

## **CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NAS PROXIMIDADES DA PONTA DO TUBARÃO – RN, NORDESTE DO BRASIL**

C.J.E.M. FORTES

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt)*

M.F.A. MATOS

*Geógrafo, – DG/PPGG - Geopro, C.P. 1584, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil*

*Estagiária de doutoramento, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [mfatimaalves.m@gmail.com](mailto:mfatimaalves.m@gmail.com)*

A. C. SCUDELARI

*D. Sc. Eng.ª Civil, PPGES, UFRN, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil, +558432153766, [ada@ct.ufrn.br](mailto:ada@ct.ufrn.br)*

V. AMARO

*Geólogo, DG/PPGG - Geopro, C.P. 1584, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil, [amaro@geologia.ufrn.br](mailto:amaro@geologia.ufrn.br)*

### **RESUMO**

A região adjacente à Ilha Ponta do Tubarão, situada no litoral do Estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, é uma zona costeira de alta complexidade ambiental devido às características biológicas e físicas de alta sensibilidade dos ecossistemas presentes e em relação à importância do potencial económico para a população residente e para o estado. Os recursos naturais lá encontrados, como as ilhas barreiras, os campos dunares e os canais de marés, parcialmente ocupados por manguezais, estão em contacto directo com as actividades da indústria salineira, da carcinicultura e petrolífera, importantes para a economia regional e nacional. Por esse motivo, trata-se de uma área que apresenta uma vulnerabilidade ambiental natural elevada em decorrência do constante risco de acidentes ambientais.

Diante deste cenário, a região tem sido alvo de estudos interdisciplinares que tentam contribuir para o entendimento da dinâmica costeira na região e preencher lacunas ainda inerentes a complexidade dos processos geológicos nesse sistema holocênico de ilhas barreiras (NASCIMENTO, 2009), e principalmente dos oceanográficos e climáticos, oriundos de uma carência na base de informações e séries temporais ao longo das décadas. Este facto leva as equipas de investigação a fazerem uso de modelos numéricos.

Nesta comunicação, descreve-se as medições hidrodinâmicas efectuadas na região e uma aplicação preliminar do modelo SWAN à zona marítima na costa setentrional do Rio Grande do Norte na região da ilha Ponta do Tubarão, entre os municípios de Macau e Guamaré. Os resultados numéricos são comparados com os dados obtidos na campanha de campo realizada de 11 a 12 de Dezembro de 2010 de modo a avaliar o desempenho do modelo SWAN.

**Palavras-chave:** Ponta do Tubarão, Agitação marítima, Campanhas de campo, Modelação numérica, Modelo SWAN

## 1. INTRODUÇÃO

A região adjacente à Ilha Ponta do Tubarão, no estuário de Diogo Lopes, no Nordeste do Brasil (Figura 1) apresenta-se como uma área de grandes belezas naturais e de grande potencial económico proveniente dos recursos naturais lá encontrados, como o sal, a carcinicultura, o petróleo e gás natural. O Estado do Rio Grande do Norte é o maior produtor de sal do país e a produção de petróleo e gás natural em terra (17.879.946 barris/ano ANP 2010) e mar (5.118.644 barris/ano ANP 2010) é altamente relevante na produção nacional ( Figura 2)

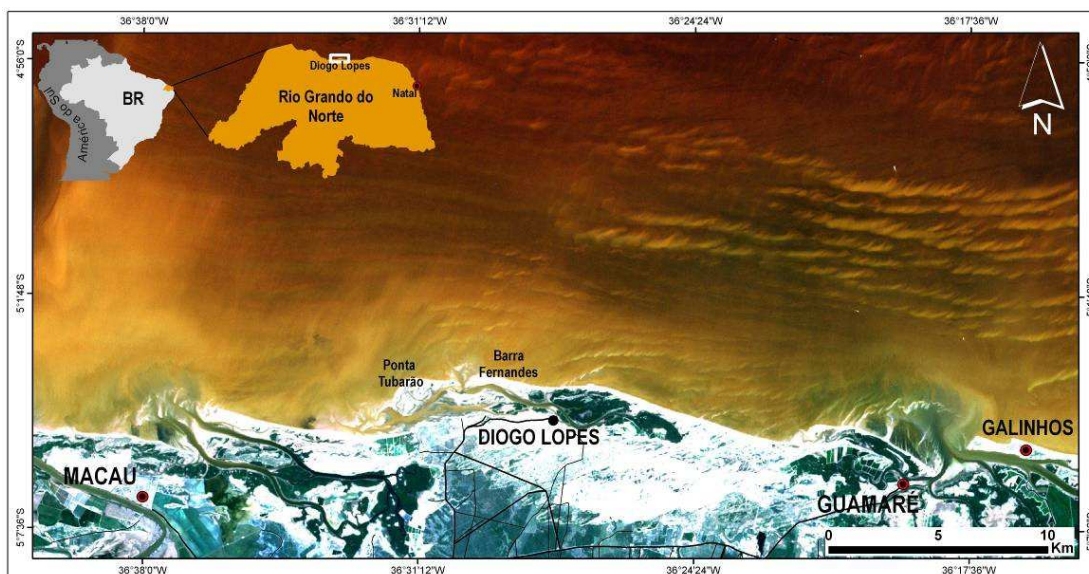


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

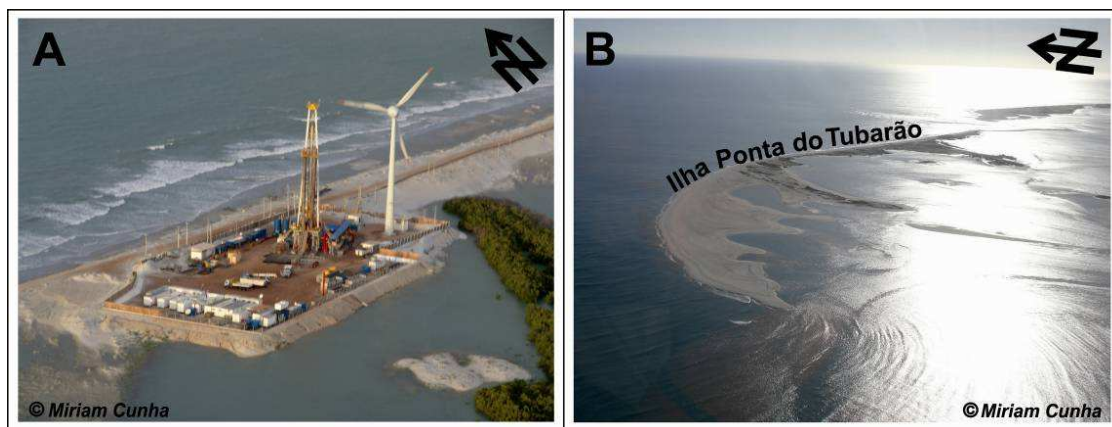


Figura 2 - (A) Exemplo da actividade petrolífera nas ilhas barreiras (A) Vista geral da área adjacente da Ilha Ponta do Tubarão. Foto: Miriam Cunha, acervo GEOPRO/DG/UFRN.

As actividades petrolíferas instaladas envolvem a prospecção, exploração e transporte de petróleo e gás natural, e mantém a área, que apresenta uma vulnerabilidade ambiental e natural elevadas (GRIGIO *et al.* 2005, BOORI & AMARO 2010), em constante risco ambiental. Diante deste cenário associado à dinâmica natural da região, esta tem sido alvo de estudos interdisciplinares que tentam contribuir para o entendimento dos processos costeiros presentes e que são responsáveis pelas intensas modificações verificadas no meio ambiente, que sofre ainda pressões socioeconômicas (SILVA *et al.* 2010).

Os diferentes estudos apontam para a necessidade do conhecimento dos forçantes hidrodinâmicos na área, como ondas, marés e ventos, além do conhecimento da circulação hidrodinâmica na área. Mais concretamente, o conhecimento do padrão de propagação de ondas na região é, assim, de fundamental importância para estudos de morfodinâmica costeira e dinâmica sedimentar, bem como para qualquer obra de engenharia costeira a ser aí implantada. No entanto, as informações existentes referentes a dados oceanográficos e climáticos são insuficientes como base de qualquer estudo de engenharia costeira e portuária na região dada a carência base de informações e séries temporais ao longo das décadas.

Nesse âmbito, está a decorrer um vasto programa de monitoramento ambiental da região em estudo e, em especial de caracterização das ondas ao longo da praia de São Bento do Norte à leste da Ponta do Tubarão, pela equipe de trabalho do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Rio Norte. Dos diferentes estudos efectuados, TABOSA (2002) obteve altura de onda significativa na região próxima a Guamaré, de 50 cm, com período médio de 1.20 s; SILVEIRA (2002) constatou na região do estuário de Guamaré valores mínimos de onda de 23 cm com período de 7.2 s (Outubro) e altura significativa de 77 cm e período de 4,9 s (novembro); LIMA (2002, 2006) em Galinhos registrou valores de altura significativa de 65 cm e períodos de ondas de 12 s, e valores mínimos de 35 cm e períodos de 5.1 s; CHAVES (2005) registrou altura significativa de onda de 35 cm com período médio de 7.5 s nas proximidades de Serra/Macau.

No entanto, este monitoramento de ondas é feito de forma pontual quer no espaço como no tempo pelo que o recurso à modelação numérica para caracterizar os principais processos de geração e propagação de ondas na mesma é muito vantajoso pois permite a caracterização espacial da zona a estudar e principalmente uma análise a curto, médio e longo prazo, constituindo por isso uma importante ferramenta de gestão costeira. Com efeito, os modelos numéricos de propagação de ondas têm-se apresentado como uma excelente alternativa para a determinação do clima de ondas em regiões carentes desse tipo de informações. São assim utilizados para transferir as características da onda (alturas, direcção e período) do largo ou de um local na costa onde sejam conhecidos para o local de interesse de estudo. Dependendo da complexidade do modelo numérico, estes podem incluir diferentes fenómenos que afectam a propagação das ondas em zonas costeiras, tais como, a refacção, a difracção, a reflexão, rebentação de ondas, efeitos não lineares e interacção onda-corrente.

Um exemplo deste tipo de modelo de geração e propagação de ondas é o modelo SWAN (BOOIJ *et al.* 1999). Trata-se de um modelo de ondas irregulares (espectro de energia) para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. Este modelo é não-linear, espectral, permite a geração de ondas por vento e efectua a sua propagação considerando vários fenómenos intervenientes na propagação de ondas - refacção, rebentação difracção (de forma aproximada), geração de harmónicas (interacção não-linear entre ondas) - é considerado adequado para grandes áreas costeiras (dezenas de quilómetros).

O modelo SWAN é assim aplicado na propagação de várias condições de agitação incidente desde o largo até junto à costa da Ponta do Tubarão. Mais concretamente, para alguns dos dias em que se efectuaram medições e considerando as condições de agitação marítima ao largo fornecidas pelo modelo de previsão WAVEWATCH III (TOLMAN 1999) é executado o modelo SWAN e obtidas as características da agitação marítima junto à costa. Seguidamente, efectua-se a comparação dos resultados numéricos com os dados medidos nos instrumentos colocados para o efeito em

profundidades de entre 5 a 12 m em momentos de regime de meso-marés (marés semi-diurnas em fase de quadratura e sizígia). Esta comparação permite avaliar o desempenho do modelo SWAN.

Nesta comunicação, descreve-se a aplicação do modelo SWAN ao estudo da agitação marítima na costa setentrional do Rio Grande do Norte na região frontal à ilha Ponta do Tubarão, entre os municípios de Macau e Guamaré. Assim, após esta introdução segue-se uma breve descrição da zona em estudo (Capítulo 2) e das medições das características das ondas nas campanhas de campo efectuadas na zona (Capítulo 3). De seguida, apresenta-se a descrição do modelo SWAN e das suas condições de aplicação e a apresentação, comparação e discussão dos resultados obtidos. Finalmente, apresentam-se as conclusões do estudo.

## 2. DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A área de estudo está situada no mar, na porção interna da plataforma continental adjacente, do litoral norte do Nordeste Brasileiro, entre os municípios de Macau e Guamaré, e coordenadas: 5°55'0"S - 36°39'0"W e 4°49'0"S - 36°17'0"W (Figura 3).

Nos limites de domínio da área encontram-se instalados os campos de produção de petróleo e gás natural da PETROBRAS, sendo estes, instalados na maioria em profundidades inferior a isobáta de 25 m, coincidindo com as principais estruturas geológicas de falhas extensionais do embasamento da margem continental da Bacia Potiguar. A oeste, destaque para o paleovale do Rio Açú, feição geomorfológica entre a Foz do Rio Açú e a quebra da Plataforma Continental (Pessoa Neto, 2003).

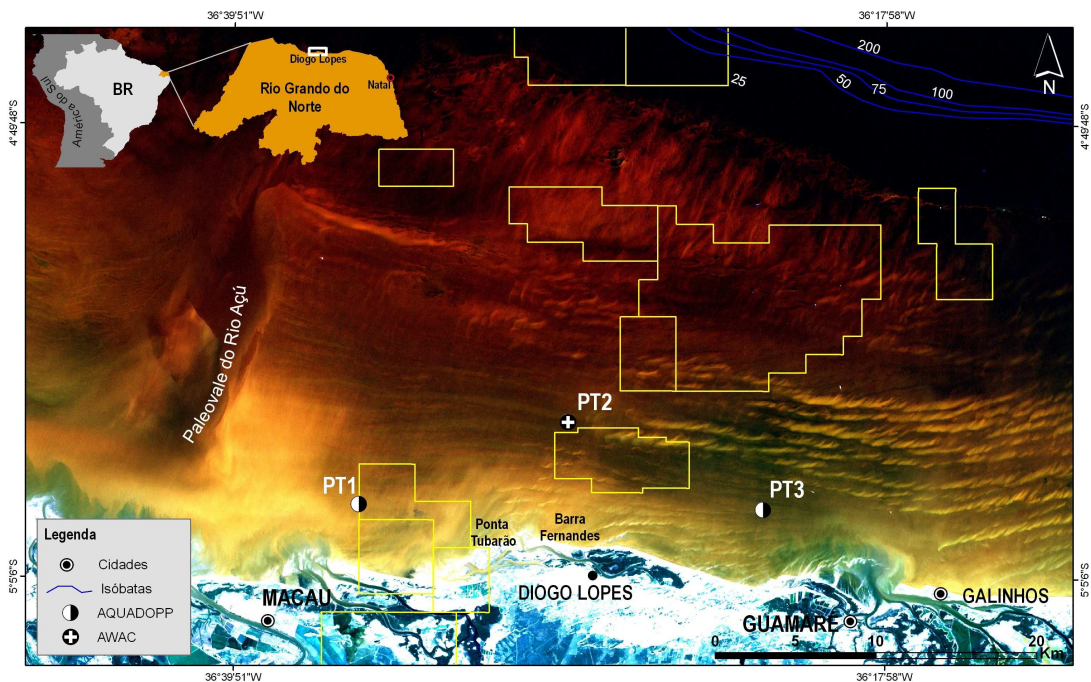


Figura 3 – Mapa de descrição da área de estudo, com indicação dos locais de medição e destaque para os campos de produção da Bacia Potiguar.

Em termos de batimetria, a zona marítima adjacente à zona entre Macau e Guamaré, caracteriza-se por uma região de plataforma muito extensa e de baixas profundidades (inferiores a

50 m), numa distância de cerca de 80 km em relação à linha de costa. Após esta região, as profundidades são significativamente maiores.

De acordo com os estudos ambientais da PETROBRAS (NASCIMENTO, 2009), na área do estudo os ventos sopram predominantemente de nordeste-leste nos meses de Setembro a Abril e de sudeste de Maio a Agosto. TABOSA & VITAL (2004) obtiveram valores entre 6.94 a 10.19 m/s para os ventos provenientes de nordeste e 6.07 a 4.22 m/s para os ventos sudeste. Os ventos sudeste são ainda a segunda direcção predominantemente em Abril e Setembro (Inverno). De Outubro a Março (Verão) a segunda direcção predominante é a nordeste. Para a região de Macau ocorre em escala de dias, semanas e meses. Geralmente, eles são mais fortes em Setembro e Outubro (média de 7.0 m/s e 7.1 m/s e de E/SE) e mais fracos em Março e Abril (média de 4.4 m/s e 4.6 m/s e de leste). A figura abaixo mostra a análise dos ventos de 2001 – 2006.

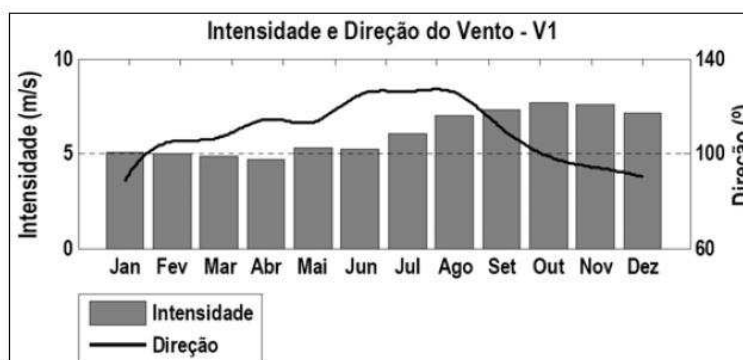


Figura 4 – Variação mensal das características de ventos (velocidade e direcção) na região de Macau a Guimarães com base em dados de 2001 - 2006 (NASCIMENTO, 2009).

### 3. MEDIÇÕES

Nas próximas secções, descrevem-se as medições de ondas efectuadas por vários instrumentos na zona marítima próxima da ilha do Tubarão, bem como o tratamento efectuado e respectiva análise. Para essa análise, apresentam-se também as características dos ventos medidos na estação Meteorológica de Macau, naqueles períodos de medição.

#### 3.1 Campanhas

A aquisição dos dados de ondas ocorreu durante fases das marés de sizígia, sob condições de regime de marés semi-diurnas, com duas preia-mares e duas baixa-mares, onde o Nível Médio ( $Z_0$ ) estabelecido é 139 cm acima do Nível de Redução (RN) com máximas de preia-mares de sizígia de 234 cm acima do RN, média de preia-mares de quadratura de 221 cm, mínimas de baixa-mares de sizígia de 43 cm abaixo do RN e mínimas das baixa-mares de quadratura de 56 cm de acordo com a estação maregráfica do Porto de Macau (DHN, 2010).

Foram usados três equipamentos para a aquisição dos dados de ondas: um correntômetro eletromagnético Modelo *Inter-Ocean* S4 (localizado em PT2); e, dois perfiladores acústicos de ondas e correntes Modelo Nortek AWAC AST e AQUADOPP (localizados em PT1 e PT3), cuja localização se pode ver na Figura 3. Na Tabela 1 apresentam-se as características e de fundeio dos equipamentos e na Tabela 2 com as características de aquisição de dados dos equipamentos.

O equipamento S4 foi programado para obter dados a cada 1800 s, efectuando uma média de valores a cada 30 s.



Tabela 1 – Características gerais e de fundeio dos sensores.

Sensor	Ponto	UTMX-Z24S	UTMY- Z24S	Freq. Hz	Profundidade* (m)	Dist. Norte** (km)
AQUADOPP	PT1	766768.68	9441999.32	1	6	3.9
S4 / AWAC AST	PT2	779765.47	9447091.11	1	10 e 11	7.6
AQUADOPP	PT3	791880.88	9441626.87	1	8	4.8

\* Profundidade do fundeio. \*\* Distância a partir da linha de Costa.

Tabela 2 – Características de aquisição dos dados

Sensor	Intervalo Perfil (s)	N.º Célula (s)	Tamanho Célula (m)	Média (s)	N.º Amostra	Tempo Aquisição (s)
AQUADOPP	600	20	1	60	1024	1800
AWAC AST	600	20	1	60	1024	1800

### 3.2 Tratamento de dados

Os dados foram processados e filtrados pelos próprios instrumentos: AQUADOPP e AWAC AST do fabricante Nortek. A análise espectral efectuada aos registos obtidos em cada um dos equipamentos, permitiu obter os valores da altura de onda significativa, HS (ou HMO), período médio, TM02, período de pico TP, direcção média, DIR\_med, e direcção de pico, DIR\_TP, ao longo do período da campanha com os quais se efectuou os gráficos apresentados na Figura 5, na Figura 6 e na Figura 7.

Devido a problemas verificados nos instrumentos, os valores válidos medidos nos instrumentos corresponderam a: PT1 – 11 a 12 de Dezembro de 2010; PT2 – 18 de Novembro de 2010 a 7 de Janeiro de 2011; PT3 – 22 de Novembro de 2010. Nesta comunicação, apenas se apresentam os resultados dos instrumentos PT1 e PT2 para as datas coincidentes, i.e., 11 a 12 de Dezembro de 2010.

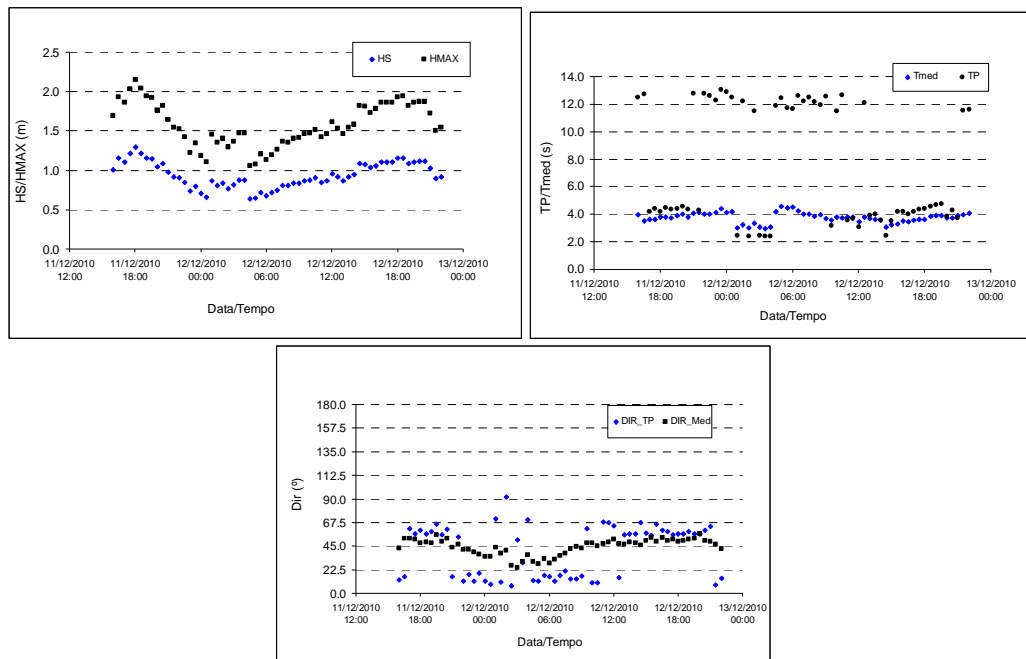


Figura 5 – Características da agitação marítima medida pelo instrumento PT1.

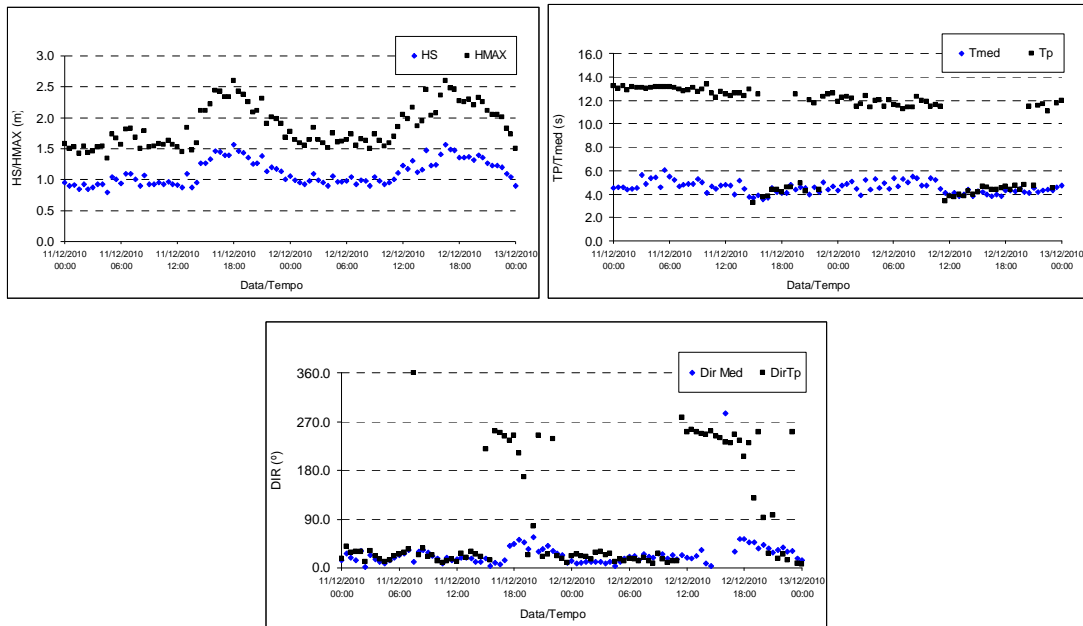


Figura 6 – Características da agitação marítima medida pelo instrumento PT2.

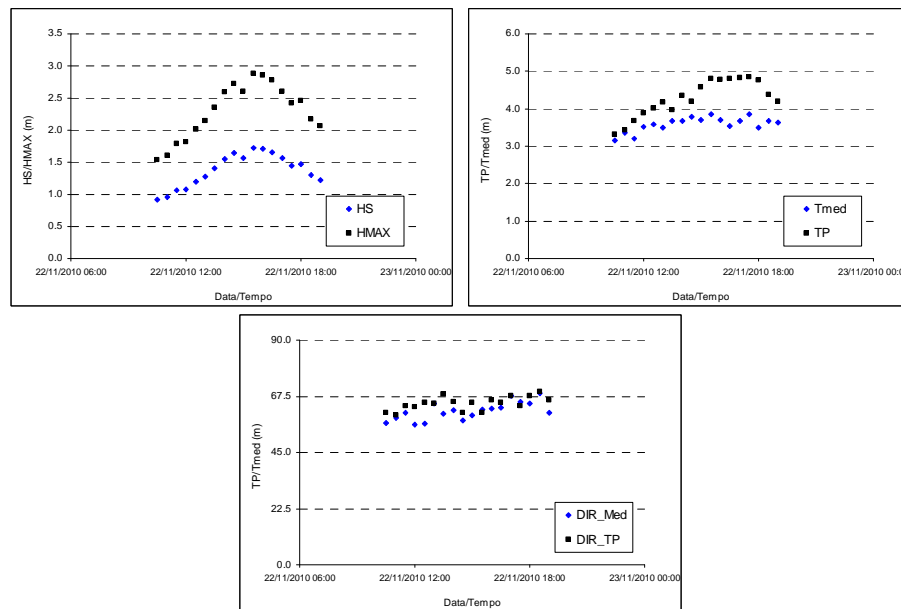


Figura 7 – Características da agitação marítima medida pelo instrumento PT3.

Da Tabela 3 à Tabela 5 mostram-se as gamas e a média de valores das características das ondas no período de 11 a 12 de Novembro de 2010 para o PT1 e PT2 e de 22 a 23 de Dezembro para PT3.

Tabela 3 – PT1. Estatísticas.

	HS	HMAX	TP	Tmed	DIR_TP	DIR_Med
Max	1.29	2.15	12.91	4.58	91.64	56.75
Min	0.65	1.08	2.42	3.02	9.96	24.48
Med	0.94	1.57	7.00	3.75	43.39	44.05

Tabela 4 – PT2. Estatísticas.

	HS	HMAX	TP	Tmed	DIR_TP	DIR_Med
Max	1.56	2.60	13.38	6.03	359.70	355.65
Min	0.80	1.34	3.25	3.58	5.63	0.98
Med	1.11	1.86	9.76	4.55	87.40	35.18

Tabela 5 – PT3. Estatísticas.

	HS	HMAX	TP	Tmed	DIR_TP	DIR_Med
Max	1.73	2.88	4.86	3.86	69.46	68.85
Min	0.92	1.54	3.32	3.15	59.95	56.04
Med	1.38	2.30	4.28	3.59	64.62	61.58

Nos dias 11 e 12 de Dezembro, o andamento dos valores da altura de onda significativa, período médio e direcção média nos instrumentos PT1 e PT2 é muito semelhante, principalmente no caso da altura de onda significativa e período da onda.

Verifica-se que a altura da onda cresce ao longo do dia 11 de Dezembro de 2009 até as 18:00h, atingindo valores de 1.29 m no PT1 e de 1.56 m no PT2, após o que decresce para valores próximos de 1 m. Volta de novo a crescer ao longo do dia 12 de Dezembro atingindo o máximo às 16:30h com valores de 1.16 no PT1 e de 1.56 no PT2. Em ambos os registos, as gamas e as médias da altura de onda são semelhantes, i.e., os valores variam na gama entre 0.6 m e 1.7 m com a média em torno de 1 m. Em geral, os valores no PT2 são superiores aos valores no PT1.

Quanto aos períodos médios variam entre 3 s e 6 s, com médias em torno dos 4 s (3.75 s para o caso PT1 e 4.55 s, para o caso PT2). Tal indica que se trata de uma agitação predominantemente gerada por ventos locais.

No que diz respeito à direcção média entre 0° e 360° no PT2 é maior do que a verificada no PT1, embora em termos de média os valores sejam parecidos (44° versus 35°).

De modo a analisar a caracterizar este tipo de agitação, apresentam-se os dados de vento (velocidade e direcção do vento) obtidos na estação Meteorológica que está localizada em Macau, nas coordenadas: Latitude -5. 1150° e Longitude -36.7156°, nos dias 11 e 12 de Dezembro de 2010.



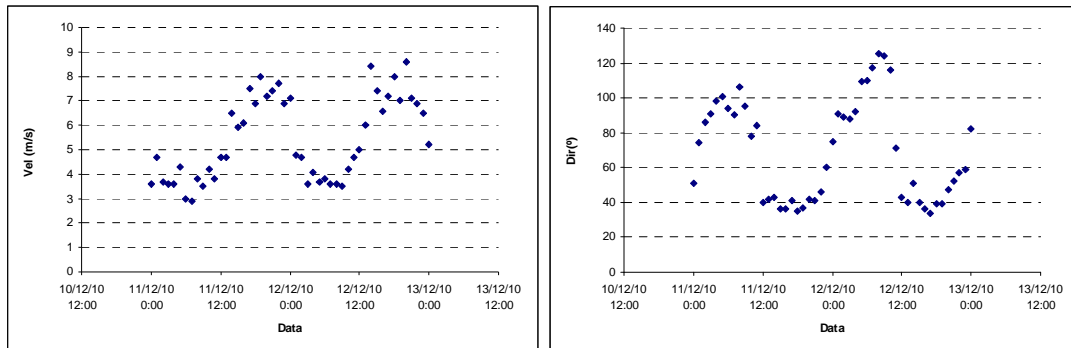


Figura 8 – Características dos ventos (vel (m/s), Dir(°)) nos dias 11 e 12 de Dezembro de 2010.

A análise conjunta da Figura 5, da Figura 6 e da Figura 8 permite dizer que, em geral, existe clara correlação entre os valores de alturas de onda e os ventos verificados na zona. Com efeito, o aumento da altura de onda está normalmente associado a um aumento da velocidade do vento e a variação da direcção da onda.

No que diz respeito ao PT3, e nos dias 22 e 23 de Dezembro, os valores de HS variaram entre 0.9 e 1.73 m com a média em torno de 1.38 m e os valores de Tmed variam na gama entre 3.15 e 3.86 s com a média em torno de 3.59 s. No que diz respeito à direcção média varia entre 56° e 69° sendo a média igual a 62°.

#### 4. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

Nesta secção, descreve-se a aplicação efectuada com o modelo SWAN para a zona em estudo com vista a caracterizar o padrão de ondas geradas pelo vento. As simulações numéricas foram obtidas mediante estimativas da agitação marítima local calculadas com o modelo numérico SWAN. O procedimento é seguinte:

- Utilização como condições ao largo do SWAN as fornecidas pelo modelo de geração WAVEWATCH III (TOLMAN, 1999), para o período de 11 a 12 de Dezembro de 2010;
- Utilização dos dados de ventos da estação meteorológica de Macau no período de 11 a 12 de Dezembro de 2010;
- Cálculo das características das ondas (HS, Tmed, DIR) em diferentes posições, utilizando o modelo SWAN para o período referido;
- Comparação dos valores numéricos das alturas de ondas com as medições efectuadas nos pontos PT1 e PT2.

Assim, após a descrição do modelo numérico, apresenta-se as principais condições de aplicação do modelo SWAN e os resultados obtidos. Efectua-se também a comparação desses resultados com as medições efectuadas *in situ*.

##### 4.1 Descrição do modelo numérico

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 acção de onda. Trata se de um modelo de domínio público (freeware), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology* da Holanda, que

possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados o que permite a fácil actualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário.

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

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

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

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

De entre as limitações do modelo refira-se:

- A calibração dos muitos dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos no SWAN utilizou dados da campanha JONSWAP, que foi realizada no Mar do Norte (HASSELMANN *et al.*, 1973). Tais parâmetros poderão não estar correctos para áreas com diferentes características de clima de ondas (ondas associadas ao estado de mar vaga e ondulação) ou diferentes características do fundo marinho;
- A difracção no SWAN, sendo modelada de modo simples como uma dispersão direcciona, pode ser considerada sua principal limitação, além de não considerar os efeitos de espalhamento de Bragg;
- A inclusão da difracção nos cálculos numéricos implica que o espaçamento da malha computacional, relativamente ao comprimento de onda, seja tal que garanta a convergência dos cálculos computacionais. Tal implica, por vezes, que as malhas sejam de tão grande dimensão que podem inviabilizar a execução dos cálculos;
- Outro ponto importante é a influência das condições de fronteira nos resultados do modelo SWAN em certas zonas do domínio de cálculo.

## **4.2 Condições de aplicação do modelo**

### *4.2.1 Condições ao largo*

Consideraram-se como condições ao largo os estados de mar ao largo estimados pelo modelo de 3ª geração e propagação de ondas WAVEWATCH (WWIII) (TOLMAN, 1999). Estas estimativas contêm os parâmetros de onda seguintes: HS (altura de onda significativa), TP (período

de pico) e DIR (direcção de onda associada ao período de pico), obtidas a cada três horas, referentes ao período de 11 de 12 de Dezembro de 2010, para o ponto da malha 4°S36°W, seleccionado por estar localizado o mais próximo da ilha Ponta do Tubarão.

Os valores HS, TP e DIR\_TP considerados ao largo são apresentados na Figura 9.

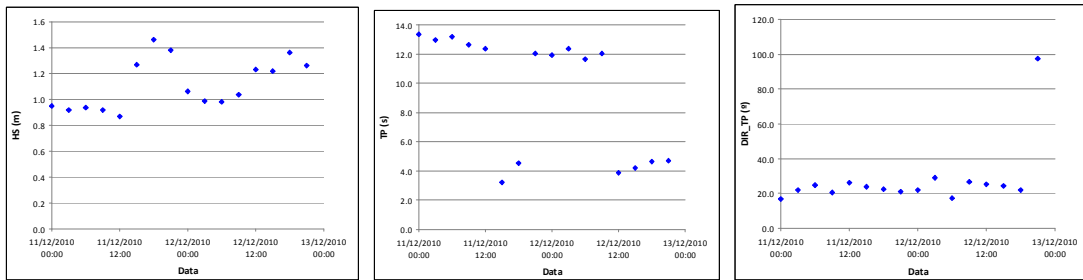


Figura 9 – Valores de HS, Tmed e DIR do modelo de 3ª geração WWIII, no período de 11 a 12 de Dezembro de 2010.

Uma vez conhecidas as estimativas do estado ao largo, caracterizado pela sua altura de onda significativa, HS, período de pico, TP, e a direcção média/pico, DIR, o modelo SWAN é capaz de transferir esses valores para a zona de estudo.

#### 4.2.2 Domínio computacional e condições do modelo SWAN

A batimetria empregue no modelo SWAN (Figura 4) foi obtida das cartas náuticas 720 da DHN (Directoria de Hidrografia e Navegação). Nas áreas próximas a linha de costa e das Ilha barreiras, áreas muito rasas, onde não foi recoberto pelos registos da DHN, as informações foram obtidas dos levantamentos batimétricos realizados em 2005 pela UFRN e PETROBRAS.

Para os cálculos com o modelo SWAN, utilizaram-se três malhas encaixadas, Figura 6. A primeira malha abrange toda a região ao largo da zona de Macau a Guamaré com dimensões de 100 km por 62 km e espaçamento de 500 metros. Uma segunda malha mais refinada, próxima e encaixada na primeira, foi definida com uma resolução de 250 metros, num total de 50 km por 20 km (Figura 6). Uma terceira malha ainda mais refinada, próxima e encaixada na segunda, que foi definida com uma resolução de 50 metros, num total de 30 km por 10 km (Figura 6). As características dessas malhas estão indicadas na Tabela 6.

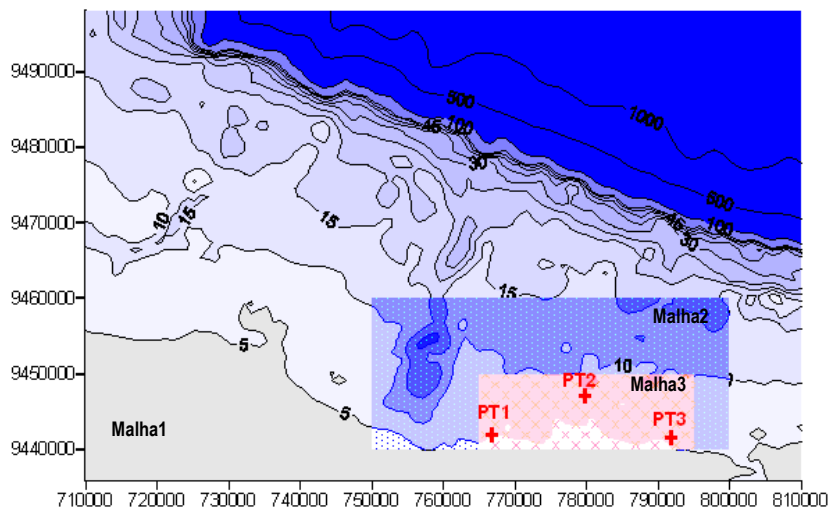


Figura 10 - Malhas utilizadas nas simulações feitas com o SWAN.

Tabela 6 - Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.

	X inicial	Y inicial	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1ª Malha	710000	9436000	200	124	500	500
2ª Malha	750000	9440000	100	80	500	250
3ª Malha	765000	9440000	120	100	250	100

A necessidade de utilização de mais que uma malha de cálculo está relacionada com a expectativa de melhor desempenho do modelo numérico face à utilização de apenas uma, quer no que se refere à qualidade da previsão, quer ao tempo necessário ao cálculo.

As características da agitação ao largo, ver 4.2.1, constituem a condição de fronteira na malha global em um ou dois dos lados dessa fronteira, dependendo da direcção daquela agitação. Os resultados da malha global fornecem as condições de fronteira para a 2ª malha, e os resultados desta malha fornecem as condições de fronteira para a 3ª malha.

O nível de maré foi de 1.3 metros (ZH).

Para execução do modelo, chegou-se à seguinte configuração:

- Utilização da versão SWAN 40.72, em modo estacionário, sem correntes;
- Consideração dos dados de ventos na malha 1, admitindo constância dos valores de velocidade e de direcção em todo o domínio. Os valores são correspondentes aos obtidos na Estação Meteorológica;
- Utilização de um espectro direccional tal que a discretização de um espectro em frequência de JONSWAP contém 21 intervalos, de 0.07 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e a discretização em direcção cobre 270°, dividida em 21 intervalos ( $\Delta = 10^\circ$ );
- Foi adoptado um coeficiente de rebentação constante igual a 0.65;
- Foi usada a lei de JONSWAP, adoptando como parâmetro de atrito de fundo o valor de 0.015.
- Os fenómenos físicos incluídos foram:
  - Na 1ª malha global: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitecapping*), difracção, interacções onda-onda quadruplets (*quadruplet wave-wave interactions*);
  - Nas 2ª e 3ª malhas: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitecapping*), interacções entre tríades de ondas (*triad wave-wave interactions*), a geração de harmónicas (*frequency shifting*) e difracção.

## 4.3 Apresentação, análise, comparação e discussão dos resultados

### 4.3.1 Introdução

Para as condições de cálculo estabelecidas no item anterior, efectuaram-se os cálculos com o modelo SWAN. Assim obtiveram-se os valores de altura significativa (HS), o período médio (Tmed), o período de pico (TP), a direcção média (DIR\_med), a direcção de pico (DIR\_TP), o comprimento de onda (L) e a dispersão direccional, em todo o domínio de cálculo total junto à costa

entre Macau e Guimarães (Figura 6) e em especial nas posições dos instrumentos de medição PT1, PT2 e PT3.

#### 4.3.2 Características da agitação marítima em todo o domínio de cálculo

Na Figura 11 apresentam-se os resultados relativos à propagação efectuada com o SWAN, para um estado de agitação incidente verificado no dia 11 de Dezembro de 2010, às 18:00 h (HS=1.5 m, TP=4.6 s, DIR=23°);

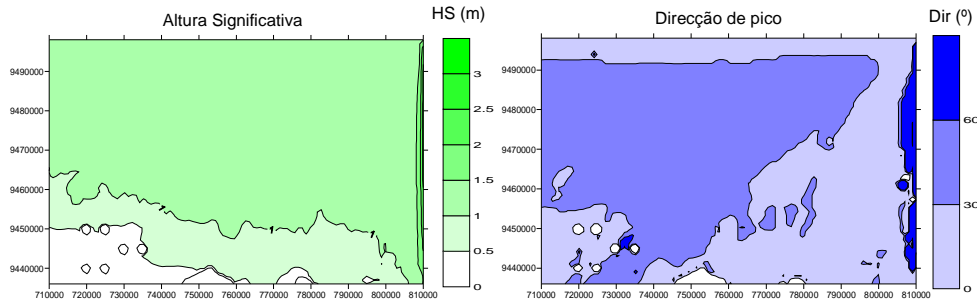


Figura 11 – Resultados do SWAN para o dia 11 de Dezembro de 2009, às 18:00 h (HS=1.5 m, TP=4.6 s, DIR\_Med=23°)

Como pode ser facilmente observado nesta figura, há uma alteração da altura de onda significativa à medida que a onda se propaga em direcção à praia que é o resultado da refacção e difracção das ondas. Em contrapartida, em termos de direcções, há uma ligeira rotação da direcção que é resultado da configuração batimétrica.

#### 4.3.3 Comparação entre os resultados numéricos e valores medidos

Na Figura 12 e na Figura 13 apresenta-se a série temporal das alturas significativas obtidas com o modelo SWAN, bem como as respectivas medições no período de 11 a 12 de Dezembro, para o ponto PT1 e PT2, respectivamente.

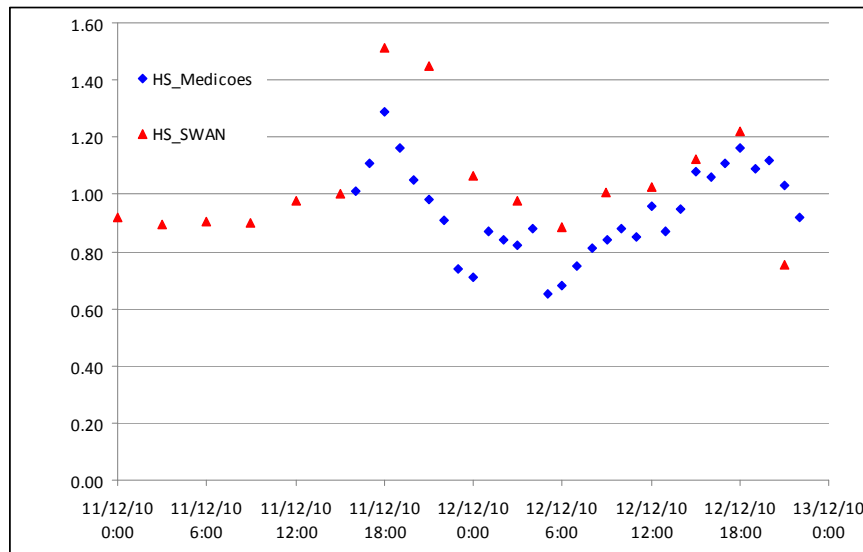


Figura 12 – Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT1.

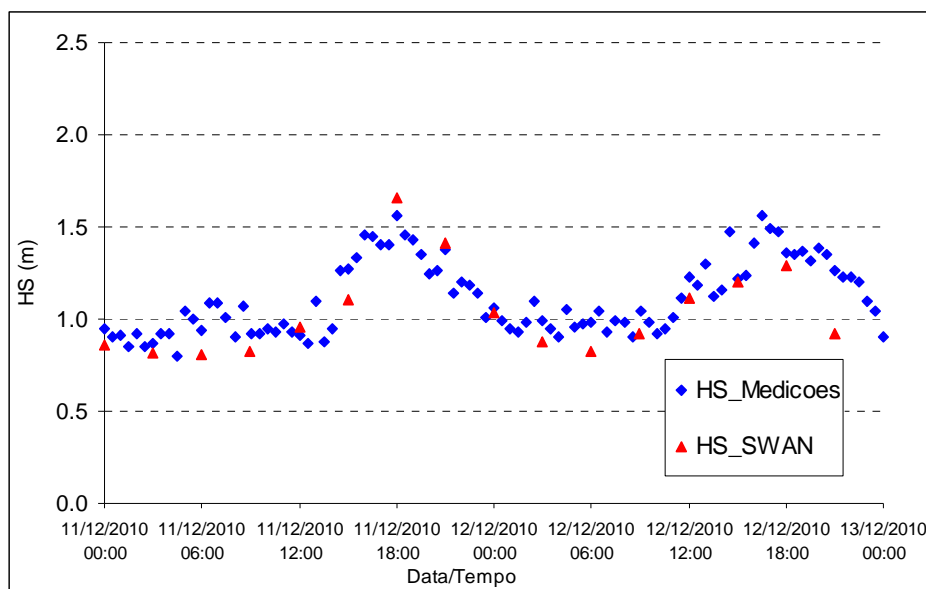


Figura 13 – Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN com as medições efectuadas no instrumento PT2.

Das figuras acima, pode constatar-se que

- O andamento geral da altura de onda significativa calculada pelo modelo numérico SWAN é muito semelhante à obtida na análise dos valores medidos, para o período em análise de 11 a 12 de Dezembro de 2010, nos pontos PT1 e PT2. Além disso, em geral, os valores numéricos e medidos apresentam uma melhor concordância para o ponto PT2, uma vez que se encontra em águas mais profundas do que para PT1 e mais ao largo;
- Em geral, para o PT1, os resultados numéricos são superiores aos medidos. No caso do PT2 os valores são da mesma ordem de grandeza.
- As diferenças encontradas podem ser explicadas pelos seguintes aspectos:
  - Os cálculos foram efectuados considerando valores de vento constantes em todo o domínio de cálculo e para cada intervalo de tempo de três horas;
  - Os valores de vento considerados dizem respeito a valores obtidos na estação Meteorológica de Macau situada em terra e não valores obtidos na zona marítima em estudo;
  - O valor de maré foi considerado constante nos dias 11 e 12 de Dezembro de 2010;
  - Não se consideraram correntes;
  - Não se efectuou qualquer estudo de sensibilidade quanto aos parâmetros do modelo relacionados com o atrito de fundo ou com a rebentação das ondas, por exemplo. Aqui neste trabalho consideraram-se os valores sugeridos no manual do SWAN.

Note-se que as simplificações admitidas resultam da falta de informação quanto aos ventos, correntes e marés características da zona em estudo.



## 5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, descreveram-se as medições da agitação marítima e a aplicação efectuada com o modelo SWAN na zona marítima entre os municípios de Macau e Guimarães, para diferentes condições de agitação incidente, com vista a caracterizar o padrão de ondas geradas pelo vento.

Para o período de 11 a 12 de Dezembro de 2010, para as condições de agitação marítima ao largo obtidas com o modelo de previsão WAVEWATCH III e ventos provenientes da Estação Meteorológica de Macau, efectuaram-se simulações com o modelo SWAN em modo estacionário com vista à caracterização das ondas na região em estudo e, mais concretamente, nos pontos onde se efectuaram medições com os instrumentos PT1 e PT2.

Da comparação entre dados medidos e simulações numéricas com o SWAN, pode-se concluir que o modelo SWAN é um modelo com capacidade de prever as condições de ondas em Macau a Guimarães. Com efeito o modelo conseguiu reproduzir o andamento geral das alturas significativas, períodos e direcções de onda ao longo do período de 11 a 12 de Dezembro de 2010, obtendo-se uma concordância razoável entre resultados numéricos e medidos, principalmente para o ponto PT2. No entanto, os resultados numéricos são em geral superiores aos observados, principalmente para o ponto PT1. Tal pode ser devido às simplificações que tiveram de ser admitidas nos cálculos efectuados, por falta de informação, nomeadamente no que diz respeito aos ventos (ventos constantes em todo o domínio computacional e baseados nos valores obtidos na Estação Meteorológica de Macau), marés (não houve variação da maré ao longo do período de simulação) e correntes (não se incluíram nos cálculos as correntes).

Assim, a caracterização dos campos de ventos e de correntes na zona e sua inclusão nas simulações numéricas, bem como a variação da maré ao longo do período de simulação, constitui trabalho futuro.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a fonte financiadora brasileira CAPES, pela concessão da bolsa através da Rede Amigos Boussinesq, às equipas de trabalhos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN e do Laboratório de Engenharia Civil de Portugal - LNEC.

Agradecem ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/AMB/67450/2006 e aos projectos cooperativos HIDROSEMA e MOLECO, da Rede de Monitoramento: REDE5-PETROMAR/CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq.

## BIBLIOGRAFIA

- ANP. 2010. Agência Nacional do Petróleo. Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural.
- 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. Geophysical Research*, 104 (C4), pp. 7649-7666.
- BOORI, M. S.; AMARO, V. E. 2010. Land use change detection for environmental management: using multi-temporal satellite data in the Apodi Valley of northeastern Brazil. *Applied GIS*, v. 6, p.1-15.

- CHAVES M. S. 2005. Dinâmica costeira da área Macau-Serra, Litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte. Tese de Doutorado. Geodinâmica e Geofísica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 97p.
- DHN. 2010. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Bases de dados da tábua de maré obtidas para os meses de Outubro a Dezembro de 2010.
- FORTES, C. J. E. M.; PINHEIRO, L.; PALHA, A.; 2007. O pacote SOPRO: Evoluções recentes. Comunicação a apresentar às 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária” (JPECP), Lisboa, Outubro.
- GRIGIO, A. M., AMARO, V. E., VITAL, H., DIODATO, M. A., 2005. A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote sensing - A case study from the Guamare city, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research, Florida, USA*, v. 42, p. 412-421.
- HASSELMANN et al. (1973) “Measurements of wind wave-growth and swell decay during the Joint \_North Sea Wave Project (JONSWAP)”, *Dtsch Hydrogr. Z. Suppl.* 12 (A8), 1-95.
- LIMA, Z. M. C.; ALVES, A. L.; AMARO, V. E.; VITAL, H. 2002. Coastline Evolution of the Galinhos Spit (NE Brazil) Using Air Photography And LANDSAT TM Images. *Revista Pesquisas em Geociências*, Ed. UFRGS, RS. 28 (2).
- LIMA, Z. M. C.; VITAL, H.; TABOSA, W. F., 2006. Morphodynamic variability of the Galinhos Spit, NE Brazil. *Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 598-601.
- NASCIMENTO, M. C. 2009. A erosão costeira e sua influência sobre a atividade petrolífera: alternativas sustentáveis na mitigação de impactos ambientais. Dissertação de Mestrado. Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 229p.
- PESSOA NETO, O. C. 2003. Estratigrafia de seqüências da Plataforma Mista Neogênica na Bacia Potiguar, Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(3): 263 – 278.
- SILVA, D. R. V.; AMARO, V. E., SOUTO, M. V. S.; NASCIMENTO, M. C.; PEREIRA, B. R. 2010. Geomorfologia de uma área com alta sensibilidade ambiental na Bacia Potiguar (NE Brasil). *Gerenciamento Costeiro Integrado*, v. 10, p.545-566.
- SILVEIRA, I. M., 2002. Monitoramento Geo-ambiental da Região Costeira do Município de Guararé-RN. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 115p.
- TABOSA, W. F. 2002. Monitoramento costeiro das prais dde São Bento do Norte e Caiçara do Norte – RN: Implicações para o Pólo Petrolífero de Guararé. Dissertação de Mestrado, Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 112p.
- TABOSA, W. F.; VITAL, H. 2004. Interpretações preliminares para dados hidrodinâmicos da plataforma interna adjacente a São Bento do Norte. *Congresso Brasileiro de Oceanografia*, Itajai-SC. p436.
- TOLMAN, H.L. (1999). *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 1.18*, NOAA / NWS / NCEP / OMB *Technical Note* 166, 110 pp.