

CHEGADA DISPERSIVA DE CAMPOS DE ONDAS SWELL NA COSTA OESTE DO ESTADO CEARÁ – BRASIL

Dispersive arrival of swell waves at the western coast of Ceará State, Brazil

Eduardo Guilherme Gentil de Farias¹, João Marcos Azevedo Correia de Souza²

RESUMO

A forma crescente com que o homem vem ocupando a zona costeira, está criando demanda para estudos de climatologia de ondas de gravidade incidentes em regiões litorâneas. Partindo dessa premissa, o presente trabalho utilizou dados oriundos de um ondógrafo instalado na região adjacente ao terminal portuário do Pecém – CE, visando identificar padrões de incidência de ondas, a partir de uma análise de curto período e posterior validação utilizando dados de escaterometria. A partir dos dados analisados, pôde ser observado que no dia 20 de Março de 2005, os maiores períodos de ondas incidentes ocorreram às 03:15h, com valores de 16.66 segundos. Daí em diante, foi observado um decréscimo contínuo dos períodos de ondas ao longo do dia, culminando em valores mínimos de período às 18:15h, sendo estes da ordem de 13,33 segundos. Este comportamento caracteriza um evento típico de chegada dispersiva. Foi possível identificar que os campos de ondas swell incidentes na região analisada, tiveram sua origem num ponto 2.808 km distante da estação de coleta, percorrendo esta distância em 2,5 dias com uma velocidade de grupo de 13 m.s⁻¹. Dados de sensoriamento remoto ratificaram os resultados do ondógrafo.

Palavras-chaves: onda swell, eventos extremos, zona costeira.

ABSTRACT

The intensive and disordered way as coastal regions are occupied have required demand for studies of gravity waves incidents in coastal regions. From this premise, this study used data from a wave measurer installed in the adjacent region to the Pecém harbor, in order to identify the incidence patterns of waves on the coast, from an analysis in short period and validated using scatterometry data. From the data analyzed, it can be noted that on March 20, 2005, the major periods of the incident waves occurred at 03:15h, with a 16.66-sec. interval. Thereafter, there was a continuous decrease of the wave periods throughout the day, culminating in the minimum period at 18:15h, with a 13.33-sec interval. This behavior characterizes a typical event of dispersive swell arrival. The epicenter of the swell fields was located at a site 2,808 km from the sampled area. This distance was covered in 2.5 days with a group velocity of 13 m.s⁻¹. Remote sensing data validated the results of the wave measurer.

Keywords: swell waves, extreme events, coastal zone.

¹ Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (São José dos Campos - Brasil), email: gentil@dsr.inpe.br

² Laboratório de Oceanografia Espacial, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – IFREMER (Plouzané – França), email: joao.marcos.azevedo.correia@ifremer.fr

INTRODUÇÃO

A forma crescente com que o homem vem ocupando a zona costeira e os respectivos investimentos envolvidos no seu processo de fixação nessas regiões, envolvendo obras costeiras como novos portos, plataformas e instalações ligadas à produção de petróleo e urbanização das áreas de praias, está criando demanda para estudos de climatologia de ondas de gravidade incidentes em regiões litorâneas (Farias, 2008).

A porção dominante no espectro de ondas em termos de energia esta normalmente associada a ondas gravitacionais com período variando entre 1 e 30 segundos (Kinsman, 1965). De acordo com Munk (1963), existem duas principais classes ondas gravitacionais no oceano, sendo estas denominadas como vagas (*windsea*) e marulhos (*swell*).

As ondas que se encontram em equilíbrio com o vento local, são normalmente associadas a geração de campos de ondas *windsea*, enquanto campos de *swell* estão comumente associados a eventos meteorológicos extremos. Devido suas características físicas, as ondas *swell* podem se propagar em escalas de bacia oceânica (Collard et al., 2009).

Segundo Alfredini (2005), os efeitos das ondas de gravidade são de fundamental importância para projetos de engenharia costeira, como portos, vias navegáveis, obras de defesa litorânea, etc; bem como na engenharia naval. Em decorrência disso, um conhecimento adequado dos processos físicos fundamentais envolvidos na geração e propagação das ondas gravitacionais é fundamental no planejamento e execução de obras marítimas. Esta exigência básica, uma vez atingida permite o uso e gestão adequados de ambientes litorâneos, tanto em condições naturais como sob a influência humana.

Este fenômeno, pela complexidade das interações entre os diversos fatores naturais e antrópicos, tem tido nas últimas décadas um maior relevo nas planificações das atividades de desenvolvimento e principalmente de ordenação da zona costeira, já que a própria obra pode ser afetada por intensificação de processos de erosão consequentes da ação do clima de ondas local (Maia, 1998).

Em estudos de monitoramento de ondas de superfície, a existência de ondógrafos *in situ*, converte a análise multitemporal em uma excelente ferramenta para auxiliar estudos de oceanografia, ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico, possibilitando o entendimento da dinâmica de uma dada região.

Partindo dessa premissa, o presente trabalho utilizou dados oriundos de um ondógrafo do tipo

waverider instalado na região adjacente ao terminal portuário do Pecém/CE, visando identificar padrões de incidência de ondas na costa, a partir de uma análise multitemporal de curto período e validação a posteriori a partir de dados de escaterometria. Pretende-se dessa forma, contribuir com a geração de conhecimentos e informações necessárias dos campos de ondas *swell* incidentes no litoral do Ceará, auxiliando a produção de metodologias que possam ser aplicadas no planejamento e gestão, o que é fundamental para futuros diagnósticos que visem o aproveitamento sustentável de regiões costeiras.

MATERIAL E MÉTODOS

Chegada dispersiva de campos de ondas *swell*

Ondas do tipo *swell* são normalmente geradas por tempestades, podendo propagar-se por milhares de quilômetros através do oceano devido seu extenso comprimento e baixo coeficiente de dispersão (Drennan et al., 2003). A relação de dispersão em ondas de longo período dá origem a um fenômeno notável chamado chegada dispersiva, onde campos de ondas gerados por um mesmo evento atingem a costa em instantes distintos, em decorrência dos seus diferentes comprimentos. Segundo Melo *et al.* (1995), este intervalo que precede a chegada dos trens de ondas com período curto, pode variar por muitas horas ou até mesmo dias, podendo ser usado para localizar a fonte geradora dos campos de *swell*, bem como sua velocidade de propagação e distância percorrida até incidir na costa (Munk *et al.*, 1963).

De acordo com Dean & Dalrymple (1984), é possível estabelecer a relação de dispersão de ondas em águas profundas, relacionando período (T) e comprimento de onda (L), a partir da Equação 1:

$$\sigma^2 = g \cdot k \quad (1)$$

onde, $\sigma = 2\pi/T$ e $k = 2\pi/L$ são a frequência da onda em radianos e o número de onda respectivamente. A derivação da velocidade de fase C e da velocidade de grupo C_g dá origem às Equações 2 e 3:

$$C = \frac{\sigma}{k} = \left(\frac{g}{k}\right)^{0.5} \quad (2)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \quad (3)$$

Considerando que a energia da onda viaja através da velocidade de grupo, o tempo de chegada de campos de ondas *swell*, considerando que o mesmo

encontra-se a uma distância D de sua fonte de geração num tempo t_1 pode ser dada pela Equação 4.

$$C_g(f) = \frac{D}{(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

onde f é a frequência do campo de ondas.

A Equação 4 pode ser reajustada a partir da Equação 1, obtendo-se:

$$\frac{df}{dt} = \frac{g}{(4\pi D)} \quad (5)$$

Assim, podemos isolar D da forma que se segue na Equação 6

$$D = \frac{g}{(4\pi)} \times \frac{(t_1 t_2)}{(t_1 - t_2)} \quad (6)$$

Todos os cálculos realizados no presente trabalho foram desenvolvidos em ambiente de programação SciLab. Para maiores detalhes, acessar <http://www.scilab.org/>.

Dados de vento

Os dados de intensidade e direção do vento utilizados no presente trabalho são oriundos do escaterômetro SeaWinds instalado no satélite QuikScat. Este produto de sensoriamento remoto provê dados de vento sobre a superfície do mar para uma altura de 10 m (Bentamy *et al.*, 2002). O conjunto de dados utilizado neste trabalho corresponde ao produto L2b que pode ser adquirido através do site do Jet Propulsion Laboratory - NASA. Maiores detalhes em http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_PRODUCT/OVW/qscat_browse.html.

A precisão dessa base de dados vem sendo exaustivamente avaliada através de comparações com dados de ventos medidos *in situ* e modelos matemáticos (Bourassa *et al.*, 2003; Ebuchi *et al.*, 2002; Bentamy *et al.*, 2008). Em todos os casos, a literatura aponta um coeficiente de correlação do vento de ordem superior a 0,90, ratificando a qualidade dos dados coletados a partir de estações orbitais, com produtos de modelagem e bóias.

Em nosso estudo, a adoção de dados eólicos sobre a superfície do mar pode nos auxiliar na identificação de eventos extremos (tempestades, furacões etc) que podem contribuir na geração de campos de ondas *swell*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o nosso estudo de caso, foram utilizados os dados obtidos a partir de um ondógrafo do tipo

waverider, instalado no terminal portuário do Pecém, litoral oeste do estado do Ceará, na região NE do Brasil. As medições utilizadas em nosso estudo de caso foram realizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias - INPH, ao longo do mês de Março de 2005, em intervalos de 3 horas. O ondógrafo foi fundeado a uma profundidade de aproximadamente 18 m, sob as coordenadas 03°29'31''S - 38°59'03''W. Foi observado que no dia 20 de março, os maiores períodos de ondas incidentes ocorreram às 03:15h, com valores de 16.66 segundos. Da segunda medida em diante, foi observado um decréscimo contínuo dos períodos de ondas incidentes ao longo do dia, culminando em valores mínimos de período às 18:15h da mesma data, sendo estes da ordem de 13.33 seg., exatamente 15 horas após a primeira medição. Este comportamento caracteriza um evento típico de chegada dispersiva, conforme pode ser evidenciado na Figura 1.

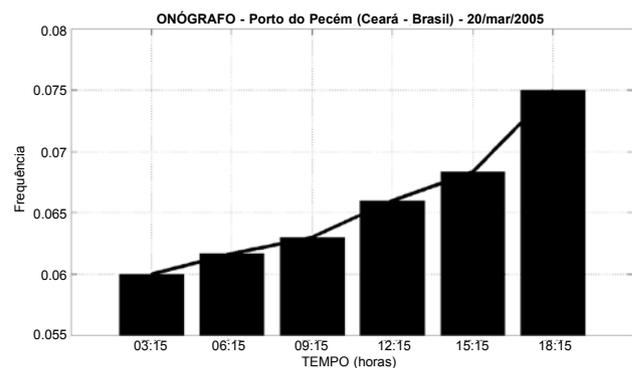


Figura 1 - Chegada dispersiva de trens de ondas *swell* no litoral oeste do Estado do Ceará - Brasil, no dia 20 de março de 2005.

A partir das equações, foi então possível identificar que os campos de ondas *swell* incidentes na região costeira do estado do Ceará tiveram sua origem num ponto distante aproximadamente 2.808 km da estação de amostragem, tendo percorrido esta distância em 2.5 dias com uma velocidade de grupo de 13 m.s⁻¹. Considerando que os dados coletados *in situ*, são referentes ao dia 20 de março de 2005 e, que os campos de ondas *swell* teriam sido gerados 2.5 dias antes de incidir na costa, verificamos a partir de dados do escaterômetro QuikSCAT, o regime de ventos para o dia 17 de março de 2005 (Figura 2).

A Figura 2 representa os dados de média diária de vento, sendo possível identificar a presença de uma tempestade no Oceano Atlântico entre as latitudes 25°N e 50°N, com intensidades máximas de 19 m.s⁻¹. Desse modo, a tempestade do dia 17 de março no Atlântico de médias latitudes, foi possível-

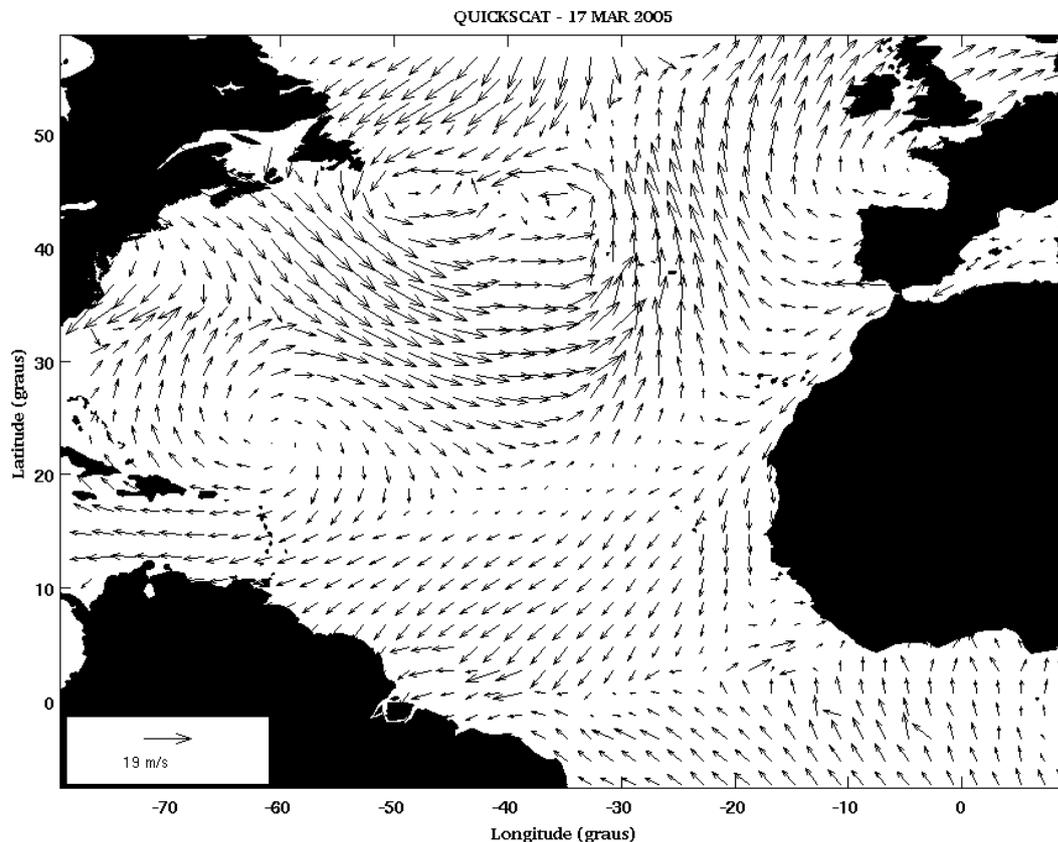


Figura 2 - Clima de ventos no oceano Atlântico para o dia 17 de março de 2005.

mente responsável pelo trem de ondas *swell* incidentes no terminal portuário do Pecém.

Melo *et al.* (1995) analisaram a evolução temporal do espectro de onda no Oceano Atlântico, identificando regiões por volta de 40°N como responsáveis pela geração de campos de ondas *swell* que apresentam chegada dispersiva na costa norte do Brasil. Nos dados analisados, os autores enfatizam que os eventos mais energéticos foram associados com tempestades nas proximidades das Ilhas dos Açores. , mostraram fortes campos de ondas associados à climatologia das tempestades de inverno local no hemisfério norte. Ventos fortes associados com os sistemas de baixa pressão que passam pelas faixas de média latitude podem gerar ondas *swell* (Vandermark *et al.*, 2006). Normalmente, o resultado é uma propagação para o sul de sistemas de ondas oriundas de tempestades ocorridas durante o inverno no hemisfério norte (Hanley *et al.*, 2010), cujos ventos fortes, são comumente intensificados por tempestades intensas nos meses de janeiro, fevereiro e março. Portanto, espera-se que campos de *swell* sejam essencialmente provenientes dessas regiões durante o primeiro trimestre (Donelan *et al.*, 1997).

Segundo Young (1999), áreas de geração intensa de ondas *swell* podem ser observadas no noroeste do Atlântico durante os intervalos janeiro-março e outubro-dezembro. No entanto, é possível observar uma forte geração de ondas *wind-sea* entre as latitudes 10°N e 20°N para quase todos os trimestres. Ao contrário dos campos de *swell*, estas ondas, são denominadas como *wind-sea* e estão diretamente relacionada com o vento local. Pianca *et al.* (2010) mostraram que o clima de ondas na região equatorial do Brasil tem o seu sistema atmosférico determinado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), dando origem a ventos alísios de nordeste e sudeste. Durante o ano, a ZCIT faz sua migração do sul para o equador, exercendo um controle significativo dos regimes de vento, com sua variação ser atribuída à migração sazonal da ZCIT e por conseguinte a geração de ondas *wind-sea*.

Em contraste com as ondas do tipo *wind-sea*, os trens de ondas *swell* são normalmente gerados por tempestades e podem se propagar por milhares de quilômetros através do oceano (Drennan *et al.*, 2003). Os resultados das campanhas de campo do projeto denominado Coupled Boundary Layers and Air-Sea

Transfer - CBLAST (Edson *et al.*, 2007) demonstraram que em condições de vento fraco, as ondas estão geralmente em um estado de não-equilíbrio, uma vez que a velocidade de fase do campo de ondas é superior ao do vento local, indicando que campos de *swell* remotamente gerados estão presentes.

CONCLUSÕES

1. As condições que propiciaram a incidência de ondas *swell* na região adjacente ao terminal portuário do Pecém foram geradas por tempestades na região de médias latitudes do Atlântico Norte, tendo-se propagado por uma enorme e intensa pista de ventos com intensidade máxima de 19 m.s⁻¹.
2. O litoral do Nordeste brasileiro localiza-se em latitudes expostas a um regime de ondas geradas por *swell* formados por eventos meteorológicos distantes, tais como ciclones extratropicais em ambos hemisférios e ondas atmosféricas africanas de leste.
3. Os resultados obtidos corroboram com a literatura existente, evidenciando o papel preponderante das tempestades de médias latitudes na geração de campos de ondas *swell* ao longo da bacia do Atlântico.
4. Espera-se que o presente trabalho possa contribuir para o melhor entendimento do clima de ondas incidente na zona costeira do Ceará. Estudos desta natureza podem contribuir para o reconhecimento dos condicionantes dinâmicos naturais de regiões litorâneas, auxiliando estudos detalhados e planos de monitoramento.

Agradecimentos - Os autores agradecem aos senhores Domenico Accetta e Luiz Casaroli do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias - INPH, por disponibilizarem os dados referentes ao ondógrafo *waverider* utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfredini, P. *Obras e gestão de portos e costas*. Edgard Bluncken, 1ª edição, 687 p., São Paulo, 2005.

Bentamy, A.; Katsaros, K.B.; Alberto, M.; Drennan, W.M. & Forde, E.B. Daily surface wind fields produced by merged satellite data. *Geoph. Monogr. Ser.*, v.127, p.343-349, 2002.

Bentamy A.; Croize-Fillon, D. & Perigaud, C. Characterization of ASCAT measurements based on

buoy and QuikSCAT wind vector observations. *Ocean Sci.*, v.4, p.265-274, 2008.

Bourassa, M.A.; Legler, D.M.; O'Brien, J.J. & Smith, S.R. SeaWinds validation with research vessels. *J. Geoph.. Res.*, v. 108, p.3019-3028, 2003.

Collard, F.; Ardhuin, F. & Chapron, B. Routine monitoring and analysis of ocean swell fields using a spaceborne SAR. *J. Geoph.. Res.*, v. 30, p.1 -13, 2009.

Dean, R.G. & Dalrymple, R.A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Prentice Hall, 353 p., Upper Saddle River, 1984.

Donelan, M.A.; Drennan, W.M. & Katsaros, K.B. The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell. *J. Phys. Oceanogr.*, v.27, n.0, p.2087-2099, 1997.

Drennan, W.M.; Graber H.C.; Hauser D. & Quentin C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. *J. Geoph.. Res.*, v.108, 2003.

Ebuchi, N.,H.C.; Graber & Caruso, M.J.. Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v.19, p.2049-2069, 2002.

Edson, J. *et alii*. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, v.88, p.341-356. 2007.

Farias, E.G.G.. *Aplicação de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Universidade Federal do Ceará, 125 p., Fortaleza, 2008.

Hanley, E.K.; Belcher E.S. & Sullivan, P.P. A global climatology of wind-wave interaction. *J. Phys. Oceanogr.* v.40, p.1263-1282, 2010.

Maia, L.P. *Processos costeros y balance sedimentário a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral*. Tese de Doutorado, Departement d'Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona, 269 p., Barcelona, 1998.

Melo, E.; Alves, J.H.G.M.; Jorden, V. & Zago, F. Instrumental confirmation of the arrival of north atlantic swell to the ceara coast, p. 1984-1996, in *Proceedings of the 4th international conference on coastal and port engineering in developing countries (COPEDEC IV)*, Rio de Janeiro, 1995.

Munk, W.H.; Miller, G.R.; Snodgrass, F.E. & Barber, N.F. Directional recording of swell from distant storms. *Phil. Trans. Royal Soc.*, London, v.255, p.505-584, 1963.

Kinsman, B. *Wind Waves*. Prentice-Hall, 676 p., Upper Saddle River, 1965.

Pianca C.; Mazzini, P.L. & Siegle, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Braz. J. Oceanogr.*, v.58, p.53-70, 2010.

Vandemark, D.; Chapron, B.; Feng, H.; Tran, N. & Be-

ckley, B. Use of fuzzy logic clustering analysis to address wave impacts on sea level measurements: Part 2 – Results, in *Anais do ESA Symposim on 15 years of Progress in Radar Altimetry*, Venice, 2006.

Young, I.R. Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *Inter. J. Climatol.*, v.19, p.931-950, 1999.