

# Influência das correntes no comportamento do modelo SWAN na zona de Diogo Lopes, Brasil

A. Ramos<sup>(1)</sup>, C. Fortes<sup>(2)</sup>, A. Pires Silva<sup>(1)</sup> e A. Scudelari<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Superior Técnico, U. Lisboa. andre.ramos@ist.utl.pt, aps@civil.ist.utl.pt

(2) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC.

(3) Universidade Federal do Rio Grande do Norte C.P. 1596, CEP 59078-970, Natal, RN, Brasil.

**Resumo:** A zona de Diogo Lopes, situada no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, foi alvo de vários estudos interdisciplinares, que incluíram a caracterização da agitação marítima ao longo desta costa (Ângelo et al. 2012, Matos et al. 2013). Esta é dominada por um regime de alternância de brisa marítima e terrestre que colocou certas dificuldades. Para obviar a estas, recorre-se, novamente, ao modelo *SWAN* para a simulação do estado de mar, mas com um domínio de cálculo alargado, um campo de ventos, obtido na estação meteorológica de Macau, diferente e com a introdução da interacção das ondas e correntes. Estas são provenientes do modelo hidrodinâmico *SISBAHIA* desenvolvido na referida Universidade. O forçamento ao largo é obtido recorrendo ao modelo *Wavewatch III*. Para a verificação das simulações, utilizaram-se medições de sensores *AWAC* para o período de 11 a 12 de Dezembro de 2010, em dois pontos distintos da malha computacional.

**Palavras-chave:** SWAN, Ondas-Correntes, Diogo Lopes, SISBAHIA, Agitação Marítima, Rebentação Parcial.

## 1. INTRODUÇÃO

A região adjacente ao estuário de Diogo Lopes (Figura 1), que se situa no estado brasileiro do Rio Grande do Norte (RN) no nordeste do Brasil, é caracterizada por um clima tropical, que por sua vez se reflete no tipo de paisagem dominante.



Figura 1 - Localização de Diogo Lopes no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Adaptado Google Maps.

Na zona em estudo verifica-se a existência abundante, ao longo da linha de costa, de pequenos estuários de rios e lagoas que desaguam no oceano. Devido a este facto, estamos perante um ambiente marítimo muito sujeito às correntes que iniciam processos de alteração sedimentológica, consequência da presença destes estuários. Este trecho de costa é fortemente afetado pela ação das ondas e correntes provocadas pela variação do nível de maré, cuja interação tem um papel decisivo na dinâmica costeira. Por esta razão, têm sido realizados, ao longo dos últimos anos, variados estudos interdisciplinares que visam caracterizar de forma cada vez mais objectiva os processos dominados pela agitação marítima. É ainda de referir que a agitação marítima em Diogo Lopes é muito

influenciada pela alternância entre a brisa terrestre e brisa marinha, que se faz sentir ali com alguma intensidade. Esta circunstância induz uma modulação diurna no campo de ondas que colocou certas dificuldades para a modelação numérica. O modelo utilizado no presente trabalho para a simulação do estado de mar corresponde ao *SWAN*, que representa um acrónimo para *Simulating Waves Nearshore* (Booij et al., 1999). Este modelo visa fornecer os parâmetros característicos da agitação marítima através do espectro direcional estimado em locais de interesse junto ao litoral. Mais especificamente, este estudo, vem no seguimento dos trabalhos levados a cabo por Ângelo (2012) e Matos (2013), que aplicaram o modelo *SWAN* para diferentes condições de vento e agitação ao largo, tendo sido comparadas as simulações numéricas com medições efectuadas *in situ* em dois pontos distintos (PT1 e PT2) no período de 11 a 12 de Dezembro de 2010. Estas comparações revelaram-se bastante concordantes. No entanto, registaram-se algumas discrepâncias, principalmente no que refere aos valores calculados do período médio ( $T_{m0,2}$ ). Uma das razões apontadas para as discrepâncias verificadas no período médio foi o facto de não se ter considerado a existência de um campo de correntes nas simulações numéricas. De facto, numa zona de estuário a consideração de um campo de correntes é importante, como se poderá observar através das comparações dos valores calculados com as medições *in situ*. A introdução de correntes irá possibilitar a descrição do efeito de *Doppler*, e desta forma, é esperado que os valores calculados do período médio de onda se aproximem mais dos períodos reais. Com o objectivo de complementar os estudos já realizados por Ângelo (2012) e Matos

(2013), o presente trabalho consistiu na aplicação do modelo *SWAN* na zona adjacente a Diogo Lopes tendo em conta, para além das condições de agitação ao largo e condições do vento, a existência de um campo de correntes dentro do domínio de cálculo e um alargamento deste mesmo domínio. O modelo é aplicado para as condições de vento, marés, agitação ao largo e correntes nos dias 11 e 12 de Dezembro de 2010. Os resultados numéricos são comparados com medições *in situ* obtidas nesse mesmo período.

## 2. CASO DE ESTUDO – ESTUÁRIO DE DIOGO LOPES, BRASIL.

### 2.1 Dados disponíveis.

Como foi referido, o presente estudo focou-se no melhoramento da definição das condições de aplicação do modelo *SWAN* nesta região, tendo em conta as suas características climáticas, mas também os dados que estão disponíveis, mais precisamente, as medições da velocidade do vento na estação meteorológica de Macau corrigidas para a altura de 10m (U S Army Corps of Engineers, 2002), as medições de altura, período e direção de onda *in situ* efectuadas através de dois aparelhos AWAC, as condições de agitação ao largo e as correntes que se fazem sentir na zona adjacente ao estuário. A localização destes pontos encontra-se descrita na Figura 2. Foi ainda utilizado o campo de ventos constante para toda a malha computacional, medido na Estação Meteorológica de Macau (RN) com uma resolução temporal de uma hora no período já mencionado. Utilizaram-se os dados de agitação ao largo (altura significativa  $H_s$ , período de pico  $T_p$  e direção  $Dir$ ) provenientes do modelo *WAVEWATCH III* calculado no ponto de coordenadas cartesianas UTM (787166.43 m, 9668067.83 m). As condições de correntes foram obtidas através do modelo *SisBaHiA* (**Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**) (Rosman, 2000), que corresponde a um sistema de modelos computacionais registado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O modelo *SisBaHiA* tem sido implementado e melhorado desde 1987, com aplicações específicas em várias teses de mestrado e doutoramento, assim como em projetos de pesquisa. Este modelo é composto por vários módulos. O módulo mais relevante para o presente trabalho é o módulo Hidrodinâmico. Para mais informações referentes ao modelo *SisBaHiA*, ver Rosman (2000).

### 2.2 Condições de Aplicação do modelo *SWAN*.

A definição do domínio de cálculo do presente trabalho, teve como condicionantes os dados de batimetria disponíveis na zona de Diogo Lopes. Foi utilizada a mesma batimetria em que se basearam os

trabalhos realizados por Ângelo (2012) e Matos (2013). A fronteira de mar foi alargada não só com o intuito de minimizar alguns possíveis erros provenientes da consideração das condições de agitação ao largo em águas pouco profundas, em algumas partes da fronteira de mar da anterior grelha, mas também para aumentar a proximidade desta mesma fronteira ao ponto de cálculo do *WAVEWATCH III*.

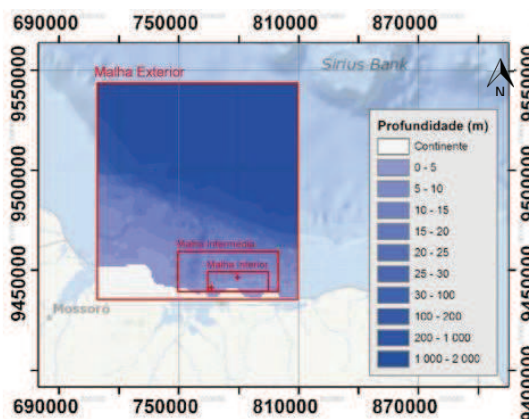


Figura 2 - Localização do domínio de cálculo, grelhas encaixadas e pontos de medição.

Tabela I - Propriedades das Grelhas de Cálculo.

Domínios	Origem (x, y) (m)	Dimensões (km)	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)
Malha Exterior	(709869, 9436260)	99.5x107.5	1000	1000
Malha Interm.	(750000, 9440000)	50x20	500	250
Malha Interior	(765000, 9440000)	30x10	100	50

Foi utilizada a versão *SWAN* 40.72. Para os fenómenos físicos, foi considerada difração, interação onda-onda tripla e quadrupla. O atrito de fundo foi introduzido segundo a expressão semi-empírica de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973). Considerou-se rebentação induzida pelo fundo e rebentação parcial por excesso de declividade (*whitcapping*), tendo sido utilizada a formulação de van der Westhuysen et al. (2007) para este último fenómeno. A discretização do espectro direcional foi feita em 23 intervalos de frequências entre 0.04 Hz e 1.0 Hz, com uma distribuição logarítmica. Esta discretização abrange 360°, e divide-se em 90 intervalos iguais. Ensaíram-se os dois modos de explorar o modelo – *estacionário* e *não estacionário* – experimentaram-se dois valores para o coeficiente de atrito do fundo e testou-se, principalmente, a introdução de correntes comparando com simulações onde estas não foram consideradas. Tendo em conta estes factores, as simulações numéricas destinaram-se a avaliar a importância das correntes e do coeficiente de atrito do fundo. Tendo em conta que no trabalho realizado por Ângelo (2012) se testaram vários coeficientes de atrito, escolheram-se dois desses valores já testados que traziam melhores resultados. Foi adoptado o coeficiente de atrito definido por defeito pelo *SWAN* para ondas de

vento (*wind sea*) de  $c=0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$  e testou-se ainda o valor de  $c=0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ . No total foram levadas a cabo 8 simulações numéricas. Testaram-se todos os pares coeficiente de atrito do fundo-condições de correntes possíveis (tendo em conta o que foi afirmado). Para a montagem dos ficheiros de *input* em modo estacionário recorreu-se ao SOPRO (Pinheiro et al., 2007).

### 3. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.

No que concerne à altura significativa, observa-se que a introdução do campo de correntes não afeta significativamente este parâmetro. Por outro lado, a variação do coeficiente de atrito do fundo tem uma elevada participação na boa aproximação da altura significativa, ou seja, quanto maior for o valor do coeficiente de atrito do fundo, menor será a altura de onda obtida. Pode-se verificar o acima escrito na Figura 3 para o PT1 e na Figura 5 para o ponto de medição PT2. Os melhores resultados foram obtidos em modo estacionário utilizando-se o coeficiente de atrito correspondente a ondas de vento ( $c=0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ ) tal como em Bouws e Komen (1983).

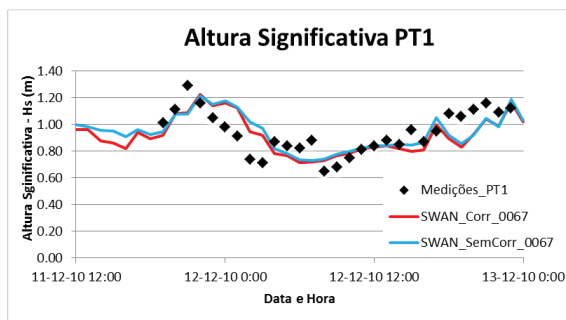


Figura 3 - Altura Significativa PT1. Modo Estacionário.  $c=0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . 11 a 12 de Dezembro de 2010.

Relativamente aos períodos médios de onda, verifica-se que se conseguem, em geral, pequenas melhorias quando o campo de correntes está presente. No entanto, a variação do coeficiente de atrito do fundo tem também uma importante influência nos valores calculados de  $Tm0,2$ . Quanto maior o valor de  $c$ , menor é o valor de  $Tm0,2$  calculado através do SWAN. Pode-se observar na Figura 4 e Figura 6 o que foi explicitado.

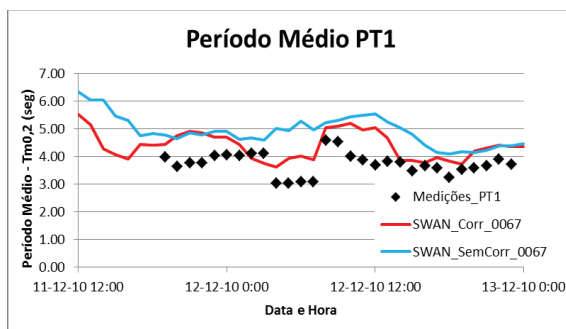


Figura 4- Período Médio. PT1. Modo Estacionário.  $c=0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . 11 a 12 de Dezembro de 2010.

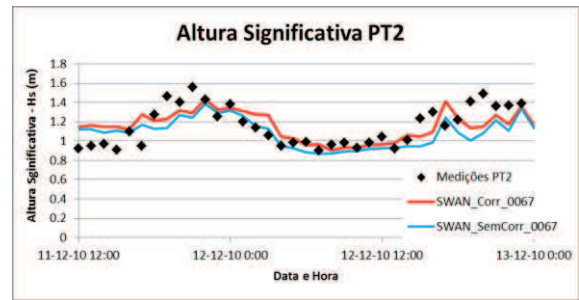


Figura 5 - Altura Significativa PT2. Modo Estacionário.  $c=0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . Com Correntes. 11 a 12 de Dezembro de 2010.

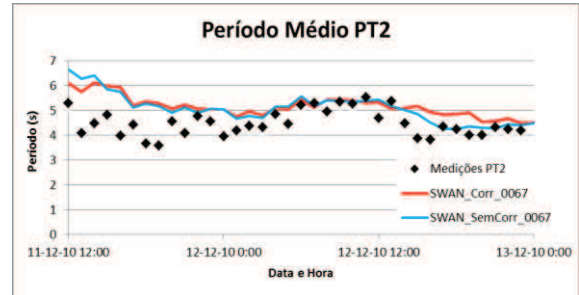


Figura 6 - Período Médio PT2. Modo Estacionário.  $c=0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ . 11 a 12 de Dezembro de 2010.

Em primeiro lugar, relembando a forte influência da alternância entre brisa de terra e de mar que se faz sentir na zona de Diogo Lopes, verifica-se que se consegue descrever este fenómeno, ao nível da altura significativa, com alguma precisão, apesar da escassez espacial de dados da velocidade de vento e agitação ao largo. Pode-se então concluir que os resultados acima apresentados são satisfatórios tendo em conta as condições de aplicação experimentadas.

Como já se referiu anteriormente, a introdução de correntes no modelo, vai descrever fenómenos como o efeito de *Doppler*, e desta forma, contribuir para uma melhor aproximação à realidade dos valores calculados do período médio. Como se pode verificar através da análise gráfica, conseguem-se resultados bastante aceitáveis no campo dos períodos médios, o que conduz à conclusão que, de facto, é bastante útil a consideração de correntes nas simulações numéricas no caso da zona de Diogo Lopes.

Para uma análise mais objectiva dos resultados apresentados graficamente, apresentam-se na Tabela II os parâmetros estatísticos calculados referentes aos gráficos apresentados. Mais especificamente o valor médio do erro quadrático (*RMSE*), parâmetro de viés (*SI*) e o erro médio (*ME*) referentes a cada parâmetro calculado pelo SWAN. Os valores apresentados, especialmente o *SI*, estão em linha com outros estudos que usaram o SWAN, como Teles et al. (2012).



Tabela II - Indicadores estatísticos. Modo Estacionário.  $c=0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . Com Correntes. 11 a 12 de Dezembro de 2010.

	Com Correntes			Sem Correntes		
	RMSE			RMSE		
PT1	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)
	0.127	0.732	23.097	0.130	1.164	25.209
	SI			SI		
	Hs	Tm0,2	Dir	Hs	Tm0,2	Dir
	0.134	0.196	---	0.138	0.311	---
	ME			ME		
Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	
-0.021	0.616	-21.439	-0.002	1.046	-24.163	
PT2	RMSE			RMSE		
	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)
	0.204	0.961	67.044	0.228	0.965	66.509
	SI			SI		
	Hs	Tm0,2	Dir	Hs	Tm0,2	Dir
	0.177	0.211	---	0.199	0.212	---
ME			ME			
Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	Hs(m)	Tm0,2(s)	Dir(°)	
-0.226	-0.584	-15.468	-0.280	-0.645	-14.596	

#### 4. CONCLUSÕES

Analisando os valores calculados para a altura significativa, verifica-se que o impacto da alteração das condições de correntes não trouxe alterações de maior. No entanto, no campo dos períodos médios calculados, a introdução de condições de correntes provocou melhorias em relação aos trabalhos realizados anteriormente na área geográfica estudada, que eram em geral subestimados. Mais especificamente, analisando os parâmetros estatísticos calculados, obtêm-se ligeiras melhorias nas simulações em que é considerado um campo de correntes. No entanto, deve-se prestar uma especial atenção ao facto de se estar a proceder à análise de resultados em dois pontos distintos, em zonas diferentes do domínio computacional. As simulações numéricas obtidas para as condições de atrito no fundo de  $c = 0.067 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ , com a consideração de correntes foram mais satisfatórios para o ponto PT2 do que para o ponto PT1.

#### Agradecimentos

Agradece-se ao Laboratório de Geoprocessamento, do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela cedência de dados de batimetria, ondas e marés na zona em estudo bem como ao Programa de Engenharia

Oceânica da COPPE/UFRJ pela utilização do modelo SISBAHIA.

#### REFERÊNCIAS

- Ângelo, J. C. F. (2012). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente ao estuário de Diogo Lopes, Brasil*. Instituto Superior Técnico.
- Booij, N., Ris, R., & Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. I-Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), 7649–7666.
- Bouws, E., Komen, G. J. (1983). On the balance between growth and dissipation in a extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea, *Journal of Physical Oceanography*, 13 (9), 1653-1658.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kurseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) (Vol. 8). *Deutsches Hydrographisches Institut*.
- Matos, M. de F. A. (2013). *Modelagem do clima de ondas e seus efeitos sobre as feições morfológicas costeiras no Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- 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. *Rev. da Tecnologia da Água*.
- Rosman, P. C. C. (2000). *Referência Técnica do SisBaHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL*. Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil.
- Teles, M. J., Pires-Silva, A. A., Belo-Pereira, M. (2012). Simulations of wave conditions on open beach configuration: wind resolution seaward forcing and whitecapping effects, *European J. Environmental and Civil Engineering*, 16(8), 927-942.
- U S Army Corps Of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual*.
- van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., & Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54(2), 151–170.