

O MODELO SWAN COMO FERRAMENTA ÚTIL NA PREVISÃO DE ONDA EM RECINTO FECHADO – ESTUDO DE CASO NO LAGO DA BARRAGEM DE ILHA SOLTEIRA - S.P

A.S. Vieira¹, G. F. Maciel¹, J.C. Fortes²

Palavras-chaves: sistemas de previsão de ondas, Swan, sensor de pressão.

Resumo

O reservatório do lago da barragem de Ilha Solteira, que tem uma extensão de 100 km, está localizado no noroeste do estado de São Paulo, Brasil. Devido à sua grande dimensão, ondas geradas por ventos podem causar problemas à segurança de navegação, para a estabilidade das margens do rio, para as infra-estruturas de todo o reservatório, ou mesmo para a segurança pública. Em 2010/2011, uma campanha de dados de campo foi realizada a fim de medir o campo de ventos, de ondas e altura significativa. A batimetria de fundo do lago e a velocidade do vento foram usados no Swan (Simulating Waves Nearshore) para prever a altura significativa das ondas. A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que a previsão do modelo numérico apresenta semelhanças com os valores experimentais.

SWAN MODEL AS AN USEFUL TOOL IN PREDICTING WAVES IN ENCLOSURES WATERS - CASE STUDY IN THE ILHA SOLTEIRA DAM RESERVOIR – SP

A.S. Vieira¹ & G. F. Maciel¹ & J.C. Fortes²

Keywords – System wave forecasts, Swan, pressure sensor

Abstract

The Ilha Solteira dam reservoir, which has an extension of 100 km, is located in the northwest of São Paulo state, Brazil. Due to its huge dimension, wind generated waves can cause problems to the navigation security, to the stability of the river banks, to the infrastructures around the reservoir or even to public safety. In 2010/2011, a field data campaign was undertaken in order to measure the wave height and wind velocity. The bottom profile and wind velocity were used on the SWAN (Simulating Waves Nearshore) to predict the wave height. From the obtained results it can be said that the prediction from the numerical model presents similarities with the experimental ones.

1. Introdução

O Reservatório da barragem de Ilha Solteira, que tem uma extensão de 100 km, está localizado no noroeste do estado de São Paulo, Brasil, (Figura 1). Como a maioria dos reservatórios do Estado de São Paulo, é um aproveitamento de usos múltiplos e faz parte de importante rota de

1 UNESP- Univ Estadual Paulista, Av. Brasil Centro, 54, 15385-000- Ilha Solteira, Brasil. adriana.ilha@gmail.com; maciel@dec.feis.unesp.br

² LNEC – National Laboratory for Civil Engineering, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisbon, Portugal. jfortes@lnec.pt

navegação comercial, no caso a Hidrovia Tietê-Paraná.

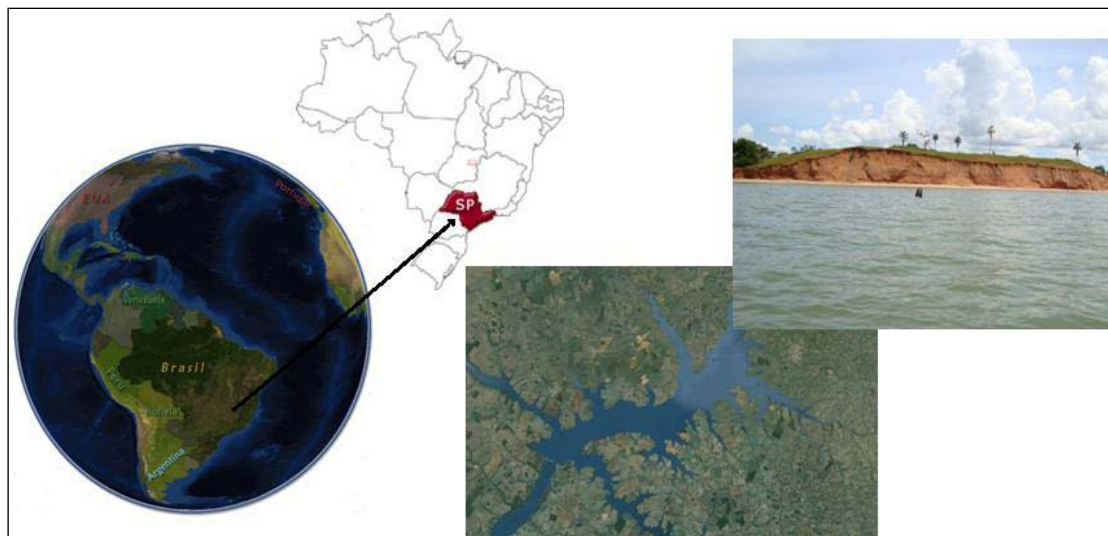


Figura 1. Posição geográfica do lago da barragem de Ilha Solteira.

Devido à grande dimensão do reservatório da barragem de Ilha Solteira, ondas geradas pelo vento pode causar problemas à segurança de navegação, à estabilidade das margens do rio, às infraestruturas de todo o reservatório, ou mesmo para a segurança pública. Neste contexto, o projeto ONDISA (Ondas no lago de Ilha Solteira), UNESP (1997, 2008), ainda em curso, tem como objetivo melhorar a compreensão da hidrodinâmica e morfodinâmica dentro do lago da barragem de Ilha Solteira. Por isso, um aspecto importante é a avaliação dos efeitos de ondas geradas pelo vento sobre as margens de lagos e / ou sobre a segurança de navegação. Assim, aquisição, processamento e modelagem numérica de ondas geradas por vento vêm sendo utilizadas para caracterizar o clima de ondas local.

Uma ampla campanha de dados de campo vem sendo realizada desde janeiro de 2010. Vários instrumentos foram utilizados em diferentes locais no reservatório de Ilha Solteira e em suas margens para medir ondas, correntes e ventos. Apesar de ser muito útil para descrever as características de ondas e correntes locais, essas medidas são de curta duração para caracterizar o clima de ondas de longo prazo. Além disso, a representação espacial das condições de onda fornecidos por estas medições é muito restrito, para além do custo elevado do equipamento de instalação, manutenção e monitorização.

A utilização de modelos numéricos para a geração de ondas de vento, a propagação e atenuação pode ser uma alternativa, uma vez que pode caracterizar espacialmente toda a região de estudo e pode ser utilizado para estudos de longo prazo. Particularmente, o uso de espectro não-linear do modelo Swan (Simulating Waves Nearshore, Booij et al., 1999), um modelo numérico que leva em conta a geração de ondas, propagação, fenômenos de atenuação e interações não lineares entre ondas e correntes, é uma boa escolha. De qualquer modo, a aplicação de Swan envolve o estabelecimento de um conjunto de parâmetros que devem ser calibrados para cada caso. Por isso, é interessante aplicar o modelo para situações em que existem dados de modo a se poder avaliar o seu desempenho.

O presente trabalho lida com a aplicação do modelo Swan para o reservatório da barragem de Ilha Solteira, a fim de simular a geração de ondas por vento e sua propagação no lago da barragem. Além disso, apresenta uma análise comparativa do modelo numérico Swan com dados medidos por um dos equipamentos (sensor de pressão) instalado no reservatório de Ilha Solteira, a fim de avaliar o desempenho do modelo e para calibrar alguns de seus parâmetros para esta região. A análise

apresentada neste artigo foi feita para os dados medidos no mês de março de 2011.

Este artigo começa com uma breve descrição da aquisição de dados (seção 2). Em seguida, a descrição (seção 3) do modelo numérico utilizado e sua aplicação para a área de estudo é apresentada. Uma discussão sobre os resultados obtidos com ambos os modelos são apresentados na seção 4. Por fim, as conclusões são tiradas na seção 5.

2. A coleta de dados

2.1 Descrição geral e metodologia

Um extenso plano de monitoramento na região está sendo realizado bem como a definição de um sistema de alerta no âmbito do projeto de pesquisa FINEP - ONDISA5. O objetivo é desenvolver modelos preditivos para a geração de ondas de vento para ser incluído em um sistema de alerta para a navegação. Várias campanhas de medição de vento e onda foram realizadas.

Vários equipamentos (sensores de pressão, anemômetros e outros) foram instalados no reservatório de Ilha Solteira para medir continuamente vento e as características de onda (Dall'Aglio Sobrinho *et al.*, 2011).

Parte desses instrumentos foi instalado em uma árvore dentro do lago, localizado na latitude 20020'49 .07" e longitude 51018'17 .63", Figura 2, para medir o vento e as características de onda. Em detalhe, o equipamento implantado no interior do lago e perto da árvore consiste em (Figura 2 e Figura 3-A): (1) um ADCP-Waves, que foi implantado a 8 m de profundidade, a 20 m de distância da base da árvore e conectados via cabo ao rádio localizado na caixa de instrumentação, (2) um transdutor de pressão (Druck), a qual foi implantado a 1 m de profundidade e ligado ao conjunto de dataloggers / rádio localizado na caixa de instrumentação, (3 e 4). Anemômetros convencionais do tipo concha, que estão localizados em 0,3 e 0,6 m no topo da estrutura ligada à árvore, (5) um Anemômetro Ultrasônico 2D foi localizado a 1,2m de altura, (6) da caixa de instrumentação, que contém dados de rádio, dataloggers baterias, etc; (7) Antenas para transmissão de dados; (8) um sistema de painel solar de energia, 80w, (9) uma câmera de vídeo com baixo consumo de energia e alta resolução, para visualização de onda em tempo real.

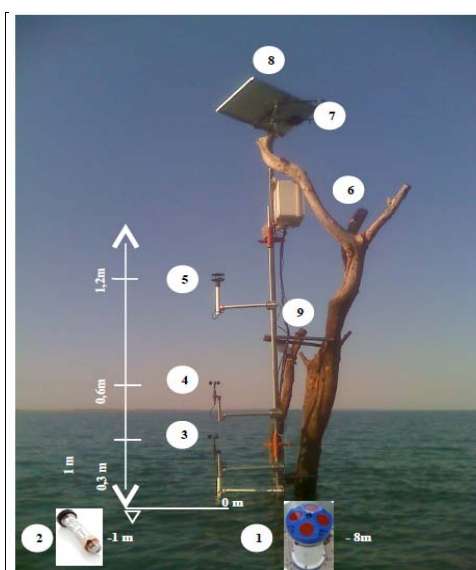


Figura 2. Instrumentação e telemetria.

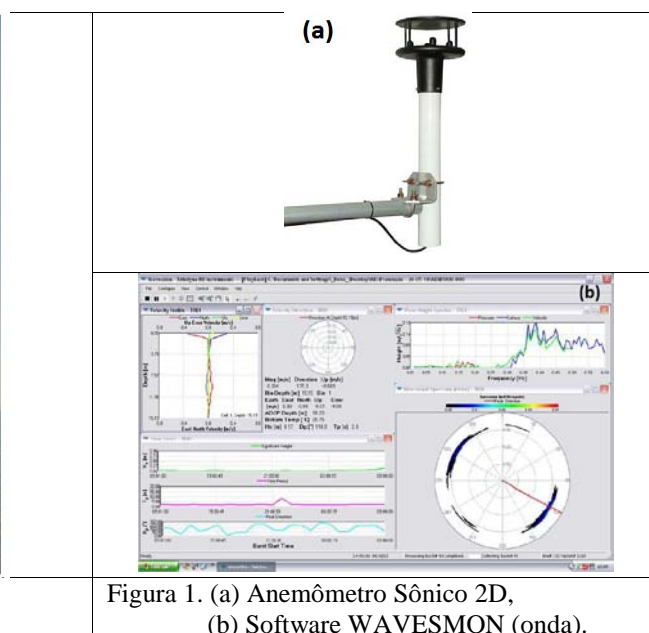


Figura 1. (a) Anemômetro Sônico 2D, (b) Software WAVESMON (onda).

2.2 Vento e medições de ondas

Conforme citado, a velocidade do vento é medida por vários anemômetros de tipo concha posicionado em 0,3 e 0,6 m, bem como com um anemômetro sônico 2D posicionado a 1,2 m acima

do nível da água, que também pode medir a direção do vento. O objetivo é traçar o perfil dos dados de vento neste local. Para o presente trabalho apenas os dados do anemômetro sônico 2D é considerado. Esses dados foram registrados em um CR1000 data-logger de Campbell Scientific.

Em relação às medições de ondas, os dados (altura significativa das ondas e períodos) são determinados a partir dos dados medidos com um sensor de pressão PDCR 1830 Druck.

É importante notar que o elemento principal do sistema de coleta é a frequência de aquisição de dados e sua transmissão por ondas de rádio. Uma vez que a altura das ondas e período não eram conhecidos, foi decidido usar uma amostragem quase contínua, considerando a maior frequência possível. O registrador de dados tem um programa interno, que verifica a memória disponível e o tempo de transmissão necessário, de modo a não comprometer toda memória. Além disso, considerou-se um tempo adicional, tal como um fator de segurança, a fim de evitar uma eventual perda de dados, devido a problemas de comunicação. Portanto, com base em um teste preliminar, foi assumida uma frequência de 8 Hz para o sensor de pressão e de 0,2 Hz para a velocidade do vento (Dall'Aglio Sobrinho et al., 2011).

O registrador de dados de memória disponível também depende da frequência em que os dados são transmitidos. Em primeiro lugar, a transmissão é feita a cada hora, mas devido a uma eventual falha é necessário diminuir esse tempo de transmissão. Em caso de falha do sistema, o tempo é reduzido pela metade. Então, se a falha persistir, o tempo de transmissão torna-se a cada 10 minutos. E, finalmente, um último recurso é a transmissão em cada minuto.

3. Aplicações do SWAN

3.1 Descrição SWAN

SWAN é um modelo numérico desenvolvido na Universidade de Tecnologia de Delft (TUDelft), na Holanda. Ele é usado para obter a avaliação espectral das ondas em áreas costeiras, como estuários e também em áreas fechadas, como lagos, reservatórios de barragens, como mostrado neste artigo. Ele usa a velocidade do vento, o perfil de fundo, e a velocidade da corrente para simular a altura da onda e é baseado na equação de equilíbrio do espectro de ação (Booji et al., 1999). O modelo 2D está disponível para qualquer um, pois é de domínio público.

As equações resolvidas no SWAN lidam com geração de ondas, dissipação e interação não-linear em águas profundas. Ele também resolve dissipação devido ao atrito de fundo, a interação não-linear e quebra da onda em águas rasas. Beji e Battjes (1994) mostram que os processos são importantes, quando a onda viaja de condições de água profunda para águas rasas, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1. Processos que são importantes, propagação da onda de águas profundas para rasas. Adaptado de Beji e Battjes (1994)

Processos	Águas profundas	Intermediárias	Rasas
Geração de energia	xxx	xxx	x
Interações quádruplas	xxx	xxx	x
Interações Triad	o	o	xx
Ruptura parcial	o	xxx	x
Atrito de fundo	o	xx	xx
Refração	x	x	xx
Empolamento	o	xx	xxx
Quebra	o	x	xxx
Reflexão	o	o	x/xx
Difração	o	o	x

Símbolo	Efeito
xxx	Dominante
xx	Significativo
x	Relevante
o	Irrelevante

A equação de equilíbrio do espectro de ação é uma função da densidade de ação, $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$, onde σ é a frequência relativa, θ é a direção da onda e E é a densidade de energia. Escrito em coordenadas Eulerianas, a equação de equilíbrio do espectro é dada pela Equação 1:

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

O primeiro termo do lado da equação 1 representa a taxa local de variação da densidade de ação no tempo, o segundo e o terceiro termo representam a propagação de ação no plano xy , com velocidades de propagação $c_{g,x}$ e $c_{g,y}$ em x e y espacial, respectivamente. O quarto termo representa deslocamento da frequência relativa devido às variações em profundidade e correntes e, por fim, o quinto termo representa a profundidade de refração induzida e corrente induzida. Em resumo, o lado esquerdo da equação 1 representa a parte da equação cinemática enquanto que o lado direito representa o termo fonte.

Os dados necessários para executar o modelo SWAN são a batimetria da região de estudo, o vento, os campos de correntes como condições de contorno, além de um conjunto de parâmetros de cálculo das ondas e, entre os vários resultados produzidos pelo SWAN vale a pena mencionar a altura significativa das ondas, a média e os períodos de pico, direção, o parâmetro de largura de banda e do nível médio da água em qualquer ponto do domínio computacional definido.

Para uma aplicação sistemática do modelo SWAN para diferentes condições de onda incidente, um pacote de software chamado SOPRO-SWAN, Fortes et al. (2006), foi desenvolvido. A interface do utilizador facilita o armazenamento e manipulação de dados e a execução do modelo de Swan, bem como o pós-processamento, nomeadamente a sua visualização gráfica. O pacote foi construído com um banco de dados da Microsoft Access e Visual Basic para aplicação da linguagem de programação.

3.2 Condições de entrada no Swan

A aplicação do modelo Swan para reservatório de Ilha Solteira foi feito para as características do vento medida pelo anemômetro sônico 2D durante o período de 01/03/2011 e 21/03/2011, e a cada 10 min.

O modelo computacional Swan foi discretizado por três malhas retangulares, com uma cobertura de toda a área do reservatório, como mostrado na Figura 4. A malha maior (global) tem as dimensões 54 km x 33 km. A segunda grade (aninhada) foi definida com uma resolução de 500 m, cobrindo um retângulo de 26,6 km x 18,4 km. A terceira malha (aninhada) foi definida com uma resolução de 250 m, cobrindo um retângulo de 14,8 km x 14,3 km, como pode ser visto na Tabela 2. É necessário o uso de redes múltiplas para alcançar um desempenho numérico melhor. Um ponto foi definido na terceira grade de onde foram extraídos os resultados pelo Swan, o mesmo onde estava localizado o sensor de pressão.

As condições do campo de vento, que foram baseados nas medições do anemômetro sônico 2D, durante o mês de março de 2011, (Figura 6), foram consideradas constantes no espaço em todas as três malhas.

O espectro direcional foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e de uma discretização em direção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos ($\Delta\theta = 2.5^\circ$). Setenta e duas corridas foram realizadas pelo Swan no modo de variação no tempo, considerando vento estacionário e sem a presença de correntes. Os fenômenos físicos foram incluídos nas três malhas: refração, difração, empolamento e arrebentação, devido à influência de fundo, whitecapping, tríade e quádruplos interações onda-onda. Todos os parâmetros relevantes foram introduzidos no pacote SOPRO-Swan

(Fortes, et al. De 2009).

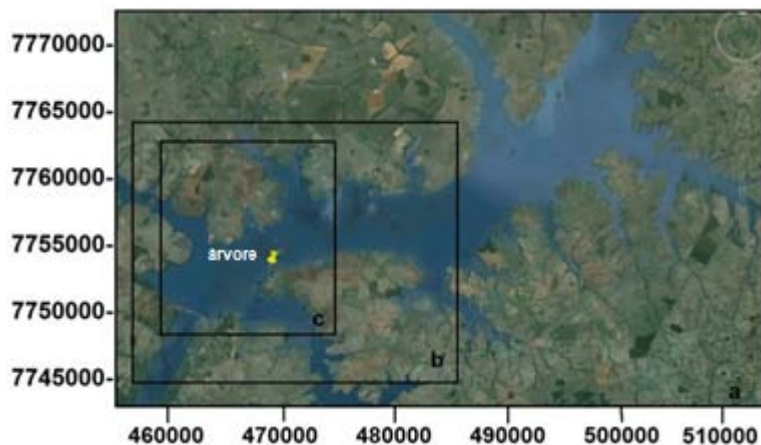


Figura 4. Modelo SWAN: Domínio e malhas.

Tabela 2. Características da malha.

Malhas	Inicial X	Inicial Y	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1	456680	7741700	58	33	1000	1000
2	457220	7744520	53	34	500	500
3	459329	7745690	58	57	250	250

4. Comparação entre os dados experimentais e resultados numéricos

Para as condições acima referidas, os resultados numéricos ao longo do período de estudo, em termos da altura das ondas e períodos, são obtidos para todo o domínio e a localização do sensor de pressão. Para obter esta posição, os resultados numéricos e dados in situ são comparados.

A Figura 5 apresenta em todo o domínio a altura significativa das ondas e seus respectivos períodos para o dia 01 de março de 2011 às 18:26 h, que teve um vento de intensidade 13.1m / s para uma direção de 75,9°.

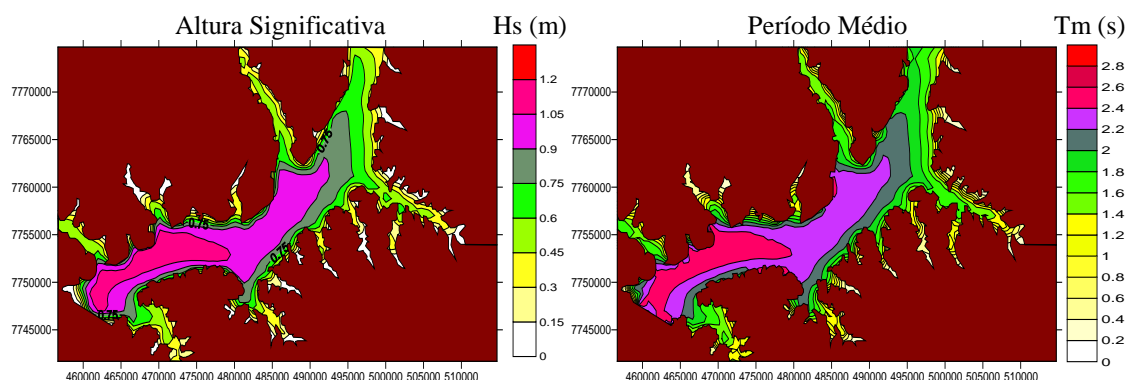


Figura 5. Representação gráfica das alturas significativas e período médio de onda.

Os resultados mostram que as alturas de onda significativas e períodos variam de 0 a 1,4 m e 0,2 a 3s, respectivamente, sendo os maiores observados no sudeste do reservatório de Ilha Solteira. Observa-se uma boa concordância espacial entre os parâmetros altura significativa e período médio

no lago da barragem, para uma mesma forçante de vento. Isto está de acordo com a direção do vento e velocidade.

A Figura 6 apresenta os resultados numéricos e dados in situ de valores de altura de onda significativa, ao longo do mês de março de 2011.

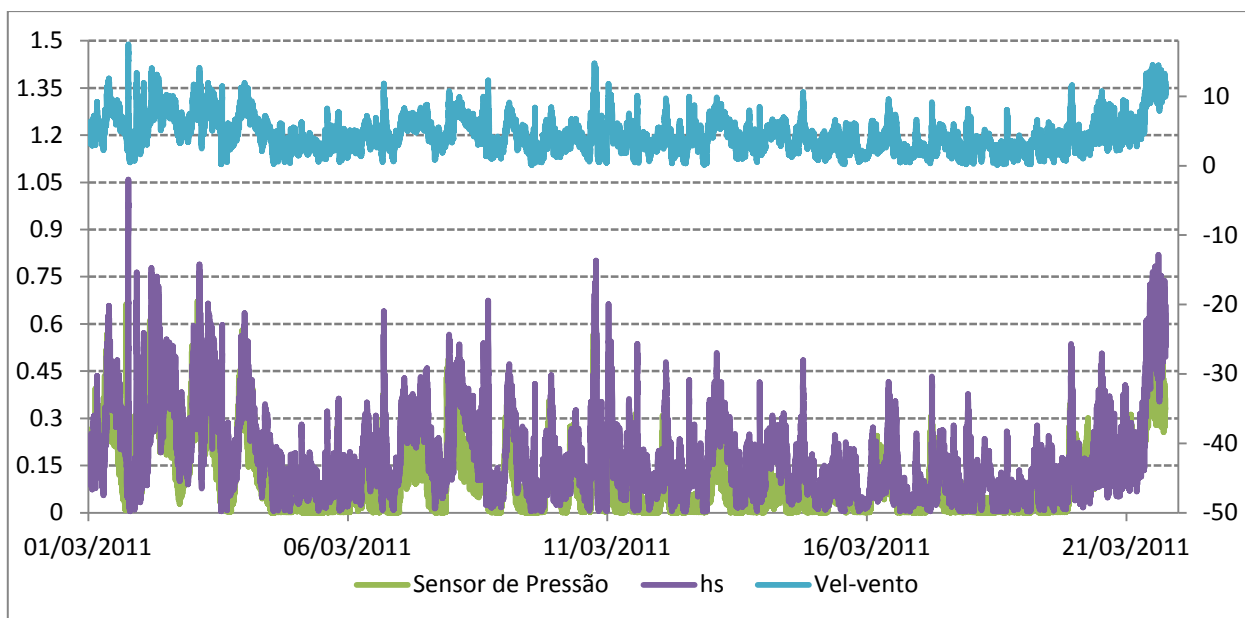


Figura 6. Representação gráfica das alturas significativas de onda de 01-03-2011 a 21-03-2011 usando o SWAN e sensor de pressão. Os dados de vento do período são também mostrados na figura.

A partir da Figura 6, pode-se concluir que o comportamento e a magnitude dos resultados numéricos e experimentais são semelhantes. Além disso, o padrão tanto numérico como o experimental segue a variação dos dados de vento. Mas há algumas diferenças com relação ao fato de que os resultados numéricos não atingem os valores máximos observados, especialmente quando o vento sopra com maior intensidade. Além disso, nas primeiras horas do dia 1 de março, os resultados numéricos de onda são mais elevados do que os observados, enquanto nas últimas horas daquele dia, ocorre o oposto.

5. Conclusões

Ondas geradas no reservatório de grandes dimensões e uso múltiplos pode ser prejudicial para as operações da usina, trechos da navegação, assim como para a estabilidade de suas margens, em alguns casos. Neste contexto, as ondas são geradas principalmente pelo vento.

Este artigo analisa as alturas significativas de onda no lago da barragem de Ilha Solteira, obtidos a partir de medições de campo nos dias 01 a 21 de março de 2011. A partir da comparação, os resultados do modelo apresentam grandes semelhanças com os resultados experimentais, o que permite indicar o código SWAN como ferramenta promissora para previsão de ondas geradas por ventos em lagos de barragens.

Um trabalho futuro consiste na aplicação do modelo para longos períodos de tempo de registro dos dados de vento e onda, assim como para outros locais na barragem do lago de Ilha Solteira.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro de doutorado fornecido pelo CNPq e Unesp para o primeiro autor, bem como o apoio técnico do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria LH² da UNESP Ilha Solteira. O apoio financeiro da "Fundação para a Ciência e a Tecnologia", através do projeto de EROS, ref. PTDC/CTE-GIX/111230/2009 - Portugal.

REFERENCIAS

- Beji, S., Battjes, J.A., 1994. Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar. *Coastal Engineering* 23, 1–16.
- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Jornal Geophys. Research*, Vol. 104, C4, pp.7649-7666.
- Fortes, C. J.; Pinheiro, L.; Santos, J. A.; Neves, M.G.; Capitão, R., 2006. SOPRO – Pacote integrado de modelos de avaliação dos efeitos das ondas em portos. *Tecnologias da Água*, Edição I, Março 2006, pp. 51-61
- Cunha, E. F.; Morais, V. S.; Maciel, G. F., Magina, F., 2009. Sistema de Transmissão de Dados de Vento e Onda, Via Rádio Telemetria, em Lagos de Barragens. *Proc. XVIII Simp. Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Dall’Aglío Sobrinho, M.; Trovati, L.R; Maciel, G.F; Oliveira, J.N de; Albertin, L.L; Oliveira, B.M; Lima, G.B; e Oliveira, E.B. Cunha, E.F, 2011. Monitoramento de ondas com sensor de pressão e comparação com dados de ADCP - Waves. *Proc. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió - Alagoas – Brasil*.
- Morais, V. S.; 2009. *Previsão de Ondas Geradas Por Ventos em Águas Interiores e Sua Alteração Devido à Presença de Vegetação Aquática em Margens de Lagos*. Dissertação de Mestrado. Unesp – Ilha Solteira- São Paulo- Brasil