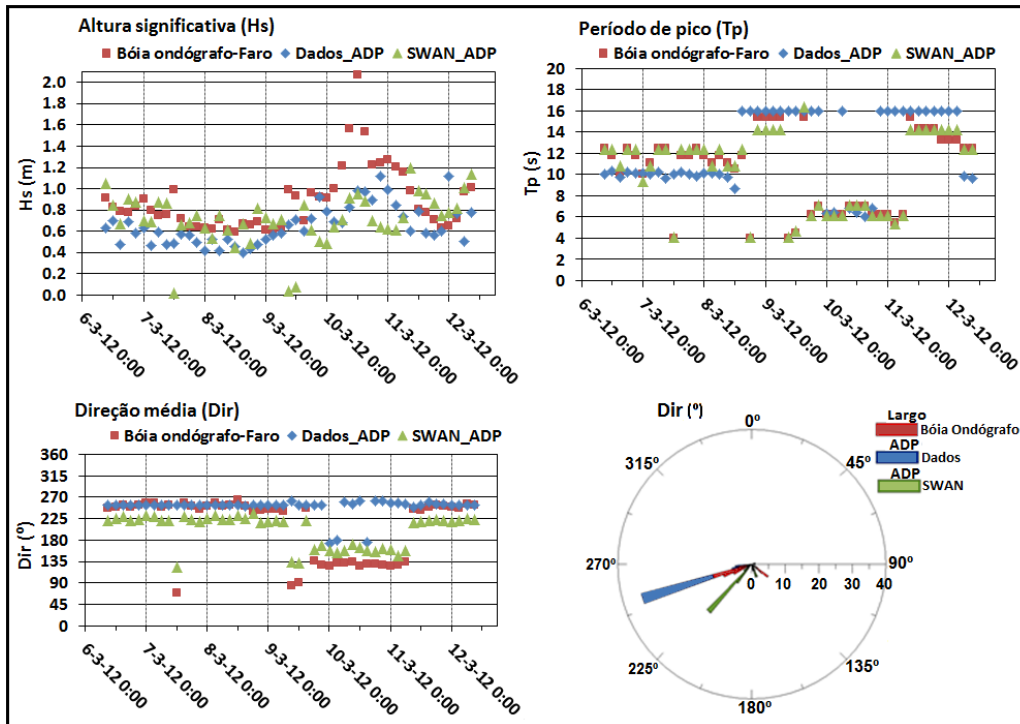


Figura 10. Valores medidos e numéricos (SWAN) na localização do ADP, bem como os valores da boia-ondógrafo em Faro (condições ao largo forçadoras): altura significativa (Hs), período de pico (Tp), direção média (Dir) e rosa das direções.

A Tabela 2 apresenta o valor médio (Med) para os valores medidos e numéricos (SWAN) na posição do ADP, bem como os valores da boia-ondógrafo de Faro (condições forçadoras), para os parâmetros Hs, Tp e Dir, desde as 9:00 H do dia 6 de março até as 9:00 H do dia 12 de março. Também apresenta os valores dos parâmetros estatísticos: erro quadrático médio (RMSE), Índice de Dispersão (SI) e erro médio (ME) obtidos entre os valores medidos e numéricos (SWAN), para o local do ADP.

Pela análise da Figura 10 e da Tabela 2, observa-se que a tendência geral dos valores estimados de Hs, Tp e Dir obtidos pelo modelo numérico SWAN é semelhante aos medidos pelo ADP, o que é confirmado pelos valores de RMSE e SI obtidos. No entanto, existem algumas diferenças entre os valores numéricos e os medidos principalmente para os parâmetros Tp e Dir. Comparando com as condições ao largo forçadoras (da bóia-ondógrafo de Faro), os resultados numéricos (SWAN_ADP) apresentam maior concordância do que os valores medidos (Dados_ADP) para ambos os parâmetros Tp e Dir.

As principais diferenças ocorrem associadas ao período entre as 12:00 H do dia 9 de março e as 00:00 H do dia 11 de março, em que parece ter ocorrido vaga. Note-se que não foi considerado o vento nos cálculos numéricos, o que se torna especialmente importante quando se verifica a ocorrência de vaga, daí se explique o pior desempenho do SWAN, principalmente na simulação do parâmetro Dir.

Tabela 2. Valores: médio (Med) e dos parâmetros estatísticos RMSE, SI e ME, no local do AP, para Hs, Tp e Dir.

	Boia-ondógrafo de Faro (largo)	ADP		
	Medições	Medições	SWAN	
Hs (m)	0.89	0.66	0.72	Med
	-	0.290		RMSE
	-	0.442		SI
	-	0.061		ME
Tp (s)	10.4	12.4	10.4	Med
	-	5.063		RMSE
	-	0.410		SI
	-	-1.936		ME
Dir (°)	208	250	201	Med
	-	59.973		RMSE
	-	0.240		SI
	-	-49.171		ME

5.2 Desempenho do Modelo COULWAVE

5.2.1 Elevação da Superfície Livre

Na Figura 11 comparam-se os valores numéricos e os dados medidos, para a altura significativa, Hs, e o período de pico, Tp, nas posições PT1, PT2 e PT5, no dia 8 de março das 11:30 H às 17:00 H.

A Tabela 3 apresenta os valores Med, RMSE, SI e ME correspondentes aos valores numéricos e aos medidos de Hs e Tp em cada uma das posições dos instrumentos PT1, PT2 e PT5, das 11:30 H às 17:00 H de 8 de março de 2012. Representa-se também o valor Med dos valores medidos no ADP para os parâmetros Hs e Tp (condições forçadoras do modelo).

Analisando a Figura 11 e a Tabela 3, constata-se que o modelo, em geral, é capaz de simular o andamento e ordem de grandeza dos valores medidos para o período em análise e para as diferentes posições PT1, PT2 e PT5. Este acordo é melhor para Hs do que para Tp, o que é confirmado por meio dos parâmetros estatísticos.

Para as posições PT1 e PT2, os resultados Hs medidos e numéricos mostram um ligeiro aumento de Hs, em comparação com os valores forçadores do ADP, que é mais evidente no PT2, que está localizado a profundidades inferiores. Tal aponta para uma boa capacidade do modelo de simular o fenômeno de empolamento na propagação das ondas em direção à costa.

Para o PT5, o modelo revela uma maior dificuldade em simular os dados reais em termos de Hs. Tal é confirmado pelos parâmetros estatísticos, com valores superiores de RMSE e de SI face aos observados em PT1 e PT2.

Em termos de período de pico as diferenças em qualquer dos PT são mais significativas, o que é indicado pelos valores mais elevados quer de RMSE quer de SI. Neste caso, em geral, os valores medidos são superiores aos numéricos (com valores de ME negativos).

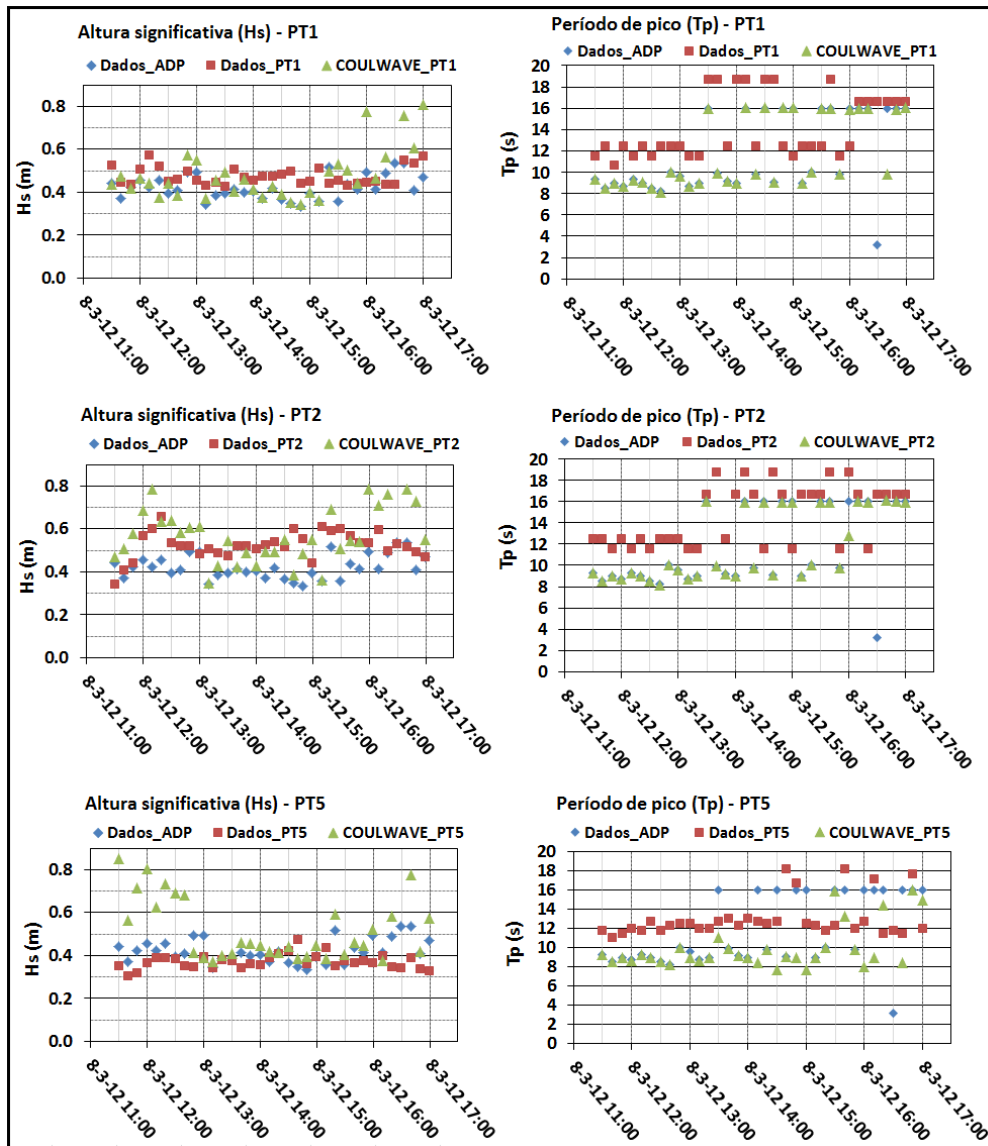


Figura 11. Valores medidos e numéricos (COULWAVE), nas posições PT1, PT2 e PT5, bem como valores no ADP, para a altura de onda significativa (Hs) e o período de pico (Tp).

Tabela 3. Valor médio de Hs e Tp, obtido numericamente (COULWAVE) e por medição, nas posições do ADP, PT1, PT2 e PT5. Parâmetros estatísticos RMSE, SI, ME, para Hs e Tp.

	ADP	PT1		PT2		PT5		
	Medições	Medições	COULWAVE	Medições	COULWAVE	Medições	COULWAVE	
Hs (m)	0.42	0.48	0.48	0.57	0.52	0.37	0.52	Med
	-	0.112		0.136		0.209		RMSE
	-	0.234		0.259		0.561		SI
	-	0.002		0.041		0.144		ME
Tp (s)	11.5	10.7	11.7	11.8	14.6	13.04	9.91	Med
	-	4.103		4.364		4.086		RMSE
	-	0.289		0.299		0.313		SI
	-	-2.537		-2.805		-3.131		ME

As diferenças entre valores numéricos e medidos podem ser consequência de:

- (i) limitações inerentes ao modelo relacionadas com a sua aplicação a fundos com uma inclinação da ordem de $1/6$, que tornam os cálculos muito exigentes, pois as equações-base são integradas no pressuposto de que os fundos são de inclinação suave;
- (ii) os parâmetros da rebentação terem sido considerados constantes ao longo do período em análise. Com efeito, os fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de um termo de viscosidade turbulenta à equação original, que depende de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Apesar destes parâmetros deverem ser calibrados para cada caso de estudo e condição de agitação, foram no presente trabalho considerados constantes para todas as condições de agitação incidente, as quais variaram ao longo do período considerado, limitando assim o desempenho do modelo;
- (iii) erros associados a terem sido consideradas como condições de fronteira os parâmetros de onda (H_s e T_p) extraídos do processamento de dados efetuado pelo ADP e não nos registos de elevação da superfície livre efetivamente medidos;
- (iv) erros de medição relacionados com os PT, uma vez que eles se encontram numa posição de transição, zona intertidal, e na definição dos períodos de análise de maneira, evitando dados desviados por ocorrência de emersão dos sensores.

5.2.2 Velocidade Horizontal

Os gráficos da Figura 12 apresentam os valores numéricos e medidos obtidos, entre as 11h30 e as 17h do dia 8 de março de 2012, para as velocidades máxima (max), mínima (min) e média (m), nas posições dos correntómetros eletromagnéticos ECM1, ECM2 e ECM3, para as componentes transversal (U) e longitudinal (V) da velocidade horizontal da corrente. A componente U apresenta valores positivos na direção do largo para a costa, SW-NE e a componente V, perpendicular a U, tem valores positivos na direção NW-SE.

É importante notar que os resultados numéricos são calculados sempre a uma profundidade $z=0.531h$ (sendo h a profundidade da água), aproximadamente a meio da coluna de água, o que não acontece com os valores medidos. Isto poderá explicar algumas das diferenças entre dados de campo e resultados numéricos.

A Tabela 4 apresenta a análise estatística com base nos valores medidos e simulados das componentes U e V da velocidade horizontal, entre as 11h30 e as 17h do dia 8 de março de 2012.

De uma forma geral, os resultados numéricos são capazes de representar bastante bem a ordem de magnitude dos valores medidos, mas demonstram uma maior dificuldade em descrever a sua variação ao longo do tempo, apresentando os resultados numéricos maiores e mais frequentes oscilações durante o intervalo de tempo em análise e, os valores medidos, um comportamento mais regular.

Verifica-se que para os valores da componente U, o modelo consegue fornecer melhores estimativas dos valores médios (U_m) do que dos valores extremos. Tal é confirmado pelos valores estatísticos: obtêm-se valores pequenos de ME e RMSE e índices de concordância superiores a 0.7, associados aos valores médios de U_m , enquanto que acontecem valores bastante elevados de ME e RMSE e índices de concordância baixos para os valores extremos dessas variáveis (U_{max} e U_{min}). No caso de V, dada a pequena ordem de grandeza dos seus valores (face aos valores de U), não existe uma diferença significativa em termos de qualquer dos parâmetros estatísticos, quanto às estimativas dos valores médios ou extremos.

A sobre e subestimação dos valores medidos, respectivamente de U e V, estão provavelmente relacionadas com a direção de propagação das ondas: o modelo foi forçado com ondas perpendiculares à costa, o que resulta em maiores valores de U e menores valores V, contrariamente à direção real de propagação das ondas na praia, onde a sua obliquidade tenderá a resultar numa componente U mais fraca e numa componente V mais forte.

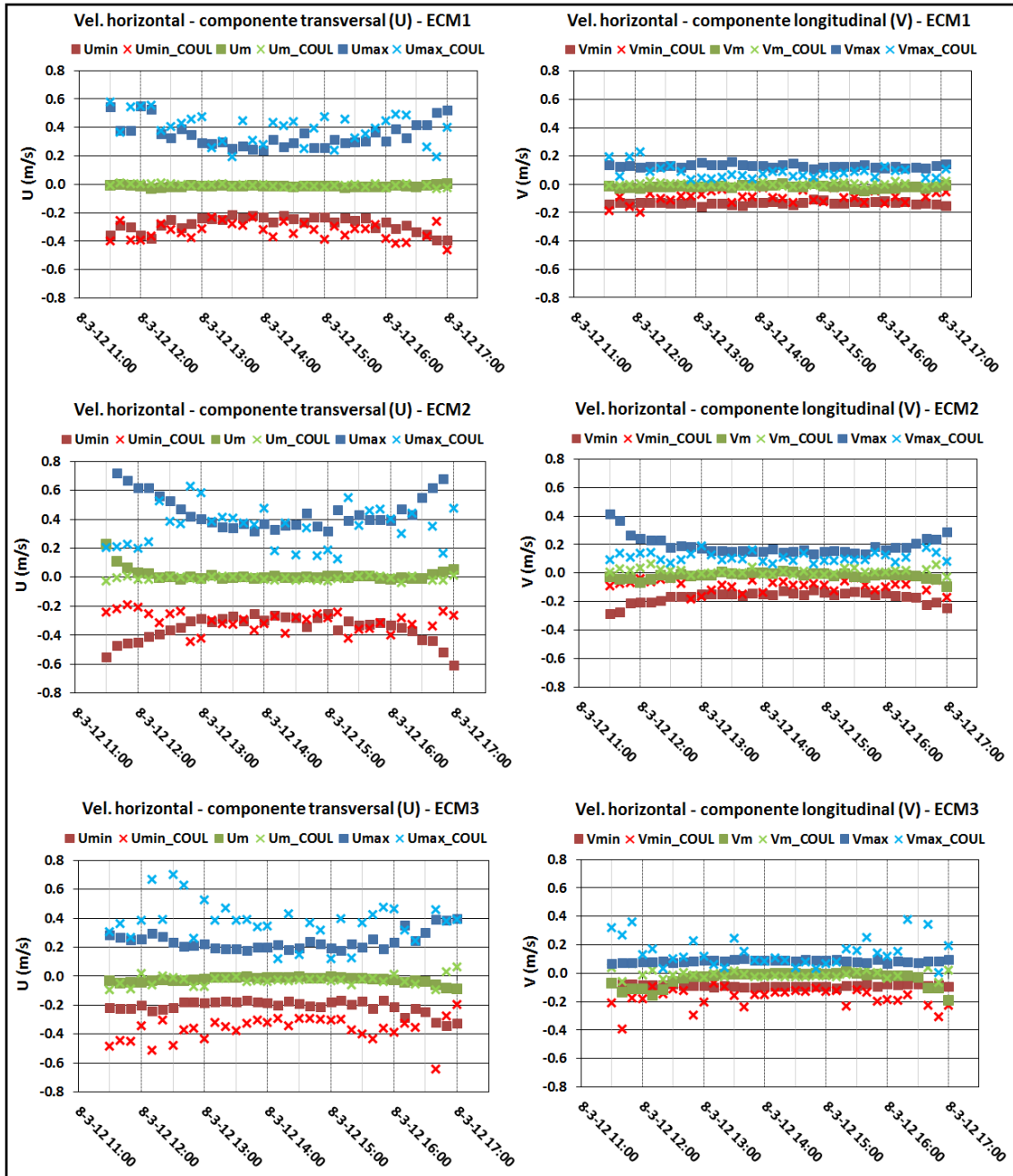


Figura 12. Comparação dos valores medidos (quadrados) e numéricos (cruzes) da velocidade média (m), mínima (min) e máxima (max) para as componentes U e V da velocidade horizontal.

Tabela 4. Valores de ME, RMSE e IC para os valores da componente transversal (Umax, Umin, Um e Urms) e componente longitudinal (Vmax, Vmin, Vm e Vrms), na localização dos correntômetros ECM1, ECM2, ECM3.

		ECM1		ECM2		ECM3		
		Medições	COULWAVE	Medições	COULWAVE	Medições	COULWAVE	
U (m/s)	Umax	0.343	0.395	0.464	0.345	0.236	0.376	Med
		0.052		-0.120		0.140		ME
		0.122		0.252		0.200		RMSE
		0.61		0.30		0.19		IC
	Um	-0.013	-0.005	0.015	-0.007	-0.024	-0.032	Med
		0.008		-0.022		-0.007		ME
		0.015		0.054		0.035		RMSE
		0.31		0.26		0.43		IC
	Umin	-0.275	-0.323	-0.346	-0.303	-0.207	-0.369	Med
		-0.049		0.043		-0.162		ME
		0.076		0.132		0.179		RMSE
		0.54		0.24		0.19		IC
V (m/s)	Vmax	0.129	0.086	0.189	0.112	0.086	0.148	Med
		-0.04		-0.08		0.06		ME
		0.07		0.10		0.12		RMSE
		0.93		0.55		0.44		IC
	Vm	-0.019	0.000	-0.018	0.013	-0.037	-0.007	Med
		0.02		0.03		0.03		ME
		0.03		0.05		0.07		RMSE
		0.26		0.25		0.41		IC
	Vmin	-0.131	-0.095	-0.168	-0.087	-0.087	-0.168	Med
		0.04		0.08		-0.08		ME
		0.06		0.10		0.11		RMSE
		0.94		0.44		0.15		IC

6. CONCLUSÕES

Esta comunicação descreve o trabalho realizado no âmbito do projeto EROS, ou seja, os dados de onda coletados durante a campanha realizada na praia da Galé de 6 a 12 de março de 2012, a análise dos dados realizada e, finalmente, as simulações numéricas de propagação de ondas para os dias da campanha. Estas simulações numéricas foram realizadas com dois modelos numéricos (SWAN e COULWAVE).

A análise dos dados obtidos com os instrumentos ADP, PT1, PT2 e PT5 mostrou que durante a campanha as condições de agitação foram pouco energéticas ($H_s < 1,2$ m), com pequenas diferenças entre a posição do ADP (em $z = -6.5$ m, NMM) e os instrumentos colocados na zona intertidal, embora se verifique um ligeiro aumento da altura de onda junto à costa devido ao empolamento quando se propagam em águas pouco profundas. O mesmo não aconteceu para T_p onde se verificou um aumento dos valores na zona intertidal, provavelmente relacionado com a rebentação das ondas antes de chegar aos instrumentos e mesmo com o fato destes instrumentos se encontrarem em zona de transição.

Em relação às simulações numéricas, os modelos SWAN e COULWAVE demonstraram ser bastante capazes de simular os dados de campo medidos pelo ADP e pelos PT, quer na variação ao longo do tempo, quer na ordem de grandeza. Essa semelhança é mais notória para H_s do que para T_p e Dir . À medida que a proximidade à costa aumenta, e os fenómenos não lineares assumem uma maior relevância, os resultados simulados pelos modelos tenderam a divergir mais dos dados medidos.

A ordem de magnitude da velocidade horizontal (máxima, mínima, média e média quadrática, em ambas as direções paralela, V , e transversal à costa, U) foi bem representada pelo modelo COULWAVE, simulando de forma razoável os valores médios da velocidade. Em contrapartida, o modelo demonstrou ser menos capaz de descrever a variação dos dados de velocidade ao longo do tempo, exibindo uma maior oscilação para resultados numéricos.

Para ultrapassar algumas das limitações deste trabalho, sugerem-se em seguida possíveis desenvolvimentos futuros.

- O uso de campos de vento e de cálculos não estacionárias poderiam melhorar os resultados obtidos com o modelo de SWAN.
- No caso do modelo COULWAVE o seu desempenho poderá ser melhorado pela utilização direta das séries temporais da elevação da superfície medidas pelo ADP, como condições fronteira. Além disso, os fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de termos de viscosidade turbulenta às equações originais, os quais dependem de um conjunto de parâmetros relacionados com o começo, duração e término da rebentação. Estes parâmetros deveriam ser calibrados individualmente para cada caso de estudo e condição de agitação imposta, mas neste trabalho foram assumidos como constantes em todos os intervalos de 10 min simulados. Um estudo da sensibilidade do modelo a estes parâmetros deveria ser considerado.
- Seria também importante explorar a influência da direcção das ondas incidentes, definindo outras direcções além da perpendicular à costa e impor condições de agitação irregulares, para uma maior aproximação à realidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para **Error! Reference source not found.** a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através do projecto “EROS – Erosion of rocky shores – Differences in protection promoted by sandy beaches and shore platforms”, ref. PTDC/CTE-GIX/111230/2009. Agradecem também ao Capitão Cruz Martins, Capitão do Porto de Portimão, pela autorização concedida à realização da campanha de medições na Praia da Galé.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph. Research*, 104, C4, 7649-7666.
- Capitão, R., 2002 – Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Costa, M., Silva, R. and Vitorino, J., 2001. Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa. 2a Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Associação Nacional de Navegação. Sines, 20p.
- Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L., Palha, A., 2007 – O pacote de dados SOPRO 3.1: evoluções recentes, Atas das 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, Portugal.
- Instituto Hidrográfico, 1990. Roteiro da Costa de Portugal - Do Cabo de São Vicente ao Rio Guadiana. Instituto Hidrográfico, Lisboa, 41p.

- Lynett P., Liu P.L.-F., 2008. Modeling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave Equations. COULWAVE Code Manual. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package, v. 2.0, May 2008.
- Pais, J., Cunha, P., Pereira, D., Legoinha, P., Dias, R., Moura, D., Kullberg, J.C., da Silveira, A.B. and González-Delado, J.A., 2012. The Paleogene and Neogene in Western Iberia (Portugal). A relevant Cenozoic record of the eastern north Atlantic margin, In: J. Pais (Edit), Springer-Verlag (Publs), 164 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22401-0.
- Kennedy, A., Chen, Q., Kirby, J., Dalrymple, R., 2000. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. Part I: 1D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126 (1): 39-47.
- Kirby, J., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A., Dalrymple, R., 1998. FUNWAVE 1.0: Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware. 80 pp.
- Wei, G. e Kirby, J., 1995. A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120: 251-261.
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., Subramanya, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294: 71-92.
- Willmott, C., Ackleson, S., Davis, R., Feddema, J., Klink, K., Legates, D., O'Donnell, J., Rowe, C. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C5): 8995-9005.