

ATENUAÇÃO DE ONDAS PELA VEGETAÇÃO: ESTUDO DE SENSIBILIDADE DE MALHAS NO SWAN PARA O LAGO DA BARRAGEM DE ILHA SOLTEIRA

Adriana S. VIEIRA¹; Geraldo F. MACIEL²; Germano O. MATTOSINHO³

RESUMO

A geração e propagação de ondas de vento em lagos de barragens de grande dimensão podem pôr em risco a segurança da navegação interior bem como contribui para a ocorrência de fenômenos erosivos nas margens desses lagos. Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade de malhas, na determinação das alturas significativas de ondas geradas por vento em três pontos do lago: um primeiro ponto antes da área vegetada, o segundo no seio da vegetação e o terceiro próximo à margem. Para a zona de estudo (8km x 51km), foram testadas 2 malhas: uma com espessamentos de 250m e outra de 70m. A malha de vegetação obedece as mesmas características das malhas em estudo, entretanto com uma dimensão de 8x1.5km². Realizaram-se 36 testes, sendo 4 sem vegetação e 32 com vegetação. Dentre estes, em 16 testes variaram-se os parâmetros de vegetação (largura da planta, densidade e altura da planta) na direção do vento reinante (nordeste/sudeste da região estudada), com intensidade de 5m/s. A atenuação de ondas devido à vegetação, para o caso de vento extremo (20m/s), do período de estudo (outubro de 2010 a março de 2011), foi também avaliada. A plataforma SOPRO – SWAN (Fortes *et al.*, 2008) foi sistematicamente utilizada nas simulações desse trabalho. O tempo de cálculo para a malha de 250m demandou um tempo de processamento da ordem de 30 horas, e de três vezes mais para a malha de 70m (Core i7 com 8GB de RAM). Em ambas as situações, os percentuais de atenuação das ondas mais significativas no trecho do lago estudado mostram uma sensível redução das alturas de ondas, podendo chegar a valores de 50%.

Palavras-chave: atenuação de ondas gravitacionais; swan; vegetação; vento.

¹ Universidade Estadual Paulista – Fac. Eng de Ilha Solteira-S.P
PPGEM – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

² Universidade Estadual Paulista – Fac. Eng de Ilha Solteira-S.P
Departamento de Engenharia Civil/ PPGEM

³ Universidade Estadual Paulista – Fac. Eng de Ilha Solteira-S.P

1. INTRODUÇÃO

A Hidrovia Tietê-Paraná é uma rota de navegação que atravessa as regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil. Permite a navegação do transporte de cargas ao longo dos rios Paraná e Tietê, sendo de extrema importância para o escoamento da produção agrícola dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e para uma parcela de Rondônia, Tocantins e Minas Gerais. A Figura 1 mostra o segmento da Hidrovia Tietê-Paraná, no lago da barragem de Ilha Solteira.

Em certas áreas do lago, as ondas geradas pelos ventos, além de poderem trazer dificuldades à navegação, são responsáveis pela erosão das margens e desbarrancamentos. Para mitigar tais efeitos, a vegetação natural ou ali inserida podem vir a atenuar as ondas e seus efeitos, o que vem constituir opção de bioengenharia interessante, pois dissipa energia, sem prejuízos ambientais e econômicos. Portanto, é fundamental analisar a redução da energia das ondas pela vegetação, perto das margens do lago.

Em um trabalho anterior de Vieira *et al.* (2013), o modelo SWAN, Booij *et al.* (1996), foi aplicado para caracterizar as ondas geradas pelo vento sobre o lago da barragem (sem vegetação). É importante salientar que para o lago Ilha Solteira executou-se um extenso plano de monitoramento, com medições realizadas no âmbito do projeto de investigação FINEP - ONDISA5, UNESP (1997, 2008). No entanto, essas medições foram feitas apenas em quatro locais distribuídos no lago, o que impossibilita uma visão geral de todo o lago como o modelo numérico é capaz de fornecer.

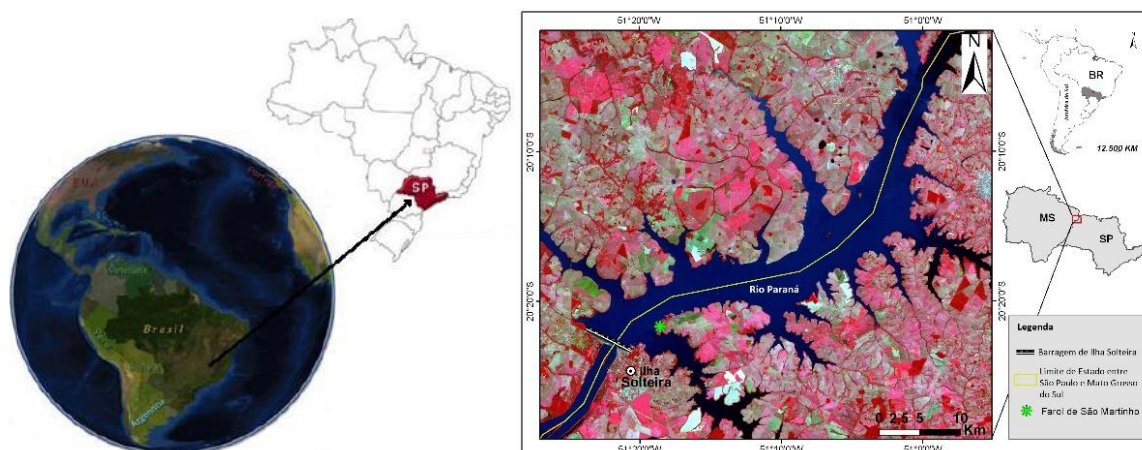


Figura 1. Barragem do reservatório de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. Representação do segmento / rota da Hidrovia Tietê-Paraná. Vistas gerais.

Para analisar a influência da vegetação na redução da altura das ondas junto às margens, o objetivo deste trabalho foi aplicar a versão mais recente do modelo numérico SWAN (versão 41.01, SWAN Team, 2014), que inclui a dissipação de energia devido à vegetação, SWAN-VEG, Suzuki *et al.* (2011), na área do lago da barragem de Ilha Solteira.

No modelo foram aplicados dois ventos contantes, de 20m/s e de 5m/s, ambos na direção NE e variaram-se as características do fator de vegetação V_f [planta/m], altura, largura e densidade das plantas numa profundidade local de 4.8m. Foram analisados os percentuais de atenuação das alturas significativas de ondas em todos os casos, levando em consideração 3 pontos no lago.

Este artigo traz, inicialmente, uma breve descrição do modelo numérico utilizado (seção 2). Em seguida, uma breve descrição da área de estudo e características utilizadas no modelo (seção 3), seguida de sua aplicação (estudo de casos) para a área de estudo (seção 4). A discussão dos resultados obtidos para as diferentes condições e conclusões são arroladas na seção 5.

2. MODELO NUMÉRICO SWAN-VEG

2.1 Conceitos Básicos

O modelo numérico SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) modela a geração, propagação e dissipação de ondas do mar com base na equação de balanço da ação das ondas, Booij *et al.* (1999). Este modelo, de domínio público, é continuamente atualizado pela *Delft University of Technology* (Holanda).

O modelo SWAN é capaz de simular a propagação de ondas do mar a partir de alto mar até à costa e considera os principais processos físicos de refração, difração e empolamento, devido à variação da profundidade do fundo e à presença de correntes e ondas. Inclui também o crescimento de onda induzida pelo vento, quebras de onda devido à variação do fundo e à declividade, dissipação de energia por atrito no fundo, bloqueio de onda e reflexão, bem como a transmissão de ondas.

2.2 SWAN-VEG

Neste artigo, utilizou-se o modelo SWAN-VEG, Suzuki *et al.* (2011). Trata-se do modelo SWAN original com a adição do módulo de vegetação, que contém um termo de dissipação de energia devido à vegetação, subtraindo energia das ondas de entrada. Isso resulta numa altura de onda inferior, uma vez que a energia da onda é menor na área com vegetação e na área posterior a mesma.

Assim, para ondas com propagação numa certa direção x , o fluxo de energia $F=E.c_g$ de onda permanece constante se nenhuma energia E for perdida ou adquirida. Isto é indicado pela equação 1.

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} [E \cdot c_g] = 0 \quad (1)$$

com c_g = celeridade de grupo

Contudo, a vegetação provoca uma perda de energia que resulta numa diminuição do fluxo e em novas condições de onda. Aqui o módulo de vegetação determina uma dissipação de energia de longo prazo, ε_v [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$], que é subtraída do fluxo de energia das ondas (Dalrymple *et al.* (1984), e Kobayashi *et al.* (1993), Mendez e Losada (2004)). O próprio modelo SWAN original não muda, apenas um termo de dissipação extra é adicionado ao mesmo, conforme indicado pela equação 2:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -\varepsilon_v \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} [E \cdot c_g] = -\varepsilon_v \quad (2)$$

com ε_v = dissipação de energia.

O termo de dissipação é sempre negativo, uma vez que provoca uma perda de energia. A equação 3 mostra que a expressão de dissipação é uma função das seguintes condições de onda e de vegetação.

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \rho C_D b_v N \left(\frac{kg}{2\sigma}\right)^3 \frac{\sinh^3(kah) + 3\sinh(kah)}{3k \cosh^3(kh)} H_{rms}^3 \quad (3)$$

Sendo: ρ a massa específica da água, H_{rms} o erro médio quadrático, k o número de onda e σ a frequência da onda.

A vegetação é modelada como obstáculos cilíndricos causando força de arrasto e definida por quatro características (altura - ah [m]; diâmetro - b_v [m]; densidade de plantas - N [planta/m²] e coeficiente de arrasto - C_D [adimensional]). Há também um parâmetro usado para quantificar a vegetação, denominado fator de vegetação (V_f [planta/m]), dado pela equação 4.

$$V_f = b_v \times N \times C_D \quad (4)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo de casos utilizaram-se duas malhas batimétricas com dimensão aproximada de 51km por 40km, e duas malhas de vegetação, encaixadas, uma com resolução de 70x70m e outra de 250x250m, cujos resultados são confrontados. Ademais, foram locados 3 pontos de interesse a serem estudados, como ilustrado na Figura 2.

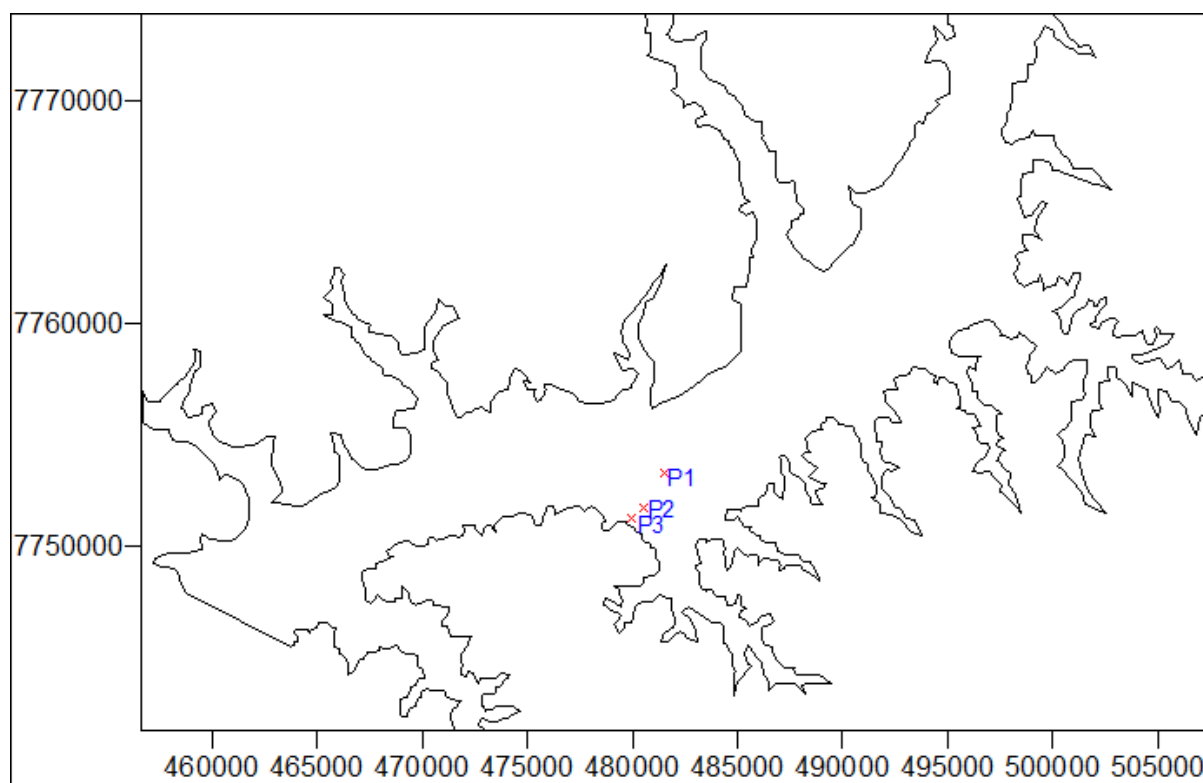


Figura 2. Esquema de localização dos pontos para estudo.

As malhas de vegetação utilizadas neste estudo, com dimensão aproximada de 8km por 1.5km, são ilustradas pela Figura 3 em detalhe, juntamente com os pontos de interesse.

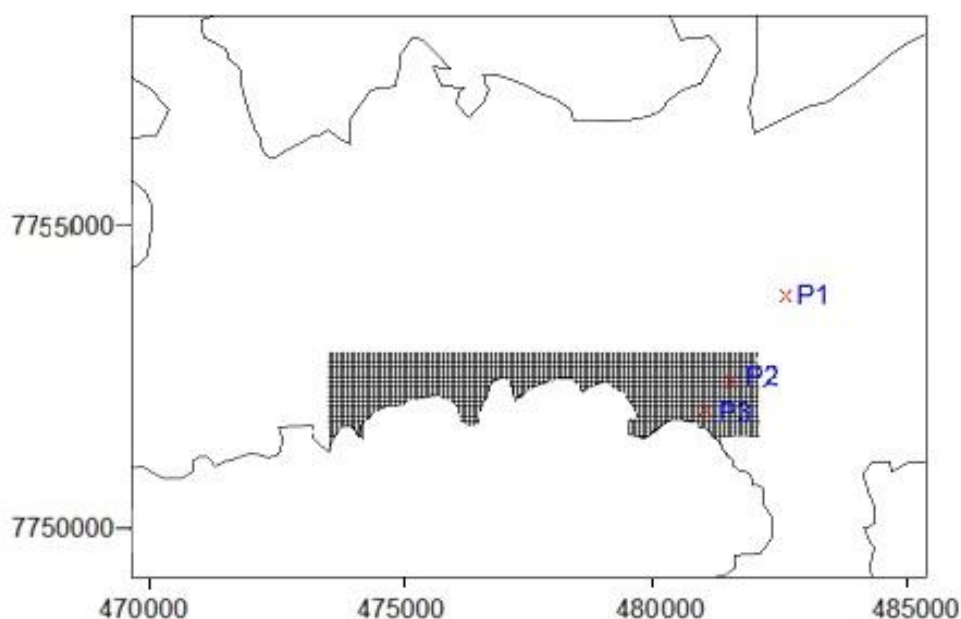


Figura 3. Esquema de localização dos pontos para estudo - Detalhado.

Os pontos de interesse P1, P2 e P3 distam da margem aproximadamente 2800m, 1000m e 315m respectivamente, cujas coordenadas (UTM, para X e Y) constam na Tabela 1. O ponto P3 escolhido encontra-se no limiar entre as zonas de águas profundas e intermediárias.

Tabela 1. Coordenadas dos pontos de estudo.

	X	Y	Z [m]
P1	481525	7753263	23.6
P2	480503	7751726	15
P3	479992	7751213	4.8

Neste estudo foram utilizadas velocidades do vento constantes de 20m/s e 5m/s, sendo a primeira uma condição extrema e a segunda, da ordem da velocidade do vento reinante no lago da barragem de Ilha Solteira – SP.

O espectro direcional nos cálculos com o SWAN foi definido com uma discretização de frequência de 30 intervalos de 0.05 a 3.0 Hz com uma distribuição logarítmica e uma discretização direcional de 2.5° cobrindo os 360° (que resulta em 44 intervalos de direção). Todos os testes foram realizados com a versão SWAN 41.01, SWAN (Team 2014), em modo estacionário, sem a presença de correntes. Os fenômenos físicos considerados foram: refração, difração, empolamento e interação não linear entre três e quatro ondas. Todos os parâmetros relevantes foram introduzidos no pacote SOPRO-SWAN, Fortes *et al.* (2006), utilizado neste trabalho.

4. ESTUDOS DE CASOS

Foram utilizados nove casos para este estudo em cada malha, onde foi possível analisar a influência do parâmetro de vegetação V_f na dissipação de energia observada, com consequente alteração da altura significativa de onda. Nestes casos, onde o coeficiente de arrasto foi considerado constante e igual a um ($C_D=1$), as características da vegetação correspondem a: três valores para a altura da vegetação (ah), 2.5, 3, 3.5 metros; duas espessuras (b_v), 0.005 e 0.2 metros; quatro valores para densidade de planta (N), 60, 2000, 2500 e 3600 plantas/m². Estes valores geram valores distintos de parâmetros de vegetação V_f , sendo eles: 10, 12, 12.5 e 18 [plantas/m]. Os resultados de alturas significativas de ondas foram obtidos a partir destes dados e constam na Tabela 2, onde também se podem observar as características de cada caso.

Tabela 2. Características dos casos em estudo.

	Vel. Vento [m/s]	Hs (alt. Sig.) [m] MALHA 70	Hs (alt. Sig.) [m] MALHA 250	Vf (parâmetro de veg.)	ah (alt. Planta) [m]	b_v (espessura) [m]	N (densidade) [plantas/m ²]
C - 1	20	3,235	3,109	0	-	-	-
	5	1,384	1,322	0	-	-	-
C - 2	20	1,739	2,7508	12	2,5	0,2	60
	5	1,390	1,319	12	2,5	0,2	60
C - 3	20	1,653	2,7018	12	3	0,2	60
	5	1,394	1,3141	12	3	0,2	60
C - 4	20	1,586	2,680	12	3,5	0,2	60
	5	1,410	1,316	12	3,5	0,2	60
C - 5	20	1,829	2,800	10	2,5	0,005	2000
	5	1,390	1,318	10	2,5	0,005	2000
C - 6	20	1,744	2,752	10	3	0,005	2000
	5	1,393	1,314	10	3	0,005	2000
C - 7	20	1,744	2,707	10	3,5	0,005	2000
	5	1,393	1,314	10	3,5	0,005	2000
C - 8	20	1,639	2,672	12,5	3,5	0,005	2500
	5	1,393	1,320	12,5	3,5	0,005	2500
C - 9	20	1,465	2,650	18	3,5	0,005	3600
	5	1,397	1,318	18	3,5	0,005	3600

O ponto P3, mais próximo da margem (cf. Tabela 1), é então, ilustrado neste artigo. Trata-se de local mais próximo à margem e portanto, mais susceptível a ações erosivas, notadamente o ataque de ondas.

Realizando-se a análise em termos de altura significativa de onda, pôde-se determinar a percentagem de amortecimento dos casos com vegetação em relação aos casos sem

vegetação (estudo de caso C-1, cf. Tabela 2). Para a velocidade do vento máximo (20m/s), a Tabela 3 apresenta as taxas de amortecimento para diversos casos tratados.

Tabela 3. Percentagem de amortecimento devido a um campo vegetado, com velocidade do vento de 20m/s e V_f variando de 10 a 18.

AMORTECIMENTO (%)		
	MALHA 70	MALHA 250
C -2	46,24	11,53
C -3	48,89	13,11
C -4	50,98	13,80
C -5	43,46	9,96
C -6	46,11	11,48
C -7	46,11	12,93
C -8	49,35	14,06
C -9	54,72	14,79

Pode-se inferir da Tabela 3 que se obtém amortecimento devido a um campo vegetado da ordem de 50%, porém com contribuição menor do próprio parâmetro de vegetação V_f . A elevação do parâmetro de vegetação de 10 para 18 plantas/m² não representou alteração significativa no amortecimento, para este estudo em questão considerando a malha de 70x70m. Com a malha mais espaçada de 250x250, obteve-se um amortecimento de apenas 13% (contra 50% da malha mais fina), o que demonstra que o refinamento da malha de estudo pode melhorar os resultados obtidos, uma vez que os cálculos de interpolação são realizados a partir de pontos mais próximos. A Tabela 4 traz o efeito da contribuição do parâmetro de vegetação no amortecimento das ondas, qual seja, a sensibilidade do modelo numérico a sua variação.

Tabela 4. Análise do amortecimento em relação ao parâmetro de vegetação V_f .

		AMORTECIMENTO (%)	
αh (m)	V_f	MALHA 70	MALHA 250
2,5	10	43,46	9,96
	12	46,24	11,53
3,5	10	46,11	12,93
	12,5	49,35	14,06
	18	54,72	14,79

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Este estudo apresenta a aplicação do modelo SWAN-VEG, SWAN (Team, 2014), no lago da barragem de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. O modelo foi usado para simular as ondas geradas por vento no reservatório, na presença de vegetação utilizando-se de duas malhas

batimétricas e duas malhas de vegetação, sendo elas com resolução de 250m e outra de 70m.

Foram realizados estudos de casos, considerando a batimetria real, variando-se a velocidade do vento e as características da vegetação. Verificou-se que existe uma redução expressiva da altura significativa de onda quando esta atravessa uma área de vegetação. Isto é mais evidente nos casos em que a velocidade do vento é maior. Ademais, verificou-se que quando se altera o parâmetro de vegetação, não há uma variação significativa (efeito dominante deste parâmetro) na dissipação de energia. Forte provavelmente investimentos em soluções não-estruturais, como de bioengenharia, reflorestamento e/ou recuperação de margens, por exemplo, gerariam custos menores, mesmo se trabalhando com parâmetros de vegetação mais reduzidos, pois estes poderiam já ser suficientes para um nível de amortecimento desejável. Ademais, o refinamento da malha, testado para o lago de Ilha Solteira, gerou resultados de atenuação mais expressivos, o que mostra que o estudo com malhas mais refinadas torna-se interessante. Vale, por fim, ressaltar, que a altura relativa da planta (submergência) é também um parâmetro a ser considerado, efeito este que ainda se mostrou moderado nos casos aqui testados.

A caracterização da vegetação real no lago de Ilha Solteira e comparações com medições *in situ* constituem tema de trabalhos futuros e que deve ser investido, dada sua importância nos processos erosivos permanentes junto às margens do reservatório, quando da ação intermitente de ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H.. 1999. A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation. *Journal Geophysical Research*, 104 (C4), pp. 7649-7666.

Dalrymple, R.A., Kirby, J.T., Hwang, P.A., 1984. Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 110, 67–79.

Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L.V., 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, March, pp. 51-61.

Kobayashi, N., Raichle, A.W., Asano, T., 1993. Wave attenuation by vegetation. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 119, 30–48.

Maciel, G.F. *et al.* 2009. Alerta de ventos e ondas para a segurança da navegação. *Proc. 6º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior*. Rio de Janeiro, 21 and 22 October.

Mendez, F.M., Losada, I.J., 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering* 51, 103–118.

Morais, V.S., Cunha, E.F., Maciel, G F., 2009. Medição, Previsão e Análise Numérica dos Mecanismos de Geração de Ondas a Partir da Cinética de Ventos e Dissipação de Ondas na Presença de Fundos com Vegetação, em Lagos de Barragens, *Proc. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Campo Grande - Mato Grosso do Sul - Brasil: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Suzuki, T., Zijlema, M., Burger, B., Meijer, M.C., Narayan, S., 2011. Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. *Coastal Engineering* 59, 64–71.

SWAN Team, 2014. SWAN scientific and technical documentation. SWAN Cycle III version 41.01. Report. Delft University of Technology.

UNESP 1997, 2008. ONDISA Project. Project support by FAPESP and FINEP Brazilian agencies.

Vieira, A.S., 2013. Análises, Aplicações e Validações – Numérico/Experimentais do Modelo SWAN em Áreas Restritas e ao Largo. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP – Brasil.

Vieira, A.S., Maciel G.F., Fortes, C.J.E.M., Minussi, C.R., Sobrinho, M. Dall'aglio, 2013. Comparative analysis of the SWAN numerical model predictions and of the pressure sensor measurements at the Ilha solteira Lake. Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 4-7 June, LNEC.