UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# Dissipação de Energia de Ondas Geradas por Ventos em Reservatórios de Barragens, devido à presença de Vegetação.

GERMANO DE OLIVEIRA MATTOSINHO

**Orientador**: Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP ï Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Ciências Térmicas.

Ilha Solteira

2016

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M444d

Mattosinho, Germano de Oliveira.
Dissipação de energia de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens, devido à presença de vegetação / Germano de Oliveira Mattosinho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
84 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2016

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel
Inclui bibliografia

1. Reservatório de barragem. 2. Ondas geradas por ventos. 3. Vegetação. 4. Atenuação de ondas gravitacionais. 5. SWAN-Veg. 6. Bioengenharia.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**Câmpus de Ilha Solteira**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **DISSIPAÇÃO DE ENERGIA DE ONDAS GERADAS POR VENTOS EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS, DEVIDO À PRESENÇA DE VEGETAÇÃO.**

**AUTOR: GERMANO DE OLIVEIRA MATTOSINHO**
**ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: CIÊNCIAS TÉRMICAS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

PROFESSOR DOUTOR TIAGO ZENKER GIRELI
Departamento de Recursos Hídricos / UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Ilha Solteira, 22 de dezembro de 2016

# AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Luiz Celso e Inez, e meu irmão Rodrigo, por todo o suporte e apoio ao longo dessa jornada, sempre acreditando em meu potencial.

Ao professor Geraldo de Freitas Maciel, por toda a orientação que tem expandido meus horizontes, e, principalmente, pelos conselhos e conversas que levarei como experiência.

Ao pessoal integrante do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria ($LH^2$) da FEIS-UNESP.

Aos amigos, de república, minha segunda família, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando e incentivando.

Agradeço em especial meu amigo Leonardo Lachi Manetti (PPGEM), que foi peça chave em minha adaptação à mudança de área (Civil ï  Mecânica) e sempre esteve presente auxiliando nos estudos.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil (básico e profissional) pelos ensinamentos, tanto teóricos, como práticos, passados ao longo da minha graduação, que me deram toda a base de conhecimento em Engenharia.

A todos os professores do PPGEM ï  Ciências Térmicas, por todos os ensinamentos, conselhos e compartilhamento de experiências, que fazem parte da minha formação.

A todos os funcionários, principalmente aos técnico-administrativos pela presteza e auxílios, e em especial aos pertencentes à Seção de Pós Graduação.

Por fim, ao Prof. Claúdio Freitas Neves pelos alertas profícuos quando do meu Exame de Qualificação.

# PREFÁCIO

A pesquisa ora apresentada traz à discussão a ação de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens e seus efeitos de atenuação, quando estas se propagam sobre fundos com vegetação.

Nestas últimas décadas, trabalhos sobre o assunto têm sido reportados na literatura, quase que exclusivamente desenvolvidos em nível de laboratório, sob condições controladas em canais de fundo horizontal ou simulando o fenômeno sobre fundos com declividade constante. Merecem destaque os trabalhos de Dalrymple et al. (1984), modificados e aperfeiçoados por Mendez e Lozada (2004) e, mais recentemente os trabalhos de Karambas et al. (2016). Todos eles desenvolvidos a partir do balanço de energia e leis de atenuação prescritas.

No cenário brasileiro, pesquisas pioneiras sobre o assunto foram realizadas na Rede "Amigos de Boussinesq - Rede Cooperativa de Pesquisa sobre Hidrodinâmica Costeira e de Águas Rasas", (UFRJ, UNESP, UFRGS), com apoio da Capes, e estendida para outras IES (Instituições de Ensino Superior) e laboratórios e universidades portuguesas.

Ressaltando os aspectos biomecânicos da vegetação, duas publicações merecem destaque: o trabalho de doutorado de Lima (2005) e a dissertação de mestrado de Vasco (2005). O primeiro, construído com base no balanço da quantidade de movimento, qual seja, desenvolvimento de um modelo mecânico que utiliza a velocidade relativa fluido-haste para calcular as forças exercidas pelas ondas sobre uma haste flexível, em função de um único parâmetro, o coeficiente de arraste. A inserção desta força na equação do movimento, integrada na vertical, e promediada no tempo, como um termo de resistência, possibilitou a determinação do decaimento da altura da onda ao longo de um campo de hastes e apontou para a importância da interação entre as mesmas no amortecimento total. O segundo, pautado no comportamento de vigas viscoelásticas e lei de atenuação tipo quociente, é baseado na dissipação de energia, e, a priori, seria mais aplicável à atenuação de ondas evoluindo sobre espécies de maior rigidez.

Assim exposto, a presente dissertação de mestrado objetiva explorar o código de cálculo SWAN-VEG (SUZUKI et al. 2011), no estudo de fatores de atenuação de ondas (energia) para espécies vegetais encontradas às margens do reservatório da UHE de Ilha Solteira. Outrossim, comparar resultados do modelo com a propositura de Lima (2005) que, a partir de ensaios laboratoriais controlados, e calibração de seu código numérico, fornece modelo de fácil exploração, este voltado para atenuação de ondas devido à presença de espécies vegetais de elevada flexibilidade, mais próximas às braquiárias encontradas às margens do reservatório.

# RESUMO

A propagação de ondas geradas por vento em reservatórios de barragens de grande dimensão pode pôr em risco a geração de energia, segurança da navegação interior, bem como contribuir para a ocorrência de fenômenos erosivos recorrentes às margens desses reservatórios. O reservatório da barragem da UHE (usina hidrelétrica) de Ilha Solteira também se encontra exposto aos fenômenos de formação de ondas por ventos com possíveis efeitos econômicos e uma análise aprofundada envolve uma grande interdisciplinaridade. Dentro dessa perspectiva, e privilegiando medidas não-estruturais como soluções de engenharia de forma a mitigar ação de ondas no processo de erosão de margens do entorno do reservatório, este trabalho de mestrado visa quantificar, com apoio da simulação numérica, os coeficientes de atenuação de energia de ondas produzidas por ventos quando estas se propagam sobre fundos com vegetação. Neste estudo, são analisadas, utilizando-se o software SWAN-VEG, as alturas de ondas geradas para uma gama de ventos e sua atenuação, nos casos sem e com a presença de diversos cenários ou *layouts* de vegetação no fundo. Ainda é verificada a influência do efeito de refinamento de malhas (250, 150 e 100 m) no modelo sobre os coeficientes de atenuação. Análises comparativas com estudos da literatura são realizadas, apontando para a necessidade de se determinar, com acurácia, o coeficiente de arraste, $\delta_{\bar{v}}$, no complexo fenômeno de atenuação de ondas propagando-se em águas confinadas com presença de vegetação. Após explorada a potencialidade do SWAN-VEG, pode-se verificar que a atenuação devido à vegetação é um processo altamente dinâmico e complexo, cuja quantificação é importante na modelagem da hidrodinâmica costeira. Por fim, foi verificado que as simulações apontam para fatores de atenuação de ondas que dependem da densidade de plantas, do *habitat* e da submergência.

**Palavras-chave**: Reservatório de barragem. Ventos. Ondas geradas por ventos. Vegetação. Atenuação de ondas gravitacionais. SWAN-VEG. Bioengenharia.

# ABSTRACT

The propagation of waves generated by winds in reservoirs of large dams can jeopardize the generation of energy, safety of inland navigation, as well as contributing to the occurrence of recurrent erosive phenomena on the banks of these reservoirs. The dam reservoir of Ilha Solteiraô s hydroelectric power plant have been exposed to wind wave formation phenomena with possible economic effects; and, an in-depth analysis on it involves a great interdisciplinary. In this perspective, and emphasizing non-structural measures as engineering solutions in order to mitigate wave action in the process of erosion of the banks around the reservoir, this master's work aims to quantify, with the support of numerical simulation, the energy attenuation coefficients of waves produced by winds when the waves propagate on vegetated bottoms. In this study, the waves heights generated by a range of winds and their attenuation, in the cases without and with the presence of several scenarios or vegetation layouts in the background, were analyzed using SWAN-VEG software. In addition, the influence of the refinement effect of meshes (250, 150 and 100 m) on the model on the attenuation coefficients was verified. Comparative analyzes with literature studies were performed, pointing out the necessity to determine, with accuracy, the drag coefficient, ŏ ̲ ̳, in the complex phenomenon of waves attenuation that propagate in reservoirs with vegetation. After exploring the potential of the SWAN-VEG, it can be verified that the attenuation due to the vegetation is a highly dynamic and complex process, whose quantification is important in the modeling of coastal hydrodynamics. Finally, it was verified that the simulations point out to wave attenuation factors that depend of density of plants, habitat, and submergence.

**Keywords**: Dam reservoir. Winds. Waves generated by winds. Vegetation. Attenuation of gravitational waves. SWAN-VEG. Bioengineering.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 ï  Planta Geral da Hidrovia do Rio Paraná ï  Itaipú ï  São Simão. 12
Figura 2- Representação de trecho/rota da hidrovia Tietê-Paraná no reservatório de Ilha Solteira ï  SP. 13
Figura 3 ï  Processos erosivos nas margens do reservatório de Ilha Solteira ï  SP (a) erosão da margem pelas ondas; b) amortecimento de ondas pela vegetação; c) geração de ondas por embarcação). 15
Figura 4 - Região de validade para diversas teorias de onda. 22
Figura 5 - Representação das alturas significativas de ondas e ventos, para o período de 01 a 23 de fevereiro de 2011. 29
Figura 6 ï  Comparação da evolução de ̈Oì ά í para o SWAN-VEG e para ondas randômicas de Mendez e Losada (2004) com período de 8 s. 31
Figura 7 ï  Comparação de altura de onda entre SWAN-VEG e Mendez e Losada (2004) através do perfil de forma de Dean, com ̈Ω sendo a altura da vegetação. 31
Figura 8 ï  Comparação de altura de onda: SWAN-VEG, Lovas (2000) e Mendez e Losada (2004). 32
Figura 9 ï  Comparação de altura de onda: Vo-Long e Massel (2006) e SWAN com ώ̈Ω سي πΐσπ. 33
Figura 10 ï  Posição dos eixos coordenados. 37
Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do SWAN-VEG. 41
Figura 12 ï  Representação georreferenciada do reservatório de Ilha Solteira (zona de estudo, dentro da qual serão dispostos layouts de campos vegetados, no entorno do reservatório). 43
Figura 13 ï  Croqui dos pontos da FASE 1. 43
Figura 14 ï  Croqui dos pontos da FASE 2. 44
Figura 15 ï  Exemplo de arquivo de ventos para entrada no SWAN-VEG. 44
Figura 16 - Representação gráfica 3D da batimetria do Lago de Ilha Solteira. 45
Figura 17 - Arquivo de entrada do Aquaveo SMS 10. 46
Figura 18 - Configuração de entrada no Aquaveo SMS 10. 46
Figura 19 - Exibição da batimetria completa e do contorno da malha no Aquaveo SMS 10. 46
Figura 20 - Características da malha com resolução de 200 m criada. 47
Figura 21 ï  Espectro de resolução. 48
Figura 22 ï  Processos físicos e características da vegetação. 49

Figura 23 ï  Condições estacionárias de onda. 49
Figura 24 ï  Condições estacionárias de vento. 50
Figura 25 ï  Decaimento do amortecimento em relação ao afastamento da margem. 53
Figura 26 ï  Aumento do amortecimento de acordo com o ώ̈Ω 53
Figura 27 - Decaimento de Hs em relação à submergência para vel. vento 20 m/s. 56
Figura 28 ï  Amortecimento da Hs em relação à submergência com variação de velocidade do vento referente ao ponto P1. 56
Figura 29 - Decaimento do amortecimento em relação ao afastamento da margem. 58
Figura 30 - Aumento do amortecimento de acordo com o ώ̈Ω. 58
Figura 31 - Decaimento de Hs em relação à submergência para vel. vento 20 m/s. 60
Figura 32 - Amortecimento de Hs em relação à submergência com variação de velocidade do vento referente ao ponto P1. 60
Figura 33 ï  Decaimento do amortecimento em relação ao afastamento da margem. 62
Figura 34 ï  Aumento do amortecimento de acordo com o ώ̈Ω 62
Figura 35 - Decaimento de Hs em relação à submergência para vel. vento 20 m/s. 64
Figura 36 - Amortecimento de Hs em relação à submergência com variação de velocidade do vento referente ao ponto P1. 64
Figura 37 ï  Amortecimento de ondas na margem para vel. Vento 5 m/s. 67
Figura 38 - Amortecimento de ondas na margem para vel. Vento 20 m/s. 68
Figura 39 ï  Aumento do amortecimento em função do ώ̈Ω para vel. vento 5 m/s. 68
Figura 40 - Aumento do amortecimento em função do ώ̈Ω para vel. vento 20 m/s 69

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 ï  Resumo dos principais estudos sobre amortecimento de ondas gravitacionais.....34
Tabela 2 ï  Altura significativa de onda em relação ao fator de vegetação para cada ponto de análise. .....52
Tabela 3 ï  Percentagem de amortecimento de onda relativo ao fator de vegetação, ώ̈Ω. .....52
Tabela 4 - Percentagem de amortecimento de onda relativa à velocidade do vento. .....54
Tabela 5 -  Altura significa de ondas em relação à submergência. .....55
Tabela 6 - Altura Significativa de Onda em relação ao fator de vegetação, ώ̈Ω, para cada ponto de análise. .....57
Tabela 7 ï  Percentagem de amortecimento de onda relativo ao fator de vegetação. .....57
Tabela 8 - Percentagem de amortecimento de onda relativa à velocidade do vento. .....59
Tabela 9 - Altura significativa de onda em relação ao fator de vegetação, ώ̈Ω, para cada ponto de análise. .....61
Tabela 10 - Percentagem de amortecimento de onda relativo ao fator de vegetação, ώ̈Ω. .....61
Tabela 11 - Percentagem de amortecimento de onda relativa à velocidade do vento. .....63
Tabela 12 ï  Comparação das Hs [m] em relação a submergência para vel. do vento = 20 m/s. .....65
Tabela 13 ï  Percentagem de amortecimento de Hs referente aos fator de vegetação, ώ̈Ω, para vel. do vento = 10 m/s. .....65
Tabela 14 - Percentagem de amortecimento de Hs referente aos fator de vegetação, ώ̈Ω, para vel. do vento = 15 m/s. .....66
Tabela 15 ï  Pontos e profundidades utilizados na FASE 2. .....67
Tabela 16 ï  Altura significativa de onda [m] dos casos de estudos da FASE 2 com | ̈Ω سي πΙυΙ .....67
Tabela 17 ï  Altura de onda local [m] no ponto PM1 para vel. vento 5 m/s. .....71
Tabela 18 - Altura de onda local [m] no ponto PM1 para vel. vento 20 m/s. .....71

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA ..... 12

2 OBJETIVOS ..... 18

3 ESTADO DA ARTE ..... 19

3.1 Geração de Onda pelo Vento ..... 19

3.2 Modelos de Geração de Ondas ..... 20

3.3 Estudos de Atenuação de Ondas pela Vegetação ..... 23

3.4 estudos de Ondas Geradas por Ventos através do modelo SWAN e efeitos de Atenuação pela Vegetação na versão SWAN-VEG ..... 27

3.5 Interação Onda-Vegetação ..... 35

3.5.1 Leis de Decaimento de Altura de Onda ..... 37

3.5.1.1 Queda exponencial da altura da onda definida pela Equação 4: ..... 37

3.5.1.2 Queda da altura da onda segundo uma função do tipo quociente definida pela Equação 5: ..... 38

4 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 40

4.1 Modelo SWAN-VEG ..... 40

4.2 Características da Zona de Estudo ..... 42

4.3 Arquitetura dos dados de ventos no SWAN-VEG ..... 44

4.4 Metodologia utilizada para a construção da batimetria ..... 44

4.5 Obtenção do Domínio de Cálculo para o SWAN-VEG ..... 45

4.6 Contorno do Lago ..... 47

4.7 Parâmetros Numéricos ..... 47

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 51

5.1 Descrição das fases de estudo ..... 51

5.2 Resultados da FASE 1 ..... 51

5.2.1 Análises dos parâmetros de Vegetação e Submergência ..... 51

5.2.2 Malha de 250 m ..... 51

5.2.2.1 Análises com variação de velocidades dos ventos ..... 54

5.2.2.2 Análise de Submergência. ..... 55

5.2.3 Malha de 150 m ..... 56

5.2.3.1 Análises com variação de velocidades dos ventos ..... 58

5.2.3.2 Análise de Submergência ..... 59

5.2.4 Malha de 100 m ..... 60

5.2.4.1 Análises com variação de velocidades dos ventos ..... 63

5.2.4.2 Análise de Submergência ..... 63

5.2.4.3 Análises com variação de velocidades dos ventos e fator de vegetação ..... 65

5.3 Análises dos parâmetros de Vegetação e Submergência ï FASE 2 ..... 66

5.3.1 Variação do coeficiente de arrasto, $F_{\pi}$ ..... 69

5.3.2 Análise de atenuação de ondas pela equação de Lima (2005) ..... 70

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS ..... 72

6.1 Perspectivas Futuras ..... 74

REFERÊNCIAS ..... 75

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Na divisa entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul e próximo ao encontro dos rios Tietê e Paraná localiza-se a UHE de Ilha Solteira, cujo reservatório faz parte de uma das mais importantes hidrovias do MERCOSUL, a hidrovia Tietê-Paraná (Figura 1 e Figura 2), que liga a região Sul, Sudeste e Centro-oeste do país, ao longo dos rios Paraná e Tietê.

Figura 1 ï Planta Geral da Hidrovia do Rio Paraná ï Itaipú ï São Simão.

Fonte: Página do DNIT ï Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte [1].

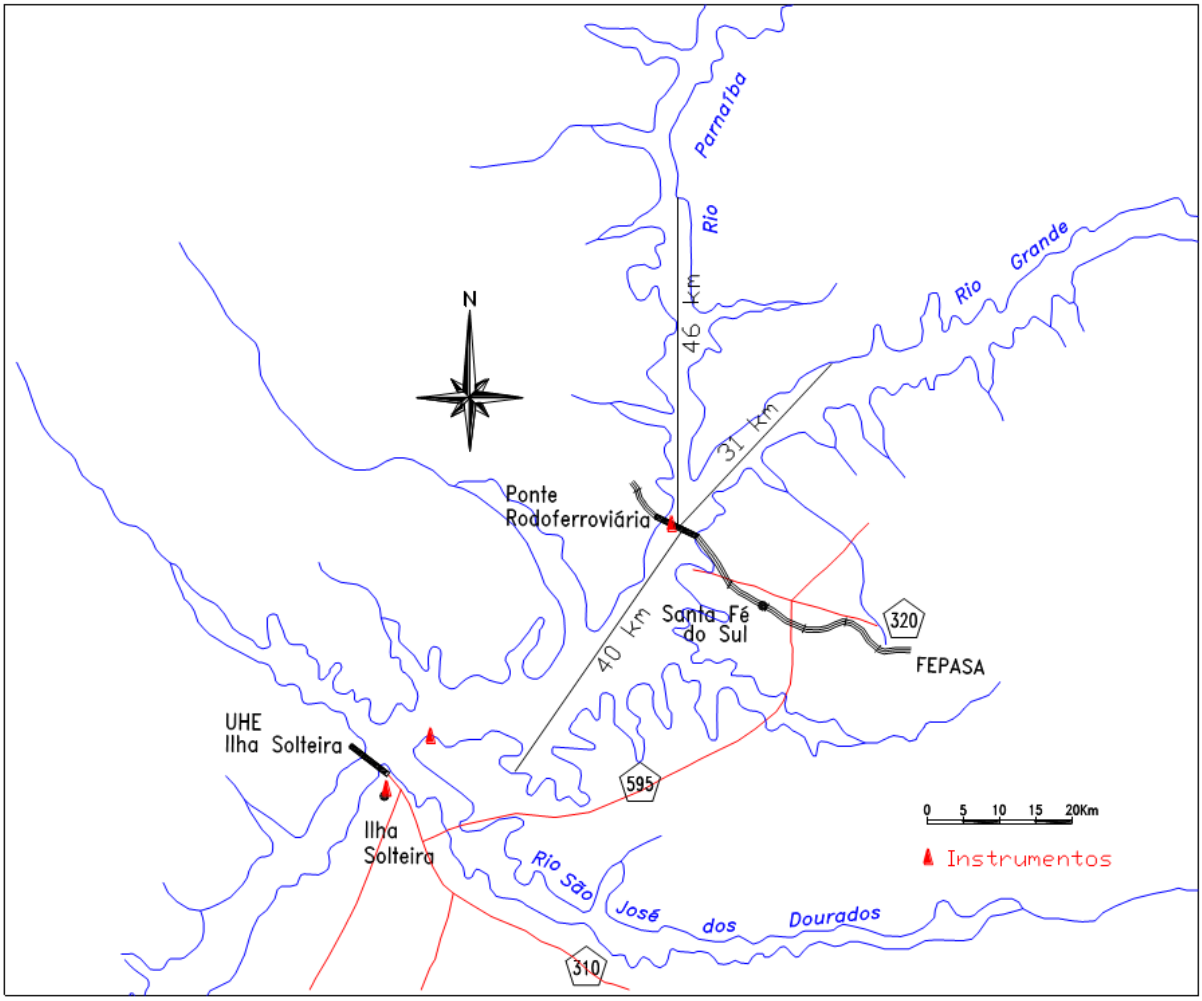
A hidrovia é de extrema importância para o escoamento de grãos dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e parte de Rondônia, Tocantins e Minas Gerais. Outrossim, o transporte hidroviário é de grande viabilidade econômica, principalmente em relação ao rodoviário, mais difundido no país, e de custo de manutenção mais elevado (FREITAS, 2015).

Segundo a ANTAQ (Agência Nacional de Transporte Aquaviários, 2012), a equivalência entre modais fornece uma relação de 1 barcaça (900 ton), para 35 carretas (26 ton). Considerando um comboio (6 barcaças), a diferença se expande e atinge a equivalência de 210 carretas.

---

[1] Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/hidrovias/hidrovias-interiores/hidrovia-parana/TRECHOS_HIDROVIA_DO_PARANA.jpg/@@images/image.jpeg> Acesso em julho/2016.

Figura 2- Representação de trecho/rota da hidrovia Tietê-Paraná no reservatório de Ilha Solteira ï SP.




Fonte: Vieira, 2013.

Em termos de competitividade do mercado, vê-se nas hidrovias uma das melhores soluções para se reduzir os custos de transporte, uma vez que o Brasil possui uma extensa rede hidrográfica, que é pouco aproveitada.

Para a criação de novas hidrovias, e/ou ampliação/modernização das existentes, são necessárias grandes obras de engenharia, já que nem todos os pontos de um rio são navegáveis, dessa forma há a necessidade de construção de eclusas e canais de navegação.

Na perspectiva de maior utilização das hidrovias no transporte de cargas e maior taxa de ocupação da Tietê-Paraná, vê-se a necessidade de se incrementar e aprofundar em estudos sobre o acoplamento meteorológico-hidrodinâmico (vento *X* onda), com previsão de ondas geradas por ventos no reservatório da barragem de Ilha Solteira, seus efeitos relativos à segurança da própria navegação, efeito de ondas sobre processos de erosão de margens, transporte de sedimentos, entre outros.

Acidentes com impactos econômicos significativos têm sido reportados na literatura. Como exemplo, podem-se citar alguns acidentes ocorridos na hidrovia Tiete-Paraná, como fortes ventos em Ilha Solteira (em 17/10/2010), que derrubaram nove torres de transmissão da Usina Hidrelétrica. O vento danificou quatro das seis linhas de transmissão, impossibilitando a geração plena de energia pela UHE, que foi obrigada a abrir seus vertedouros para manter o sistema estável. Na ocasião, ondas da ordem de 1,5 m de altura foram estimadas no reservatório (VIEIRA, 2013).

Acidentes desta natureza, causando prejuízos semelhantes, têm sido também registrados em hidrovias do rio Mississipi (G1, 2011) e em trechos do rio Reno na Europa (REUTERS, 2011).

A análise e estudo de ondas geradas por ventos em recintos fechados, como reservatórios de barragens, têm ainda recebido, relativamente, pouca dedicação dos pesquisadores, *vis à vis* dos inúmeros estudos realizados em engenharia costeira. Vale lembrar que muitos dos nossos aproveitamentos hidroelétricos datam dos anos 60/70, e os poucos modelos disponíveis no tema são de natureza semi-empírica.

Um problema comum em reservatórios é o assoreamento, principalmente imediatamente à montante da hidréletrica, que pode ser devido à erosão das margens próximas ou devido ao transporte de sedimentos de trechos a montante. Tal fato colabora para a redução do potencial energético dos reservatórios das hidréletricas, bem como para a degradação ambiental/ecológica que afeta a fauna presente.

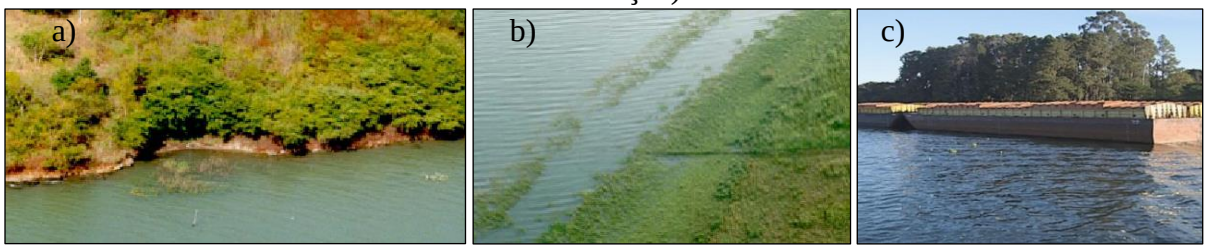
Em se tratanto de assoreamento de reservatórios, pode-se verificar nos estudos de Soares (2015) que a diminuição da capacidade de armazenamento do reservatório da hidrelétrica do Funil, por exemplo, foi da ordem de 1%. Este valor é maior que os prognósticos e que os valores de referência, da ordem de 0,5%.

Soares (2015) ainda afirma que o assoreamento está ocorrendo de forma mais acelerada nos últimos anos e, consequentemente, a sobrelevação do fundo do reservatório tem aumentado o risco de interferência e inundações em área de ocupação antrópica que cresce no entorno do mesmo.

Voltando ao contexto regional e ressaltando, como supracitado, a potencialidade da navegação para o noroeste paulista, esta pode ser prejudicada pela ação intensa de ondas geradas por ventos, trazendo prejuízos às embarcações, desestabilizando margens e acelerando processos erosivos (às vezes a desestabilização das margens pode ser acelerada devido às ondas geradas pela própria embarcação). Diante deste cenário, observa-se, em contrapartida, no caso do

reservatório da UHE de Ilha Solteira e tantos outros, que a própria natureza criou mecanismos para se proteger dos impactos gerados pelas ondas, como a vegetação às margens dos rios e lagos (Figura 3), que dissipa parte da energia proveniente das ondas, cujo mecanismo de dissipação (interação onda *X* vegetação) não é ainda totalmente esclarecido.

Figura 3 ï Processos erosivos nas margens do reservatório de Ilha Solteira ï SP (a) erosão da margem pelas ondas; b) amortecimento de ondas pela vegetação; c) geração de ondas por embarcação).




Fonte: adaptado de Vasco, 2005.

Apesar de ser de conhecimento geral que a vegetação atenua a energia proveniente das ondas, a solução adotada por muitas vezes são investimentos na construção de obras rígidas, como diques e quebra-mares (medidas estruturais), interferindo drasticamente na conformação ou *layout* natural. Entretanto, soluções alternativas (medidas não-estruturais) de obras que não alterem de modo considerável o ecossistema no qual estão inseridas ganham força nos dias de hoje, face ao apelo constante pela manutenção e proteção do meio ambiente como um todo.

O interesse por estudos e avaliações de coeficientes de dissipação de energia sobre campos vegetados é necessário, a fim de verificar e quantificar as perdas, na forma de altura significativa (energia potencial), de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens, minimizando seus efeitos erosivos em margens. Estudos nesse campo têm sido feitos em alguns países da Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, estudo dessa natureza, enquanto pesquisa, (aspectos biomecânicos / interação vento *X* onda *X* vegetação) teve seu início com a Rede "Amigos de Boussinesq - Rede Cooperativa de Pesquisa sobre Hidrodinâmica Costeira e de Águas Rasas", (UFRJ, UNESP, UFRGS), com apoio da Capes, e estendida para outras IES (Instituições de Ensino Superior) e laboratórios e universidades portuguesas.

Nos lagos, devido às alterações antropogênicas, o restabelecimento da vegetação aquática nativa é altamente desejável, especialmente nos locais de solos friáveis e erodíveis, pois a vegetação auxilia a conservação e complementa os corredores para proteção da biodiversidade e o *habitat.*

Ainda que poucos, os estudos nesse tema têm sido feitos em situações idealizadas em laboratório (LIMA et al., parte 2, 2007), na natureza, através da instalação de sensores de

velocidade de vento e nível da superfície livre (VIEIRA et al., 2013), o que sempre exige uma logística mais complexa, vindo se complementar com a abordagem numérica.

No que tange à simulação numérica, o modelo utilizado, nessa dissertação, é, na sua base, o SWAN (*Simulating WAves Nearhshore*), modelo de geração e propagação de ondas, utilizado para obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, a partir de campos de vento, batimetria e correntes. Desenvolvido na *Delft University of Technology* (TUDelft), Holanda, o SWAN é classificado como modelo de 3º geração[2] permitindo obter parâmetros das características da agitação marítima desde águas profundas a águas rasas. Em estudos anteriores, como o de Vieira et al. (2013), entre outros, este modelo apresentou bom desempenho na previsão de ondas geradas por ventos, com resultados significativamente próximos aos medidos, para o reservatório de Ilha Solteira.

Devido à necessidade de quantificar e analisar a influência que um determinado campo de vegetação produz sobre as ondas incidentes, a *University of Twente e Deltares (Delft)* introduziram no modelo SWAN o efeito da vegetação, representada por obstáculos cilíndricos rígidos. Este modelo é baseado no método desenvolvido por Dalrymple et al. (1984), Kobayashi et al. (1993) e Mendez e Losada (2004), com validade em ambientes oceânicos. O modelo aprimorado recebeu o nome de SWAN-VEG (OUDE, 2010 e SUZUKI et al. 2011), com o qual é possível analisar os efeitos da vegetação sobre as ondas, como a dissipação de energia.

Voltado a ambientes lacustres ou zonas confinadas, o trabalho de pós-doutoramento de Vieira (2014), do Grupo de Ondas Gravitacionais da Unesp, foi desenvolvido em colaboração com o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa-Portugal), utilizando o modelo SWAN-VEG. Este foi aprimorado e adaptado para o reservatório de Ilha Solteira com os parâmetros de vegetação para ambientes lacustres. Parâmetros esses como altura, diâmetro, densidade de plantas e coeficiente de arrasto, os quais são introduzidos de acordo com o caso a ser estudado. O parâmetro de vegetação ($\Pi$, resultado do produto de três parâmetros (diâmetro $X$ densidade de plantas $X$ coeficiente de arrasto), varia de 0 a 20 (OUDE, 2010).

Assim, utilizar-se-á o modelo numérico SWAN-VEG a fim de determinar e quantificar efeitos de atenuação das ondas para casos sem vegetação e com presença de vegetação de fundo. Dessa forma será possível analisar a influência da presença da vegetação na dissipação de energia e

[2] Estado da Arte sobre mecanismos de geração de ondas por vento e de modelos numéricos de geração.

amortecimento das ondas geradas por ventos e, mais detalhadamente, a influência do refinamento de malhas nos resultados. Cabe, por fim, lembrar que a proposta numérica (coeficientes de atenuação de ondas pela vegetação), traduz-se em elemento de supra importância na determinação da matriz de fragilidade do entorno do reservatório[3].

Vale observar que as boas estimativas de ondas produzidas pelo modelo estão diretamente ligadas à calibração e fidedignidade dos dados inseridos (qualidade dos dados de entrada).

[3] Fragilidade entende-se como respostas de maior, ou menor intensidade no entorno do reservatório a agentes internos (tipos de solos, tipo de vegetação, ocupação, etc) e externos (ação eólica, ação de ondas, etc).

# 2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo principal analisar a influência da vegetação na redução da altura das ondas (dissipação de energia) junto às margens do reservatório de Ilha Solteira ï SP, através do software SWAN-VEG (OUDE, 2010 e SUZUKI et al., 2011), com refinamento de malhas.

Ademais, pretendeu-se aplicar o modelo SWAN-VEG a fim de analisar os resultados simulados com os modelos de dissipação de energia devido à presença de vegetação disponíveis na literatura, como quantificar os fatores de atenuação para uma determinada zona de estudo. Por fim, confrontrar resultados numéricos com a formulação proposta por Lima (2005).

# 3 ESTADO DA ARTE

## 3.1 Geração de Onda pelo Vento

Existem diversos modelos matemáticos que relacionam a altura significativa de onda[4] com os ventos que sopram nas diversas direções, todavia, ainda hoje não há um modelo universal que englobe as diversas características observadas em diferentes regiões do globo, no que diz respeito à vasta gama de períodos de ondas, que, basicamente, definem três zonas distintas, quais sejam, águas profundas, intermediárias e rasas, além da influência de correntes marinhas, efeitos de maré, entre outros.

Os estudos no campo de ondas gravitacionais tiveram grande expansão durante a segunda guerra mundial, uma vez que a importância das forças navais no embate levou a marinha dos Estados Unidos a investir nesse campo, e dessa forma, muitos modelos de previsão de ondas gravitacionais vêm sendo desenvolvidos e empregados operacionalmente por diversas instituições de pesquisa e organismos internacionais, em especial na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Exemplos atuais são o *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* ð ECMWF (Reino Unido), o *Fleet Numerical Oceanography Center* (EUA), a *National Oceanic and Atmospheric Administration* ð NOAA (EUA), o *British Meteorological Office* (Reino Unido), o *Koninklijke Nederlands e Meteorologisk Institutt* (Holanda), o *Scripps Institution of Oceanography* (EUA), o *Instituto per lo Studio dela Dinamica dele Grandi Masse* (Itália), entre outros. Em Portugal, modelos operacionais de previsão de agitação marítima são utilizados pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa, pelo Instituto de Meteorologia, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e pelo Instituto Superior Técnico (através do Centro de Tecnologia Marinha e Ambiental, MARETEC, e da Seção Autônoma de Engenharia Naval, SAEN). A grande dependência dos dados de ventos faz com que a maioria dos modelos de ondas sejam operados por agências meteorológicas.

Em 1991, segundo a *World Meteorological Organization* (WMO, 1988 e LAVRENOV, 2003), já eram mais de quarenta modelos numéricos de previsão de ondas geradas a partir de ventos, sendo utilizados em mais de dezessete países em todo o mundo, o que implica num leque com muitas possibilidades. Assim, a modelagem de previsão de ondas passou rapidamente de uma escala regional para uma global, com uma diversidade de fundamentação teórica notável. Estes modelos são caracterizados pela sua heterogeneidade de fundamentação, já que a modelagem

---

[4] Altura significativa de onda: representa a média do terço superior de todas as ondas analisadas durante o período considerado.

dos fenômenos de agitação é complexa, com parâmetros das ondas variando significativamente. Dessa forma, fica evidente a grande dificuldade da descrição matemática dos fenômenos ondulatórios e assim é possível perceber como é difícil a criação de um modelo universal, completo e que englobe todos os fenômenos passíveis de serem verificados ao nível da agitação. Em contrapartida, um ponto positivo de existirem diversos modelos é a vantagem de se poder adotar o modelo mais apropriado ao caso de estudo, evitando, assim, o prolongamento desnecessário dos tempos de cálculo, por exemplo.

A formação das ondas geralmente ocorre devido aos ventos através da transferência de quantidade de movimento à superfície livre. O mecanismo de interface, turbulento, provoca mudanças de pressão na superfície livre, produzindo pequenas ondas com comprimentos quase insignificantes. A ação do vento sobre estas pequenas ondas faz com que haja variações de pressão ao longo do perfil de onda, fazendo as mesmas crescerem de forma exponencial. Depois da formação das ondas, essas viajam para fora da sua zona de geração transportando energia com pequenas perdas, adquirindo, assim, um aspecto bidimensional (ondas de crista longa) denominadas ondulação (*swell)*, tendo por característica, períodos elevados e comprimentos de onda superiores à sua altura da ordem de 30 vezes (PEREIRA, 2008).

As ondas que se propagam em direção à costa encontram profundidades cada vez menores, o que faz com que elas se transformem devido aos fenômenos de refração, difração e arrebentação, perdendo quase a totalidade de sua energia durante a quebra.

## 3.2 Modelos de Geração de Ondas

Devido à complexidade envolvida na criação de modelos numéricos que descrevessem as ondas, fez-se necessário, ao longo do tempo, aprimorar teorias, a fim de estudar os fenômenos de agitação, surgindo primeiramente as teorias de ondas regulares seguidas das teorias de ondas irregulares ou randômicas.

No âmbito do estudo das ondas regulares podemos citar, a teoria linear de ondas (AIRY, 1845) e as teorias não lineares de ondas. A teoria de Airy adota que os movimentos da superfície livre podem ser descritos por uma função senoidal perfeita. Esta teoria pode ser aplicada em águas profundas e para ondas com baixa amplitude, ou seja, quando a amplitude da onda é muito pequena em relação ao comprimento e/ou com a profundidade. Por sua vez, as teorias não lineares demonstram o comportamento das ondas quando têm grande amplitude relativa ou quando se aproximam de zonas menos profundas. Dessa forma, a superfície não pode mais ser

considerada como uma senoide perfeita. Autores clássicos em teorias não lineares de ondas são Stokes (1847, 1880), Boussinesq (1871), Bretschneider (1960) e Fenton (1985).

Gelci et al. (1957) foram os pioneiros no desenvolvimento de um modelo de previsão de ondas baseado na equação diferencial de transporte de energia. Devido à falta de teorias apropriadas, eram utilizadas expressões empíricas para a determinação da evolução espectral. Com base nos estudos de Phillips (1957) e Miles (1957) sobre os processos de geração de ondas, principalmente as interações do campo de velocidades do vento com a superfície da água, aliados aos estudos de Pierson e Moskowitz (1964) sobre o espectro, foi aberto o caminho para a elaboração de modelos de ondas ditos modelos de **primeira geração**. Nos modelos de primeira geração, cada componente do espectro de energia propaga-se com a sua própria velocidade de grupo, desenvolvendo-se de forma independente em relação às demais, até atingir um nível individual de saturação. A interação não linear é desprezada ou, se parametrizada, pouco significativa, sendo representada de uma forma simples (WMO, 1988). Os principais erros associados a este tipo de modelo parecem ser a subestimação do crescimento das ondas, por superestimar a transferência de energia do vento para as ondas e subestimar a interação não linear entre ondas na região de alta frequência.

Na década de 70 foram desenvolvidos os modelos denominados de **segunda geração** com base nos estudos de Hasselmann et al. (1973), que após análise de dados do *JOint North Sea WAve Project* (JONSWAP), observaram que o espectro não se encontra completamente desenvolvido devido a interações não lineares ondaï onda. Estas interações provocam a transferência de energia dentro do espectro. Neste tipo de modelo a interação não linear é representada através de parametrizações, o que impede o crescimento independente dos diversos componentes do espectro.

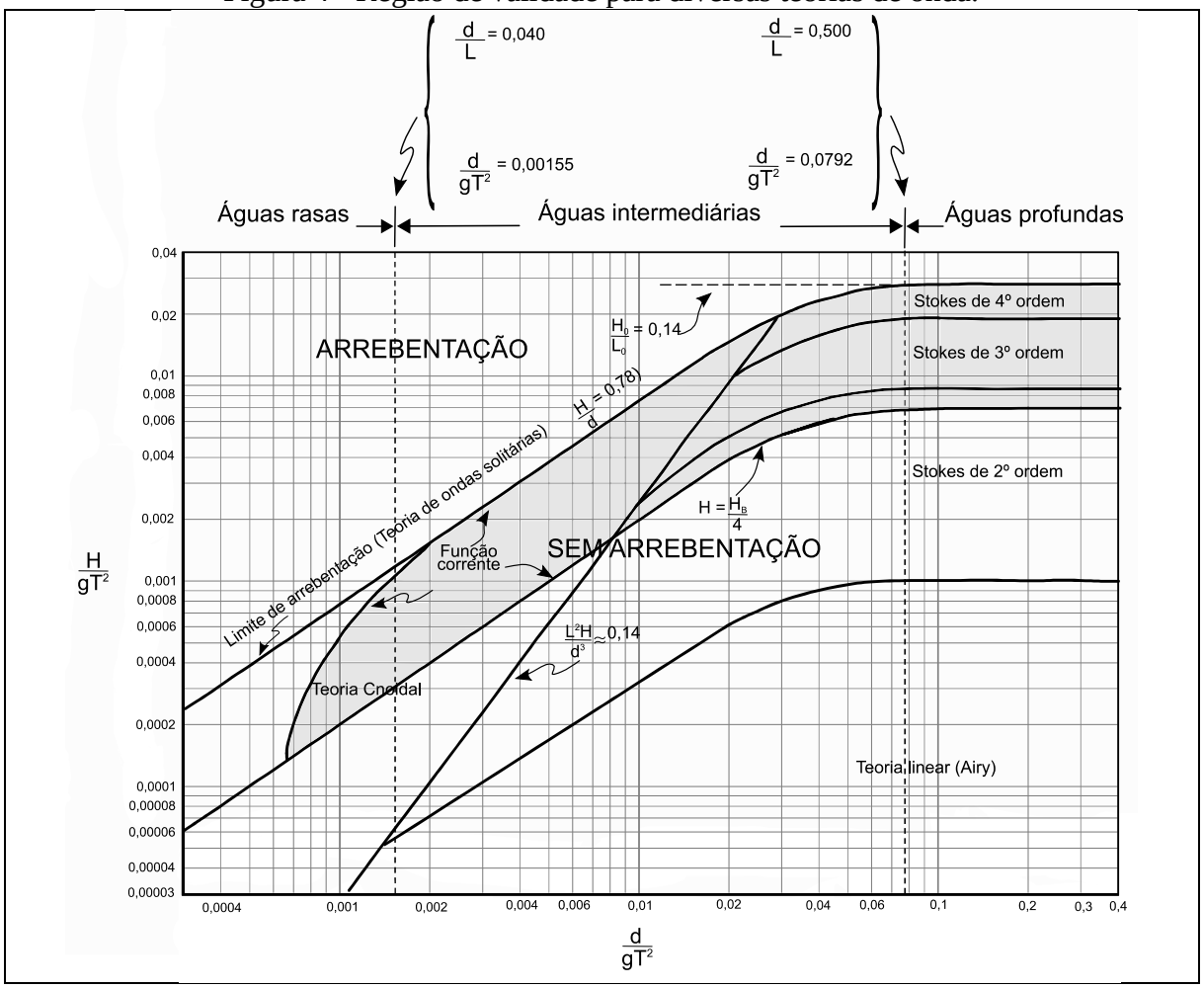
Atualmente temos os modelos ditos de **terceira geração**, os quais são distintos dos de segunda devido ao método de solução da interação onda-onda, desse modo os componentes podem propagar-se pela malha em diversas direções.

Alguns modelos de terceira geração são o WAM (*WAve Model*) e o WW3 (*WaveWatch 3*), desenvolvidos na *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (HASSELMANN et al., 1988, KOMEN et al., 1994). O WW3 é um modelo global de ondas, utilizado para previsões em todo o globo, e pode ser utilizado para malhas fora da zona costeira, enquanto que o WAM é resultado da primeira tentativa de implementação de um modelo de ondas operacional de terceira geração.

Outro modelo bastante difundido é o SWAN *(Simulating WAves Nearshore)* (BOOIJ, HOLTHUIJSEN, RIS, 1996), desenvolvido na Faculdade de Engenharia Civil e Geociências de Delft, Holanda, o qual apresenta atributos em comum com o WAM, como a geração da onda, crescimento e decaimento desta devido ao vento, ao atrito com o fundo ou à interação entre ondas e fenômenos de refração, além da propagação, e fenômeno de arrebentação, em zonas costeiras. Apesar do modelo SWAN poder ser utilizado para simulações desde o largo até a zona costeira, pesquisadores geralmente utilizam outros modelos com resolução de fase, como os modelos do tipo de Boussinesq (1871) ou do tipo fundo suave de Berkhoff (1972 e 1976) para estudos em zonas costeiras.

Um modelo considerado mais simples, em relação aos supracitados, é o STWAVE 3.0 (*STeady state spectral WAVE, 2001*) criado pelo *Coastland Hydraulics Laboratory* e *US Army Engineer Research and Development Center*, o qual simula a propagação das ondas desde o largo até as zonas junto à costa, podend ser utilizado para estudar o comportamento das ondas na vizinhança de estruturas portuárias.

Figura 4 - Região de validade para diversas teorias de onda.




Fonte: Adaptado de *Le Mehaute* 1969, *apud Shore Protection*, 1984 (pág. 2-33).

De modo geral, os modelos de geração e propagação de agitação podem ser classificados em três categorias (águas profundas, intermediárias e rasas) *(SHORE PROTECTION MANUAL*, Vol. 1, 4 ed., 1984)), relacionados aos fenômenos físicos que descrevem e a escala da sua aplicação (Figura 4), podendo estar mais focados para a representação das condições de geração de ondulação ao largo, para as condições de propagação até a zona costeira, ou então, focalizados nos processos físicos que ocorrem na zona de arrebentação.

Os parâmetros constantes na Figura 4 referem-se à profundidade relativa (*d/L*), período (*T)*, altura significativa de onda (*H*), comprimento de onda (*L)* e aceleração gravitacional (*g*).

### 3.3 Estudos de Atenuação de Ondas pela Vegetação

A importância da vegetação costeira na proteção da costa tem sido cada vez mais reconhecida (KARAMBAS et al. 2016) . Sob o termo geral de ñvegeta-de *habitat* costeiros vegetados pode ser inclusa, como pântanos, leitos marinhos vegetados, florestas de algas e mangues, com diferentes funções na preservação do equilíbrio do ecossistema costeiro. Em geral, a vegetação é de suma importância para manter a biodiversidade (GREEN e SHORT, 2003), na sedimentação e estabilização de margens, e dessa forma, proteção contra inundação (BORUM et al., 2004; FONSECA e CAHALAN, 1992; TIGNY et al., 2007), e no amortecimento de ondas (KOCH et al., 2006; MENDEZ e LOSADA, 2004). Muitos parâmetros são significantes para a estimativa do grau de amortecimento de onda devido à vegetação.

O amortecimento de ondas também pode ser encontrado sobre fundos não vegetados devido à forma desses fundos, como ondulações, degraus (FREDSΠE, ANDERSEN e SUMER, 1999; FARACI, FOTI e MUSUMECI, 2008). Em tais casos, a atenuação da altura de onda pode ser atribuída a interação onda-fundo, ou seja, devido à rugosidade de fundo. Para a hidrodinâmica da onda e leitos marinhos vegetados, um sistema complexo de escoamento descreve a situação, desde que os leitos marinhos vegetados e o escoamento d´água possam interagir altamente acoplados, de maneira não linear (KOCH et al., 2006). Fato semelhante se processa às margens do reservatório.

Os primeiros estudos em campo, relatados na literatura, tinham como foco principal a determinação do grau de amortecimento de onda devido à vegetação baseados em medidas para diferentes leitos marinhos vegetados e pântanos (KARAMBAS et al., 2016). Ward, Kemp e Boynton (1984) estudaram uma enseada rasa colonizada por comunidade de leitos marinhos vegetados em Chesapeake Bay, EUA. O amortecimento de ondas em pântanos de capim-

marinho (*Spartina alterniflora*) foi quantificado no campo de estudo em Chesapeake Bay por Knutson, Seeling e Inskeep (1982). Os estudos demonstraram que este tipo de pântano foi capaz de diminuir cerca de 26% de energia incidente por metro de vegetação, amortecimento este dependente da densidade e altura das plantas, Med nos pântanos em North Norfolk, Inglaterra, indicam que a redução média da altura de onda através de 200 m de vegetação foi de até 63%. No estudo em campo no noroeste da baía da Flórida, onde as principais espécies de campo foram *Thalassia testudinum* e *Halodule wrightii*, Bradley e Houser (2009) mediram uma queda média de 30% na altura significativa de onda em 39 m de campo vegetação.

Seguindo à vertente experimental, num estudo de propagação de ondas através de um campo artificialmente vegetado (*Posidonia oceanica*) cobrindo metade do canal, Elginoz, Kabdasli e Tanik (2011) mostraram que a razão da altura de onda do lado vegetado do canal de ensaios, em relação ao lado sem vegetação, variou de 0,78 a 0,94. Recentemente, estudos experimentais em larga escala (KOFTIS, PRINOS e STRATIGAKI, 2013; STRATIGAKI et al., 2011) quantificaram o efeito da densidade de planta da *P. oceanica* artificial, a submergência, e período de onda para teste com ondas regulares e não regulares, respectivamente.

No contexto nacional, podemos citar os trabalho de Vasco (2005) e Lima (2005) que visaram investigar a dissipação da energia da onda quando esta se propaga por obstáculos naturais e artificiais. No primeiro estudo, o autor modela o aspecto dinâmico, fazendo analogia do comportamento dos organismos vivos (plantas) como vigas viscoelásticas engastadas no fundo, tendo a equação da dinâmica sido deduzida para um grupo particular de organismos (rígidos).

Vasco (2005) propõe uma formulação para atenuação através de uma função raiz quadrada (Equação 1) distinta das usuais. O autor afirma ter obtido bons resultados e ressalta que a calibração da equação foi feita a partir dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais. Outrossim, o autor explicita que o equacionamento não deve ser aplicado para extensos campos vegetados, pois não foi verificada sua validade.

$$\frac{\tilde{H}}{\tilde{H}_{lm}} = \sqrt{\frac{\omega}{\alpha_{\omega}}} \qquad (1)$$

sendo $\alpha_{\omega} = \frac{\rho_{veg}}{\rho_{lm}}$, onde $\tilde{H}$ é a altura de onda loca, $\tilde{H}_{i}$ a altura de onda incidente, $\omega$ o eixo de deslocamento longitudinal (VASCO, 2005) e $\tilde{H}_{c}$ a energia de onda incidente, .

Lima (2005), por sua vez, propôs uma abordagem para a determinação do amortecimento de ondas de gravidade propagando-se sobre campos de vegetação para espécies de grande

flexibilidade. O modelo desenvolvido pelo autor passa a depender de um único parâmetro, o coeficiente de arraste, para estimar uma haste em um período de onda.

A estimativa do coeficiente de arraste proposta por Lima (2005) é de difícil aplicação para a simulação numérica, uma vez que depende de parâmetros locais da onda, como ΌΩ, altura de onda e ü, comprimento de onda, conforme Equação 2:

$$\ddot{O}_{\ddot{-}} \text{ سي } \rho\hbar\upsilon\varphi \frac{\text{ح ز و ص و } \tilde{I}}{\text{ح ؤ و ص و } \text{ر}} \qquad (2)$$

sendo ΌΩ a profundidade local e ر o diâmetro da planta.

O autor afirma obter 15% de atenuação na altura de onda utilizando 1600 plantas por metro quadrado num campo de 3 m de extensão. As características deste experimento específico foram: ΌΩ سي πħχ ά ή ί سي πħφ ά ή ΌΥ سي ρ ί ή ΌΟح سي πħπυ ά ή ü سي ρħυχ ά ΌΩ ر سي φ ά ά ή

Vale salientar que este percentual de atenuação se deu num campo vegetado da ordem de duas vezes o comprimento de onda.

Mais recentemente, Karambas et al. (2016) afirmam que modelagens numéricas de mecanismos de atenuação de onda são uma demandas desafiantes, uma vez que parâmetros de rigidez e flexibilidade com o movimento da onda são difíceis de modelar. As primeiras aproximações teóricas foram sobretudo baseadas na teoria linear de onda (DALRYMPLE et al., 1984; KOBAYASHI et al., 1993). Chen et al. (2007) desenvolveram um modelo que leva em consideração a interação entre as ondas, correntes e transporte de sedimento em sistemas de leitos marinhos vegetados dentro do modelo de circulação *nearshore* SHORECIRC e do modelo de ondas REF/DIF.

De acordo com Suzuki et al. (2011), diferentes modelos numéricos e analíticos têm sido propostos nas últimas três décadas na tentativa de reproduzir a hidrodinâmica dentro dos campos vegetados a respeito da dissipação da energia da onda. Uma aproximação frequentemente utilizada é considerar um atrito ou uma rugosidade de fundo como um parâmetro de vegetação (HASSELMANN e COLLINS, 1968; van RIJN, 1989). Contudo, tomadas de dados são necessárias a fim de ajustar o modelo para diversos tipos de vegetação.

Outra aproximação encontrada é a consideração da vegetação como elementos estruturais, geralmente cilíndricos, e estimar a dissipação através de força resultante (DALRYMPLE et al., 1984; KOBAYASHI et al., 1993; VASCO e MACIEL, 2007; VO-LUONG e MASSEL, 2008).

Estes modelos de atenuação de ondas pela vegetação assumem que a Teoria Linear de Onda (Teoria de Airy, 1845) é válida dentro do campo vegetado.

Dalrymple et al. (1984) propuseram uma fórmula para o amortecimento de ondas pela vegetação que considera extensão de cilindros na coluna d´água para ondas com incidência normal e constante, e com profundidade arbitrária. Os pesquisadores sugerem a utilização de um coeficiente de arrasto que leve em conta todas as aproximações e fatores não considerados na formulação. A fórmula de amortecimento de ondas foi obtida pela integração da equação de Morison et al. (1950) para uma força de arrasto devido à velocidade das ondas em função da altura do cilindro.

Mendez e Losada (2004) apresentam uma expansão da formulação de Dalrymple et al. (1984), que inclui a possiblidade da esquematização da vegetação, além das condições de inclinação de fundo e quebra de ondas. Foi assumido que a força de arrasto é uma força dominante, com o coeficiente de arrasto parametrizado em função do número de Keulegan-Carpenter[5] para representar a transformação da onda no campo vegetado.

Esta abordagem, segundo Suzuki et al. (2011), representa melhor os processos físicos com a vegetação desde que considere o diâmetro, densidade e altura de vegetação nos cálculos do coeficiente de arrasto. Ademais, esta formulação pode ser implementada em modelos numéricos de propagação de ondas como o SWAN, apenas calibrando o coeficiente de arrasto de acordo com o tipo de vegetação.

Bao (2011) analisou a atenuação de ondas pelos manguezais no Vietnam, considerando-os em duas regiões distintas. Foram efetuadas medições das estruturas dos mangues e altura de onda em pontos com diferentes distâncias da margem. Foi observada queda exponencial de altura de onda através da vegetação, e que a altura de onda local está intimamente relacionada à distância da margem. O autor afirma que a redução da altura significativa de onda depende da altura de onda inicial, da distância da margem e das estruturas dos mangues. Esta relação é utilizada para se estimar a largura necessária de manguezais para proteção contra as ondas na região de estudo.

Um modelo teórico de previsão de propagação de ondas através de manguezais não uniformes com profundidade arbitrária da água foi proposto por Vo-Luong e Massel (2008), tendo sido validado com dados experimentais do sul do Vietnã. Naquele estudo foi observado que a quebra

---

[5] O número de Keulegan-Carpenter é definido como: ̇ سي ; sendo: ́ a velocidade característica atuante na planta e definida como a máxima velocidade horizontal no meio do campo vegetado; ̈ o período de pico da onda; ̃ área de planta por unidade de altura normal à velocidade.

e interação das ondas com a vegetação são os processos dominantes de dissipação de energia naquela região.

Considerando ondas não lineares, Karambas et al., (2016) desenvolveram e aplicaram seu modelo de propagação de ondas para simulação da dissipação de energia sobre a vegetação. Neste modelo, o escoamento de superfície livre sobre a vegetação foi simulado pelo modelo de Boussinesq. Os parâmetros do modelo de escoamento são dependentes das características físicas da vegetação, enquanto que o coeficiente de arrasto foi adotado a partir de fórmulas existentes na literatura e relacionados com o número de Reynolds. O acoplamento entre os modelos de Boussinesq e de escoamento dentro da vegetação foram simulados, adicionando dois termos extras, devido à vegetação, um nas equação da continuidade e outro na equação de quantidade de movimento.

Estes pesquisadores observaram que os resultados numéricos encontrados estavam em concordância com diversos estudos experimentais de relevância na literatura. Para os autores, a vantagem da metodologia proposta é devido ao modelo ser baseado em teorias de ondas não lineares do tipo Boussinesq, com ampla gama de aplicações em engenharia e no meio científico (como ilustrado na revisão de BROCCHINI, 2013), além de não ser necessária a calibração dos coeficientes do modelo de escoamento pela vegetação (*canopy*). Ademais, uma fórmula adimensional e simples (Equação 3), segundo os autores, foi extraída dos resultados para estimar o fator de atenuação dependendo do campo e dos parâmetros da onda. A equação foi ajustada com índice de correlação expressivo de ˈϒ˙ سي πϧωρρ.

$$\dot{\upsilon}_{\text{ب}} \text{ سي } \frac{\bar{\text{I}}}{\bar{\text{I}}_{\text{ع}}} \text{ سي } \text{طي}\pi\ddot{\text{ϧ}}\tau\psi \text{ طي } \varphi\ddot{\text{ϧ}}\varphi\varphi \frac{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طى } \rho\ddot{\text{ϧ}}\rho\varsigma \frac{\acute{\text{ؤ}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طى } \rho\chi\ddot{\text{ϧ}}\varphi\pi \frac{\text{ثُ}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طى } \rho\varsigma\ddot{\text{ϧ}}\chi\chi \frac{\bar{\text{I}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طى } \varsigma\sigma\ddot{\text{ϧ}}\varphi\psi \frac{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طي } \pi\ddot{\text{ϧ}}\upsilon\chi \frac{\acute{\text{ؤ}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طى}$$

$$\text{طى}\chi\rho\ddot{\text{ϧ}}\varsigma\pi \frac{\text{ثُ}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \text{ طي } \varsigma\omega\tau\ddot{\text{ϧ}}\pi\varphi \frac{\bar{\text{I}}}{\text{ثن}\acute{\text{ؤ}}} \qquad (3)$$

Sendo: $\dot{\upsilon}_{\text{ب}}$ o coeficiente de amortecimento de onda; ˈΟ a altura da onda amortecida (local); ˈΟ$_{\text{ي}}$ a altura da onda incidente; ϋ$_{\text{ت}}$ o comprimento do campo vegetado; ϋ$_{\text{ز}}$ a escala do comprimento de arrasto da vegetação; ϋ o comprimento o comprimento total do canal de testes; ˈΩ a altura da lâmina d´água.

### 3.4 Estudos de Ondas Geradas por Ventos através do modelo SWAN e efeitos de Atenuação pela Vegetação na versão SWAN-VEG

Utilizando o modelo base (SWAN), Capitão e Fortes (2011) analisaram, de forma comparativa, as medidas *in situ* com as simuladas pelo modelo numérico na Praia da Amoreira em Portugal,

donde foi possível reafirmar a confiança já existente no modelo, uma vez que os dados de campo foram bem representado. Dessa forma, os autores reafirmaram a validade do modelo nos estudos de morfodinâmica e dinâmica costeira.

No trabalho realizado por El Mekadem et al. (2011), na costa noroeste do Marrocos, entre Asilah e Larache, foi efetuado um estudo a fim de caracterizar as ondas que incidem na costa atlântica e determinar a influência destas ondas sobre o carreamento de sedimentos pela costa. Neste estudo foi observado que as ondas dominantes provinham de NO (75% do tempo), e com a utilização do modelo numérico SWAN, obtiveram-se as propagações das ondas desde águas profundas até a zona de estudo. Neste estudo foi possível caracterizar a influência das ondas dominantes com altura média de 1,2 m e período de aproximadamente 10,5 s (ao largo), que quando alcançavam a costa, possuíam altura e período estimado de 0,4 m e 5 s, respectivamente, com carreamento de sedimentos paralelamente à costa, direção NE.

Mais recentemente, Matos et al. (2013) realizaram uma análise comparativa entre a simulação da agitação de ondas no litoral setentrional do Rio Grande do Norte e os dados medidos *in situ*. Neste estudo foi observado que a altura significativa de onda simulada pelo SWAN subestimou as alturas significativas medidas em campo, no entanto, vale ressaltar que o ponto de análise se situava em região de águas rasas. Ademais, os autores consideraram satisfatórios os resultados obtidos no estudo, uma vez que foi possível caracterizar o estado de agitação marítima em zona costeira rasa.

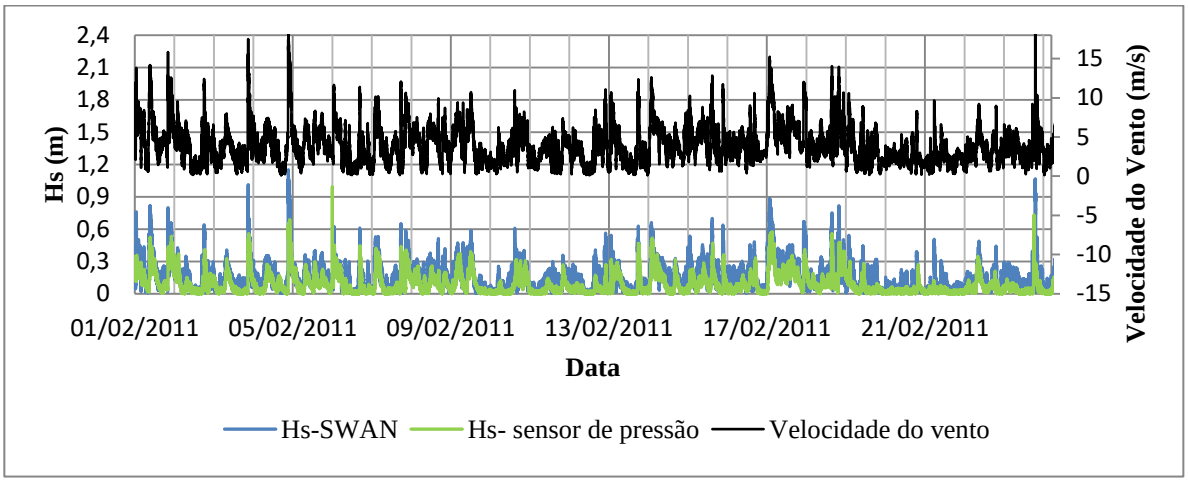
Viola et al. (2013) realizaram um estudo de caracterização de agitação marítima na costa de Maputo (Moçambique), utilizando a teoria de propagação linear de ondas e o modelo SWAN, além de um banco de dados de 13 anos de registros de ondas fornecidos pelo NOAA. No estudo foi possível observar que algumas ilhas contribuíam para a diminuição da altura de onda, outrossim, observou-se o carreamento de sedimentos prioritariamente para o norte, efeito este em concordância com a direção de ondulação mais frequentes.

Bever e MacWilliams (2013) utilizaram o SWAN juntamente com o *UnTRIM*, e com o *SediMorph* a fim de simular a influência dos ventos e das correntes de maré sobre o transporte de sedimentos na baía de São Francisco ï EUA. Após a validação do modelo, foi observado que o mesmo pode simular, com boa precisão, a hidrodinâmica, as ondas e a concentração de sedimentos em suspensão.

Vieira et al. (2013) realizaram um estudo utilizando o modelo SWAN no reservatório da barragem de Ilha Solteira ï SP, no qual foi realizada uma comparação entre os resultados

simulados pelo SWAN com os dados medidos *in situ*, donde os autores afirmam a fidedignidade dos resultados simulados pelo modelo aos dados experimentais medidos em campo. Foi verificado que as simulações numéricas sempre superestimavam a altura significativa de onda (Figura 5), donde a necessidade de estudos mais aprofundados acerca do tema.

Figura 5 - Representação das alturas significativas de ondas e ventos, para o período de 01 a 23 de fevereiro de 2011.




Fonte: adaptado de Vieira, 2013.

No tocante ao amortecimento de ondas pela vegetação, um dos parâmetros mais difíceis de ser determinado é o $C_D$ (coeficiente de arrasto). Com o intuito de fornecer um método prático para a estimativa deste coeficiente para um campo vegetado, e considerando o efeito de empolamento para ondas randômicas em condições antes e depois da quebra, Henry e Myrhaug (2013) utilizaram as fórmulas empíricas para o coeficiente, obtidas por Mendez e Losada (2004), onde incluíram os efeitos de empolamento e quebra de ondas na distribuição das alturas. Os autores concluem que o equacionamento obtido retrata, de forma satisfatória, os efeitos nas proximidades das margens, e ressaltam que tais resultados devem ser utilizados como estimativa inicial.

Em se tratando de SWAN-VEG, uma das primeiras utilizações do modelo foi feita por Oude (2010), em cujo estudo foram efetuadas simulações a fim de se estabelecer a altura de onda para o dimensionamento de um dique de proteção para uma área próxima ao *Fort Steugat* (Holanda). Foi observado que a inserção de vegetação e execução de um aterro atuaram como atenuadores de ondas, permitindo, assim, reduzir a altura do dique em 1,2 m (de 5,5 m para 4,3 m).

O estudo de casos de Oude (2010) contou com um campo vegetado de 80 m. e a vegetação foi locada num aterro em frente ao dique. De acordo com as simulações no SWAN-VEG, o aterro e a vegetação reduziram a altura de onda entre 68 % a 76%. Os resultados mostraram crescimento das ondas no interior do campo de vegetação devido ao vento, o que não é realista,

pois a água é abrigada do vento devido à vegetação emergente. Compensando os resultados para este efeito, não assumindo vento dentro do campo de vegetação, a redução da altura da onda foi de até 80%.

Ainda no seu trabalho, Oude (2010), faz análise de sensibilidade e validação do modelo numérico SWAN-VEG. Afirma que para vegetação rígida o coeficiente de arrasto é aproximadamente 1 (valor máximo), e menor para plantas flexíveis.

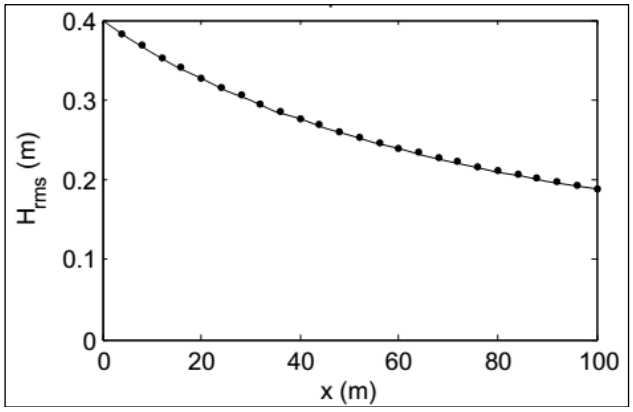
Nesta análise foi observado que o decaimento da altura de onda através do campo vegetado não é linear, sendo mais visível para parâmetro de vegetação igual a 20. Também observou-se o distanciamento entre os resultados do SWAN-VEG e Mendez e Losada (2004) com o aumento do parâmetro de vegetação, sendo que o SWAN-VEG tem menor redução de altura de onda quando comparada à Mendez e Losada (2004). Todavia, apresentam comportamentos semelhantes.

Em relação à submergência, observaram-se resultados semelhantes nos casos em que a vegetação esteve até o limiar da superfície d´água. Considerando plantas emergentes, os resultados do SWAN-VEG não sofrem modificação, diferente do equacionamento de Mendez e Losada (2004), onde observamos o contínuo decaimento da altura de onda.

De modo geral, Oude (2010) afirma, após sua análise de sensibilidade, que o SWAN-VEG é adequado para ondas com períodos maiores que 2 s, sendo que a dissipação de energia pode ser exagerada e inexplicada fisicamente para períodos de onda menores.

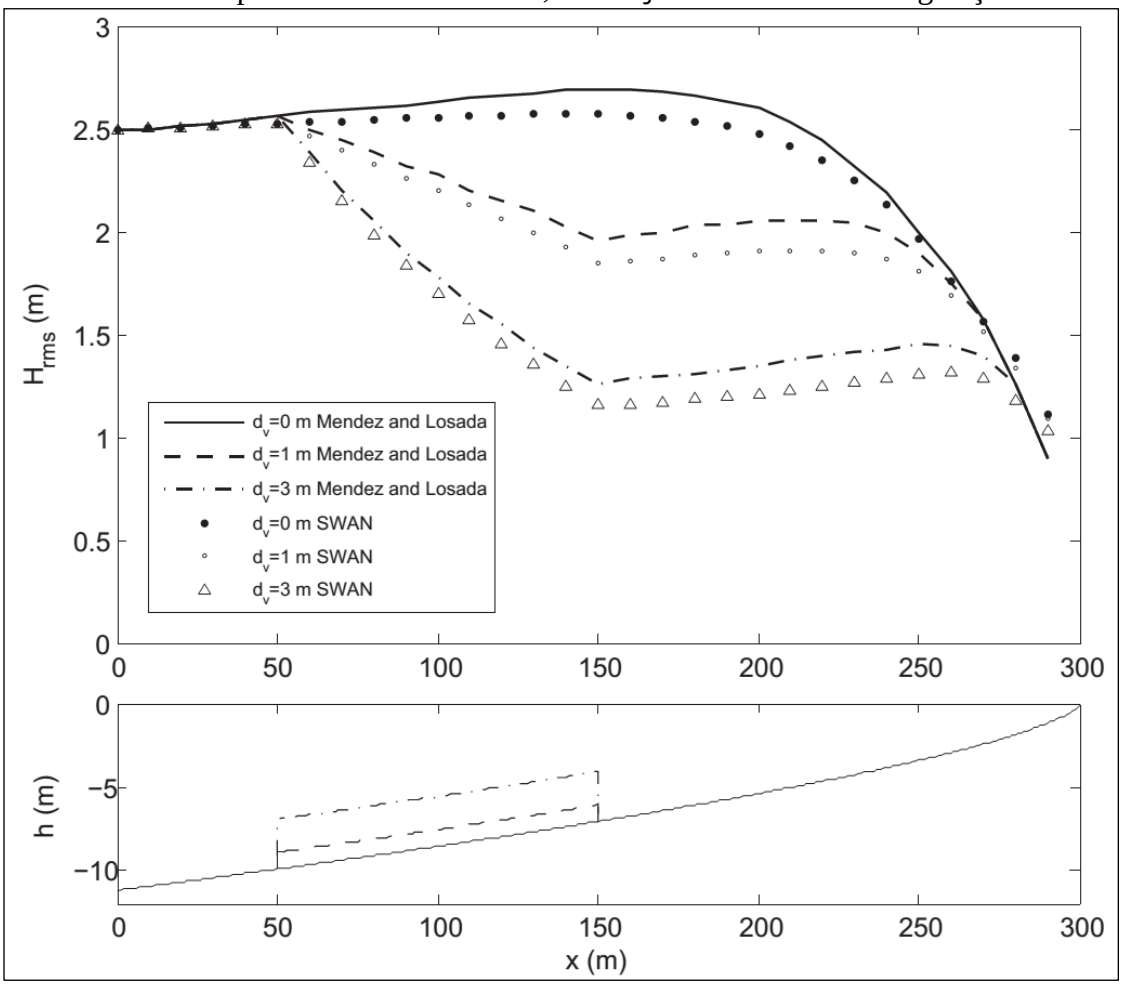
Dando seguimento a esta linha de pesquisa, Suzuki et al. (2011) estudaram como a propagação de energia da onda é dissipada através da vegetação. No estudo, foram considerados os equacionamentos de Dalrymple et al. (1984), que estimavam a dissipação de energia da onda considerando a vegetação como um cilindro vertical, e o equacionamento de Mendez e Losada (2004), que incluíram a variação de profundidade e o efeito de quebra de ondas randômicas. As comparações feitas no estudo levaram em consideração os resultados originais obtidos por Mendez e Losada (2004) para validar o modelo SWAN-VEG (com ŏ ّ سي ρ , conforme Figura 6 e Figura 7. O modelo tem a habilidade de calcular a dissipação da onda, em duas dimensões, através de um campo de vegetação incluindo alguns aspectos importantes, tal como quebra.

Figura 6 ï Comparação da evolução de ̈Ω$_{ζ ̈ζ}$ para o SWAN-VEG e para ondas randômicas de Mendez e Losada (2004) com período de 8 s.




Fonte: Suzuki et. al., 2011.

Figura 7 ï Comparação de altura de onda entre SWAN-VEG e Mendez e Losada (2004) através do perfil de forma de Dean, com ̈Ω$_{ɔ}$ sendo a altura da vegetação.

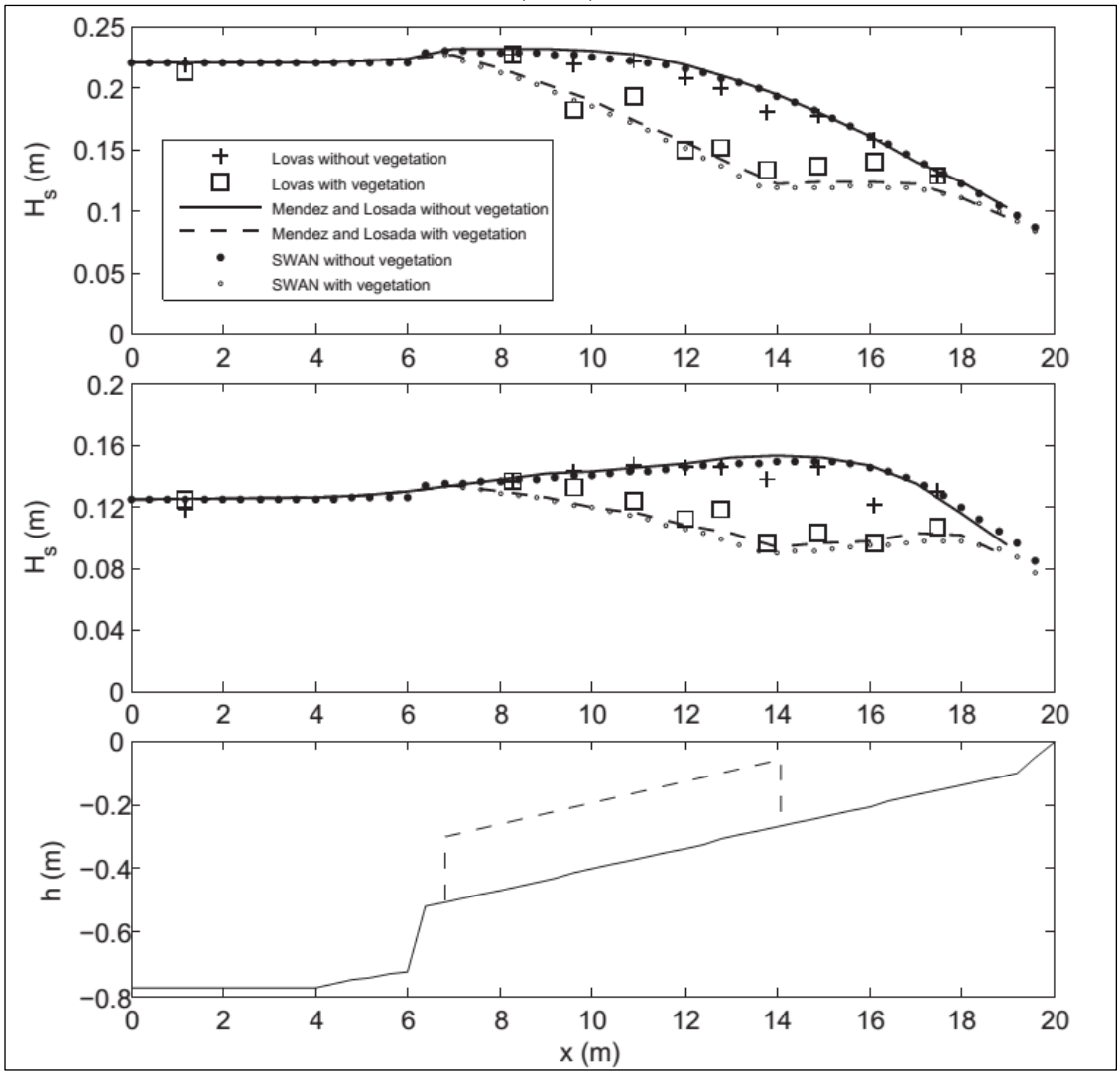



Fonte: Suzuki et. al., 2011.

Suzuki et al. (2011) analisaram estudos em canais e afirmam que as estimativas de altura de onda do modelo SWAN-VEG têm a mesma tendência que os estudos de Lovas (2000), e também observaram que os resultados do SWAN-VEG são semelhantes aos de Mendez e Losada (2004) para cada caso, com e sem vegetação conforme Figura 8. Dessa forma, os autores

afirmam que o modelo SWAN-VEG foi capaz de reproduzir os resultados de Mendez e Losada (2004), tanto para interação onda-onda, quanto para quebra de onda.

Figura 8 ï  Comparação de altura de onda: SWAN-VEG, Lovas (2000) e Mendez e Losada (2004).

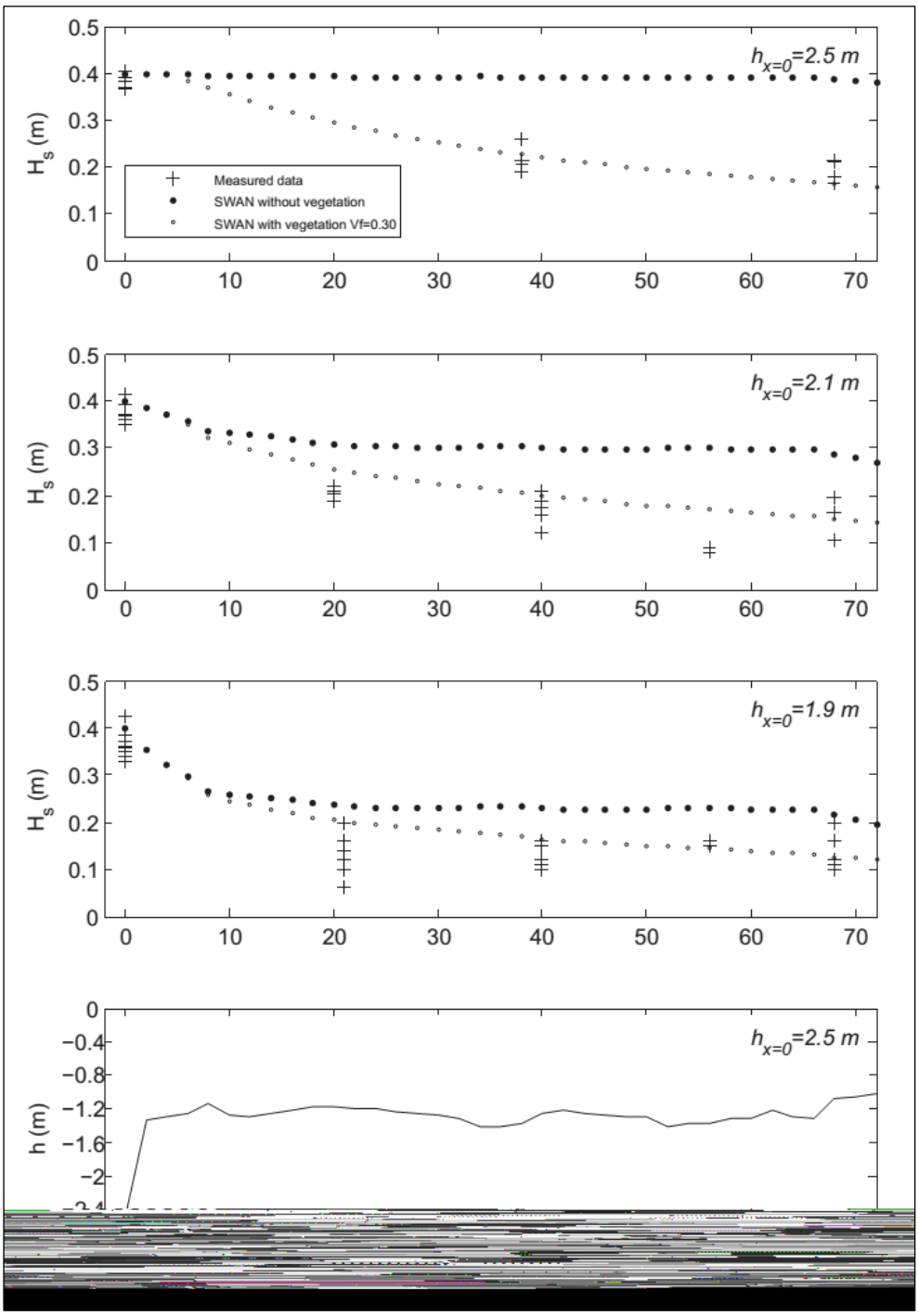



Fonte: Suzuki et al., 2011.

Não obstante, Suzuki et al. (2011) também validaram o modelo SWAN-VEG a partir de estudo de campo feito por Vo-Long e Massel (2006). Neste caso, como os autores não dispunham com precisão das características da vegetação, eles inseriram o conceito fator de vegetação ώ para um efeito generalizado. Como pode-se observar na

Figura 9, os autores afirmam que a dissipação de ondas também depende da batimetria. À medida que a profundidade relativa diminui, a dissipação de ondas se torna maior devido à perda de energia por quebra de onda.

Figura 9 ï  Comparação de altura de onda: Vo-Long e Massel (2006) e SWAN com ώ·Ω سي πΪσπ.




Fonte: Suzuki et. al. 2011.

Vieira et al. (2014), utilizando o modelo SWAN-VEG, executaram uma primeira análise acerca da influência da vegetação na redução da energia das ondas nas proximidades das margens do reservatório de Ilha Solteira ï  SP, e, para tanto, foram comparadas as simulações com e sem vegetação utilizando três malhas encaixadas (1000, 500 e 250 m), donde os autores observaram uma queda significativa na altura de onda nas proximidades das margens, sendo mais evidente