



Relatório

Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima: Praia da Galé

Janeiro 2013

Relatório EROS no. 1/2013



CIMA

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	DESCRIÇÃO DO MODELO SWAN	9
2.1	Estrutura Matemática do Modelo	10
2.1.1	Equação do balanço de energia	10
2.1.2	Os termos de propagação	11
2.1.3	Forçamento pelo campo de ventos.....	13
2.1.4	Interação Não Linear das Ondas	14
2.1.5	Dissipação de Energia.....	15
2.2	Implementação Numérica	17
2.2.1	Introdução	17
2.2.2	Geração, Dissipação e Interações Não Lineares Onda-Onda.....	19
2.3	Procedimentos de pré e pós processamento	19
3.	CASO DE ESTUDO: PRAIA DA GALÉ	22
3.1	Objectivos.....	22
3.2	Local de estudo	22
3.3	Condições da agitação marítima ao largo	24
3.4	Nível de maré	29
3.5	Medições <i>in situ</i> – 1º Caso.....	30
3.5.1	ADP.....	30
3.5.2	PT1 e PT2	33
3.6	Aplicação do modelo SWAN	37
3.6.1	Batimetria	37
3.6.2	Domínio de cálculo	37
3.6.3	Características do cálculo.....	38
3.7	Apresentação e análise de resultados: 1º caso.....	39
3.7.1	Apresentação de resultados	39
3.7.2	Análise de resultados	41
3.8	Apresentação e análise de resultados: 2º caso.....	43
3.8.1	Apresentação de resultados	43
4.	CONCLUSÕES.....	48
5.	BIBLIOGRAFIA	49
6.	ANEXOS	52
6.1	Diagrama	52
6.2	Guia de utilização do SWAN – Sopro.....	53
6.3	Histogramas.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração das várias grelhas que se podem usar no SWAN (Retirado de http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model).	10
Figura 2 – Termo fonte devido à acção do vento, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).	13
Figura 3 - Termo fonte devido à interação não linear de três ondas , calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen 2007).	14
Figura 4 - Termo fonte devido à interação não linear de quatro ondas , calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).	15
Figura 5 - Termo fonte devido à acção do atrito de fundo, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).	17
Figura 6 - Domínio de cálculo (x_c , y_c) em relação ao sistema local de coordenadas (x_p y_p). Adaptado de SWAN Team (2008).	21
Figura 7 - Mapas de localização da área de estudo.	23
Figura 8 - Batimetria da zona de estudo (NMM).	24
Figura 9 - Localização da bóia-ondógrafo de Faro.	24
Figura 10 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – 1º Caso.	25
Figura 11 - Séries temporais dos períodos de pico (T_p) e médio (T_z) – 1º Caso.	26
Figura 12 - Série temporal da direcção média (Dir) – 1º Caso.	26
Figura 13 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – 2º Caso.	27
Figura 14 - Séries temporais dos períodos de pico (T_p) e médio (T_z) – 2º Caso.	27
Figura 15 - Série temporal da direcção média (Dir) – 2º Caso.	28
Figura 16 - Rosa das direcções médias (Dir) – 2º Caso.	28
Figura 17 – Regime médio ao largo em termos dos parâmetros H_s , T_p e Dir , de 1998 a 2007 – 2º Caso.	29
Figura 18 – Registo horário do nível de maré – 1º Caso.	30
Figura 19 - Aspeto geral do ADP, sensor, dataloger e estrutura de suporte e colocação.	31
Figura 20 - Localização do ADP.	31
Figura 21 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – ADP.	32
Figura 22 - Série temporal do período de pico (T_p) – ADP.	32
Figura 23 - Série temporal da direcção média (Dir) – ADP.	32
Figura 24 - Rosa da direcção média (Dir) – ADP.	33
Figura 25 - Posicionamento e localização dos sensores na Praia da Galé.	34
Figura 26 – <i>Pressure Transducers</i> PT1 (a) e PT2 (b).	35
Figura 27 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – PT1.	35

Figura 28 - Série temporal do período médio (T_z) – PT1.	36
Figura 29 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – PT2.....	36
Figura 30 - Série temporal do período médio (T_z) – PT2.	36
Figura 31 – Altura significativa ao largo e no ADP.	40
Figura 32 – Período de pico ao largo e no ADP. Valores medidos e calculados.	40
Figura 33 – Direção média ao largo e no ADP. Valores medidos e calculados.	41
Figura 34 – Rosa das direcção médias ao largo e no ADP.	41
Figura 35 - Valores da altura de onda significativa (H_s) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH).....	43
Figura 36 - Valores do período de pico (T_p) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e +4 m (ZH).	44
Figura 37 - Valores da direcção média (Dir) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e +4 m (ZH).	44
A Figura 38 apresenta a rosa para as direcções médias (Dir) no ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH). Apresenta também os correspondentes valores ao largo.....	44
Figura 38 – Rosa da direcção média (Dir) no ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH).	45
Figura 39 - Regime médio no ADP, para o nível de maré de +2 m (ZH).	45
Figura 40 - Regime médio no ADP, para o nível de maré de +4 m (ZH).	46
Figura 41 – Activação de conteúdos na Base de Dados.	53
Figura 42 – Selecção do projecto.....	54
Figura 43 – Identificação do projecto.	54
Figura 44 – Definição da <i>Computacional Grid</i>	55
Figura 45 – Ficheiro batimétrico com valores z.	55
Figura 46 – Definição da <i>Bathymetry Grid</i>	56
Figura 47 – Definição da resolução espectral.	56
Figura 48 – Selecção de processos físicos.	57
Figura 49 – Definição das condições de agitação fronteira.	58
Figura 50 – Ficheiro com os dados de agitação ao largo.	58
Figura 51 – Definição do nome dos ficheiros de saída e dos pontos para os quais queremos obter resultados.	59
Figura 52 – Ficheiro com as coordenadas dos pontos a estudar.	59
Figura 53 – Definição da localização do ficheiro batimétrico, obtenção dos ficheiros de entrada (1), execução do programa SWAN (2) e obtenção dos resultados (matrizes de transferência).	60

Figura 54 – Ficheiro com os resultados obtidos para uma condição de agitação de entrada, nos pontos a estudar.	60
Figura 55 – Ficheiro com resultados em toda a <i>Computacional Grid</i> para uma condição de agitação de entrada.....	61
Figura 56 – Exemplo de ficheiro com os dados da matriz de transferência para um ponto em estudo.....	61
Figura 57 - Histograma Hs-Dir ao largo – 2º Caso.	62
Figura 58 - Histograma Hs-Tp ao largo – 2º Caso.....	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimo, médio e máximo para os parâmetros Hs, Tp e Dir, fornecidos pelo IH – 2º Caso.....	29
Tabela 2 – Valores mínimo, médio e máximo para os parâmetros Hs, Tp e Dir, obtidos pelo ADP.....	33
Tabela 3 - Características das malhas batimétricas.....	37
Tabela 4 - Malhas computacionais utilizadas no modelo SWAN.....	38
Tabela 5 - Estatísticas comparativas relativas aos parâmetros da agitação marítima Hs, Tp e Dir, obtidos para o ADP (1º Caso).....	42
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos no ponto ADP (para os níveis de +2 m e +4 m (Z.H.) e ao largo.....	46

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto EROS - Erosão dos Litorais Rochosos – Diferenças Na Proteção Conferida Pelas Praias Arenosas e Pelas Formas Litorais, projeto PTDC/CTE-GIX/111230/2009 financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, efetuou-se a caracterização da agitação marítima na zona da praia da Galé, recorrendo ao modelo numérico SWAN (Booij et al. 1999).

Esta caracterização é efetuada em duas partes:

1 – Aplicação e validação do modelo SWAN para as condições de agitação marítima que se verificaram no período 6 a 12 de Março 2012 que corresponde ao período em que se efetuaram medições in situ na praia da Galé;

2 – Aplicação do modelo SWAN para as condições de agitação marítima no período de 1998 a 2007 o que permite a caracterização do regime observado e médio da zona em estudo.

O presente relatório descreve este trabalho. Assim depois desta introdução efectua-se no capítulo 2, a descrição do modelo SWAN, no capítulo 3 a aplicação e validação do modelo SWAN e a caracterização dos regimes observado e médio. O relatório termina com o capítulo de conclusões.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO SWAN

O modelo SWAN - *Simulating WAVes Nearshore* - é um modelo numérico de agitação marítima baseado na equação de ação de balanço espectral (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2008) que modela a geração, propagação e dissipação da energia das ondas do mar. É um modelo computacional de agitação espectral de terceira geração, com utilização aberta (*freeware*).

O funcionamento do SWAN tem por base os pressupostos do modelo WAM (Komen *et al.*, 1994) e propaga a agitação marítima do largo até junto à costa, tomando em conta não apenas o fenómeno de geração, dissipação e interação não linear de quatro ondas associada a propagações em águas profundas, mas também fenómenos característicos de águas costeiras, tais como, a dissipação devida ao atrito de fundo, a rebentação devido à diminuição da profundidade e a interação não linear de três ondas (Booij et al., 1999).

A propagação da agitação atrás referida é feita através de esquemas numéricos implícitos nos espaços espectral e geográfico e pode ser realizada em modo estacionário ou não estacionário. Para este processo, é necessário fornecer ao modelo uma grelha batimétrica e uma grelha computacional - que poderão ser descritas em coordenadas cartesianas ou esféricas – juntamente com condições

fronteira e outros parâmetros de cálculo. Complementarmente, poderão ser introduzidos outros tipos de dados para melhorar a modelação, tais como, um campo de ventos e correntes. Campos estes que poderão ser variáveis no espaço e/ou no tempo. Na Figura 1 encontra-se um esquema com as múltiplas grelhas passíveis de serem utilizadas no modelo SWAN.

Existe ainda hipótese de se implementar um sistema de malhas encaixadas, no qual as malhas exteriores, de menor resolução, servem de condição fronteira para as malhas interiores, melhorando os resultados a obter na malha interior e poupando tempo de computação, em comparação com uma corrida de apenas uma malha de alta resolução em todo o domínio.

O SWAN é então capaz de fornecer múltiplos parâmetros referentes à agitação da superfície livre, em qualquer ponto do domínio de estudo, Figura 1.

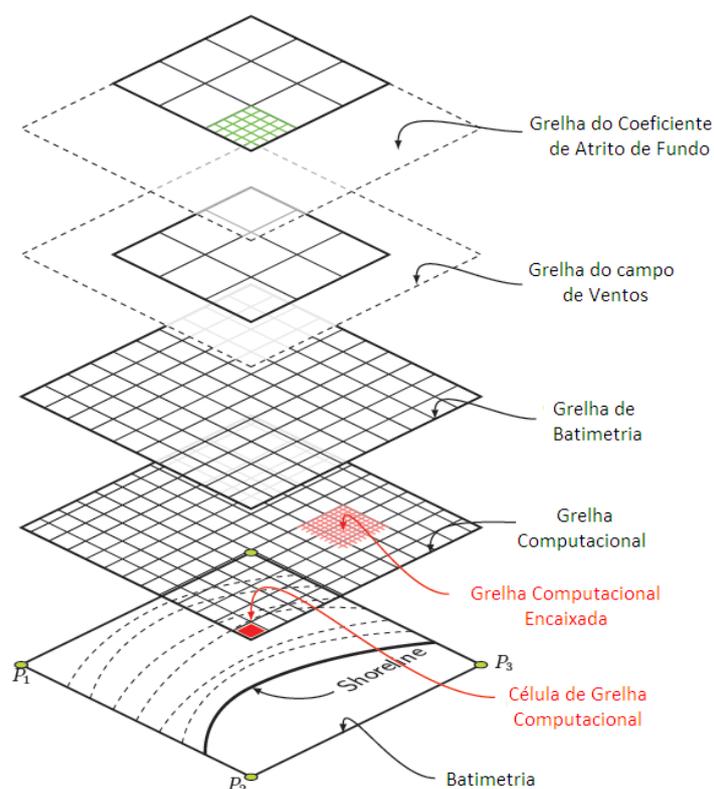


Figura 1 - Ilustração das várias grelhas que se podem usar no SWAN (Retirado de <http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model>).

2.1 Estrutura Matemática do Modelo

2.1.1 Equação do balanço de energia

A descrição do modelo SWAN que na sequência se apresenta, seguiu Holthuisen (2007). Sendo o SWAN um modelo de terceira geração possui a capacidade de

interpretar e tratar o espectro de agitação como a sobreposição de um conjunto de ondas numa determinada área, sendo que cada uma destas ondas é caracterizada por uma frequência própria. Isto permite que cada frequência seja resolvida individualmente a partir da teoria linear da onda. Assim, torna-se possível obter a descrição estatística da superfície livre do mar através do espectro de variância de densidade ou pela variância da energia $E(\sigma, \theta)$, distribuindo a energia das ondas por frequências.

Como já foi referido, o SWAN baseia-se na equação do balanço de energia espectral. Esta pode ser formulada em coordenadas esféricas, para computações de grande escala, ou, perante aplicações de menor escala, em coordenadas cartesianas (1). A equação de balanço de energia espectral utiliza a densidade de ação de onda

$N = \frac{E}{\sigma}$ em detrimento da densidade de energia E, já que esta última não se conserva ao longo da propagação de energia entre ondas e correntes.

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \quad (1)$$

A parte esquerda desta igualdade representa a componente cinemática da equação, ao passo que a parte direita $S=(\sigma, \theta, x, y, t)$ refere-se aos termos fonte e sumidouro. Da esquerda para a direita, o primeiro termo exprime a taxa de variação local da densidade de ação no tempo, os dois termos seguintes representam a propagação da energia das ondas através do espaço x-y, sendo a velocidade de grupo $c_{g,x}$, $c_{g,y}$ ($c_g = d\sigma/dk$) definida a partir da relação da dispersão $\sigma^2 = g |k| \tanh(|k|d)$, onde k representa o número de onda e d a profundidade. O quarto termo exprime a refração provocada pelas correntes e variações de profundidade e, por fim, o quinto pesa a variação da frequência angular causada por alterações da profundidade e correntes.

Na parte direita da igualdade, $S=(\sigma, \theta, x, y, t)$, engloba três termos distintos de geração e dissipação de energia (2),

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

onde, $S_{in}(\sigma, \theta)$ representa a energia gerada pelo vento, $S_{nl}(\sigma, \theta)$, as interações não lineares e $S_{diss}(\sigma, \theta)$, a dissipação de energia por fenómenos como a rebentação induzida pelo fundo, a rebentação parcial, ou *whitecapping*, e o atrito de fundo.

2.1.2 Os termos de propagação

Desde a sua geração até à costa, os parâmetros fundamentais da onda marítima são alterados por fatores ambientais e físicos, pelo que é importante considerar estes processos e que o SWAN os descreva matematicamente.

O efeito da diminuição da profundidade respeita a relação de dispersão ($\sigma^2 = gk \tanh(kh)$), o que implica que a celeridade e o comprimento de onda diminuam proporcionalmente à profundidade. A refração, partindo da velocidade de mudança de direção da onda, é calculada através de uma abordagem Euleriana, dividindo o espaço de computação numa malha multi-celular. O empolamento provoca uma elevação da superfície livre, a frequência constante, admitindo ausência de correntes.

Na presença de correntes marítimas, a frequência e amplitude das ondas serão afetadas. Neste tipo de situação, a teoria linear apenas poderá ser considerada válida se tanto o campo de correntes como a profundidade forem considerados constantes no espaço e no tempo, o que leva a que a frequência absoluta ω possa ser descrita pela equação 3.

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (3)$$

onde σ representa a frequência relativa ou intrínseca e na segunda parcela da soma \vec{k} e \vec{u} representam o número de onda e o vector da velocidade da corrente, respetivamente.

A presença de correntes na agitação marítima é considerada pelo modelo matemático do SWAN, através das seguintes expressões para a velocidade de propagação da energia da onda $c_g + \vec{u}$, c_θ e c_σ no plano cartesiano x, y , no espaço definido por θ e pela frequência relativa, σ .

$$\frac{dx}{dt} = c_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\sigma \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + \vec{u} \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left[\frac{\delta\sigma}{\delta h} \frac{\delta h}{\delta m} + \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right] \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \nabla h \right) - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \quad (6)$$

nas quais o parâmetro s representa o deslocamento na direção de propagação, m é o deslocamento na perpendicular, h a profundidade e o termo (d/dt) exprime a derivada total no campo de propagação da energia da onda

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (c_g + \vec{u}) \nabla - \vec{x} \cdot \nabla \quad (7)$$

2.1.3 Forçamento pelo campo de ventos

Na modelação da transferência de energia do vento para a superfície marítima, o modelo SWAN conjuga o efeito de dois processos distintos, um de crescimento linear e outro de crescimento exponencial.

O efeito do vento na superfície do mar é então o resultado da soma destes dois processos

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (8)$$

onde o termo A se refere à parcela linear e B à componente exponencial do processo de transferência e ambos os termos, A e B , dependem da direção e frequência da onda e da direção e intensidade do campo de ventos local.

A Figura 2 apresenta a distribuição espectral da ação do termo fonte associado ao forçamento do vento para o caso de um espectro JONSWAP. Esta transferência de energia do vento para as ondas ocorre, principalmente, perto da frequência de pico e das altas frequências.

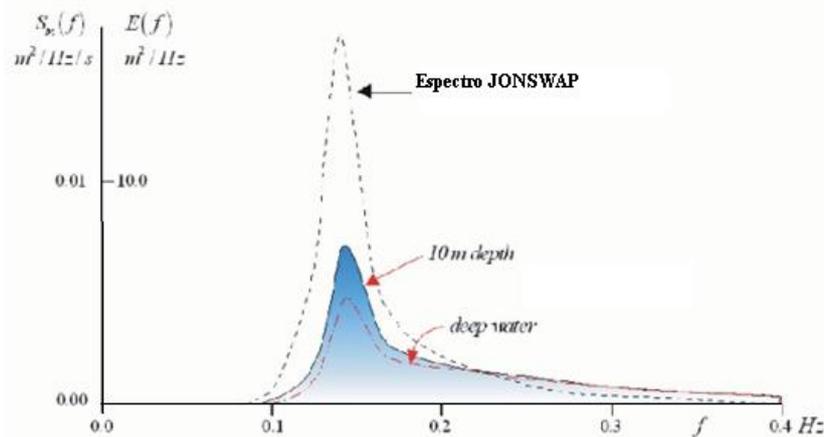


Figura 2 – Termo fonte devido à acção do vento, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).

A caracterização do termo de crescimento exponencial, B , pode ser feita de duas formas distintas, ambas explanadas em Booji et al. (1999).

Os valores de entrada do campo de ventos medidos são convertidos na velocidade de atrito u_* , recorrendo à expressão

$$u_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (9)$$

É essencial, para uma boa performance do SWAN, que os ventos fornecidos ao modelo sejam os referentes à altura padrão de 10 m, U_{10} . Este facto mostrou-se

fundamental na modelação da agitação marítima do presente estudo, como de resto se poderá atestar mais à frente no texto.

Na expressão da velocidade de atrito acima descrita, C_D , representa o coeficiente de arrastamento. Este coeficiente é descrito por duas diferentes expressões, consoante a gama de velocidades do vento atuante (Holthuijsen, 2007)

$$C_D = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} \\ (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} \end{cases}, \text{ se } \begin{cases} U_{10} < 7.5 \text{ m/s}; \\ U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s}; \end{cases} \quad (10)$$

2.1.4 Interação Não Linear das Ondas

As interações não lineares entre ondas podem revelar-se de extrema importância em determinadas situações de agitação. Para modelação da agitação marítima em águas pouco profundas a interação não linear quase ressonante de três ondas é dominante, ao passo que em águas profundas a interação entre grupos de quatro ondas é a mais relevante. Em ambos os casos, esta interação entre ondas resulta em transferências de energia através do espectro.

De facto, em águas pouco profundas a interação entre grupos de três ondas pode levar a uma transferência abrupta de energia das frequências mais baixas para as mais altas, conduzindo a um espectro de várias frequências de pico, por oposição a uma única frequência de pico inicial (Holthuijsen, 2007). Na Figura 3 apresenta-se o espectro de frequências tipo, quando afetado por interações não lineares de três ondas.

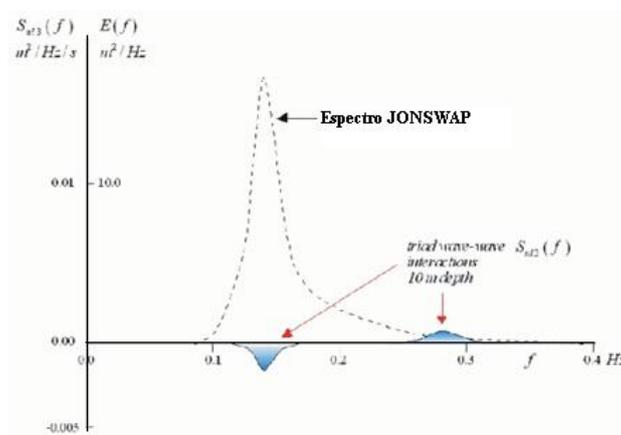


Figura 3 - Termo fonte devido à interação não linear de três ondas , calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen 2007).

Este tipo de interações é descrito pelo SWAN a partir da aproximação de LTA (Lumped Triad Approximation), (Eldeberky, 1996).

Em situações de agitação em águas de maior profundidade a interação entre grupos de quatro ondas passa a predominar, transferindo a frequência de pico para valores mais baixos e para zonas de frequências superiores, onde posteriormente a energia é dissipada por rebentação parcial (*whitecapping*). Na Figura 4, apresenta-se o espectro de frequências tipo, quando afetado por interações não lineares quadruplas.

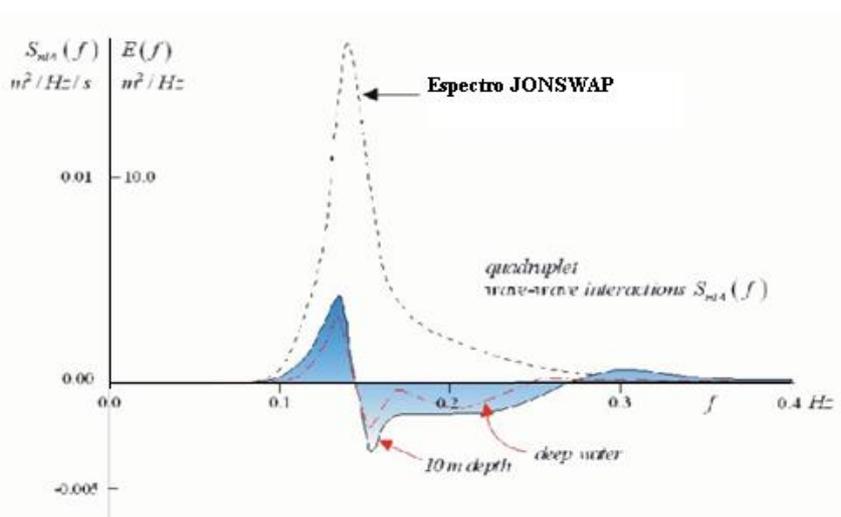


Figura 4 - Termo fonte devido à interação não linear de quatro ondas , calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).

Este tipo de interações é descrito pelo SWAN a partir de duas formas, a formulação WRT (Webb-Resio-Tracy), (van Vledder, 2006) e a formulação DIA (Discrete Interaction Approximation), desenvolvida por Hasselmann et al. (1985)

2.1.5 Dissipação de Energia

A dissipação de energia das ondas é o resultado de três fenômenos base: a rebentação parcial (*whitecapping*), a rebentação induzida pela profundidade e o atrito de fundo.

i) Rebentação Parcial (*Whitecapping*)

A rebentação parcial é essencialmente dependente da declividade da onda. Nos modelos de terceira geração como é o caso do SWAN, a sua formulação baseia-se no modelo de Hasselmann (1974); SWAN Team 2008, tendo sido já introduzida previamente no modelo WAM (WAMDI group, 1988) e pode ser representada pela seguinte expressão

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \sigma_m \frac{k}{k_m} E(\sigma, \theta) \quad (11)$$

onde Γ representa o coeficiente de declividade, k o número de onda, σ_m a frequência média e k_m o número de onda médio. O valor de Γ foi estimado por Komen et al. (1994) através da equação de balanço da energia para um estado de mar de completo desenvolvimento, o que significa que há uma dependência direta entre o valor de Γ e a formulação utilizada para a geração de onda pelos ventos. O SWAN utiliza a formulação de Komen et al. (1994) por omissão. Esta formulação representa uma aproximação quasi-linear pois depende apenas de valores integrais do espectro (σ_m, K_m) , que configuram uma declividade média.

Mais recentemente foi proposta por Westhuysen et al. (2007) uma formulação diferente para a dissipação de energia por rebentação parcial no SWAN, a qual é baseada na aproximação não linear desenvolvida por Alves e Banner (2003), que tem um carácter local pois depende da declividade local e não da declividade média estendida a todo o espectro,

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{\frac{p}{2}} (\tanh(kh))^{\frac{2-p\sigma}{4}} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta) \quad (12)$$

onde B_r é um coeficiente relacionado com a rebentação e obtido de forma experimental e $B(k)$ calcula-se a partir do integral

$$B(k) = \int_0^{2\pi} c_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta \quad (13)$$

Esta expressão adaptada é combinada com um termo de forçamento do vento baseado no proposto por Yan (1987).

ii) Rebentação Induzida Pelo Fundo

À medida que a profundidade vai diminuindo, na aproximação à costa, a energia da onda vai-se concentrando até que chega a um ponto limite e rebenta, dissipando a rápida e totalmente a sua energia.

Este parâmetro encontra-se definido no SWAN a partir da proposta apresentada por Battjes e Jansen (1978), que propõem que a dissipação de energia por unidade de área (D_{tot}) , causada por rebentação é definida pela expressão

$$D_{tot} = -1/4 \alpha_{BJ} Q_b (\sigma_1 m / 2\pi) H_{1max}^2 = \alpha_{BJ} Q_b \sigma_1 m (H_{1max}^2) / 8\pi \quad (14)$$

onde $\alpha_{BJ} = 1$, Q_b é a parcela de ondas sujeitas a rebentação e H_{max} é a altura máxima para qual não se dá rebentação, definida por $H_{max} = \gamma d$, onde d define a profundidade e γ , o parâmetro de rebentação, que tem vindo a assumir diferentes

valores ao longo dos anos, sendo que uma das propostas mais recentes e aproximadas é a de Holthuijsen (2007) que definiu $\gamma = 0.79$.

iii) Atrito de Fundo

Este parâmetro de dissipação de energia é resultado das interações da coluna líquida com o fundo. É descrito no SWAN de três formas distintas todas baseadas na seguinte expressão

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kh} E(\sigma, \theta) \quad (15)$$

onde C_b é um coeficiente dependente do movimento do fluido junto ao fundo e alterável pelo utilizador através dos ficheiros de entrada.

Em águas pouco profundas o aspecto do espectro de frequências para a variação do atrito de fundo pode ser representado pelo gráfico na Figura 5.

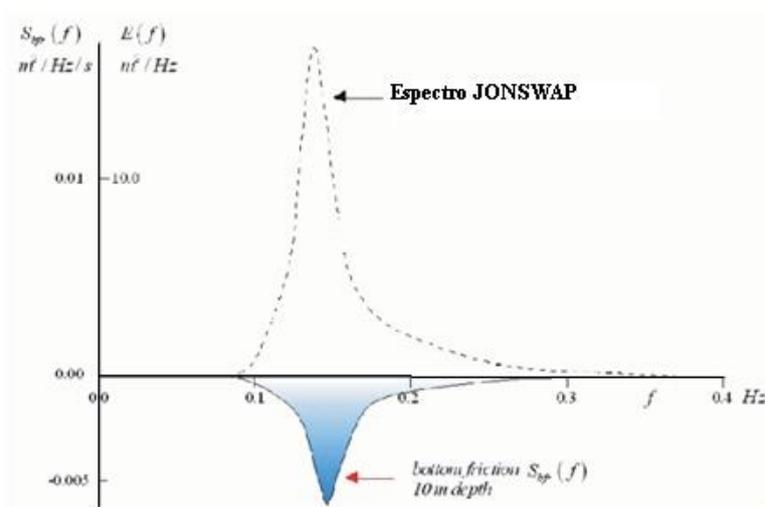


Figura 5 - Termo fonte devido à acção do atrito de fundo, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).

2.2 Implementação Numérica

2.2.1 Introdução

Uma das preocupações principais ao utilizar um modelo numérico é o tempo de computação exigido, o que torna fundamental a escolha de um esquema numérico apropriado para, neste caso, modelar a propagação da agitação por forma a obter resultados apropriados. Estes esquemas numéricos devem satisfazer critérios de estabilidade, convergência e consistência (Smith, 1978).

A discretização do tempo é feita através de intervalos de tempo Δt constantes para a integração simultânea dos termos de propagação e termos fonte (para computações em modo estacionário o tempo é removido das equações). A malha

retangular que define o espaço geográfico cartesiano é composta por células de dimensões Δx e Δy e o espaço espectral é discretizado com uma resolução direcional constante $\Delta\theta$ para cada frequência ($\Delta\sigma/\sigma$).

As frequências são definidas pelo intervalo entre um limite inferior f_{\min} e um limite superior f_{\max} , especificados pelo utilizador (Valores típicos para condições de mar: $f_{\min} = 0.04\text{Hz}$ e $f_{\max} = 1\text{Hz}$). Abaixo deste intervalo o espectro assume valor zero, acima é imposto uma extensão ao espectro da forma f^{-m} , onde o valor de m varia consoante a formulação de geração de vento utilizada.

A natureza aleatória das ondas geradas pelo vento, apresenta um desafio para os modelos de computação, pois a esta aleatoriedade corresponde uma multiplicidade de escalas temporais. No caso do SWAN, sendo um modelo de agitação de águas pouco profundas, vê crescer a necessidade de utilizar altas resoluções para resolver os pormenores da batimetria. Nos esquemas numéricos explícitos a discretização espacial está ligada à discretização temporal pelo critério de *Courant – Fredrichs – Levy* (CFL), que explica que a um passo temporal apenas pode corresponder um avanço de uma célula em ambas as direções $(\Delta x; \Delta y)$ o que limita diretamente as

velocidades de propagação no espaço $\left(\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{g,x}}; \Delta t \leq \frac{\Delta y}{c_{g,y}} \right)$.

Por esta razão, o modelo SWAN utiliza um esquema numérico implícito e resolve as equações relativas ao processo de propagação através do método das diferenças finitas. Por “esquema implícito” deve-se entender que neste tipo de esquema todas as derivadas da acção de densidade são formuladas no mesmo nível temporal de computação. Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e os intervalos discretos dos passos Δx , Δy e Δt podem ser escolhidos de forma independente uma vez que não estão condicionados pelo critério CFL.

Chegado à altura de escolher o esquema de propagação associado à propagação das ondas nos espaços geográfico e espectral, o utilizador pode escolher entre três esquemas distintos:

- i. Esquema BSBT (Backward Space, Backward Time) – é um esquema de primeira ordem de diferenças retardadas, aplicável em modo estacionário ou não estacionário. Este esquema é o esquema adoptado por omissão pelo SWAN
- ii. Esquema S&M (Stelling and Leendertse, 1992) – é um esquema de segunda ordem, exclusivo para corridas em modo não estacionário.
- iii. Esquema SORDUP – (Second ORDer, UPwind – Rogers et al., 2002) – é um esquema de segunda ordem, exclusivo para corridas em modo estacionário.

Para uma descrição mais aprofundada destes esquemas numéricos e suas discretizações, recomenda-se a consulta de Holthuijsen (2007).

2.2.2 Geração, Dissipação e Interacções Não Lineares Onda-Onda

O SWAN realiza abordagens diferentes para as aproximações numéricas aos termos fonte de acordo com a sua natureza de contribuição positiva ou negativa (sumidouros). De um modo geral, os termos fonte e sumidouro podem ser escritos na forma $S = \phi E$, onde ϕ é um coeficiente que depende de parâmetros integrais do espectro das ondas. Este coeficiente é calculado no passo temporal anterior. Os esquemas numéricos explícitos são caracterizados por:

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^{n-1} \quad (16)$$

e estão associados a termos fonte (positivos).

Para o caso dos termos sumidouro de energia, para que haja estabilidade no modelo é necessário um esquema implícito. Neste caso os termos são divididos consoante se tratem de processos fortemente não lineares ou de não linearidade fraca.

O único fenómeno dos termos sumidouros considerado fortemente não linear é a rebentação devida a diminuição da profundidade. Deste modo, ela é estimada no nível n da iteração, a par com a aproximação linear do nível precedente

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^n + \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)^{n-1} (E^n - E^{n-1}) \quad (17)$$

Os restantes termos sumidouro, com não linearidade menor, são estimados com o mesmo nível de aproximação através da substituição de $\left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)^{n-1}$ por $\left(\frac{S}{E} \right)^{n-1}$, o que confere à equação seguinte um esquema simplificado e por isso mais económico

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^{n-1} + \left(\frac{S}{E} \right)^{n-1} (E^n - E^{n-1}) \quad (18)$$

Tendo em conta que $S = \phi E$, (23) fica:

$$S^n \approx \phi^{n-1} E^n \quad (19)$$

Estas estimativas dos termos fonte e sumidouro são então adicionadas aos elementos da matriz, para a propagação.

2.3 Procedimentos de pré e pós processamento

O modelo SWAN requer à partida ficheiros de entrada com toda a informação relativa ao caso de estudo e aos parâmetros da corrida em questão. Nestes ficheiros

devem constar os diferentes nomes de ficheiros que o utilizador pretende que sejam lidos pelo programa, de modo a fornecer informação sobre a batimetria, malhas computacionais, parâmetros da agitação ao largo, ventos, níveis de maré, correntes, etc. Devem também constar especificações acerca dos vários fenómenos físicos considerados, assim como do esquema numérico e suas especificidades iterativas e finalmente quais os parâmetros de agitação e localização geográfica dos dados de saída que se pretendem (estes dados de saída podem vir na forma paramétrica ou espectral).

O SWAN permite, portanto, a consideração de vários fenómenos físicos e, em alguns casos, alterar as metodologias de cálculo pressupostos por omissão, assim como os valores de alguns parâmetros, como é o caso da constante das fórmulas de atrito de fundo. Entre estes fenómenos contam-se, por exemplo, a rebentação parcial, o atrito de fundo, a rebentação induzida pela profundidade, interações não lineares entre grupos de três e quatro ondas e interação com as correntes.

Para casos em que se pretende computar um domínio de grandes dimensões, o SWAN permite um plano de múltiplas corridas, o já descrito esquema de malhas encaixadas, que permite melhorar os tempos de computação sem comprometer a fiabilidade dos resultados.

Quando se pretende executar o SWAN em modo não estacionário, é necessário um ficheiro de entrada por cada malha encaixada. No entanto, em modo estacionário é necessário criar um número de ficheiros de entrada igual ao número de entradas de dados vezes o número de malhas encaixadas. Assim, no caso de uma corrida para um período total de 24 horas, com dados de entrada de hora a hora, com 3 malhas encaixadas o utilizador terá de criar (24×3) 72 ficheiros diferentes. Daqui se compreende a importância de um gerador de ficheiros de dados de entradas como o SOPRO, que realiza esta tarefa automaticamente, agilizando bastante a tarefa do utilizador do SWAN.

No ANEXO A apresenta-se um diagrama do funcionamento do SWAN, aliado ao programa SOPRO, com todos os dados de entrada e saída do modelo.

No que concerne a direção dos ventos e ondas, o SWAN permite que a entrada e saída dos dados seja feita na convenção Náutica ou na Cartesiana. Na convenção Náutica, a medição é feita a partir do Norte no sentido dos ponteiros do relógio até à direção de onde sopram os ventos. Na convenção Cartesiana o Norte é substituído pelo eixo Ox positivo e partir deste mede-se, no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, a direção para onde o vento sopra.

Em relação aos dados da agitação marítima na fronteira, podem ser inseridos na forma paramétrica ou espectral. Para a primeira são necessários valores da altura

significativa, do período de pico ou médio, da direção média para a frequência de pico e da dispersão em direção. Para introduzir a agitação na forma espectral existem três hipóteses distintas: um espectro bidimensional discreto $E(\sigma, \theta)$, um espectro bidimensional discreto $E(\sigma)$ complementado pela direção média e dispersão relativas para cada frequência, ou um de três espectros unidimensionais empíricos de distribuição também ela unidimensional empírica -JONSWAP, Pierson-Moskowitz e um espectro de distribuição gaussiana, (Ris, 1997).

Na definição da localização e dimensões geográficas da zona de estudo, o SWAN permite a escolha entre coordenadas geográficas ou cartesianas. Para o segundo caso, o utilizador tem que definir a origem geográfica (0,0) e a direção dos eixos dos vários domínios, em relação ao sistema local de coordenadas (Figura 6).

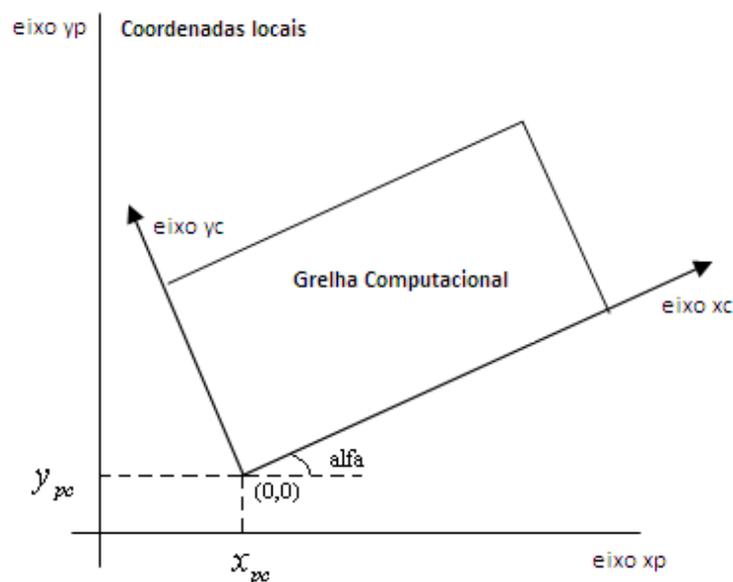


Figura 6 - Domínio de cálculo (x_c, y_c) em relação ao sistema local de coordenadas (x_p, y_p) . Adaptado de SWAN Team (2008).

É no espaço direcional que o SWAN faz todos os cálculos dos parâmetros de onda, no intervalo de direções que o utilizador desejar.

3. CASO DE ESTUDO: PRAIA DA GALÉ

3.1 Objectivos

Neste capítulo, descreve-se a aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona da praia da Galé, tendo como principais objectivos: a validação do modelo numérico e a obtenção dos regimes geral observado e médio. Assim, aplica-se o modelo SWAN na transferência de dados da agitação marítima, registados pela bóia-ondógrafo de Faro, para a zona marítima da praia da Galé em dois casos distintos que abrangem diferentes intervalos de tempo:

- **1º Caso:** os dias da realização de uma campanha de medições (6 a 12 de Março, 2012). Neste caso, avalia-se o desempenho do modelo SWAN, estabelecendo a comparação dos resultados numéricos obtidos por simulação utilizando o SWAN (parâmetros da altura de onda significativa, H_s , período de pico, T_p , e direcção média, Dir) com os correspondentes valores baseados em medições *in situ*, para o local onde foi colocado um *Acoustic Doppler Profiler* (ADP);
- **2º Caso:** de 1 de Janeiro 1998 a 31 de Dezembro 2007. Neste caso, obtêm-se os resultados numéricos através do SWAN (parâmetros de altura de onda significativa, H_s , período de pico, T_p e direcção média, Dir) para a posição de medição do ADP referente ao 1º Caso, com os quais é possível (a fim de) definir os regimes gerais observados e regime médio.

A metodologia utilizada em ambos os casos foi:

- 1 – Estabelecimento das condições de agitação marítima e maré ao largo com base nos dados obtidos na bóia de Faro;
- 2 – Aplicação do modelo SWAN para essas condições de agitação ao largo;
- 3 – Obtenção dos resultados numéricos no ponto de medição de dados.

Nas próximas seções, descreve-se o local de estudo, as condições de agitação marítima e de marés ao largo, as medições *in situ* e, finalmente, a aplicação do modelo SWAN.

3.2 Local de estudo

A área estudada situa-se na zona marítima da praia da Galé, na região do Algarve, em Portugal (Figura 7).

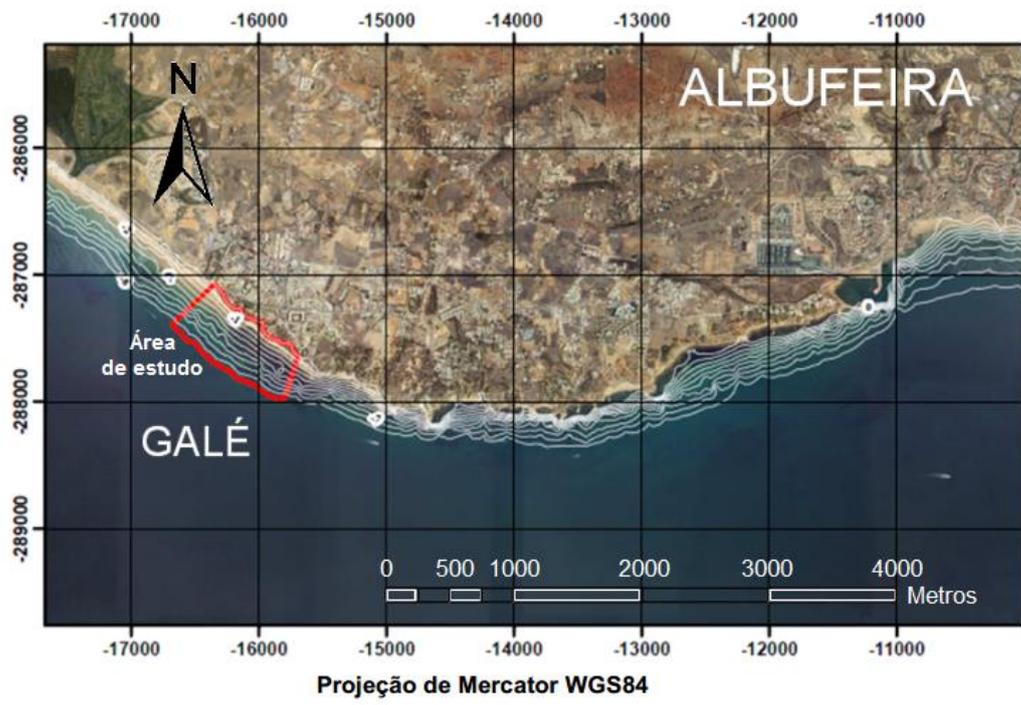
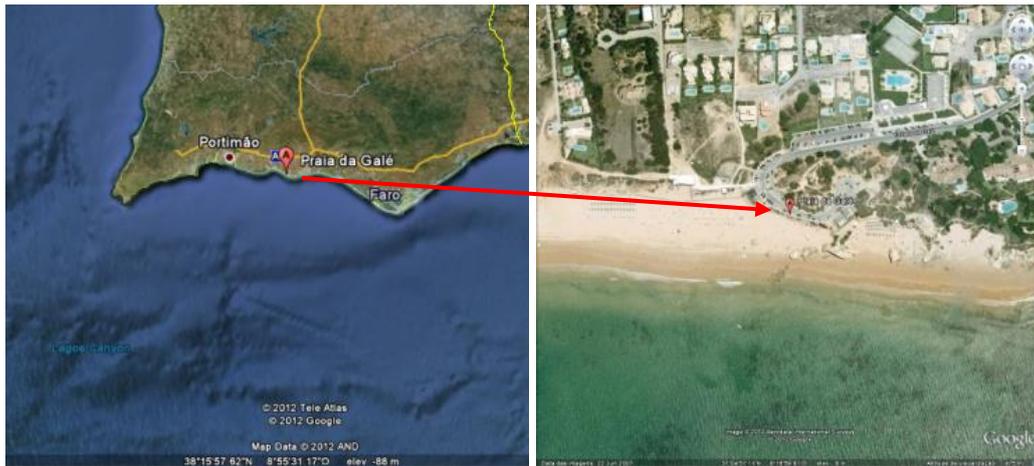


Figura 7 - Mapas de localização da área de estudo.

Na Figura 8 podem visualizar-se as linhas isobatimétricas relativas ao NMM para zona estudada.

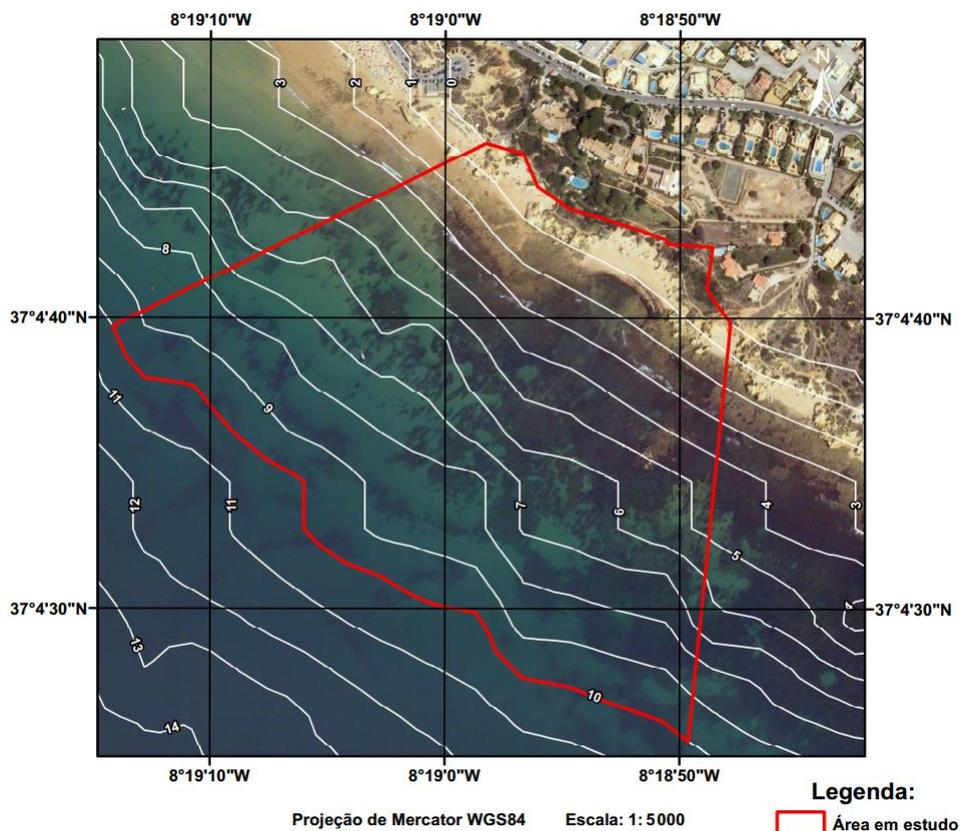


Figura 8 - Batimetria da zona de estudo (NMM).

3.3 Condições da agitação marítima ao largo

Na caracterização da agitação marítima ao largo da zona estudada, recorreu-se aos dados de agitação marítima, medidos pela bóia-ondógrafo de faro (bóia direcional WAVERIDER e recetor WAREC), fornecidos pelo Instituto Hidrográfico (IH). A bóia encontra-se localizada à batimétrica +93 m, relativa ao Zero Hidrográfico (ZH), sendo a sua posição de 36° 54' 17" N, 07° 53' 54" W (Filipe *et al.*, 1999) (Figura 9).

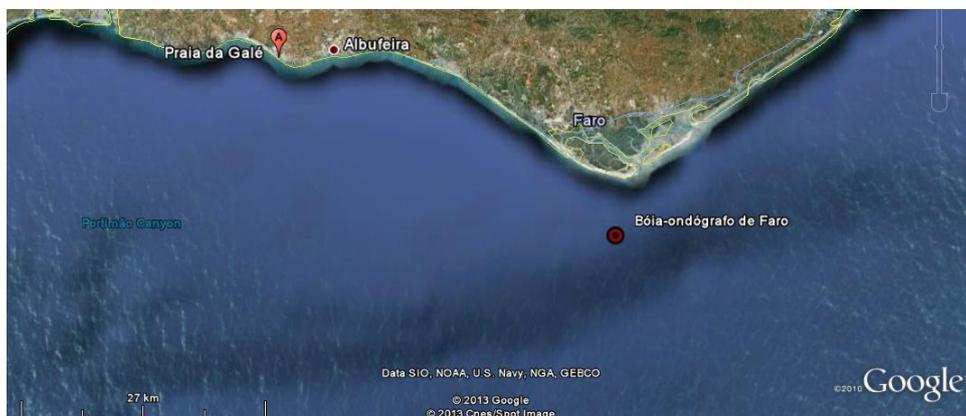


Figura 9 - Localização da bóia-ondógrafo de Faro.

Da Figura 10 à Figura 12 apresentam-se as séries temporais dos valores tri-horários medidos (parâmetros de altura de onda significativa, H_s , período de pico, T_p , e médio, T_z , e direcção média, Dir) pela bóia-ondógrafo de Faro, disponibilizados pelo IH, para os dias 6 a 12 de Março de 2012 (1º Caso).

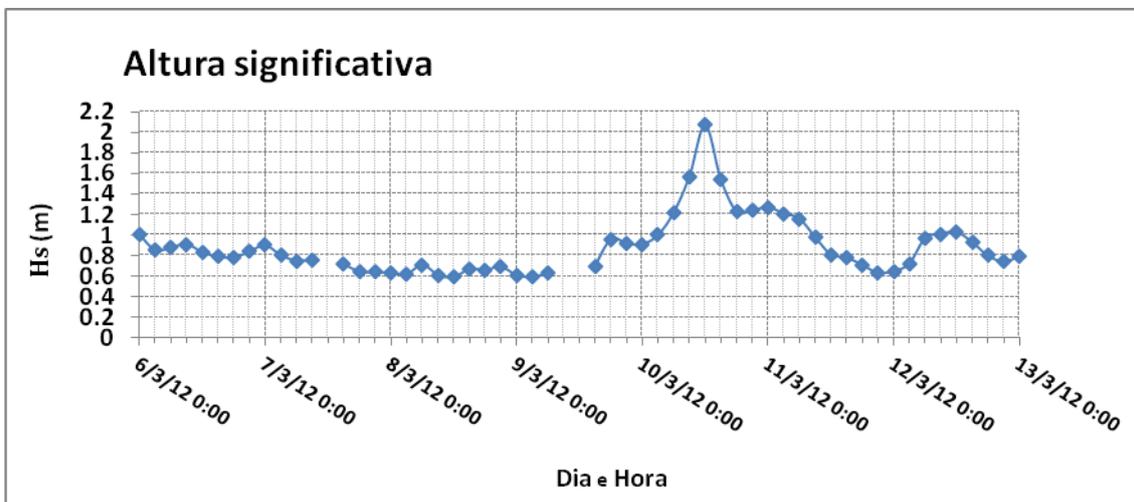


Figura 10 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – 1º Caso.

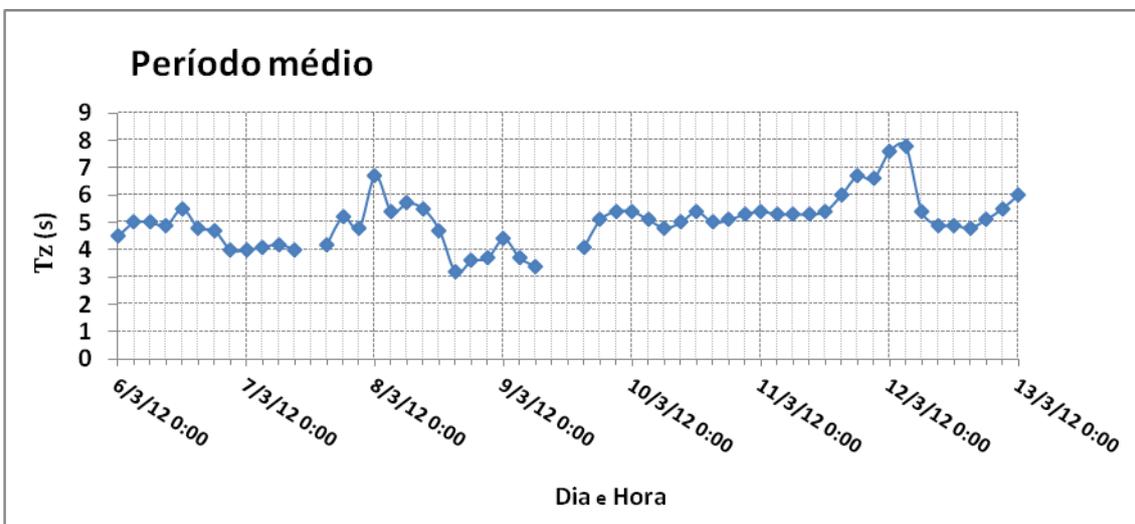
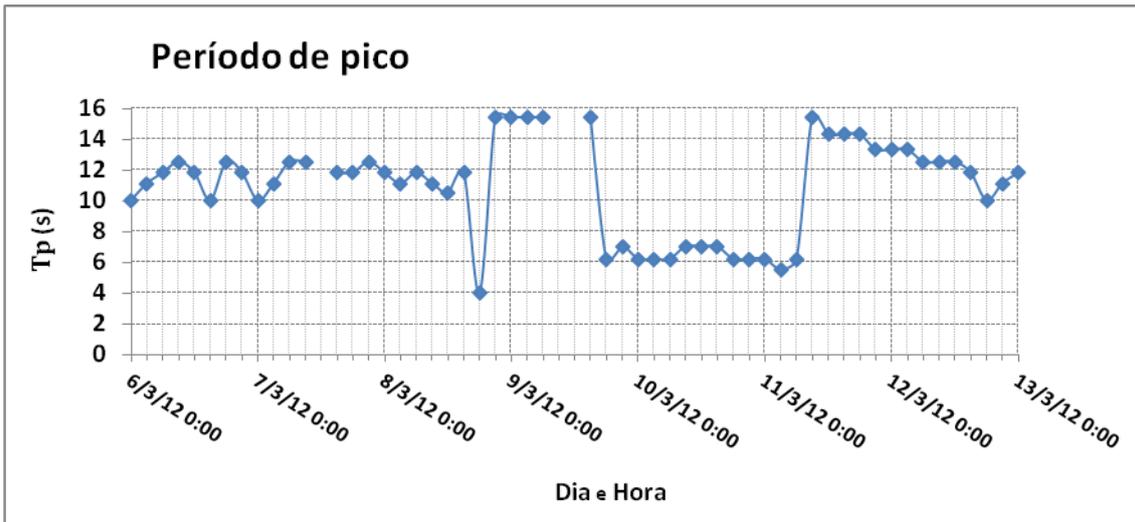
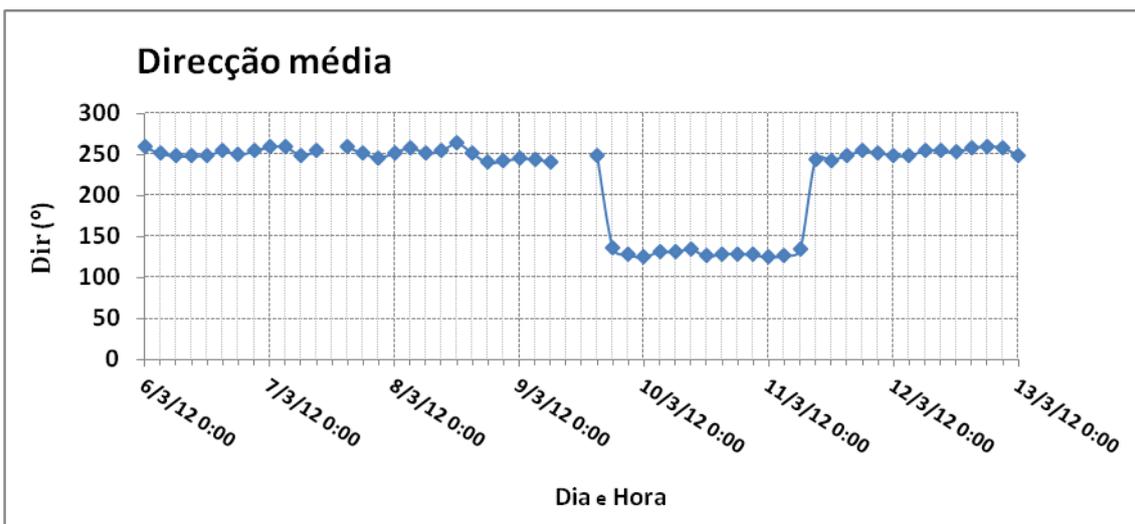


Figura 11 - Séries temporais dos períodos de pico (Tp) e médio (Tz) – 1º Caso.



Da Figura 14 à Figura 18 são apresentadas as séries temporais dos dados tri-horários de agitação marítima (parâmetros de altura de onda significativa, H_s , período de pico, T_p , e médio, T_m , e direcção média, Dir) medidos pela bóia-onógrafa de Faro, disponibilizados pelo IH, para os anos 1998 a 2007 (2º Caso).

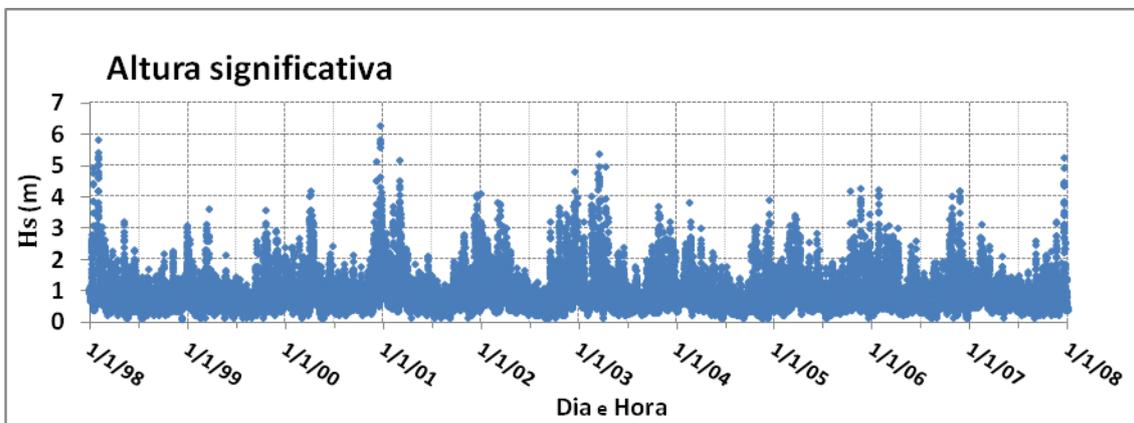


Figura 13 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – 2º Caso.

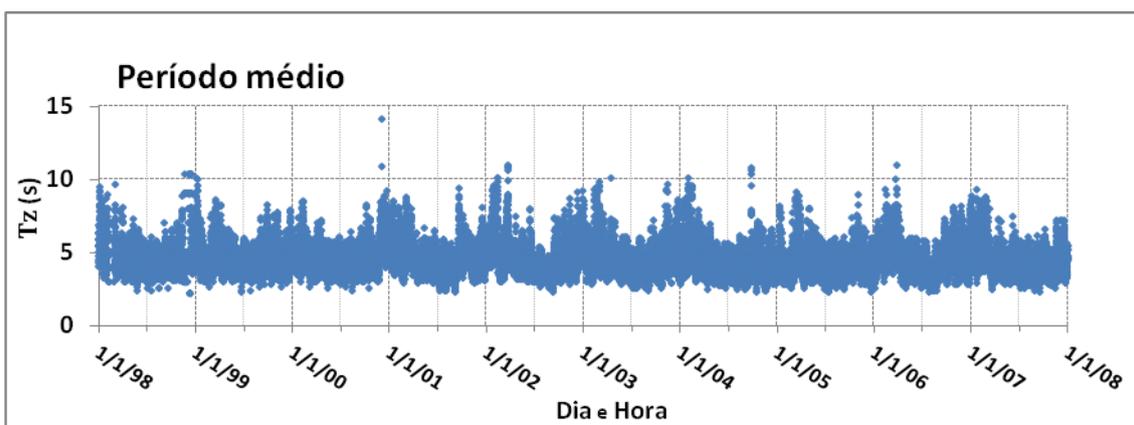
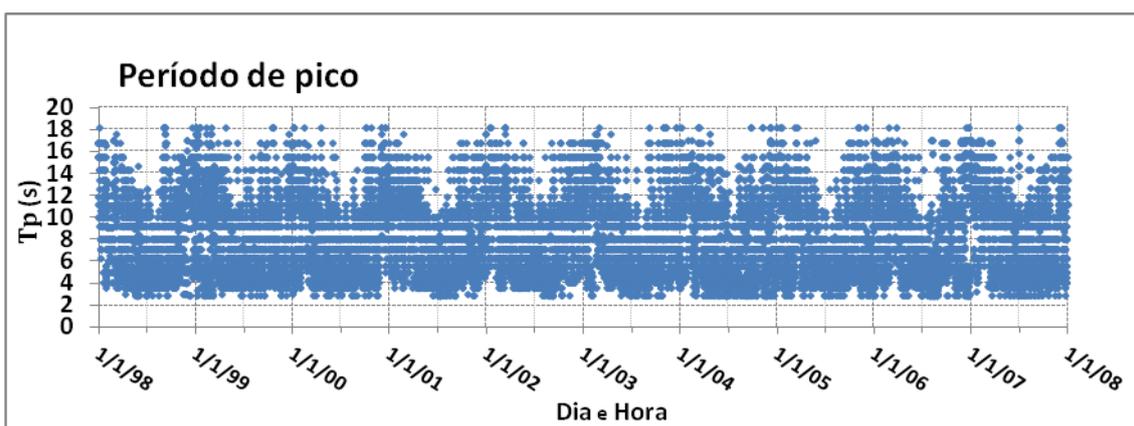


Figura 14 - Séries temporais dos períodos de pico (T_p) e médio (T_z) – 2º Caso.

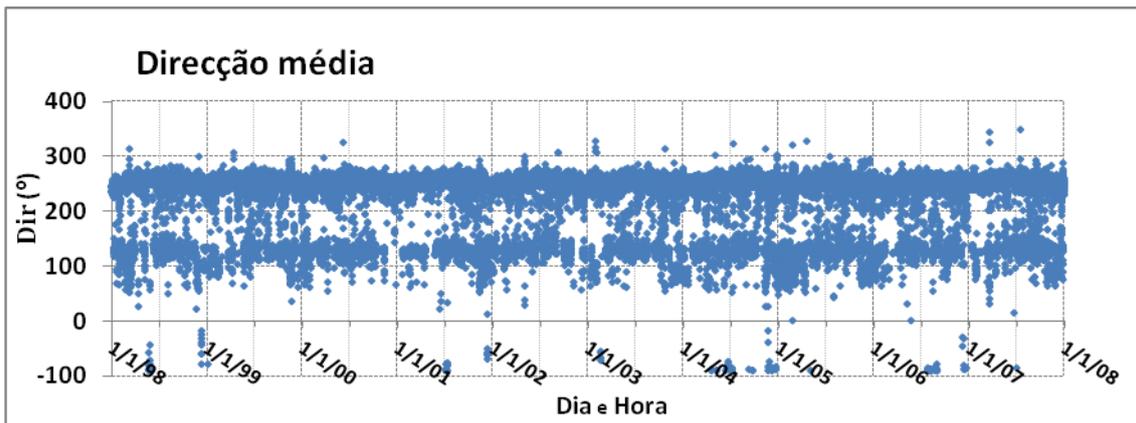


Figura 15 - Série temporal da direcção média (Dir) – 2º Caso.

A Figura 16 apresenta o diagrama de rosa para as direcções médias (Dir) ao largo no 2º Caso.

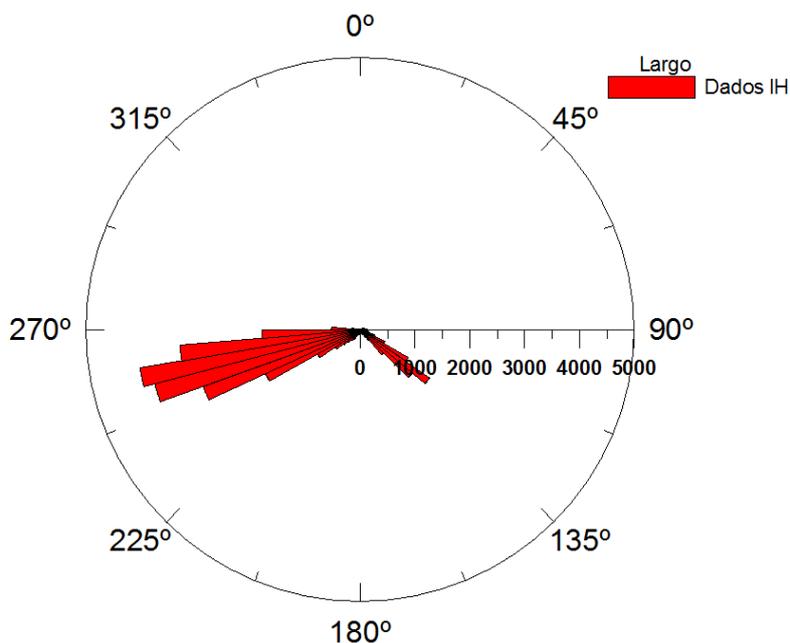


Figura 16 - Rosa das direcções médias (Dir) – 2º Caso.

A Figura 57 e a Figura 58, em anexo (6.3), apresentam para o 2º Caso, respectivamente os histogramas dos parâmetros Hs-Dir e Hs-Tp ao largo.

A Figura 17 apresenta o regime médio ao largo em termos dos parâmetros Hs, Tp e Dir, de 1998 a 2007 – 2º Caso.

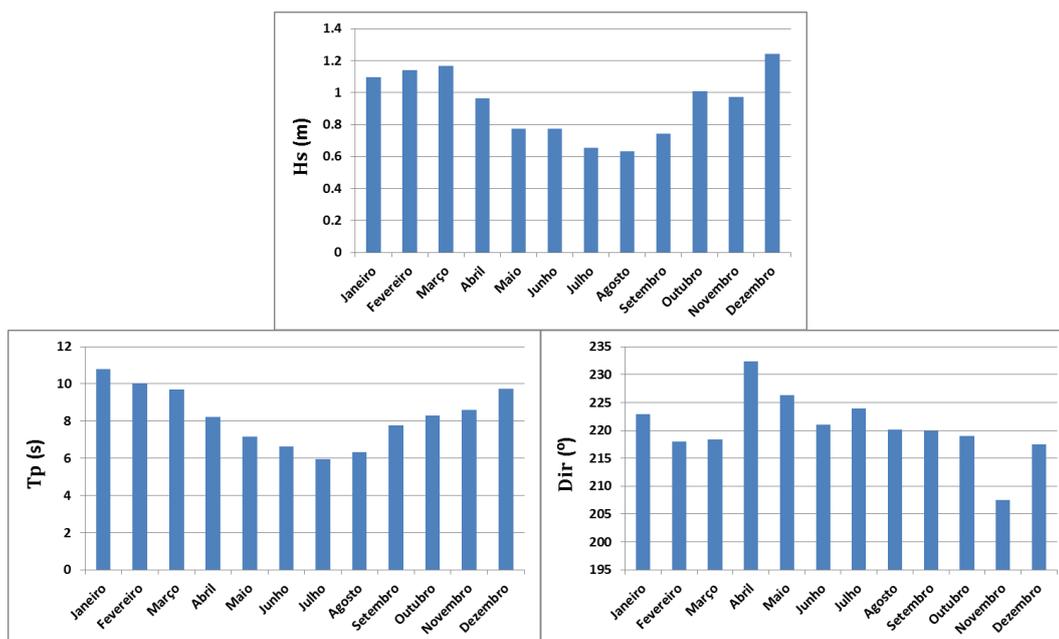


Figura 17 – Regime médio ao largo em termos dos parâmetros Hs, Tp e Dir, de 1998 a 2007 – 2º Caso.

A Tabela 1 apresenta para o 2º Caso os valores mínimos, médios e máximos, referentes aos parâmetros de altura de onda significativa (Hs), período de pico (Tp), período médio e direcção média (Dir), fornecidos pelo IH.

Tabela 1 - Valores mínimo, médio e máximo para os parâmetros Hs, Tp e Dir, fornecidos pelo IH – 2º Caso.

Parâmetros	Mínimo	Médio	Máximo
Hs (m)	0.089	0.930	6.26
Tp (s)	2.8	8.26	18.2
Tz (s)	2.205	4.590	14.125
Dir (°)	-90	218.612	350

3.4 Nível de maré

A amplitude do nível de maré na zona marítima da praia da Galé chega a ultrapassar os dois metros.

No 1º Caso, consideraram-se os valores do nível de maré para a preia-mar e baixa-mar locais, fornecidos pelo IH. Estes valores foram posteriormente interpolados, recorrendo a uma função sinusoidal, de forma a obter-se o nível de maré a cada hora. A Figura 18 mostra o registo do nível de maré, para os dias 6 a 12 de Março 2012 (1º Caso) correspondente ao conjunto de valores horários que resultaram dessa metodologia e que foram considerados.

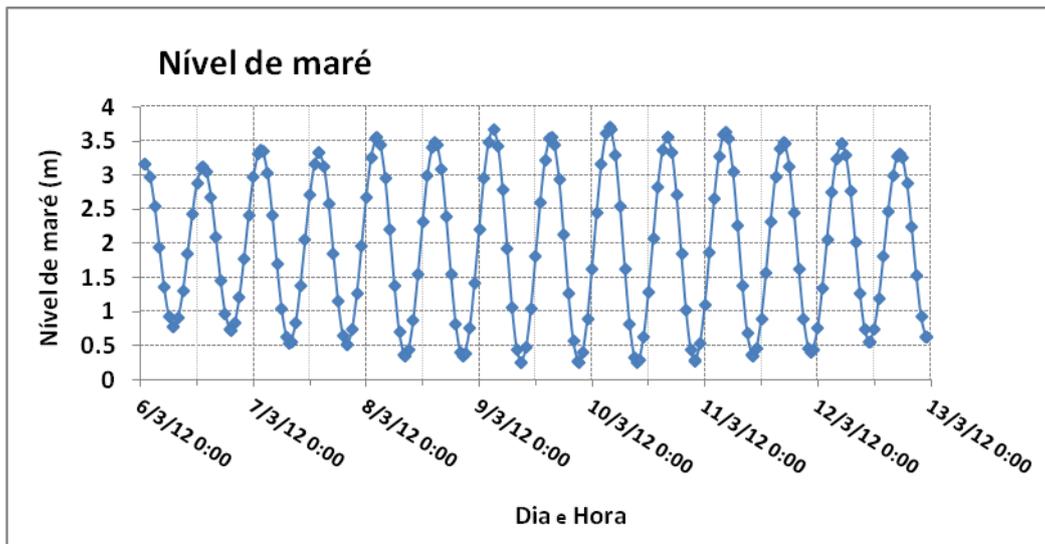


Figura 18 – Registro horário do nível de maré – 1º Caso.

No 2º caso, para definir os regimes geral observado e médio consideraram-se os valores de nível de maré (ZH) +2.0 m e +4.0 m, respectivamente.

3.5 Medições *in situ* – 1º Caso

Foi realizada uma campanha de medições, na praia da Galé, que decorreu entre os dias 6 e 12 de Março 2012 (1º Caso), durante a qual foi instalado diverso equipamento para a medição de parâmetros de agitação marítima em vários pontos específicos.

Os instrumentos de medição utilizados foram: seis *Pressure Transducers* (PT), três *Electromagnetic Current Meters* (ECM), um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) e um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP ou ADP).

3.5.1 ADP

O sensor ADP da SonTek foi fundeado, em frente à praia da Galé no dia 5 de Março, tendo começado a adquirir dados no dia 6 de Março às 9h e retirado da água a meio da manhã de 12 de Março. A Figura 19 apresenta duas fotos do equipamento utilizado e a Figura 20 ilustra a localização do ADP, à batimétrica de +6.5 m referida ao NMM.

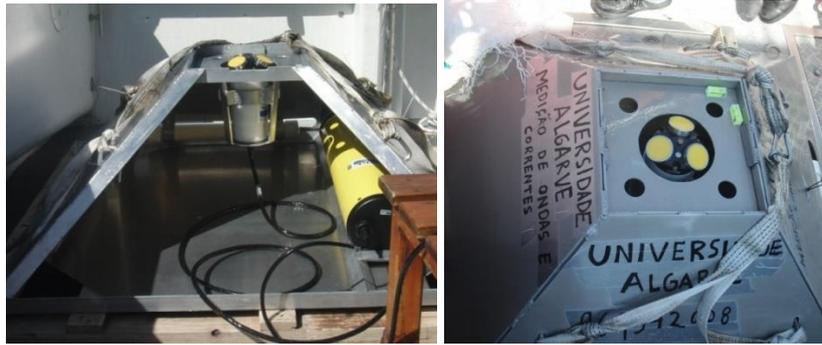


Figura 19 - Aspeto geral do ADP, sensor, dataloger e estrutura de suporte e colocação.

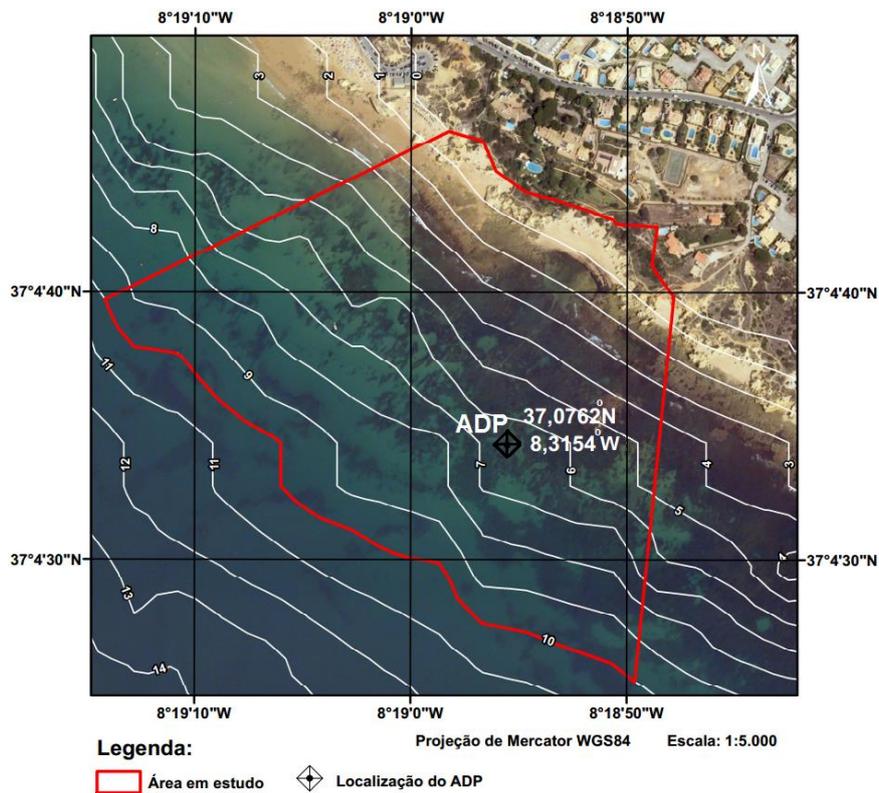


Figura 20 - Localização do ADP.

Com base nas medições do ADP (tratamento de dados), foram determinados, entre outros, os valores dos parâmetros de agitação marítima: altura de onda significativa (H_s), período de pico (T_p) e direcção média (Dir). A Figura 21 e a Figura 23 apresentam os valores obtidos para o ADP, de 10 em 10 minutos, dos parâmetros H_s , T_p e Dir .

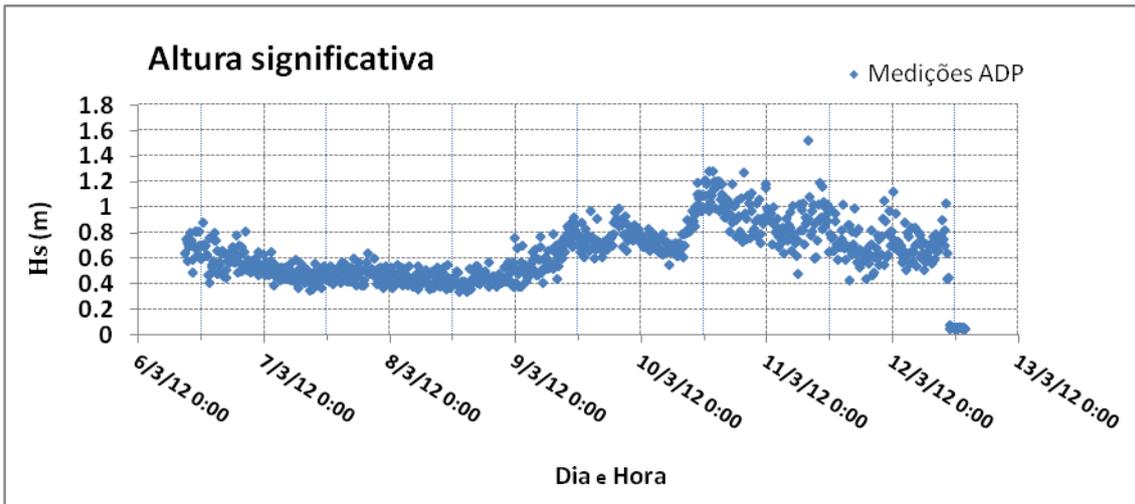


Figura 21 - Série temporal da altura de onda significativa (Hs) – ADP.

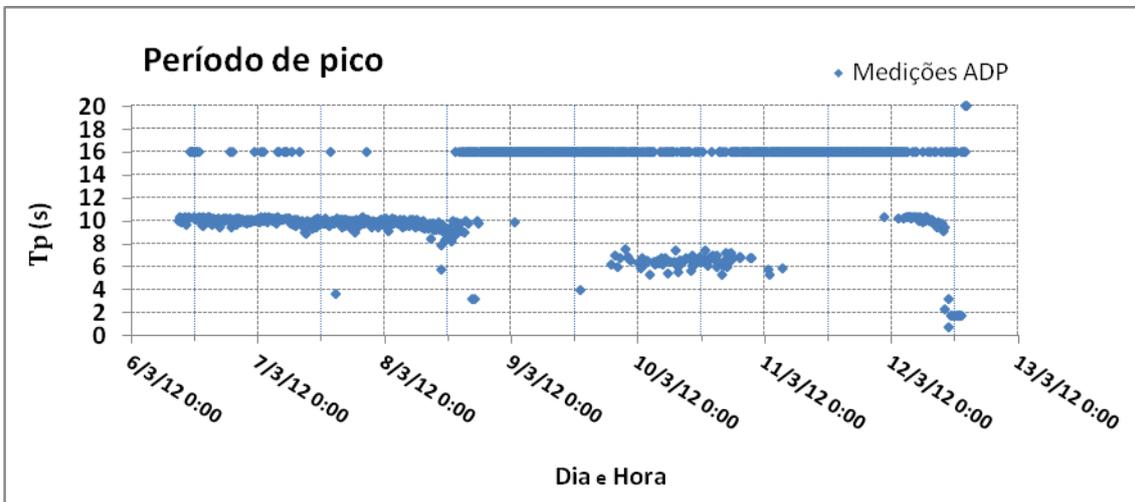


Figura 22 - Série temporal do período de pico (Tp) – ADP.

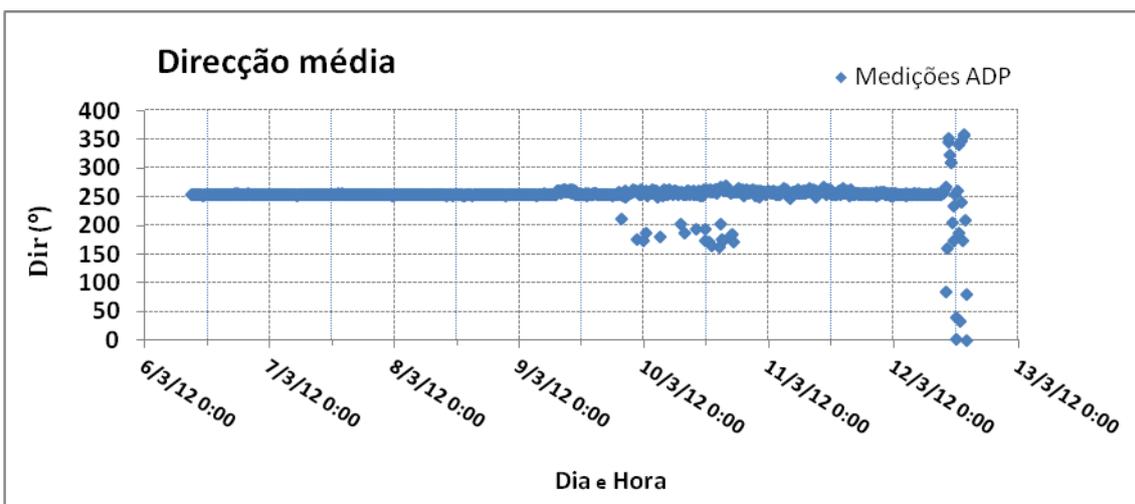


Figura 23 - Série temporal da direção média (Dir) – ADP.

A Figura 24 apresenta o diagrama de rosa para as direções médias (Dir) medidas no ADP.

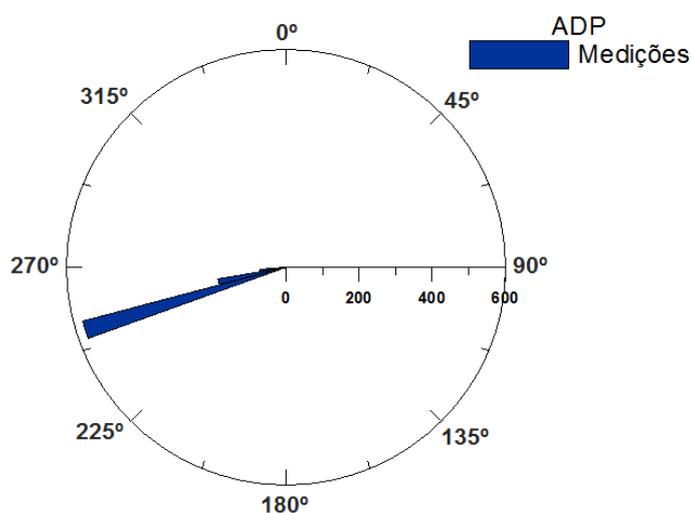


Figura 24 - Rosa da direção média (Dir) – ADP.

A Tabela 2 apresenta os valores mínimos, médios e máximos referentes aos parâmetros de altura de onda significativa (H_s), período de pico (T_p), período médio e direção média (Dir), obtidos pelo ADP.

Tabela 2 – Valores mínimo, médio e máximo para os parâmetros H_s , T_p e Dir, obtidos pelo ADP.

Parâmetros	Mínimo	Média	Máximo
H_s (m)	0.048	0.656	6.364
T_p (s)	0.7	12.557	20
Dir ($^\circ$)	0	252.453	357.9

Da análise das Figura 21 à Figura 24 e Tabela 2, pode-se constatar que ocorrem duas situações diferentes em termos de agitação marítima: a 1ª situação no período de 6 a 9 de Março em que a agitação marítima é pequena, em média com valor $H_s = 0.656$ m associada a direções provenientes de 250° , e uma 2ª situação no período a partir de 9 de Março em que se dá o aumento progressivo da H_s , atingindo esta valores de 1 m e associada a direções de 250 mas também direções inferiores a 200° . Note-se que ao largo, neste período verificou-se a rotação da direção da onda para 150° .

3.5.2 PT1 e PT2

Os restantes aparelhos de medição foram distribuídos e instalados, em solo/fundo, rochoso (plataforma rochosa) ou arenoso, tal como ilustrado na Figura 25 e a

aquisição de dados decorreu nos dias 8 a 9 de Março. Note-se que, deste equipamento, apenas os *Pressure Transducers* PT1 e PT2, (que estão ao longo de um perfil e localizados na plataforma rochosa) foram considerados para o presente estudo (assinalados na Figura 25). O PT1 e PT2 encontram-se às respectivas cotas batimétricas (NMM), +0.771 m e +0.221 m.

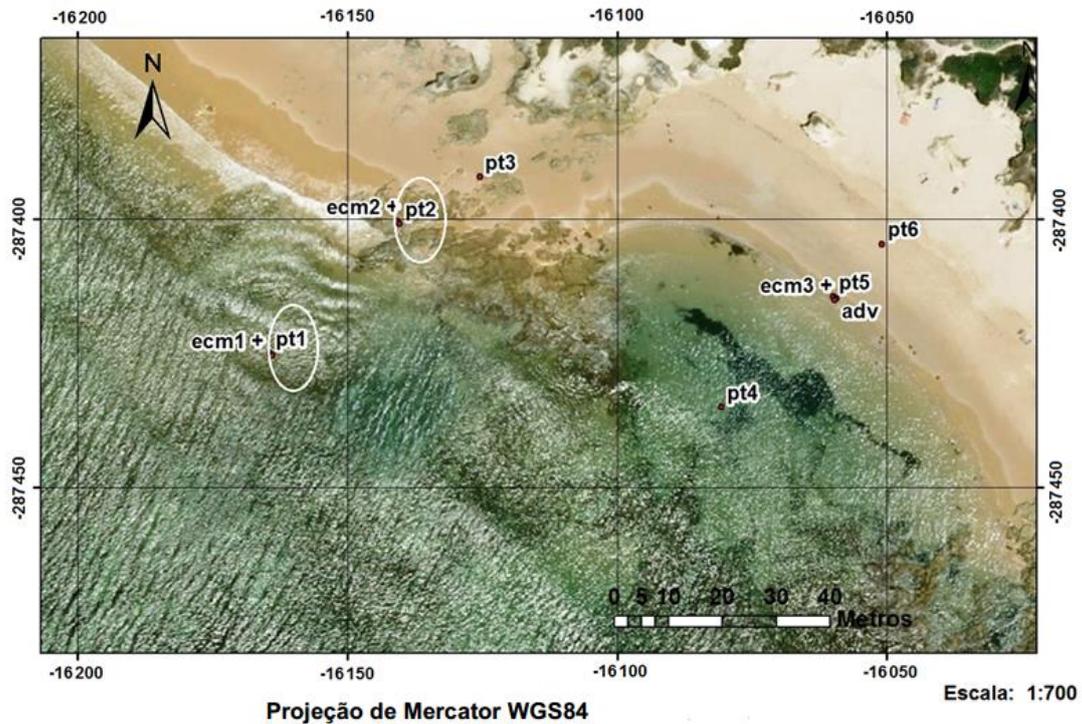


Figura 25 - Posicionamento e localização dos sensores na Praia da Galé.

A Figura 26 apresenta uma foto do *Pressure Transducer* Infinity_WH, PT1 (a), outra do *Pressure Transducer* LevelTroll, (PT2) (b), e as respectivas estruturas utilizadas para a instalação do referido equipamento (Figura 21 a) e b).

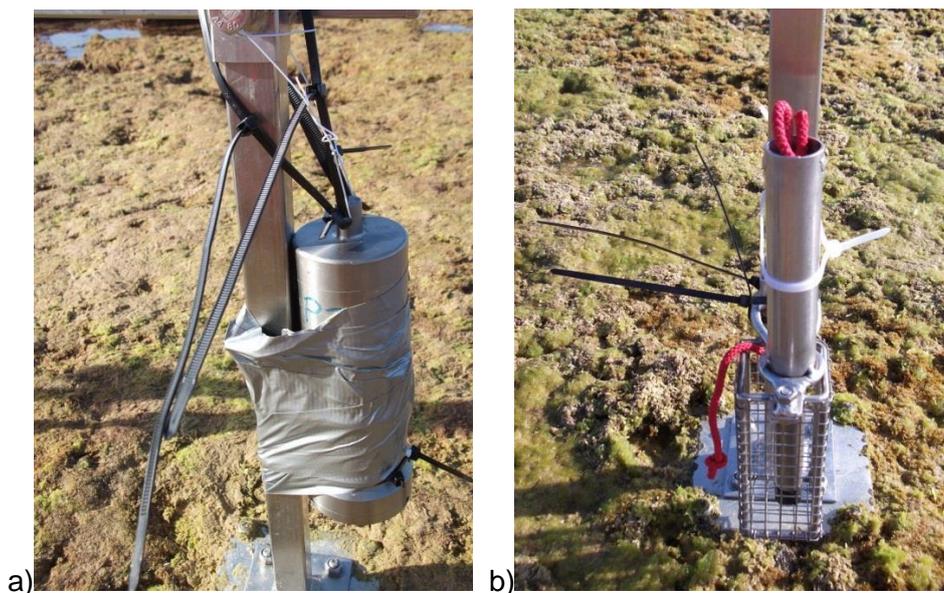


Figura 26 – Pressure Transducers PT1 (a) e PT2 (b).

Com base nos valores medidos pelos sensores de pressão PT1 e PT2, foram determinados valores de parâmetros da agitação marítima, entre os quais, a altura de onda significativa (H_s) e do período médio (T_z).

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os valores obtidos para o PT1, de 10 em 10 minutos, dos parâmetros altura de onda significativa (H_s) e período médio (T_z).

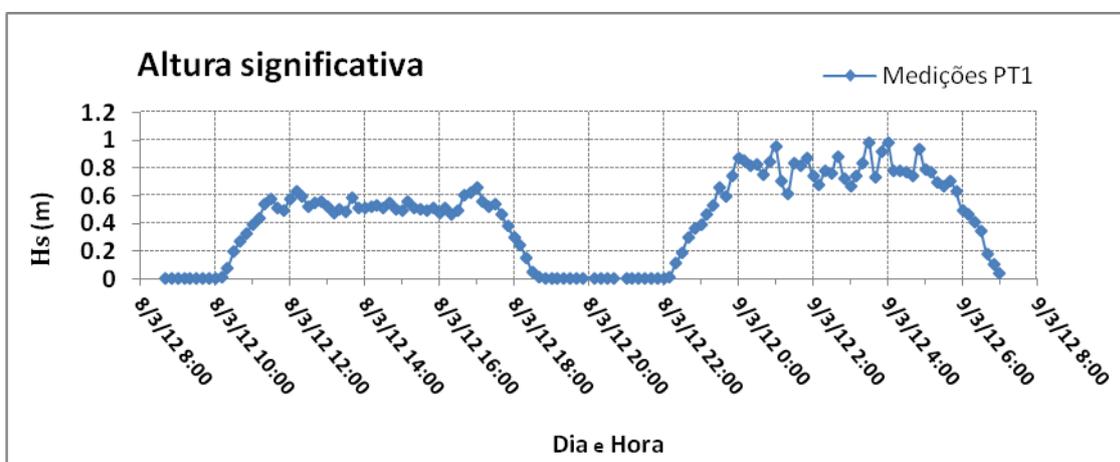


Figura 27 - Série temporal da altura de onda significativa (H_s) – PT1.

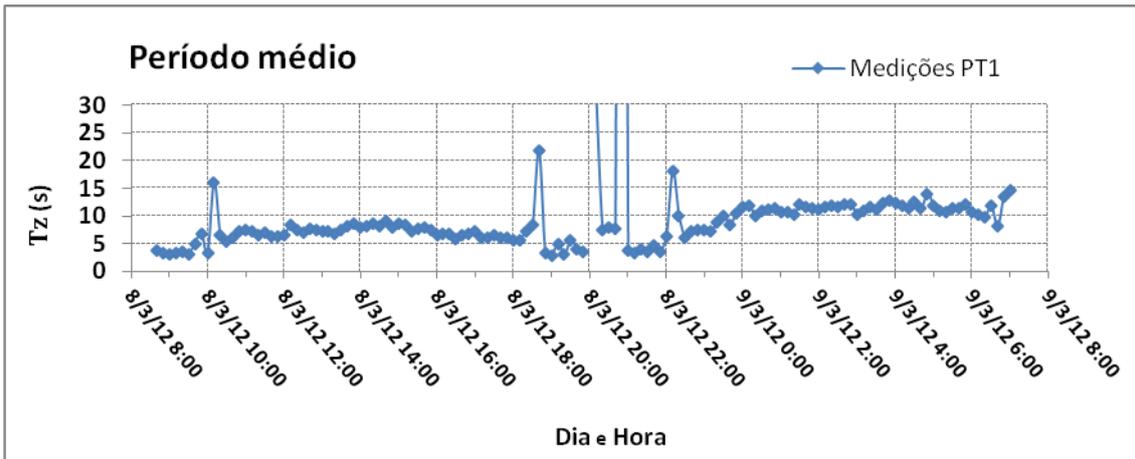


Figura 28 - Série temporal do período médio (Tz) – PT1.

A Figura 29 e a Figura 30 apresentam os valores obtidos para o PT2, de 10 em 10 minutos, dos parâmetros altura de onda significativa (Hs) e período médio (Tz).

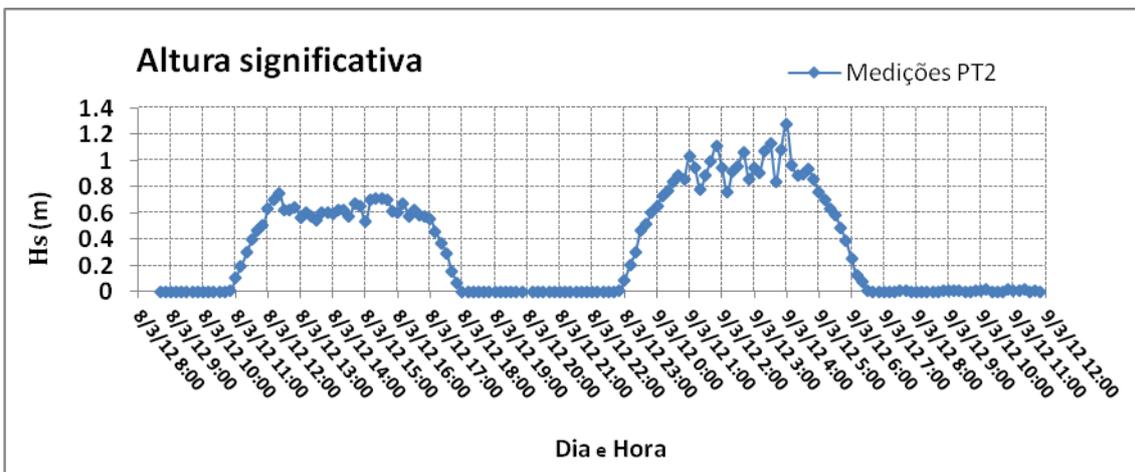


Figura 29 - Série temporal da altura de onda significativa (Hs) – PT2.

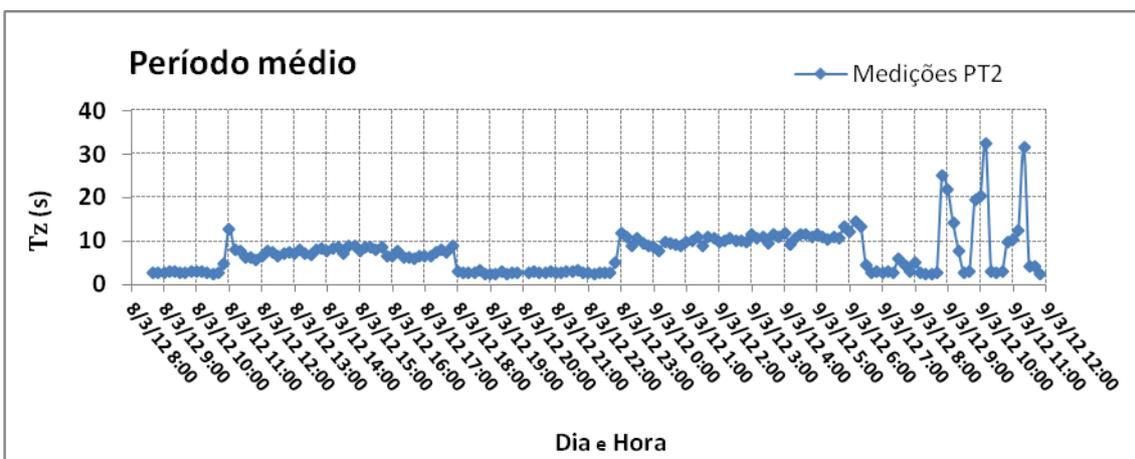


Figura 30 - Série temporal do período médio (Tz) – PT2.

Das Figura 27 à Figura 30 verifica-se o seguinte:

- Os valores de Hs mostram os períodos em que o instrumento estava com e sem água bem como a evolução dessa altura de onda à medida que a maré vai subindo ou descendo;
- Os valores de Hs até 9 de Março rondam 0.6 m em ambos os transdutores e associados a períodos médios (Tz) inferiores a 10 s, aumentando a partir de 9 de Março, *i.e.*, da ordem de 1 m e 1.2 m, para PT1 e PT2, respectivamente (tal está de acordo com o observado nos dados registados pelo ADP, Figura 21), e associados a períodos também superiores da ordem dos 10 s. Os valores de Hs são mais elevados no PT2 devido ao empolamento.

3.6 Aplicação do modelo SWAN

3.6.1 Batimetria

A informação batimétrica foi fornecida ao modelo através de um conjunto de três malhas rectangulares compostas por unidades quadrangulares, designadas por malhas batimétricas. Na Tabela 3 apresentam-se as características destas malhas: dimensões comprimento (x) e largura (y), bem como o espaçamento lateral das unidades quadrangulares, Δ , (resolução).

Tabela 3 - Características das malhas batimétricas.

Malha	N.º pontos em x	N.º pontos em y	Δ (m)	x (m)	y (m)
B1	185	87	400	74000	34800
B2	225	98	200	45000	19600
B3	193	105	100	19300	10500

De notar que, a malha B1 é a de maior área, a malha B2 está encaixada na malha B1 e a malha B3 está encaixada nas B1 e B2. Quanto ao nível de detalhe, note-se também que, a B1 é a mais grosseira, a B3 é a mais refinada e a B2 é intermédia às anteriores.

3.6.2 Domínio de cálculo

O domínio de cálculo do modelo SWAN foi discretizado através de três malhas computacionais (C1, C2, C3), cujos valores de batimetria foram interpolados nas correspondentes malhas batimétricas.

À semelhança das malhas batimétricas (seção 3.6.1), foram definidas malhas computacionais rectangulares compostas por unidades quadrangulares, em que a malha C2 se encaixa na C1 e a malha C3 é encaixada nas C1 e C2. Na Tabela 4 apresentam-se as características destas malhas: dimensões comprimento (x) e largura (y), bem como o espaçamento lateral das unidades quadrangulares, Δ (resolução).

Tabela 4 - Malhas computacionais utilizadas no modelo SWAN.

Malha	x (m)	y (m)	Δ (m)
C1	73600	34800	800
C2	45000	19400	200
C3	5000	5000	100

De notar que, à fronteira da malha de maior área (malha C1), fez-se corresponder as condições de agitação ao largo (seção 3.3) e correspondentes níveis de maré considerados (seção 3.4).

3.6.3 Características do cálculo

O modelo SWAN, versão SWAN 40.72, foi executado em modo estacionário, sem considerar a interacção do vento.

Foram testadas duas diferentes formulações de *whitecapping*: a formulação KOMEN, de crescimento linear (Komen et al. 1984) e a formulação WestH (Westhuysen et al. 2007), crescimento *whitecapping* não-linear combinado com dados de ventos de Yan (1987). Posteriormente, foram testados diferentes valores para o coeficiente de atrito (c) da expressão semi-empírica, derivada dos resultados JONSWAP para a dissipação por atrito de fundo. Esses valores foram $c=0.015$, 0.067 , $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$. Os cálculos com o modelo SWAN foram efetuados para as diferentes combinações de *whitecapping* e coeficientes de atrito e verificou-se que a influência destes dois factores é muito pequena nos resultados numéricos, por isso consideraram-se apenas os resultados obtidos com a formulação WestH e $c=0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ (valor padrão atribuído pelo SWAN em condições de wind sea, $c=0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$).

O espectro direccionado é caracterizado por um espectro em frequência de JONSWAP de 23 intervalos, de 0.04 a 1.0 Hz, com distribuição logarítmica, e uma discretização em direcção que cobre 360° , dividida em 180 intervalos. Um coeficiente de rebentação constante de 0.65 para os períodos distintos.

As condições definidas para a fronteira da malha computacional C1 (seção 3.6.2), *i.e.*, que foram considerados para “forçar” o modelo SWAN são:

- no **1º Caso** – (6 a 12 de Março 2012), as condições de agitação marítima ao largo, sob a forma de valores tri-horários dos parâmetros altura de onda significativa (Hs), período de pico (Tp) e direcção média (Dir), fornecidos pelo IH (secção 3.3), e os correspondentes valores tri-horários de nível de maré retirados do registo de maré obtido segundo a metodologia descrita em 3.4 (que tem em conta as previsões do IH para as baixa-mar e preia-mar);
- no **2º Caso** – (1998 a 2007), as condições de agitação marítima ao largo, sob a forma de valores de Hs, Tp e Dir, definidos pela análise das gamas de valores tri-horários, fornecidos pelo IH (secção 3.3). Mais concretamente, fizeram-se cálculos para as combinações dos seguintes valores ao largo para os parâmetros:
 - Hs: de 0.5 m a 7.5 m com intervalos de 0.5 m;
 - Tp: de 6 s a 20 s com intervalos de 2 s;
 - Dir: de 90 ° a 270 ° com intervalo de 22.5°.

Neste caso, foram considerados níveis de maré (ZH) constantes de +2 m e +4 m (Z.H.). Com estes cálculos, obtiveram-se as designadas matrizes de transferência, para cada ponto de cálculo, que permitem relacionar os valores considerados ao largo com os correspondentes valores na costa. Os resultados finais são obtidos a partir duma interpolação dos valores tri-horários ao largo dos parâmetros Hs, Tp e Dir, dados pelo IH (secção 3.3), nestas matrizes de transferência que resultaram da aplicação do modelo SWAN.

De notar que, como já foi referido (secção 3.1), os resultados da aplicação do modelo SWAN, para os dois casos, foram obtidos para a posição de medição do ADP (secção 3.5.1).

3.7 Apresentação e análise de resultados: 1º caso

3.7.1 Apresentação de resultados

Da Figura 31 à Figura 33 apresentam-se os resultados tri-horários das medições *in-situ* do ADP e das simulações numéricas numéricas com o SWAN, na posição de medição do ADP, para os parâmetros altura de onda significativa (Hs), período de pico (Tp) e direcção média (Dir), bem como os correspondentes valores ao largo considerados para “forçar” o modelo, fornecidos pelo IH (secção 3.3). Na Figura 34, apresenta-se a rosa das direcções média ao largo e no ADP, para valores medidos e calculados.

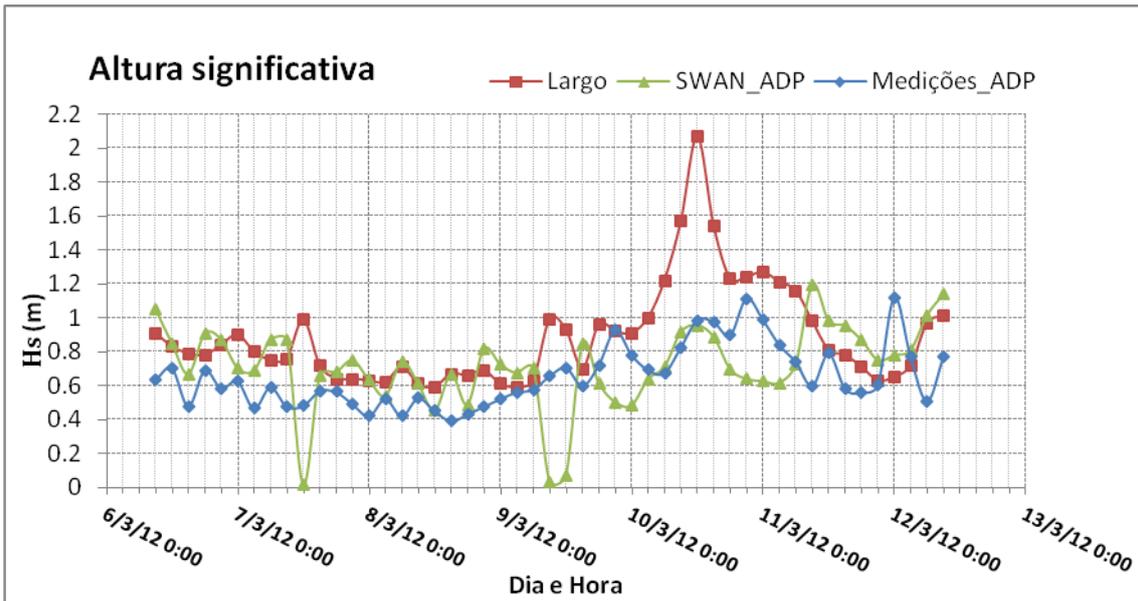


Figura 31 – Altura significativa ao largo e no ADP.

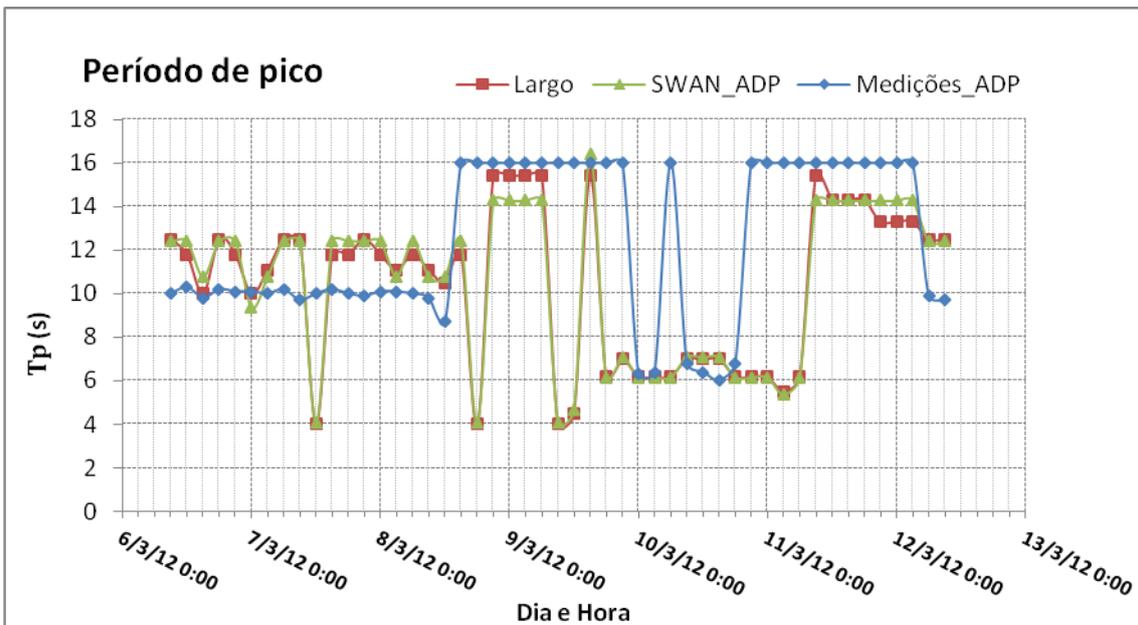


Figura 32 – Período de pico ao largo e no ADP. Valores medidos e calculados.

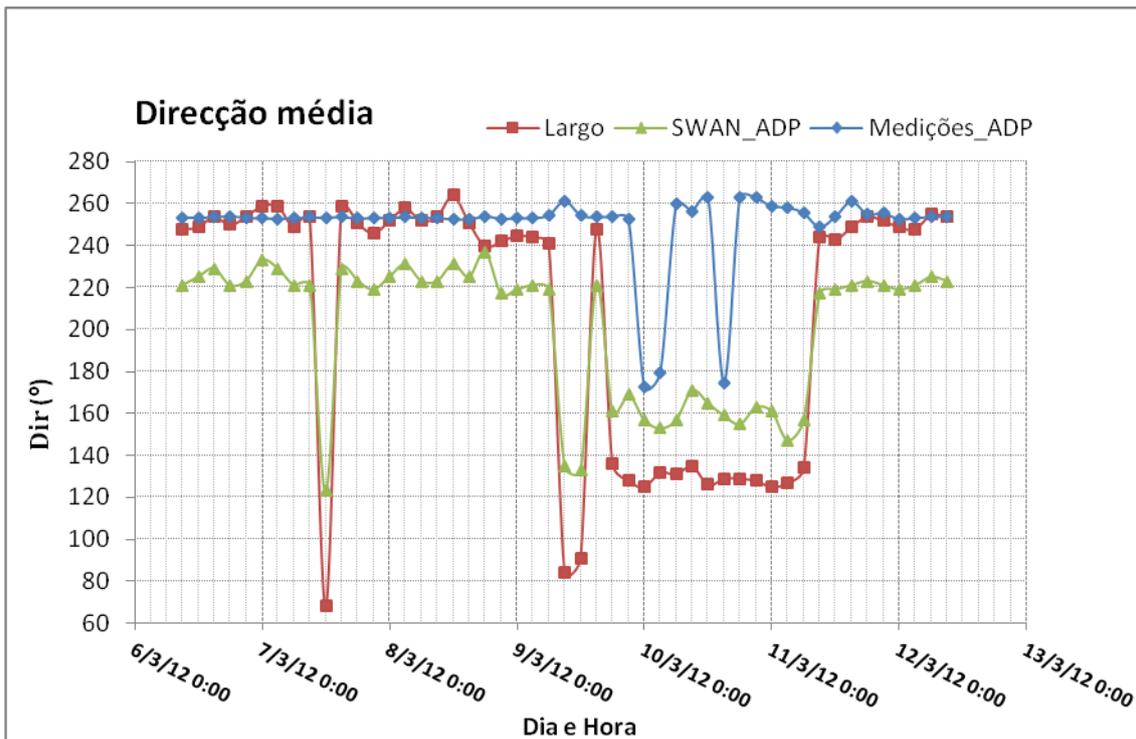


Figura 33 – Direcção média ao largo e no ADP. Valores medidos e calculados.

A Figura 16 apresenta o diagrama de rosa para as direcções médias (Dir) no ADP. Apresentam-se também os valores os correspondentes valores ao largo.

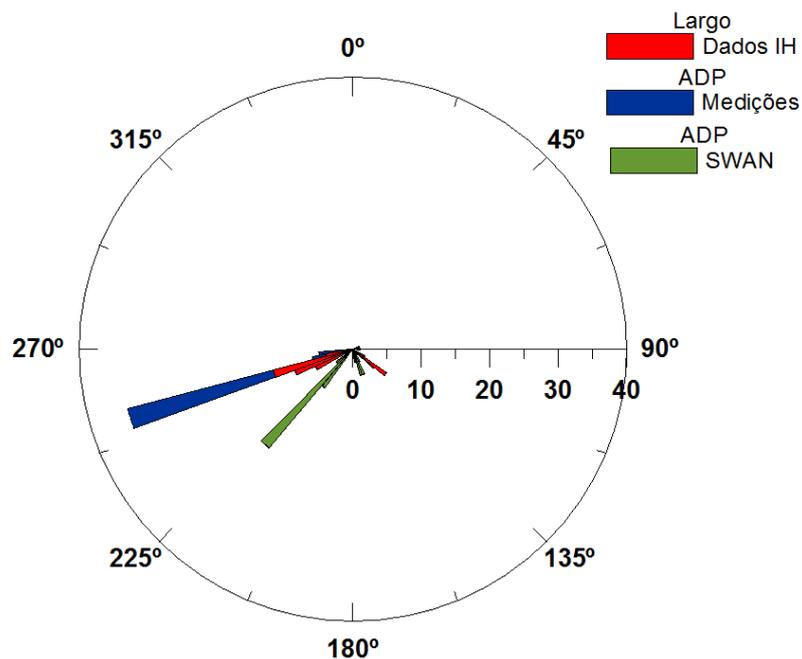


Figura 34 – Rosa das direcção médias ao largo e no ADP.

3.7.2 Análise de resultados

A análise gráfica da comparação dos resultados numéricos com os dados medidos, embora seja útil para uma avaliação imediata e geral, não é suficientemente

objetiva ou conclusiva. Para tal, é fundamental realizar-se uma análise estatística que compare os valores dos parâmetros medidos com os calculados. Assim, para as várias simulações realizadas e para ambos os períodos estudados, foi feita uma análise estatística através dos seguintes parâmetros:

- Valor médio quadrático do erro - RMSE (*Root Mean Square Error*)

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

- SI (Scatter Index)

$$SI = \frac{RMSE}{\overline{X_0}} \quad (2)$$

- Valor médio do erro - ME (*Mean Error*)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta X_i \quad (3)$$

Onde,

N – é a dimensão da amostra;

ΔX – representa a diferença entre os valores estimados pelo SWAN e os valores medidos, ou seja, $\Delta X = X_c - X_0$;

$\overline{X_0}$ – é o valor médio das observações.

Para as diferentes condições de cálculo referidas anteriormente são apresentados, para o ADP os parâmetros estatísticos relativos à Desvio (Viés), ao *root mean square* (RMSE) e ao *Scatter Index* (SI). A Tabela 5 resume os resultados estatísticos referentes aos dados obtidos no 1º Caso.

Tabela 5 - Estatísticas comparativas relativas aos parâmetros da agitação marítima Hs, Tp e Dir, obtidos para o ADP (1º Caso)

ADP			
Parâmetros	Hs (m)	Tp (s)	Dir (º)
RMSE	1.325	5.063	59.973
SI	0.660	0.410	0.240
ME	-1.291	-1.936	-49.171

Dos resultados apresentados da Figura 31 à Figura 34, verifica-se que:

- no geral, o andamento e a ordem de grandeza dos valores de altura de onda e período médio e direção, calculados pelo modelo numérico SWAN, apresentam certa tendência e comportamento semelhantes aos correspondentes dos valores medidos;

- Os resultados do modelo em termos de alturas de onda aproximam-se mais dos medidos do que os de período de onda e da direção da onda. A análise estatística, tal como consta na Tabela 5, confirma estes resultados. Com efeito, para o parâmetro Hs o SI é de 0.66 diminuindo no caso do período de onda e, mais ainda, no caso da direção das ondas;
- Para as alturas de onda, os valores numéricos apresentam ligeira superioridade em relação aos medidos, até o dia 9 de Março sendo depois inferiores. Note-se que para este último período a agitação ao largo rodou para valores inferiores a 150°, i.e., provêm do sector SE-S;
- Para os períodos da onda, os valores são mais parecidos com os do largo o que não é de estranhar, uma vez não se ter tido em conta o vento nos cálculos do modelo;
- Para as direções, até dia 9 de Março, os valores numéricos são muito semelhantes aos medidos enquanto que entre 9 e 11 de março à tarde as diferenças são maiores. No dia 12 de Março, as direções medidas e calculadas voltam a ser mais semelhantes. As maiores diferenças estão associadas ao período em que ocorreu agitação proveniente SE-S..

3.8 Apresentação e análise de resultados: 2º caso

3.8.1 Apresentação de resultados

Da Figura 35 à Figura 37 apresentam os valores na posição de medição do ADP, dos parâmetros altura de onda significativa (Hs), período de pico (Tp) e direção média (Dir), para os níveis de maré de +2 m e +4 m (ZH), bem como os correspondentes valores ao largo considerados, fornecidos pelo IH (seção 3.3)

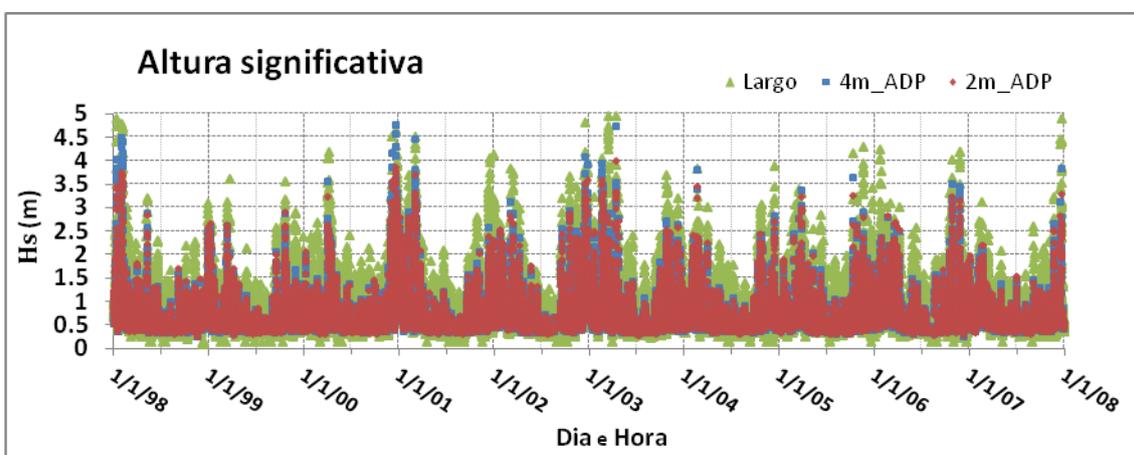


Figura 35 - Valores da altura de onda significativa (Hs) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH).

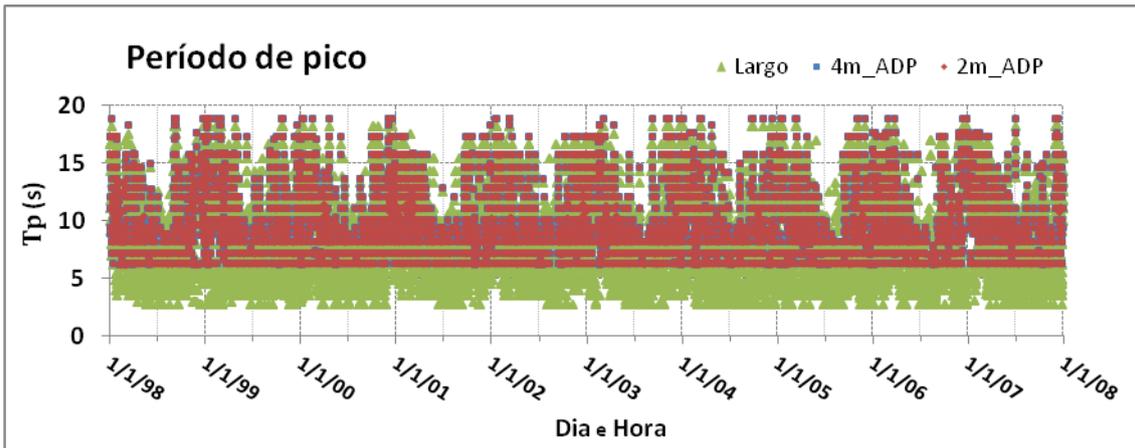


Figura 36 - Valores do período de pico (T_p) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e +4 m (ZH).

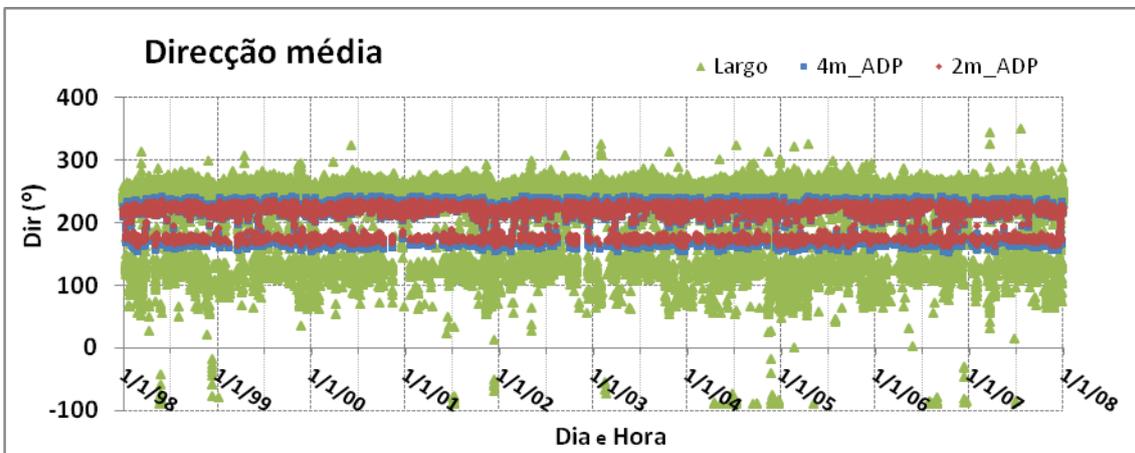


Figura 37 - Valores da direcção média (Dir) ao largo e ADP, para o nível de maré de +2 m e +4 m (ZH).

A Figura 38 apresenta a rosa para as direcções médias (Dir) no ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH). Apresenta também os correspondentes valores ao largo.

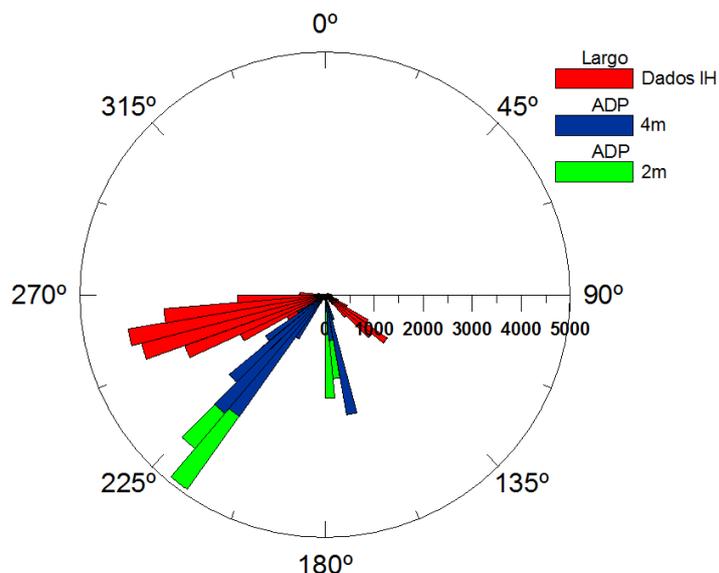


Figura 38 – Rosa da direcção média (Dir) no ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH).

Das Figura 59 à Figura 62, em anexo (6.3) apresentam-se para o 2º caso os histogramas dos parâmetros Hs-Dir e Hs-Tp no ponto do ADP, para o nível de maré de +2 m e 4 m (ZH).

A Figura 39 mostra o regime médio no ADP, em termos dos parâmetros Hs, Tp e Dir, para o nível de maré de +2m (ZH).

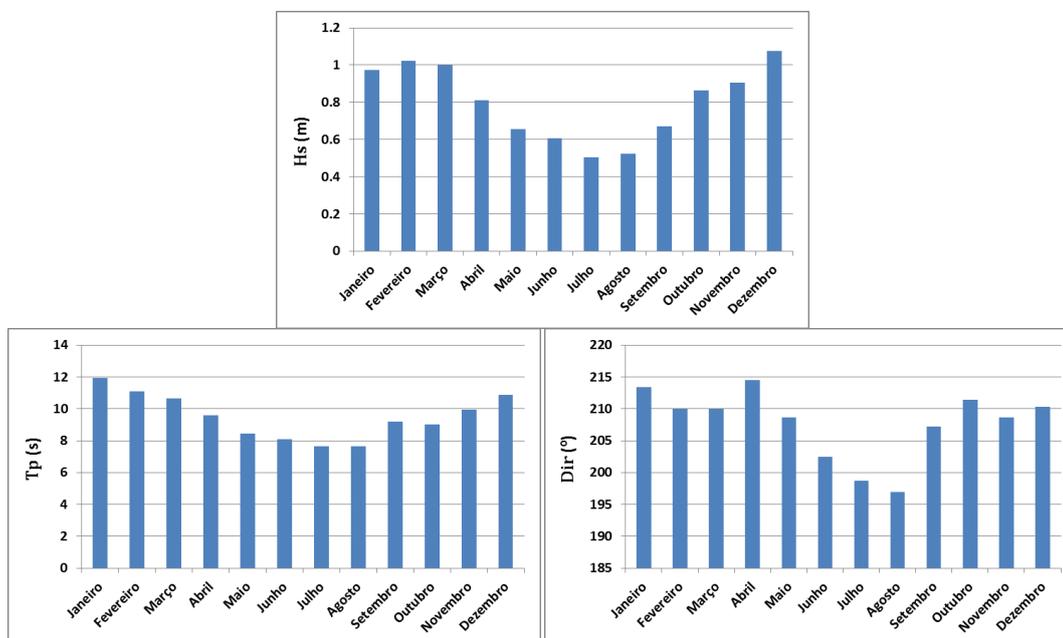


Figura 39 - Regime médio no ADP, para o nível de maré de +2 m (ZH).

A Figura 40 apresenta os regimes médios no ADP em termos dos parâmetros Hs, Tp e Dir para o nível de maré de +4m (ZH).

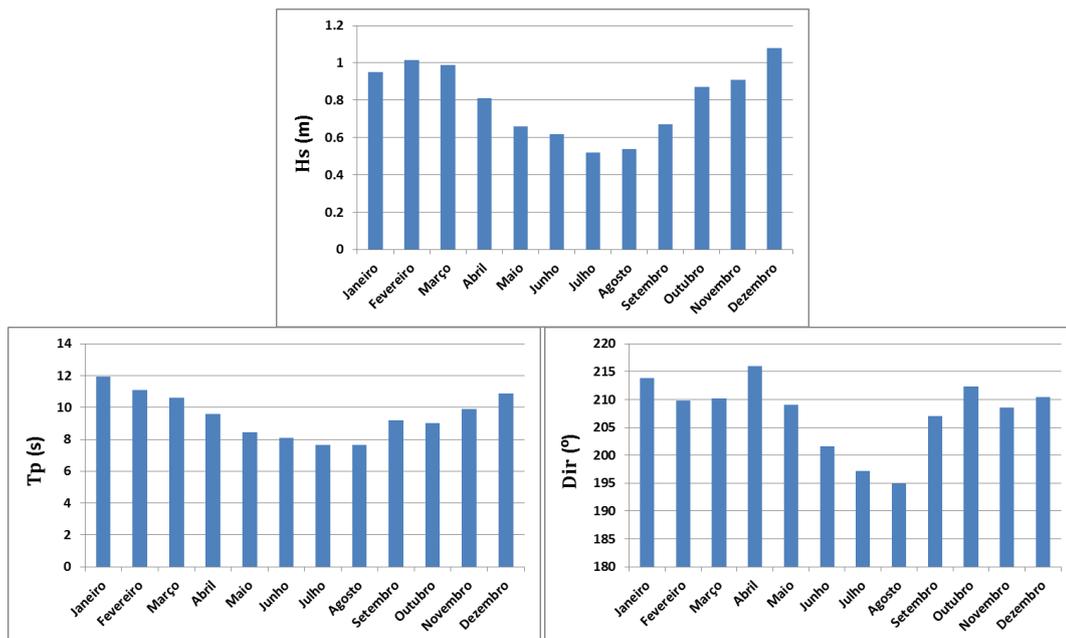


Figura 40 - Regime médio no ADP, para o nível de maré de +4 m (ZH).

Na Tabela 6 apresentam-se resultados estatísticos no ponto ADP, para os parâmetros altura de onda significativa (Hs), período de pico (Tp) e direcção média (Dir), considerando o nível de maré de +2.0 m e de +4.0 m (ZH). Apresentam-se também os correspondentes valores ao largo considerados.

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos no ponto ADP (para os níveis de +2 m e +4 m (Z.H.) e ao largo.

	Hs			Tp			Dir		
	Largo	Posição_ADP		Largo	Posição_ADP		Largo	Posição_ADP	
		4m	2m		4m	2m		4m	2m
Média	0.930	0.854	0.856	8.256	9.875	9.882	218.612	209.092	209.018
Erro-padrão	0.003	0.004	0.004	0.021	0.025	0.025	0.357	0.192	0.158
Mediana	0.760	0.700	0.705	8	8.834	8.834	249	219.333	217.778
Moda	0.510	0.405	0.448	7	7.164	7.164	258	168.400	216.867
Desvio-padrão	0.560	0.502	0.489	3.510	3.173	3.174	61.092	24.789	20.364
Variância da amostra	0.348	0.252	0.240	12.322	10.070	10.072	3732.191	614.480	414.678
Curtose	7.051	7.124	4.828	-0.473	-0.430	-0.438	2.164	-0.800	-0.765
Assimetria	2.181	2.228	1.961	0.603	0.817	0.811	-1.500	-0.929	-0.981
Intervalo	6.171	4.514	3.738	15.400	12.729	12.729	440	90	74.400
Mínimo	0.089	0.254	0.246	2.800	6.168	6.1679	-90	153.200	161.800
Máximo	6.260	4.768	3.984	18.200	18.896	18.896	350	243.200	236.200
Contagem	29216	16677	16677	29216	16677	16677	29216	16677	16677

Do exposto, conclui-se que no ponto do ADP:

– em termos médios, não se verificam diferenças muito significativas entre os valores de H_s , T_p e Dir obtidos com os diferentes níveis de maré.

- ocorre uma ligeira redução das altura de onda face ao que se verifica ao largo, como se constata pelo valor médio da altura de onda ao largo passar de 0.93 m para 0.85 m

- existe uma rotação da direção média face ao largo, i.e., a média da direção ao largo passou dos 218° para 209 , de modo a tornar-se mais perpendicular à batimetria da praia.

4. CONCLUSÕES

Neste relatório, realiza-se a caracterização da zona marítima na praia da Galé, através da aplicação e validação do modelo SWAN, para os intervalos de tempo de 6 a 12 de Março 2012 (1º Caso) e de 1998 a 2007 (2º Caso).

No 1º Caso (6 a 12 de Março 2012), foram considerados valores medidos *in situ*, os quais, foram comparados com os resultados numéricos obtidos através do modelo SWAN. Os resultados numéricos e *in-situ* permitiram observar duas situações distintas de agitação marítima: até ao dia 9 de Março 2012 onde se verifica claramente uma agitação marítima menor, com valores de altura de onda significativa (H_s) que rondam os 0.6 m e a partir do dia 9 de Março onde se verifica um aumento da agitação marítima com valores de altura de onda significativa (H_s) que rondam 1 m. Da comparação, entre os resultados numéricos e os *in-situ*, pode concluir-se que o SWAN é um modelo que conseguiu reproduzir bastante bem o andamento geral e a ordem de grandeza das alturas significativas ao longo do intervalo de tempo estudado, 6 a 12 de Março 2012. No que respeita, aos parâmetros período e direcção de onda, verifica-se que os resultados do modelo SWAN apresentam maiores diferenças em relação aos valores medidos. Julga-se, neste caso, que as dificuldades de simulação do SWAN prender-se-ão ao facto de não ter sido considerada a interacção do vento.

O trabalho futuro passará necessariamente pela inclusão de campos de vento.

5. BIBLIOGRAFIA

Alves, J., Banner, M., 2003. Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modelling the fetch-limited evolution of wind waves, *Journal of Physical Oceanography*, 33, 1274-1298.

Battjes, J., Janssen, J., 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. of the 16th International Conference of Coastal Engineering*, 569-587.

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.

Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping,

Boundary-Layer Meteorology, 6, 1-2, 107-127.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., Barnett, T., 1985. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models, *Journal of Physical Oceanography*, 15, 11, 1378-1391.

Holthuijsen, Leo H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press.

Janssen, P., 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 1631-1642.

Komen, G., Hasselmann, S., Hasselmann, K., 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *Journal of Physical Oceanography*. 14, 1271-1285.

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

Pinheiro, L., Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R., 2007. SOPRO – Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos. *Revista da Tecnologia da Água*, Edição I, Março.

SWAN Team, 2008. "SWAN: Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.51", Delft University of Technology.

Westhuysen, A. van der, Zijlema, M. e Battjes, J., 2007. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54, 151-171.

van Vledder, G., 2006. The WRT method for the computation of non-linear fourwave interactions in discrete spectral wave models. *Coastal Engineering*, 53, 223-242.

WAMDI group, 1988. The WAM model - a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810.

Yan, L., 1987. An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling, Scientific report WR-No 87-8, De Bilt, The Netherlands.

Lisboa, Janeiro 2013

Autores

A handwritten signature in black ink, reading "Rui de Alencar Reis". The signature is fluid and cursive, with the first name "Rui" being the most prominent.

Rui Reis
Bolseiro de investigação

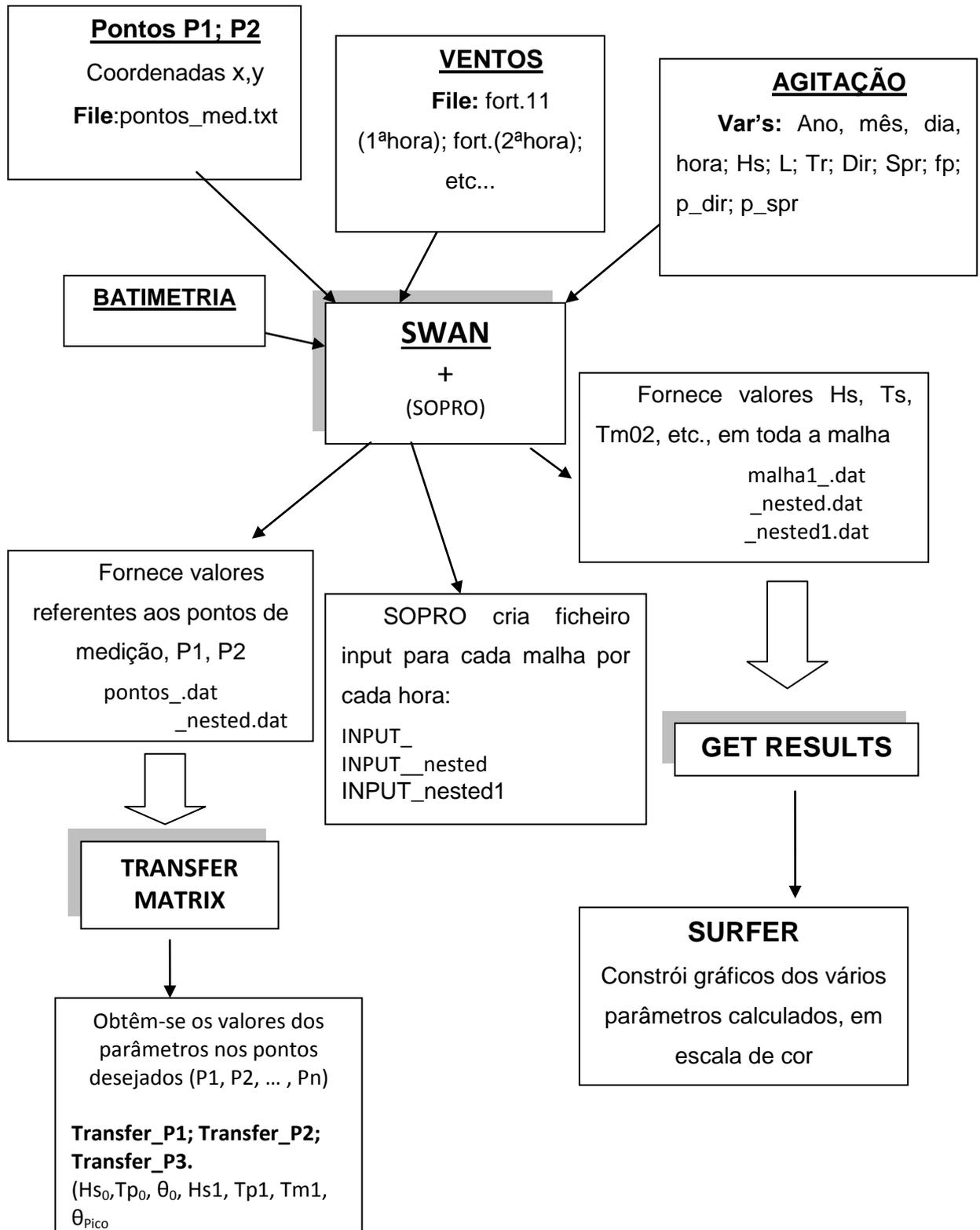
A handwritten signature in black ink, reading "Conceição Juana Fortes". The signature is highly stylized and cursive, with the first name "Conceição" being the most prominent.

Conceição Juana Fortes
Investigadora Principal

6. ANEXOS

6.1 Diagrama

ANEXO A



6.2 Guia de utilização do SWAN – Sopro

Para simplificar a utilização do programa SWAN usou-se o Sopro (versão SWAN_6SETEMBRO2012-TotalFriction.mdb), que é uma interface em Access desenvolvida no LNEC. O Sopro facilita a construção de ficheiros de entrada, bem como a visualização dos resultados, nomeadamente na disposição dos dados gerados, após correr o modelo.

As Figura 41 a Figura 56 ilustram procedimentos de aplicação do modelo SWAN, por intermédio do Sopro.

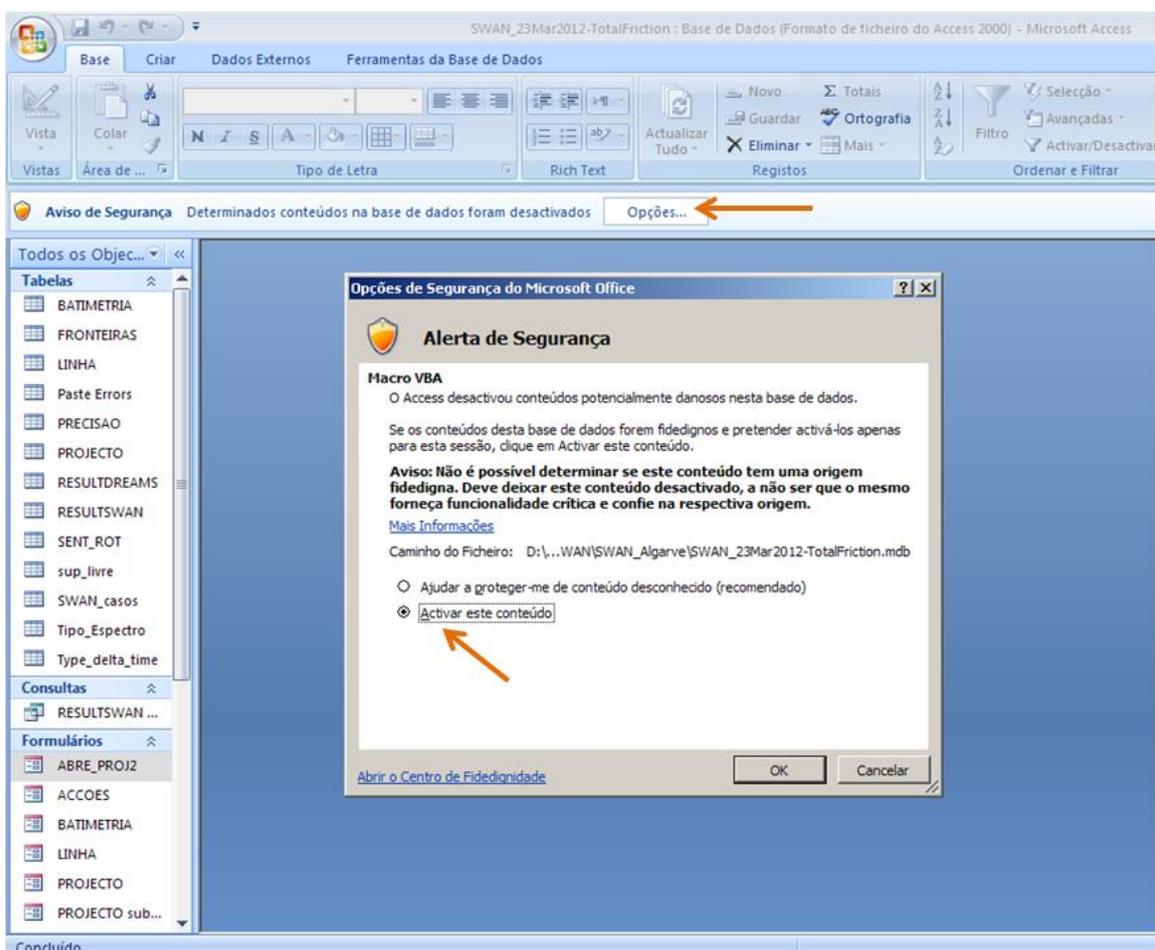


Figura 41 – Activação de conteúdos na Base de Dados.

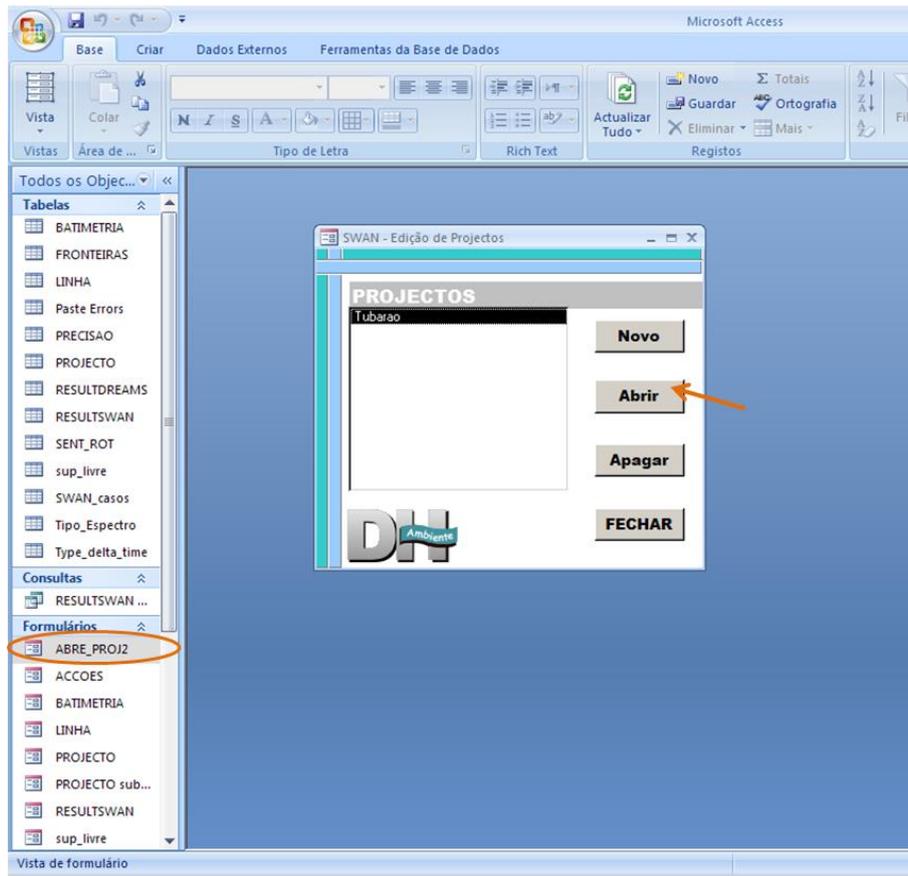


Figura 42 – Selecção do projecto.

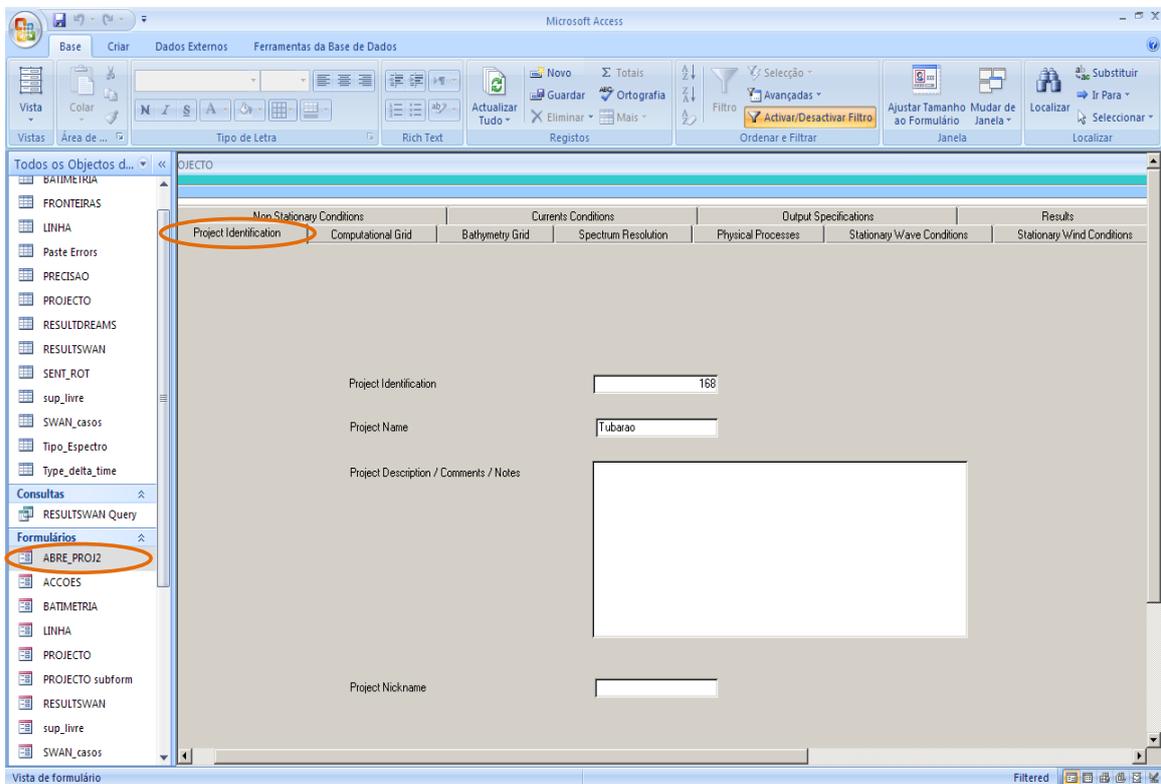


Figura 43 – Identificação do projecto.

A definição da “Computational Grid” (Fig. 3) deverá ser mais pequena que a “Bathymetry Grid” (Fig 5) fornecida pelo utilizador. As coordenadas fornecidas são em sistema métrico, mas também podem ser em coordenadas relativas. Apenas é necessário o X e Y inicial e depois o espaçamento pretendido. Os ficheiros batimétricos apenas contêm os valores de z (Fig. 4).

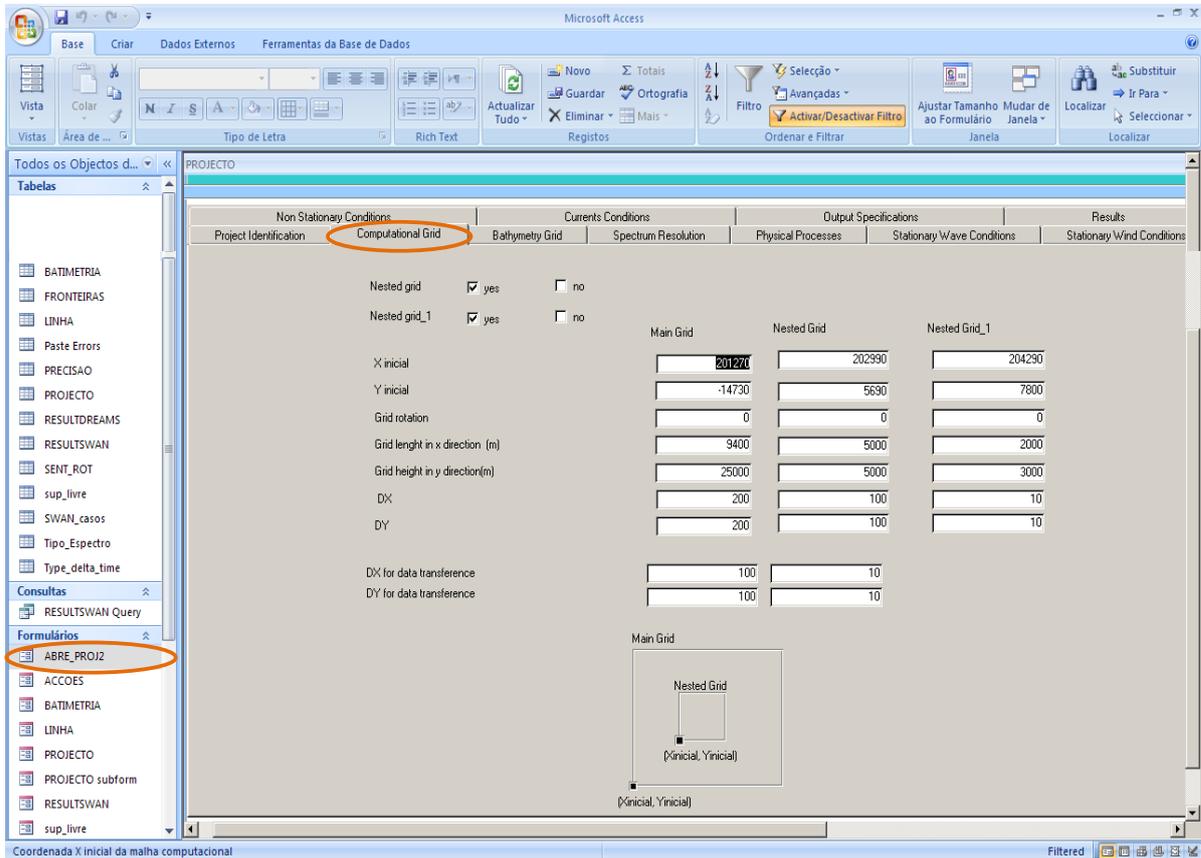


Figura 44 – Definição da *Computacional Grid*.

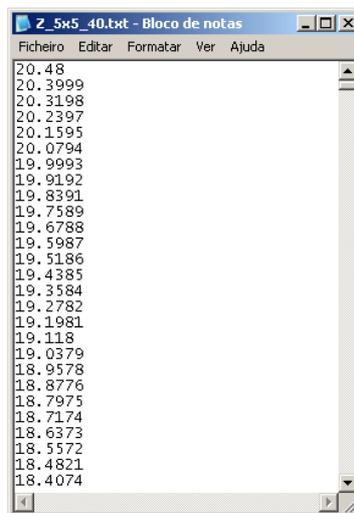


Figura 45 – Ficheiro batimétrico com valores z.

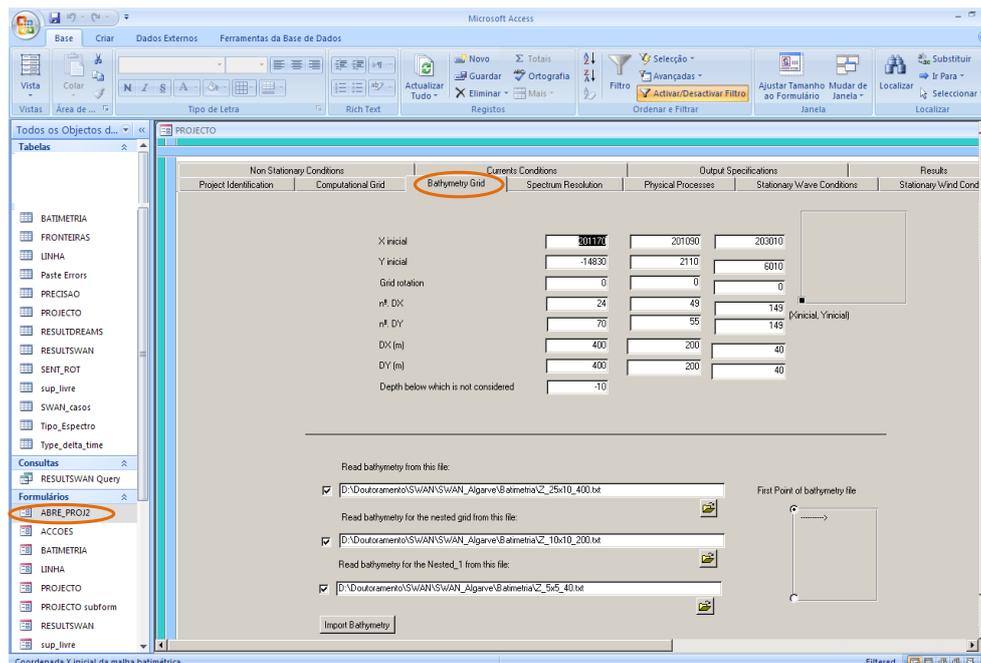


Figura 46 – Definição da *Bathymetry Grid*.

Normalmente para a costa portuguesa utiliza-se um espectro do tipo JONSWAP, obtendo-se os valores de período de pico (Fig 6.)

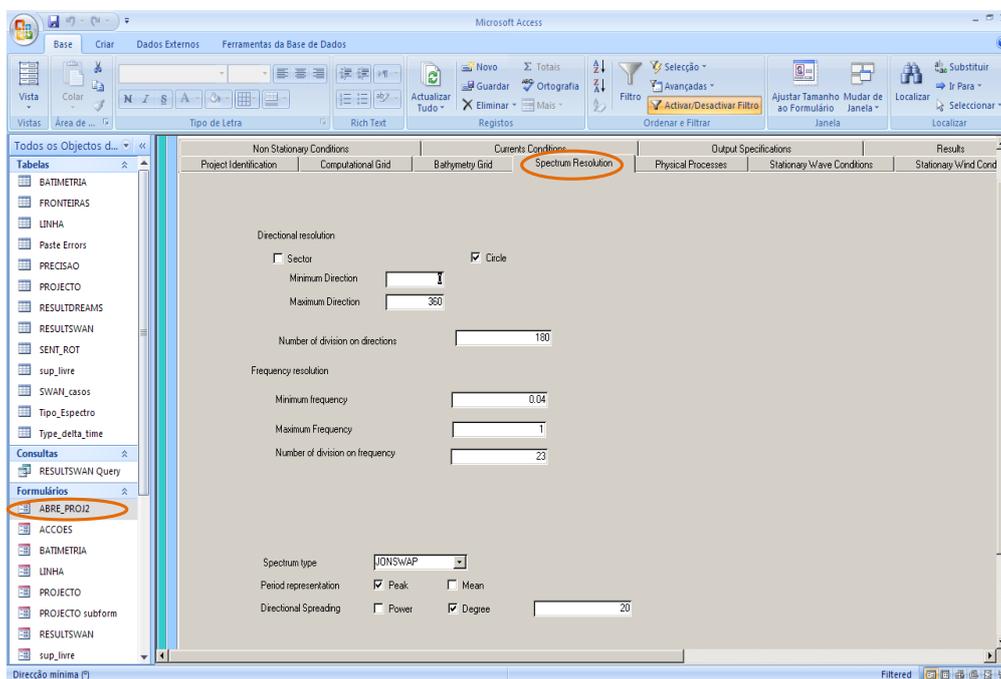


Figura 47 – Definição da resolução espectral.

Relativamente aos processos físicos simulados, no nosso caso apenas se vai simular processos estacionários, uma vez que não temos uma série temporal de ventos. Quando não está assinalado nenhum processo (Fig. 7) o modelo apenas tem em conta a refração, que é o processo mais simples.

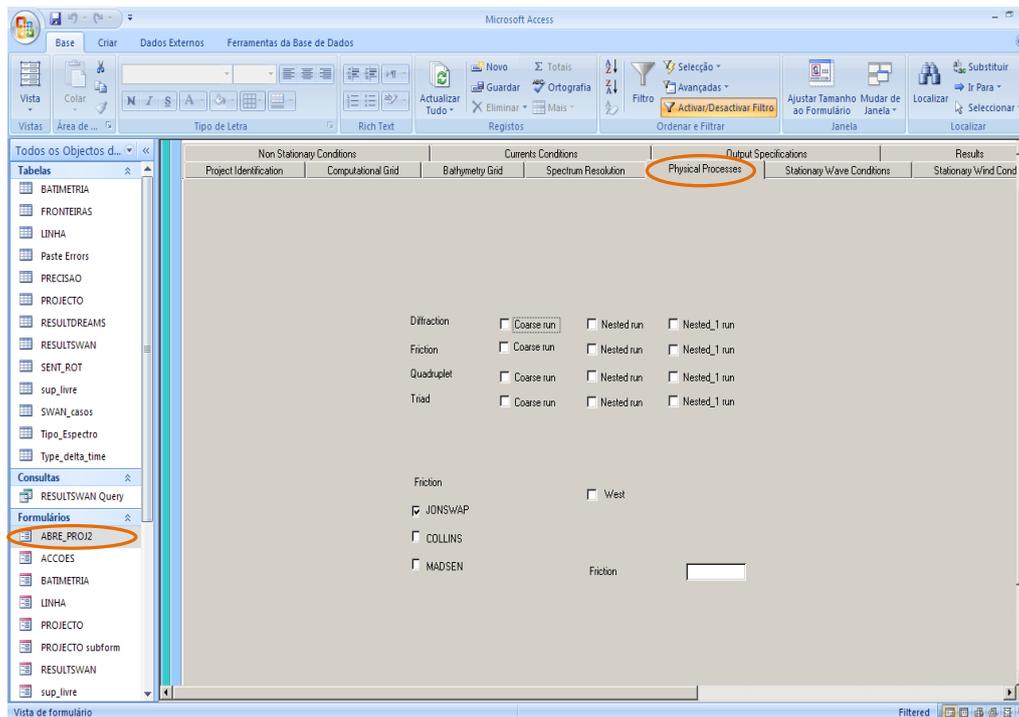


Figura 48 – Seleção de processos físicos.

A definição das condições de agitação é feita pela introdução de um ficheiro (Fig. 9) com as condições ao largo, na primeira situação, com os dados da boia do IH no dia da campanha de medições.

Na segunda situação, utiliza-se para se efetuar a transferência até à costa dos registos da bóia-ondógrafo de Faro correspondentes a 1991, procedeu-se à:

- identificação dos intervalos em HS, TZ e DIR que incluem todos os dados de 1991;
- realização de cálculos sistemáticos de propagação de ondas para os trios (HS, TZ, DIR) que resultam dos intervalos anteriormente definidos considerando um dado espaçamento. Estes cálculos de propagação foram realizados com o modelo SWAN, incluído no módulo SWAN do sistema GUIOMAR (Nahon *et al.*, 2007);

Assim é construída a matriz de transferência.

A série temporal de resultados é definida neste ficheiro, pois os resultados vão ser para os exatos instantes em que são fornecidas as condições ao largo. A serie temporal final vai ser tanto maior quanto instantes de agitação forem fornecidos, neste ficheiro. É definido também a(s) fronteira(s) onde as condições de agitação vão ser aplicadas (Fig.8). A maré também é aqui definida.

No nosso ficheiro apenas se alterou o Hs, a direcção posta igual no “DIR” e no “p_dir”, e o período de pico que deve ser transformado em frequência ($=1/T$) e colocar no “fp”

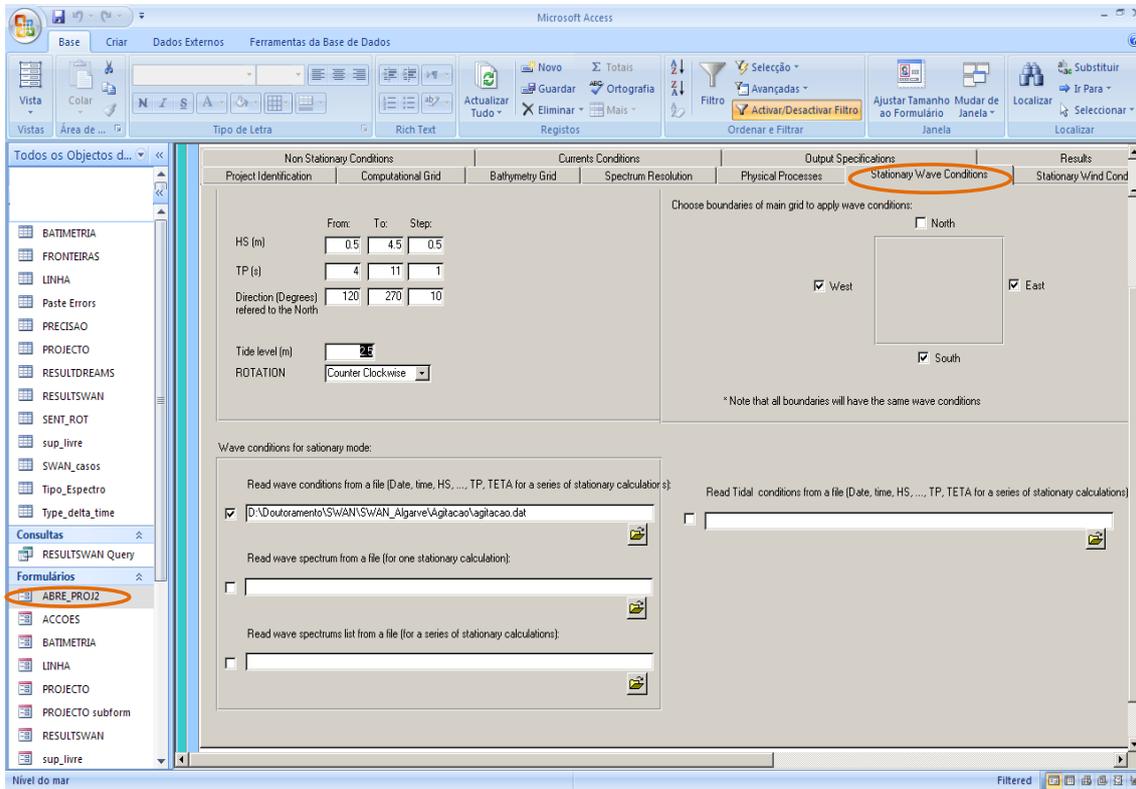


Figura 49 – Definição das condições de agitação fronteira.

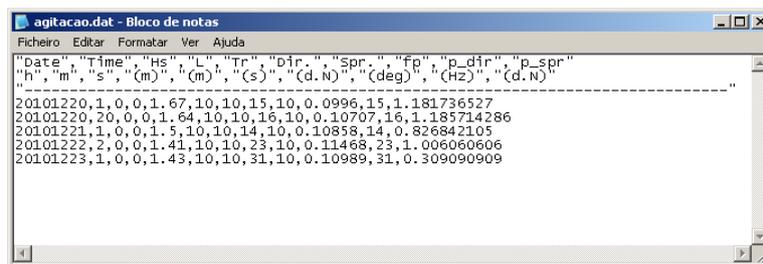


Figura 50 – Ficheiro com os dados de agitação ao largo.

Os pontos para os quais se pretende fazer a propagação das condições ao largo são fornecidos através de um ficheiro (Fig. 11), onde está definido o nº d pontos e as suas respetivas coordenadas. Define-se também o nome dos ficheiros de saída (Fig.10).

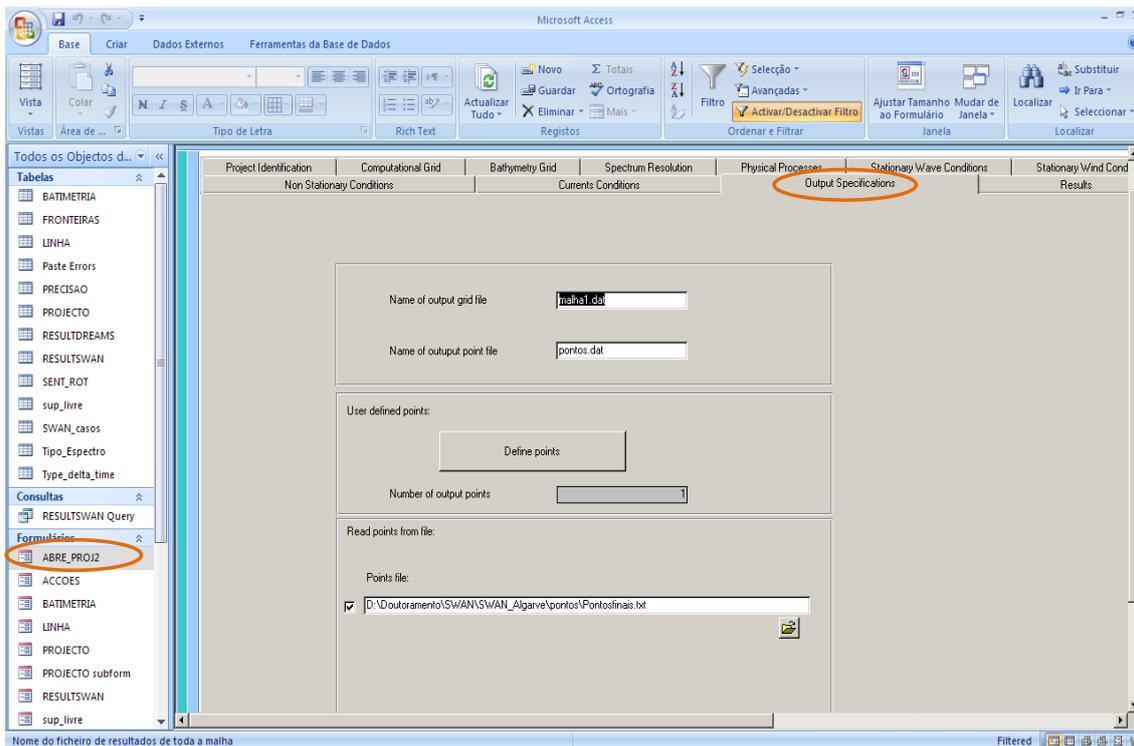


Figura 51 – Definição do nome dos ficheiros de saída e dos pontos para os quais queremos obter resultados.



Figura 52 – Ficheiro com as coordenadas dos pontos a estudar.

Na pasta onde estão todos os ficheiros necessários deve constar o ficheiro em Access, os executáveis (SWAN.BAT; swan.exe; PONTOS.BAT), e uma pasta para a qual vão ser direccionados os ficheiros de resultados que deve conter o nome do projeto e a respetiva identificação (indicado na Fig. 2 e Fig. 12).

Após a definição dos parâmetros e fornecimento dos caminhos para os ficheiros de entrada, clicar em “Create Data File” (Fig. 12-1).

Próximo passo é “Run SWAN” (Fig.12-2). Por algum motivo não possível de identificar, provavelmente relacionados com diferenças de versões, não é possível correr o SWAN através da interface de Access, assim deve ser feito diretamente no SWAN.BAT.

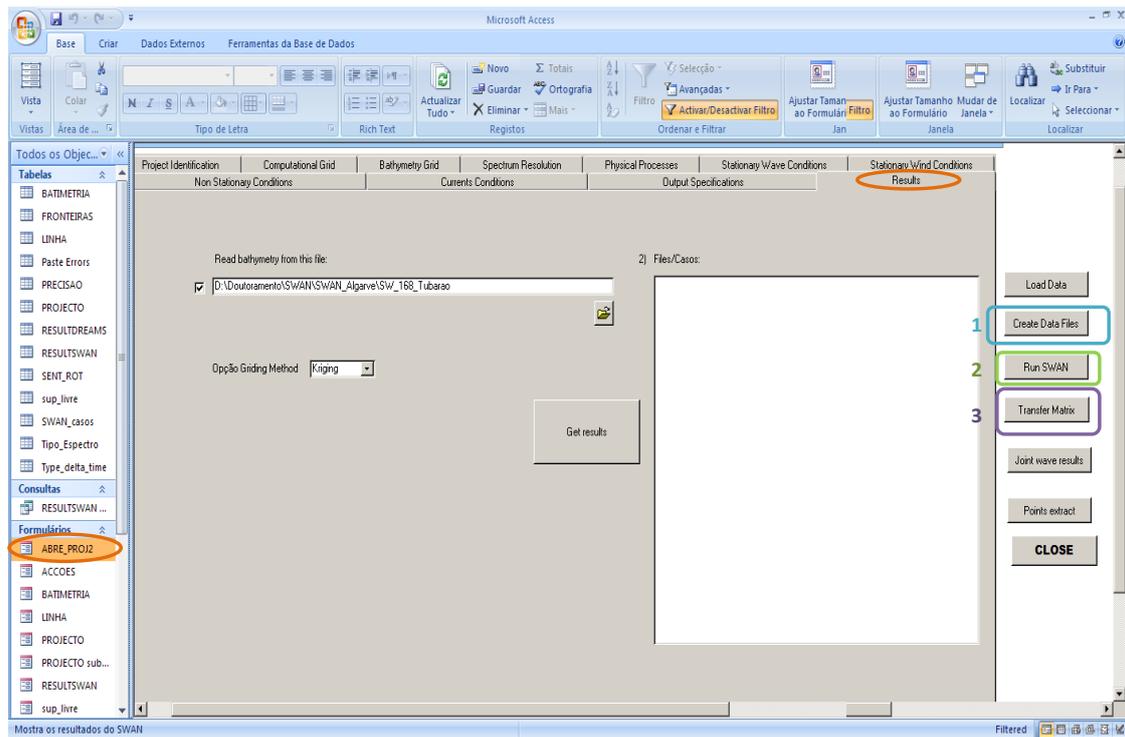


Figura 53 – Definição da localização do ficheiro batimétrico, obtenção dos ficheiros de entrada (1), execução do programa SWAN (2) e obtenção dos resultados (matrizes de transferência).

Os resultados vão ser escritos sobre a forma de matriz (Fig. 13 e 14), quer relacionado com a malha computacional (Fig. 13) quer num ponto específico (Fig. 14). Cada um destes ficheiros corresponde ao um instante definido no ficheiro das condições de agitação marítima inicial (Fig. 9).

pontos.dat_2010122001.dat - Bloco de notas

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

```

%
% Run:1      Table:CN      SWAN version:40.72AB
%
%      Xp      Yp      Hsig      Tm02      PkDir      Depth      RTpeak      Dir      Tm01
%      [m]      [m]      [m]      [sec]      [degr]      [m]      [sec]      [degr]      [sec]
%
%      205028.      8020.      0.00025      7.7524      47.000      103.0673      9.3860      48.664      8.3575
%      205288.      7840.      0.00014      8.1035      43.000      101.8187      10.7959      44.205      8.7171
%      206048.      7300.      0.00550      7.6880      45.000      98.7687      9.3860      45.027      8.2897

```

Figura 54 – Ficheiro com os resultados obtidos para uma condição de agitação de entrada, nos pontos a estudar.

Run:1	Table:	SWAN version:40.72AB						
xp [m]	yp [m]	Hsig [m]	Tm02 [sec]	PkDir [degr]	Depth [m]	RTpeak [sec]	Dir [degr]	Tm01 [sec]
201270.	-14730.	0.49748	6.8290	359.000	1.2182	9.3860	357.417	7.4597
201470.	-14730.	0.48548	7.5699	355.000	1.1939	9.3860	355.786	8.0630
201670.	-14730.	0.47245	8.2170	355.000	1.1817	9.3860	355.344	8.6850
201870.	-14730.	0.47451	8.3039	359.000	1.1817	9.3860	356.079	8.7962
202070.	-14730.	0.44401	7.8131	353.000	1.1817	9.3860	352.378	8.4160
202270.	-14730.	0.42619	7.7138	349.000	1.1817	9.3860	347.542	8.3477
202470.	-14730.	0.41839	7.7756	345.000	1.1817	9.3860	343.475	8.3885
202670.	-14730.	0.43710	7.8220	343.000	1.1817	9.3860	344.061	8.4259
202870.	-14730.	0.43265	7.7758	343.000	1.1817	9.3860	345.047	8.4335
203070.	-14730.	0.40797	7.6455	343.000	1.1817	9.3860	343.854	8.3447

Figura 55 – Ficheiro com resultados em toda a *Computacional Grid* para uma condição de agitação de entrada.

A “Transfer Matrix” (Fig. 12-3) permite juntar num só ficheiro todos os instantes relativos a um dos pontos, originando o ficheiro TRANSFER_nome do ponto.dat (Fig. 15). Os parâmetros obtidos, por coluna, nos ficheiros de resultados são: **Hsign** – significant wave height (m), **TM02** – mean absolute zero crossing wave period (s), **PDIR** – peak period (degree), **DEP** (m), **RTP** – relative peak period (s), **DIR** – mean wave direction (degree), **TM01** – mean absolute wave period (s).

TRANSFER_P1.dat - Bloco de notas									
1.67	10.04	15	0.00012	4.6621	57	3.9671	56.432	4.1099	
1.64	9.34	16	0.00018	4.6621	57	4.0182	56.587	4.176	
1.5	9.21	14	0.00009	4.6621	57	3.8431	56.767	3.9663	
1.41	8.72	23	0.00124	8.1602	57	4.5448	55.446	4.9155	
1.43	9.1	31	0.0072	9.386	53	4.9805	55.559	5.4934	

Figura 56 – Exemplo de ficheiro com os dados da matriz de transferência para um ponto em estudo.

