

## Interação Onda-Vegetação Submersa: Parte II: Modelo Físico e Numérico

**Joel Roberto Guimarães Vasco, Geraldo de Freitas Maciel**

Departamento de Engenharia Civil – FEIS – UNESP

*joel@dec.feis.unesp.br, maciel@dec.feis.unesp.br*

*Recebido: 31/03/06 – revisado: 13/10/06 – aceito: 27/11/06*

---

### RESUMO

*Este trabalho baseia-se na constatação de que ondas que incidem em margens protegidas pela vegetação aquática submersa são menos suscetíveis aos efeitos de erosão e/ou assoreamento do que margens desprotegidas. Neste âmbito, propõe-se um modelo de atenuação da energia da onda baseada na premissa de que toda energia dissipada por esta é transmitida integralmente à vegetação. As equações base do modelo numérico são obtidas a partir da analogia dinâmica entre a vegetação e vigas, dotadas de viscoelasticidade. Estas equações são discretizadas e acopladas com um modelo energético baseado nas equações de atenuação encontradas na literatura. Os resultados experimentais, quando da simulação da vegetação presente no sítio de estudo (margens do reservatório de Ilha Solteira-SP), foram comparados com os resultados do modelo numérico e teóricos, tanto no aspecto dinâmico quanto no energético, mostrando a potencialidade do modelo numérico desenvolvido.*

**Palavras-chave:** ondas gravitacionais, vegetação, dissipação de energia, interação onda-vegetação, resultados numéricos e experimentais.

---

### INTRODUÇÃO

A vegetação é um importante agente em margens de corpos de água e ecossistemas costeiros por influenciar processos de caráter químico, biológico e físico. Massel et al. (1999) afirma que, em áreas de manguezais, a interação entre as ondas e a vegetação vai além da interação mecânica. Nestas e em outros tipos de vegetação, processos bioquímicos estão intimamente relacionados ao movimento da água, devido às mares e ondas.

Em se tratando de processos físicos (ou mecânicos), notadamente a interação onda-vegetação submersa, a acomodação hidrodinâmica nas margens de corpos de água é fortemente influenciada pela presença da vegetação. Esse fato ocorre, por exemplo, em lagos artificiais de barragens, onde parte da energia do escoamento é atenuada pela vegetação, o que concorre para a proteção das margens e taludes de canais de navegação de ações erosivas e assoreamento.

No caso apresentado, a vegetação submersa apresenta-se como obstáculo ao escoamento, tanto para correntes quanto para escoamentos oscilatórios. Dessa forma, é provocada a estabilização do habitat, devido à diminuição da capacidade do fluido em suspender e transportar sedimentos, causado

pela diminuição da energia hidrodinâmica do escoamento.

No entanto, a determinação e previsão dos processos físicos com acurácia ainda figuram como desafios aos pesquisadores da área. Em termos de estudos acerca do assunto, existem poucas investigações dos processos físicos em lagos e estuários tropicais, quando comparados com aqueles feitos em estuários temperados. No entanto, o interesse da comunidade científica vem crescendo, tendo em vista problemas como defesa do litoral, elevação relativa do nível médio do mar, acesso a portos, entre outros.

Mais precisamente no que tange à interação energética entre escoamentos oscilatórios e a vegetação submersa, desconhecem-se os detalhes de tal fenômeno, além do que, há escassez de trabalhos da literatura retratando esse fenômeno no Brasil.

O objetivo deste artigo é, inicialmente, aplicar as metodologias encontradas na literatura para quantificar a atenuação da energia da onda que se propaga por fundos vegetados. Posteriormente, comparam-se os ensaios realizados com resultados da literatura e um modelo numérico desenvolvido pelos autores, tanto para o aspecto energético (perda de energia da onda) quanto para o aspecto dinâmico (oscilação adquirida pela vegetação quando da passagem da onda).

## BREVE REVISÃO

Faz-se aqui uma breve revisão da literatura no tocante aos modelos de interação onda-vegetação submersa (para maiores detalhes, consultar Vasco, 2005).

### Algumas leis de decaimento

Para quantificação da dissipação da energia da onda de forma analítica, procura-se obter uma expressão da altura da onda em função da distância percorrida no campo vegetado. Considera-se que a teoria de onda é a teoria linear, que o fundo é plano e não há modificações na celeridade de grupo ( $c_G$ ) dentro do campo vegetado. Duas leis de decaimento aparecem com freqüência na literatura, a saber:

- Queda da altura da onda segundo uma função do tipo exponencial:

$$\frac{H}{H_0} = \exp(-k_1 y) \quad (1)$$

sendo  $H$  a altura da onda,  $H_0$  a altura da onda incidente,  $k_1$  o coeficiente de atenuação e  $y$  é a posição longitudinal no campo vegetado.

Sabe-se que o comportamento desta função advém da solução da equação que rege a onda linear (equação de Laplace). Kobayashi et al. (1993) e Mork (1996) são exemplos de pesquisadores que admitem a queda exponencial da altura da onda em áreas sujeitas à dissipação de energia pela vegetação.

- Queda da altura da onda segundo uma função do tipo fração ou quociente:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \alpha y} \quad (2)$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de atenuação do modelo.

Nesta abordagem, analisa-se o fluxo de energia gerado pela passagem da onda (dado por  $\mathcal{J} = E c_G$ , onde  $E$  é a energia da onda por unidade de largura da crista e por comprimento de onda e  $c_G$  é a celeridade de grupo). Dalrymple et al. (1984) e Mendez e Losada (2004) podem ser citados como pesquisadores que seguem este modelo de decaimento em problemas envolvendo a dissipação da energia da onda.

A Figura 1 mostra o comportamento das funções de decaimento e a quantidade de energia

dissipada ao longo de um campo vegetado fictício. Como se pode observar na figura supracitada, para um coeficiente de atenuação em torno de  $0,1 \text{ m}^{-1}$ , em 10m de campo, a energia da onda é reduzida a praticamente 20% de seu valor original. Esse fato ilustra a potencialidade da vegetação submersa como agente de dissipação da energia da onda, portanto estabilizador de margens de corpos de água. Além disso, para um coeficiente de atenuação de  $0,01 \text{ m}^{-1}$ , as funções de decaimento são praticamente coincidentes. Não por acaso, as expansões em séries dos modelos de atenuação ficam:

$$\frac{1}{1 + \alpha y} = 1 - \alpha y + (\alpha y)^2 - (\alpha y)^3 + \dots$$

$$\exp(-k_1 y) = 1 - k_1 y + (k_1 y)^2 / 2 - (k_1 y)^3 / 3 + \dots$$

Este fato justifica a aproximação dos modelos para coeficientes de atenuação pequenos. Em geral, admite-se que os dois modelos são semelhantes se o coeficiente de atenuação é inferior a  $0,1 \text{ m}^{-1}$  (Mendez e Losada, 2004).

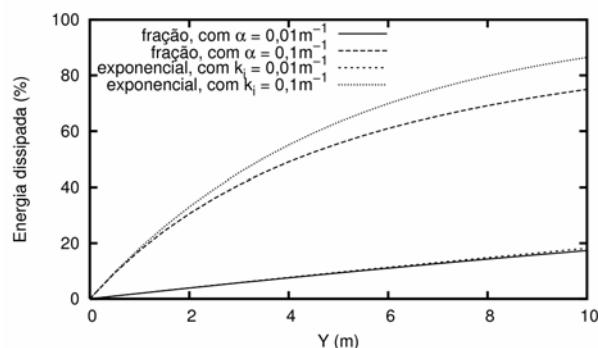


Figura 1 – Comportamento das funções de decaimento mais comuns (tipo exponencial e quociente ou fração)

### Força e coeficiente de arrasto

Para chegar a um resultado semelhante ao da Figura 1, é necessário determinar o coeficiente de atenuação ( $\alpha$  ou  $k_1$ ), que é obtido a partir de um modelo previamente adotado, como o proposto por Dalrymple et al. (1984):

$$\alpha = \frac{4}{9\pi} C_D D \frac{H_0}{b_p^2} k_R \frac{\operatorname{senh}(k_R l) + 3\operatorname{senh}(k_R l)}{(\operatorname{senh}(2k_R h) + 2k_R h)\operatorname{senh}(k_R h)} \quad (3)$$

onde:  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação do modelo de Dalrymple et al. (1984),  $C_D$  é o coeficiente de arras-

to,  $D$  é o diâmetro da vegetação,  $H_0$  é a altura da onda incidente,  $b_p$  é a distância entre os elementos cilíndricos que simulam a vegetação,  $k_R$  é o número de onda real ( $2\pi/L$ , onde  $L$  é o comprimento de onda linear),  $I$  é a altura da vegetação e  $h$  a profundidade normal.

Como se pode notar pela Equação 3, o coeficiente de atenuação depende de vários fatores, como geometria do campo (distribuição espacial, altura e diâmetro da vegetação), bem como das características da onda incidente (altura, período e profundidade).

Há, no entanto, um parâmetro que procura sintetizar diversos aspectos dos quais o arrasto depende diretamente tal como a forma, inclinação e condições do escoamento. Esse parâmetro é o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ), obtido a partir da expressão do arrasto gerado pela oposição de um cilindro indefomável ao escoamento, baseada na equação de Morison (Equação 4):

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2} C_D \rho A \vec{u} \vec{u} \quad (4)$$

onde  $\vec{F}_D$  é o vetor força de arrasto por unidade de volume,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $A$  é a projeção da área normal ao escoamento e  $\vec{u}$  é o vetor velocidade.

Entretanto, a aplicação da equação de Morison em problemas envolvendo o arrasto em vegetações aquáticas fica impossibilitada, uma vez que a hipótese de indefomabilidade do elemento nem sempre é verificada. Por esse motivo, fazem-se necessárias adaptações à equação de Morison, principalmente no tocante ao coeficiente de arrasto ( $C_D$ ). É intuitivo imaginar a diminuição do arrasto atuante em um elemento que se deforma transversalmente, em relação a outro com mesmas dimensões, mas indefomável. A deformabilidade é, inclusive, uma das estratégias de sobrevivência de organismos aquáticos com estrutura frágil que vivem em ambientes submetidos a esforços hidrodinâmicos intensos (Koehl, 1999).

Além da diferenciação do coeficiente de arrasto para elementos deformáveis ou indefomáveis, pode-se afirmar que em alguns casos o coeficiente de arrasto não é constante, mas varia espacialmente, tanto ao longo do comprimento do organismo ( $I$ ) quanto ao longo do campo de organismos ( $I_C$ ). Para exemplificar esse fato, podem-se citar as algas com que Mork (1996) e Lovås e Tørum (2001) trabalharam (*Laminaria hyperborea* (*Gunnerus*) *Foslie*), cujos

efeitos de dissipaçāo de energia ficam restritos à copa destas algas, caracterizando uma distribuição não uniforme do coeficiente de arrasto ao longo de seu comprimento.

Por outro lado, Johnson (2001) realizou testes com a alga *Chondrus crispus* e verificou uma redução de mais de 65% no arrasto de uma alga posicionada atrás da outra. A redução na força de arrasto é decorrente da diminuição do coeficiente de arrasto, que ocorre em resposta à esteira formada no escoamento.

Além de alterar o coeficiente de arrasto, utiliza-se a velocidade relativa entre o fluido e a vegetação para reproduzir com mais fidelidade os elementos de grande flexibilidade (Utter e Denny, 1996; Mendez e Losada, 2004; Lima, 2005) e contesta-se a relação quadrática entre a força de arrasto e a velocidade relativa (Utter e Denny, 1996; Johnson, 2001; Vasco e Maciel, 2005; Vasco, 2005).

A equação da força de arrasto de Morison, após as considerações acima efetuadas, torna-se, segundo referência da literatura (Utter e Denny, 1996) a seguinte equação dimensionalmente não-homogênea (Equação 5):

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A u_R^{\beta_0} \quad (5)$$

onde  $F_D$  é a força de arrasto (estimada empiricamente) por unidade de volume,  $\beta_0$  é um coeficiente adimensional cujo valor está relacionado à forma do objeto ( $\beta_0 \leq 2$ : quanto mais hidrodinâmico e/ou flexível, menor é o valor de  $\beta_0$ ) e  $u_R$  é a velocidade relativa ( $u_R = u - u_p$ , onde  $u_p$  é a velocidade adquirida pela vegetação).

O coeficiente de arrasto, no contexto apresentado, tem importante papel na atenuação da energia da onda, pois está intimamente ligado ao arrasto provocado pela presença da vegetação. Ou seja, o desafio em quantificar os esforços aplicados aos organismos deve-se, em grande parte, à correta determinação do coeficiente de arrasto.

## MÉTODOS DE ENSAIO

O sucesso da representação de fenômenos naturais está na capacidade de se reproduzir em laboratório, as mesmas condições que são percebidas no ambiente. Não obstante, a necessidade de parâmetros físicos calibrados experimentalmente ou

mesmo a visualização de fenômenos na natureza são etapas indispensáveis no contexto apresentado.

Sendo assim, as atividades experimentais que concernem a interação onda-vegetação submersa são apresentadas no escopo deste trabalho. Durante meados de 2003, realizou-se um monitoramento no reservatório de Ilha Solteira, que é o terceiro maior reservatório do Brasil em termos de volume. As principais atividades, que envolveram equipes multidisciplinares de três instituições (FEIS-UNESP, Coppe-UFRJ e IPH-UFRGS), foram: monitorar o regime de ondas e vento em uma pequena porção da área de estudo, bem como a execução da batimetria local, identificação de espécies vegetais responsáveis pela atenuação da energia da onda e estabilização das margens, entre outras atividades.

No local de estudo, foram identificadas diversas espécies que estabilizavam as margens do reservatório de Ilha Solteira. Entretanto, a espécie predominante era a *Brachiaria subquadrípara*. Esta planta tem vários caules, que são delgados e finos, de onde folhas crescem verticalmente. A *B. subquadrípara* (Figura 2) não possui sustentação própria, permanecendo na vertical por meio da ação do empuxo quando submersa, possuindo baixa rigidez.

Pelo menos mais dois tipos de plantas também são encontrados com freqüência na área de estudo: *Panicum maximum* (capim colonião) e *Cynodon dactylon* (grama seda).

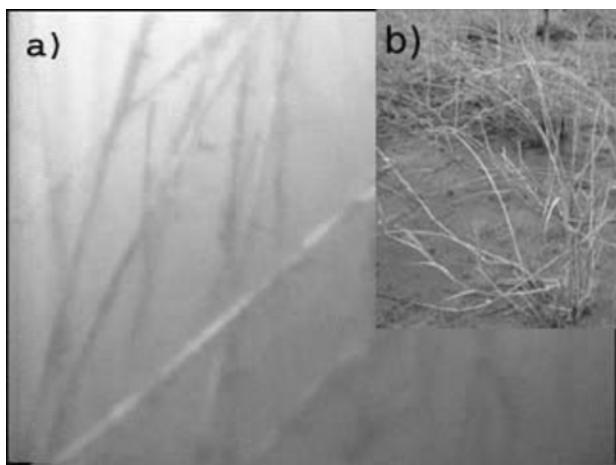


Figura 2 – a) Imagem subaquática da *B. Subquadrípara* (cortesia: CESP) e b) detalhe desta espécie de vegetação na época de estiagem

Contudo, a realização de experimentos em laboratório permite um maior controle das variáveis envolvidas no fenômeno. Exemplificando esse fato,

os resultados de atenuação de energia de Mork (1996) apontaram para 70-85% em uma distância de 258m (maior redução na maré baixa). Entretanto, Mork (1996) lembra que é difícil dizer quanto da energia é atenuada somente pelo arrasto induzido na vegetação, uma vez que efeitos como refração também são responsáveis pela atenuação da energia da onda e não foram incluídos na análise dos dados. Por esse motivo, realizaram-se ensaios em laboratórios (EPUSP-SP e INPH-RJ) em canal de ondas de fundo plano, submetidos a uma onda linear (água intermediária ou profunda) e com material artificial simulando a vegetação submersa. Cabe, ainda, uma explicação pela utilização de material artificial na representação da *B. subquadrípara*.

### Elemento simulado

Sabe-se que a substituição de organismos aquáticos por qualquer outro material (fibra de vidro e cordas de nylon, por exemplo), na validação experimental de um modelo, insere erros de ordem mecânica, desde que não seja obedecida uma escala conveniente. Mesmo devido à dificuldade em encontrar materiais que reproduzam em escala de laboratório os aspectos dinâmico e mecânico da vegetação observados na natureza, vários pesquisadores buscam maneiras de simular a presença de organismos aquáticos por outros materiais, pelas mais variadas razões. Como exemplo, são mostrados na Figura 3 os organismos simulados por Lovás e Tórum (2001) e Ghisalberti e Nepf (2002).

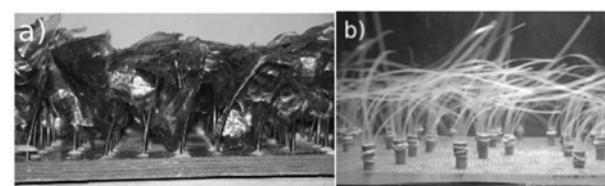


Figura 3 – Representação do organismo utilizado por a) Lovás e Tórum (2001) e b) Ghisalberti e Nepf (2002)

Entretanto, existem também pesquisadores que acreditam que a maneira mais correta de avaliar o coeficiente de arrasto e a energia dissipada é utilizando a própria vegetação estudada, como é o caso de Freeman et al. (2000), conforme ilustra a Figura 4.

No presente estudo, utilizaram-se cordas de nylon para simular a vegetação do reservatório de Ilha Solteira. As cordas de nylon constituem material adequado à representação de vegetais frágeis e de

grande mobilidade, constatação esta corroborada por Lima (2005).

### Coeficiente de arrasto

A determinação do coeficiente de arrasto é um dos maiores desafios na quantificação da atenuação da energia da onda devido à presença de vegetação submersa. Existem basicamente duas formas de determinação do coeficiente de arrasto: analiticamente ou experimentalmente.



Figura 4 – Ensaio realizado por Freeman et al. (2000), onde utilizou-se a própria vegetação na experimentação física

As formas analíticas recaem em substituições das equações de arrasto, a partir de hipóteses prévias. Alben et al. (2002) determinaram uma expressão analítica para o coeficiente de arrasto de elementos flexíveis, fazendo uma relação ( $\eta_0$ ) entre o comprimento total de um elemento e seu respectivo comprimento fletido. O coeficiente de arrasto seria então dado por (Equação 6):

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A u^2} \eta_0^2 \quad (6)$$

A determinação experimental do coeficiente de arrasto figura como o procedimento mais utilizado na literatura. Além da calibração, procuram-se expressões empíricas para extrapolar os resultados experimentais para outros casos. Neste contexto, lança-se mão também do trabalho de Freeman et al. (2000). Freeman et al. (2000) construíram um modelo de previsão de perda de carga e coeficiente de

arrasto em canais, tratando exclusivamente de plantas submetidas a um regime permanente e uniforme. O coeficiente de arrasto para objetos flexíveis seria função de vários fatores, e segundo constatação dos autores, quatro parâmetros foram então escolhidos como significantes, sendo:

- Relação entre a força de arrasto e as forças de resistência à flexão da planta;
- Relação entre a profundidade e altura da planta;
- Relação entre a área normal ao escoamento e a área normal total;
- Número de Reynolds (Re).

Então, resumidamente (Equação 7):

$$C_D = f \left( \frac{\rho u^2 A}{E_s A_T}, \frac{h}{l}, N_A, Re \right) \quad (7)$$

onde  $E_s$  é o módulo elástico à flexão da vegetação,  $A_T$  é a área total (soma de todas as áreas individuais  $A$  das plantas na seção transversal do canal),  $N$  é o número de plantas por metro quadrado,  $Re$  é o número de Reynolds,  $h$  é a profundidade e  $l$  é a altura da vegetação.

Entretanto, contesta-se a extrapolação da aplicabilidade de equações empíricas para o coeficiente de arrasto de elementos flexíveis. Isso ocorre principalmente pela característica do coeficiente de arrasto. Este parâmetro agrupa fatores difíceis de serem determinados com precisão: geometria do obstáculo e condições do escoamento (turbulência, efeitos de esteira, escoamentos oscilatórios, entre outros). No caso da geometria do obstáculo, percebe-se que diferentes espécies de plantas têm áreas de bloqueio distintas e, muitas vezes, os resultados não podem ser generalizados ou aplicados em outras situações.

### MODELO NUMÉRICO

A concepção do modelo numérico leva em consideração que a energia da onda é dissipada através do trabalho realizado sobre a vegetação para movimentá-la. Ou seja, a energia dissipada da onda é utilizada integralmente para movimentar a vegetação. Para isso, é necessário construir um modelo dinâmico acoplado a um modelo energético para estimar, tanto a movimentação do elemento vegetal quanto a dissipação da energia. No entanto, é preci-

so estabelecer um comportamento dinâmico para a vegetação aquática.

Seja a vegetação estudada representada por uma viga engastada em uma extremidade e livre na extremidade oposta, de seção circular, sujeita ao carregamento hidrodinâmico provocado pela passagem de ondas incidindo normalmente à vegetação. É desejável que essa viga apresente características mecânicas semelhantes ao organismo vegetal. Portanto, com base em relatos de pesquisadores, além de observações em campo, pode-se supor que o organismo vegetal apresenta um mecanismo de perda interna de energia, de modo a possibilitar sua sobrevivência em um meio sujeito à ação de esforços hidrodinâmicos intensos. Esse mecanismo pode ser representado por uma viscosidade, ou mais precisamente, uma viscoelasticidade. Em termos de equacionamento, o comportamento de um sólido viscoelástico pode ser representado pelo esquema de Voigt (Kolsky, 1963). São feitas, ainda, as seguintes hipóteses:

- A vegetação, quando oscila, o faz com pequenas deformações ( $\partial y / \partial x \approx 0$ );
- Os efeitos de rotação inercial da seção transversal são desconsiderados;

Fazendo a compatibilização dos esforços em uma seção transversal, considerando o arrasto atuante como forçante externa, chega-se a Equação 8 (Vasco, 2005):

$$\rho_K A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + E_S I \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + E_{visc} I \frac{\partial^5 y}{\partial t \partial x^4} = \frac{1}{2} C_D \rho D u_R^{\beta_0} \quad (8)$$

com:  $\rho_K$  é a massa específica da vegetação,  $I$  é o momento de inércia e  $E_{visc}$  é o módulo viscoso. Esta equação representa a dinâmica de uma viga viscoelástica engastada, de seção transversal circular, submetida a uma força de arrasto por unidade de comprimento (adaptada da Equação 5), cuja solução fornece os deslocamentos em toda sua extensão.

A Equação 8 é discretizada, segundo o Método das Diferenças Finitas (MDF) implícita e centralmente, e resolvida numericamente utilizando algoritmo de Crank-Nicholson modificado. A Equação 8 discretizada é dada por:

$$\begin{aligned} C_1 y_{i+2}^{j+1} - 4C_1 y_{i+1}^{j+1} + (6C_1 + M)y_i^{j+1} - \\ - 4C_1 y_{i-1}^{j+1} + C_1 y_{i-2}^{j+1} = b_i^j \quad (9) \\ \text{com: } C_1 = \frac{E_S I}{2\Delta y^4} + \frac{E_{visc} I}{\Delta t \Delta y^4}; \quad M = \frac{\rho_K A_S}{\Delta t} \end{aligned}$$

onde  $A_S$  é a área da seção transversal,  $\Delta y$  é o incremento espacial,  $b_i^j$  é o vetor solução (onde o sobreírito  $j$  indica o ponto na malha temporal e o subscrito  $i$  indica o ponto espacial no domínio) e  $\Delta t$  o incremento temporal.

A parcela dinâmica da interação onda-vegetação submersa é resolvida utilizando as condições de contorno do problema (Equações 10-a, b, c e d):

$$y(0, t) = 0 \quad (10-a)$$

$$\frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (10-b)$$

$$E_S I \frac{\partial^2 y(l, t)}{\partial x^2} + E_{visc} I \frac{\partial^3 y(l, t)}{\partial x^2 \partial t} = 0 \quad (10-c)$$

$$E_S I \frac{\partial^3 y(l, t)}{\partial x^2} + E_{visc} I \frac{\partial^4 y(l, t)}{\partial x^3 \partial t} = 0 \quad (10-d)$$

Com relação ao aspecto energético, é utilizada uma metodologia própria baseada na premissa de que a energia transferida da onda para a vegetação (dissipação de energia da onda) resulta na oscilação do elemento vegetal. Dessa forma, a equação da conservação da energia em um período de onda fica (Equação 11):

$$\frac{\partial}{\partial x} (E c_g) = -\varepsilon_v \quad (11)$$

onde  $E$  é a energia da onda por unidade de largura da crista,  $c_g$  é a celeridade de grupo e  $\varepsilon_v$  é a taxa de energia dissipada medianizada em um período de onda. Dessa forma, a taxa de energia dissipada medianizada em um período de onda pode ser determinada, através da relação integral entre força de arrasto e velocidade (Equação 12):

$$\varepsilon_v = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F u_R dx \quad (12)$$

onde  $F$  é a força externa aplicada,  $u_R$  é a velocidade relativa do movimento da vegetação e  $T$  é o período da onda. A Equação 12 é resolvida numericamente a

cada período de onda, através de um método de integração numérica (Método 1/3 de Simpson).

## RESULTADOS

Nesta seção são mostrados os resultados experimentais, assim como análises do comportamento do modelo numérico desenvolvido. Divide-se então a apresentação dos resultados em duas partes: experimental e numérica.

Na parte experimental, serão analisados os aspectos dinâmico e energético da vegetação simulada por cordas de nylon (representando a *B. subquadrípara*, espécie encontrada no reservatório de Ilha Solteira). O aspecto dinâmico é quantificado através do deslocamento do nó superior da corda de nylon (ponta da corda), comparando o seu movimento com o movimento calculado pela parcela dinâmica do modelo geral. A forçante aplicada é a onda linear controlada, gerada no canal de ondas e reproduzida no modelo. O aspecto energético é quantificado através da relação entre a altura registrada por sensores resistivos em diversos pontos do campo de elementos e a altura incidente (altura de onda inicial que incide no campo de elementos).

Na parte numérica são avaliados, da mesma forma que na parte experimental, o aspecto dinâmico e energético. Desta vez, entretanto, é utilizado nas simulações um tipo de vegetação com características semelhantes à de um coral, (características do vegetal com menor flexibilidade e maior rigidez). O aspecto dinâmico é quantificado através da aplicação de esforços instantâneos, verificando o comportamento do organismo, assim como a influência de alguns parâmetros. O aspecto energético é avaliado da mesma forma que na parte experimental, através da relação entre alturas de onda. Também é realizada uma análise da influência das características do campo de organismos na dissipação da energia da onda, assim como um estudo pontual acerca da aplicabilidade do modelo numérico desenvolvido.

### Resultados experimentais: Aspecto dinâmico

A análise da dinâmica da vegetação é realizada comparando os resultados do modelo numérico proposto com o deslocamento e velocidade do nó superior de um modelo de vegetação (corda de nylon). Os dados aqui apresentados foram obtidos na campanha experimental realizada nos laboratórios do INPH-RJ e EPUSP-SP.

Primeiramente, o modelo conceitual proposto precisa ser calibrado. O coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) foi determinado em cada ensaio de modo que o deslocamento e a velocidade gerados pelo modelo numérico se aproximasse o máximo possível do resultado experimental. Embora seja interessante estabelecer uma lei de comportamento para o coeficiente de arrasto, este objetivo não foi perseguido. Isso ocorreu principalmente pela quantidade de ensaios realizados, que não foi suficiente para estabelecer uma função para  $C_D$  com certa margem de sucesso, embora tenha sido suficiente para a análise da dinâmica e perda de energia.

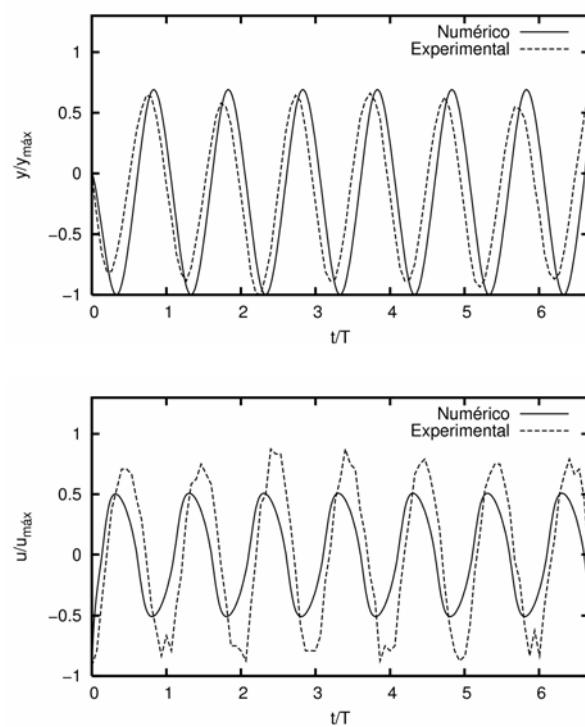


Figura 5 – Deslocamentos e velocidades do nó superior da corda de nylon (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,1m; profundidade normal: 0,75m; comprimento da corda: 0,65m; diâmetro da corda: 0,006m)

São mostrados a seguir (Figuras 5, 6 e 7) os deslocamentos e velocidades do nó superior da corda de nylon, comparando os resultados experimentais com os do modelo numérico proposto, para algumas das configurações ensaiadas.

Não de forma casual, os melhores resultados para deslocamento e velocidade foram obtidos

quando a profundidade relativa é maior (quando se tende para águas profundas). A situação ensaiada é extrema no caso do modelo proposto (elemento altamente flexível e águas intermediárias), uma vez que o modelo aplica-se preferencialmente a elementos com maior rigidez. Mesmo assim nota-se uma boa performance no que tange à representação da magnitude dos deslocamentos e velocidades, assim como da fase de oscilação do organismo.

### Resultados experimentais: Aspecto energético

Em se tratando de perda de energia devido à ação das ondas, o modelo conceitual proposto é comparado com outros dois modelos da literatura: um dado pela formulação de Kobayashi et al. (1993) (decaimento exponencial, Equação 1) e outro pela formulação de Dalrymple et al. (1984) (decaimento tipo fração, Equação 2), além dos ensaios físicos.

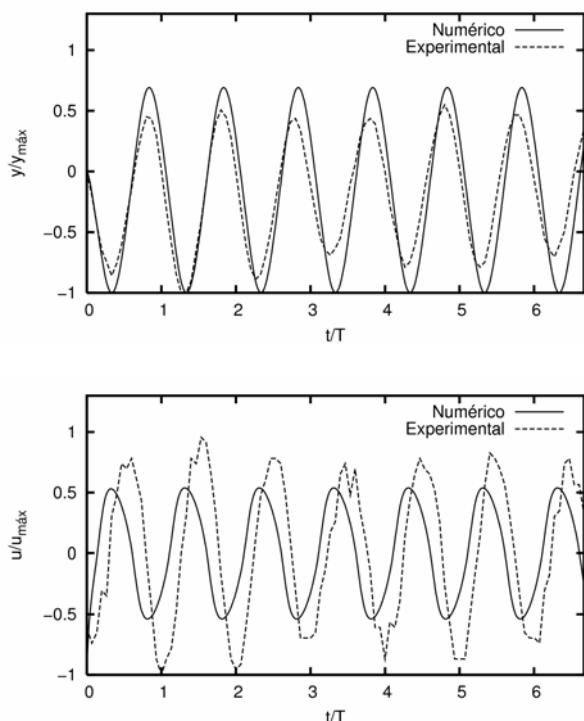


Figura 6 – Deslocamentos e velocidades do nó superior da corda de nylon (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,1m; profundidade normal: 0,55m; comprimento da corda: 0,45m; diâmetro da corda: 0,006m)

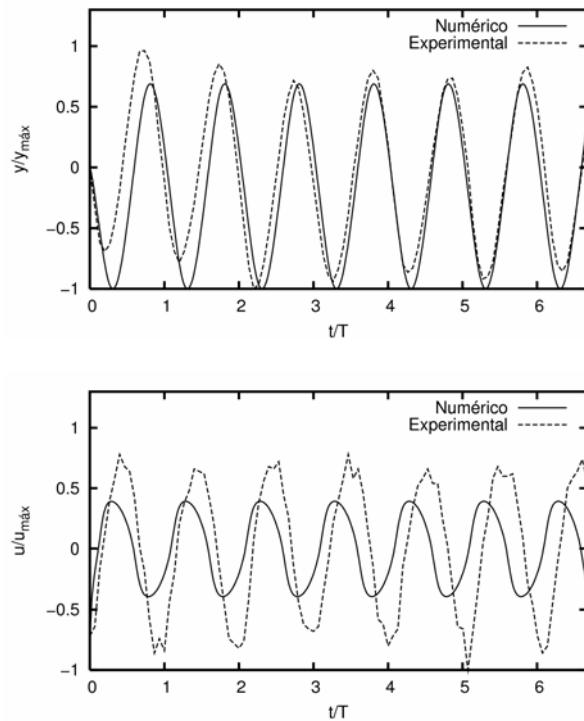


Figura 7 – Deslocamentos e velocidades do nó superior da corda de nylon (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,2m; profundidade normal: 0,55m; comprimento da corda: 0,45m; diâmetro da corda: 0,006m)

Para a quantificação do aspecto energético, foram feitos ensaios experimentais com um campo de cordas de nylon. A energia é avaliada através da diminuição da altura da onda percebida pelos sensores resistivos espalhados pelo campo de cordas.

Nas figuras seguintes (Figuras 8, 9 e 10), mostra-se a comparação entre o modelo numérico proposto, os modelos da literatura e os ensaios físicos, no que diz respeito à quantidade de energia dissipada num período de onda. De modo geral, pode-se perceber que os modelos da literatura apresentam concordância, para alguns casos, em relação aos resultados experimentais. Este comportamento também é seguido pelo modelo numérico proposto. Analisando todos os dados, entretanto, percebe-se que os modelos da literatura possuem maior capacidade de perseguir os resultados experimentais, enquanto que o modelo numérico proposto restringe-se à concordância com alguns casos.

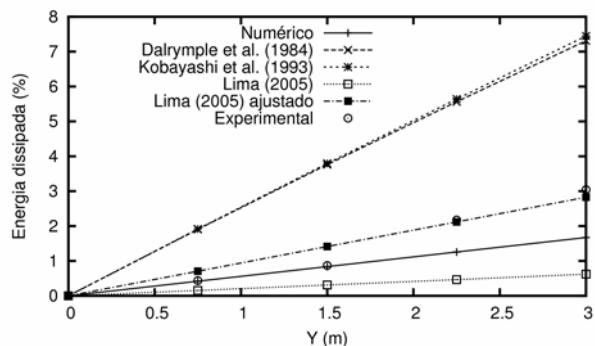


Figura 8 – Dissipação de energia da onda (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,05m; profundidade normal: 0,7m; comprimento da corda: 0,6m; diâmetro da corda: 0,006m)

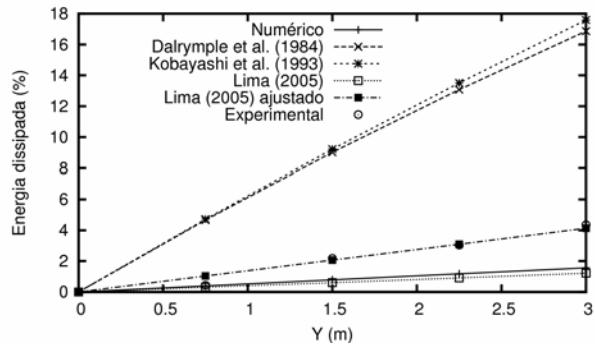


Figura 9 – Dissipação de energia da onda (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,1m; profundidade normal: 0,7m; comprimento da corda: 0,6m; diâmetro da corda: 0,006m)

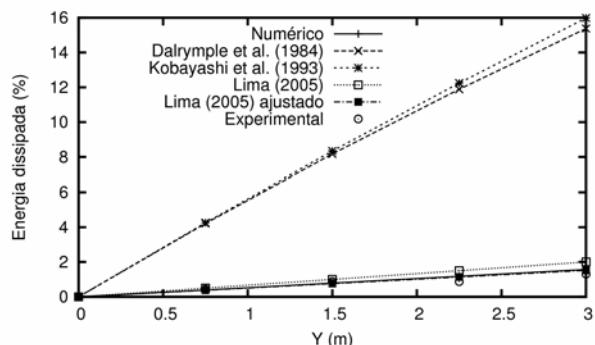


Figura 10 – Dissipação de energia da onda (configuração de ensaio: período da onda: 1,5s; altura da onda incidente: 0,15m; profundidade normal: 0,7m; comprimento da corda: 0,6m; diâmetro da corda: 0,006m)

É necessário lembrar também as condições em que o teste foi realizado. Em primeiro lugar, o coeficiente de arrasto utilizado nas simulações (modelo numérico proposto e da literatura) é o mesmo. Dalrymple et al. (1984) e Kobayashi et al. (1993) admitem utilizar um coeficiente de arrasto modificado, exatamente para incluir os efeitos da dinâmica dos organismos e levar em consideração o trabalho realizado ao deslocá-los. Esses efeitos ficam mais pronunciados à medida que a onda caminha para águas rasas.

### Resultados Numéricos: Aspecto dinâmico

Nesta seção, serão apresentados os resultados gerados pelo modelo numérico proposto para as vertentes dinâmica e energética. O vegetal selecionado para os testes possui características de um organismo rígido (similares a de um coral:  $E_s: 5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\rho_K: 2820 \text{ kg/m}^3$ ) (Vicente, 1982 apud Gaylord et al., 2001), com viscoelasticidade  $E_{visc}: 10^7 \text{ N/m}^2$ .

Para a análise dinâmica do organismo estudado, escolhe-se como força excitadora um pulso semi-senoidal, com duração de  $t_i = 0,05s$  e intensidade máxima unitária. Este tipo de carregamento transiente foi escolhido devido às observações realizadas por Gaylord et al. (2001), quando da quantificação dos esforços máximos impostos por ondas de marés. Esta região é submetida a forças advindas da quebra da onda, que é um caso extremo em termos de solicitação ao organismo. Será avaliado, portanto, o comportamento dinâmico do organismo, frente a um caso de esforços transientes extremos, verificando o efeito de parâmetros físicos na estratégia de sobrevivência do organismo.

Observa-se inicialmente o comportamento dinâmico do nó superior do organismo similar a um coral frente à variação do seu diâmetro. A variação do diâmetro acarreta a alteração da inércia e força restauradora do sistema dinâmico. A inércia depende do diâmetro em termos de  $D^2$ , enquanto que a força restauradora é mais afetada:  $D^4$ . Pode-se notar pela Figura 11 que com o aumento do diâmetro, maior é a inércia do organismo, portanto maior é o esforço externo necessário para deslocá-lo. A força restauradora reflete a evolução do deslocamento com o tempo. Quanto menor o diâmetro, menor a força restauradora, ou seja, leva-se um tempo maior para o organismo atingir o estado de repouso e consequentemente, as amplitudes de oscilação com o tempo são maiores.

Além disso, soma-se à inércia do organismo o efeito retardador do módulo viscoso. Com isso,

leva-se um tempo maior até que o organismo seja solicitado pela força máxima, evidenciando o efeito da inércia e da viscosidade do tecido como estratégias de sobrevivência em ambientes sujeitos a esforços hidrodinâmicos instantâneos intensos.

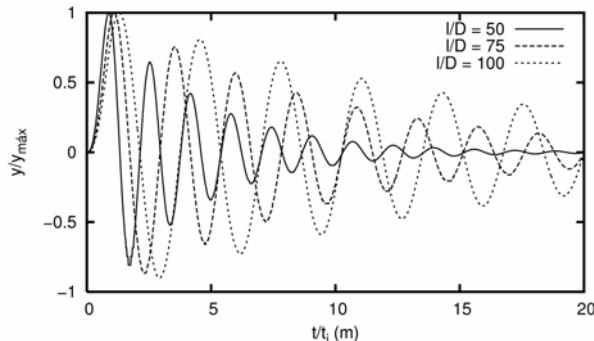


Figura 11 – Comportamento dinâmico, segundo a variação do diâmetro (D) do elemento

De modo geral, o mesmo ocorre com a Figura 12, que analisa o efeito da variação da massa específica do organismo, embora a massa específica  $\rho_k$  altere apenas sua inércia. Dessa forma, atribui-se o retardamento na força de pico ao aumento da inércia do organismo.

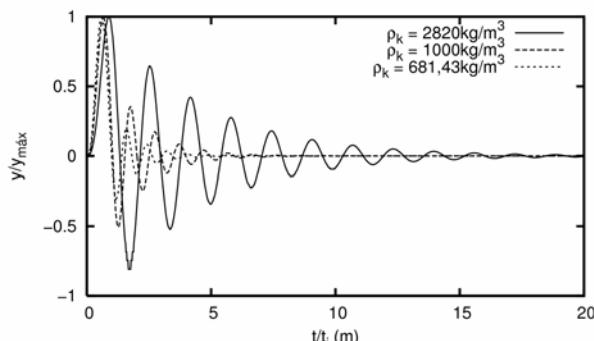


Figura 12 – Comportamento dinâmico, segundo a variação da massa específica ( $\rho_k$ ) do elemento

### Resultados Numéricos: Aspecto energético

De modo a quantificar o aspecto energético, reproduz-se no modelo numérico as características de um campo povoado com vegetais com características similares a corais. Faz-se também a comparação entre os resultados do modelo numérico proposto e alguns modelos da literatura, da mesma maneira realizada na parte experimental. Os modelos da

literatura são, para os casos onde não há resultados físicos disponíveis, norteadores e balizadores e servem como referência.

Primeiramente, observa-se a redução de energia para um campo de organismos com a variação da profundidade relativa. Percebe-se pela Figura 13 uma relação exponencial entre a porcentagem de energia dissipada em um período de onda e a profundidade relativa ( $h/L$ ). A porcentagem de energia dissipada está relacionada à taxa de energia dissipada em um período de onda,  $\varepsilon_G$ .

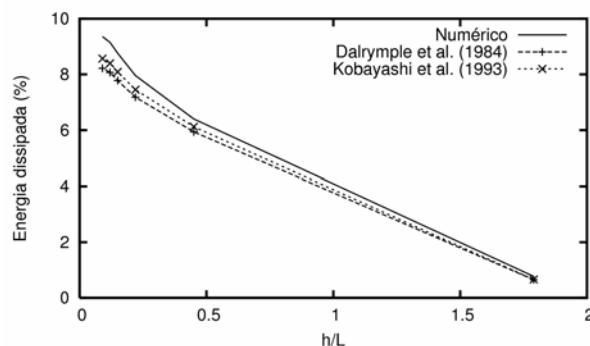


Figura 13 – Porcentagem da dissipação da energia da onda em um período de onda, segundo a variação da profundidade relativa  $h/L$ . As características do ensaio numérico são: altura da onda incidente: 0,1m; altura da vegetação simulada: 0,6m; profundidade normal: 0,7m; coeficiente de arrasto: 0,5; largura do campo simulado: 3m; espaçamento entre a vegetação: 0,05m

Nota-se, de antemão, uma boa concordância entre os modelos da literatura (Dalrymple et al., 1984; Kobayashi et al., 1993) e o modelo numérico proposto. Isso ocorre principalmente pelas características do organismo simulado (pouco flexível, ou seja, deslocamentos relativos pequenos), que são as mesmas adotadas pelo modelo na concepção da parte dinâmica. A concordância entre modelos teóricos e numérico mostra a evolução do modelo conceitual proposto no que tange à representação não só do aspecto energético de organismos rígidos e frágeis, mas também que contempla, em sua essência, a dinâmica desses organismos aquáticos.

Ainda de acordo com a Figura 13, à medida que a profundidade relativa diminui (ou seja, caminha-se para a classificação de águas rasas), a porcentagem de energia dissipada cresce rapidamente. Deve-se, entretanto, evitar essa região de rápida ascensão, visto que o limite teórico do modelo proposto não admite grandes deslocamentos na equação

ção dinâmica, além de ser regido pela teoria de onda linear.

Independente das hipóteses teóricas acerca do modelo conceitual, destaca-se a importância da medianização da velocidade e força de arrasto em um período de onda como responsável pela ponderação dos efeitos dissipadores em cada instante de tempo. O modelo conceitual proposto realiza tal procedimento utilizando técnicas de integração numérica. A técnica numérica escolhida foi o Método 1/3 de Simpson, método este já consagrado e de eficiência comprovada pela literatura.

Observa-se agora a influência das características geométricas do campo vegetal (Figura 14). O comprimento do campo afeta diretamente a quantidade de energia dissipada, possibilitando dessa forma analisar os limites do modelo energético proposto em comparação com os modelos da literatura.

Ressalta-se, entretanto, que o modelo formulado tem forte influência da visualização dos ensaios realizados (tanto no INPH-RJ quanto na EPUSP-SP), quando da quantificação da dissipação da energia da onda. Para esses ensaios, o comprimento do campo foi mantido constante nos experimentos, sendo outros parâmetros quantificados. Não há, portanto, verificação física do modelo numérico para um campo extenso, o que poderia justificar o distanciamento entre os resultados teóricos e numérico.

## CONCLUSÕES

Este trabalho baseou-se em observações de experimentos físicos de campo, onde margens protegidas pela vegetação eram menos susceptíveis à ação das ondas e aos efeitos de erosão e/ou assoreamento do que margens desprotegidas. Em termos da determinação da energia dissipada, esbarra-se nas incertezas deste fenômeno, principalmente na quantificação de alguns parâmetros, como é o caso do coeficiente de arrasto ( $C_D$ ).

Como encontrar o coeficiente de arrasto para elementos flexíveis não é uma tarefa trivial, existem metodologias diversas que procuram, sob certas hipóteses, estabelecer uma expressão para este parâmetro. As mais comuns são aquelas advindas de calibrações experimentais, que muitas vezes são extrapoladas para cobrir casos diferentes do ensaiado, o que dificilmente refletirá a realidade.

Neste âmbito, propôs-se um modelo de atenuação da energia da onda baseada na premissa de que toda energia dissipada pela onda é transmitida

integralmente à vegetação, daí o aparecimento de oscilações. As equações base do modelo numérico são obtidas a partir da analogia dinâmica entre a vegetação e vigas, dotadas de viscoelasticidade. Estas equações são discretizadas e acopladas com um modelo energético (perda de energia) baseado nas equações de atenuação encontradas na literatura (Equações 1 e 2).

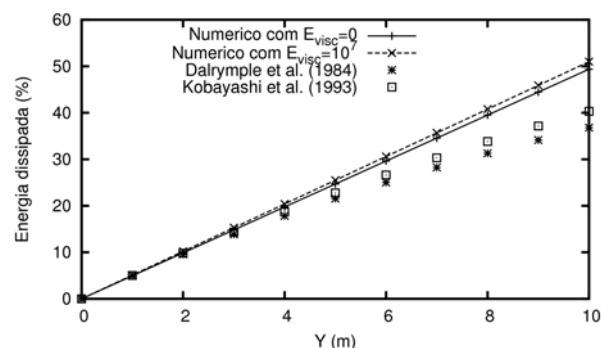


Figura 14 – Atenuação de energia da onda em um campo com as seguintes características: comprimento do campo: 10m; espaçamento entre a vegetação: 0,05m; coeficiente de arrasto: 0,5 e módulo elástico à flexão:  $5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Os resultados experimentais obtidos, com relação à dinâmica, quando da simulação da vegetação presente no sítio de estudo (margens do reservatório de Ilha Solteira-SP) por cordas de nylon, foram comparados com os resultados do modelo numérico e teóricos (Figuras 5, 6 e 7). Pode-se perceber através destas figuras que há uma boa concordância entre o deslocamento obtido pelo modelo numérico quando comparado com o deslocamento experimental. Com relação às velocidades, a acurácia é menor, fato esse atribuído à medida indireta da velocidade (cinematografia, ou seja, medida de deslocamentos pelo tempo no vídeo; Lima, 2005).

Já com relação aos resultados experimentais, do ponto de vista energético, pode-se notar pelas, Figuras 8, 9 e 10, o afastamento entre a proposta numérica e os resultados experimentais. A forma com a qual a onda interage com o organismo frágil ainda requer investigação. Lima (2005) observou a mesmo afastamento entre seu modelo construído com base em elementos altamente flexíveis e o experimento. Este autor atribui este distanciamento a efeitos não computados na análise, como por exemplo, a interação entre organismos. Lima (2005) adota então fatores de interação que são diretamente proporcionais à perda de energia (são os resultados

de Lima, 2005, ajustado nas Figuras 8, 9 e 10). Entretanto, cogita-se a hipótese de influência de  $\beta_0$ , sendo que para todas análises empreendidas, foi adotado  $\beta_0=2$ .

A diminuição de  $\beta_0$  aumenta a amplitude de oscilação do elemento simulado, sendo, portanto indicado para representar os organismos altamente flexíveis. Com uma amplitude maior, espera-se que a dissipação de energia também seja maior, uma vez que o trabalho da onda incidente sobre o organismo será maior. Com isso, conclui-se que  $\beta_0$  também influencia o aspecto energético, constatação esta feita com base na Figura 15 e nos comentários discutidos neste parágrafo. Entretanto, a correta quantificação dos esforços em elementos flexíveis sob a ação de uma forçante hidrodinâmica oscilatória (onda) ainda requer investigação.

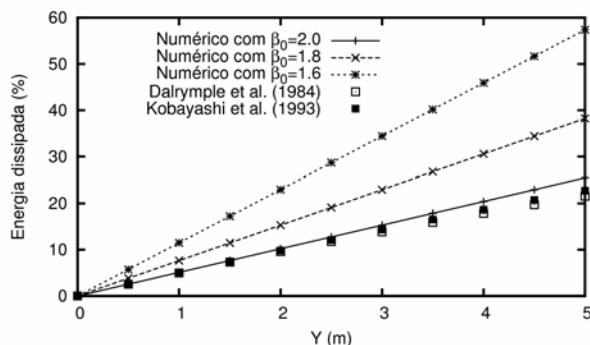


Figura 15 – Perda de energia da onda em termos percentuais ao longo do campo vegetado, segundo a variação de  $\beta_0$ , para uma onda com: altura da onda incidente: 0,1m; período: 1,5s; altura da vegetação: 0,6m; profundidade normal: 0,7m; comprimento do campo: 5m; espaçamento entre a vegetação: 0,05m; coeficiente de arrasto: 0,5

Além disso, mostra-se nas Figuras 13 e 14 que a concordância entre o modelo numérico proposto e os modelos da literatura melhora à medida que o vegetal adquire características mais rígidas. Com base no observado, o modelo gera uma atenuação menor em relação aos modelos da literatura, quando o elemento estudado possui características altamente flexíveis.

Sendo assim, pode-se afirmar que o modelo numérico desenvolvido tem potencialidades e pode ser aplicado como uma ferramenta de apoio na previsão da atenuação da energia da onda.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento da bolsa de mestrado (proc. 02/11363-2), a UNESP e CAPES pela oportunidade de participação na equipe do projeto PROCAD/CAPES "Amigos de Boussinesq": Rede Cooperativa de Pesquisa sobre Hidrodinâmica de Águas Costeiras e Águas Rasas (proc. 0144/01-0). À EPUSP-Naval e INPH-RJ pela disponibilização de infraestrutura e recursos humanos.

## REFERÊNCIAS

- ALBEN S. et al, *Drag reduction through self-similar bending of a flexible body*, Nature, 420, 2002.
- DALRYMPLE R. A. et al, *Wave refraction due to areas of energy dissipation*, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 110, 67-79, 1984.
- FREEMAN G. E. et al, *Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation*, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 2000.
- GAYLORD B. et al, *Consequences of transient fluid forces for compliant benthic organisms*, Journal of Experimental Biology, 204, 1347-1360, 2001.
- GHISALBERTI M. e NEPF H. M, *Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flow*, Journal of Geophysical Research, 107, No C2, 2002.
- JOHNSON A. S., *Drag, drafting, and mechanical interactions in canopies of the red alga Chondrus crispus*, Biol. Bull., 201, 126-135, 2001.
- KOBAYASHI N. et al, *Wave attenuation by vegetation*, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 199, 30-48, 1993.
- LIMA S. F., *Amortecimento de ondas gravitacionais por campos de vegetação simulados por elementos de grande flexibilidade*, Tese de Doutorado – Coppe-UFRJ, 2005.
- LOVÅS S. M. e TØRUM A., *Effects of the kelp Laminaria hyperborea upon sand dune erosion and water particle velocities*, Coastal Engineering, v. 44, p. 37-63, 2001.
- MENDEZ F. J. e LOSADA I. J, *An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields*, Coastal Engineering, vol. 51, n 2, pp. 103-118, 2004.
- MORK M., *The effect of kelp in wave damping*, Sarsia Online, 1996. Disponível em <<http://www.ifm.uib.no/sol>>

- PRICE W. A. et al., *The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches*, Proc. 11º Coastal Engineering Conference, ASCE, 1, 570-578, 1968.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center (CERC), *Shore Protection Manual*, 3rd edition. Washington, D. C, Department of Army Corps of Engineers, 1977.
- UTTER B. D. e DENNY M. W, *Wave-induced forces on the giant kelp Macrocystis pyrifera (agardh): field test of a computational model*, Journal of Experimental Biology, 199, 2645-2654, 1996.
- VASCO, J. R. G. e MACIEL, G. F., *Proposta de um modelo viscoelástico para determinação de dissipação de energia de ondas devido à vegetação*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.
- VASCO, J. R. G., *Modelo conceitual de dissipação da energia da onda que se propaga por fundos vegetados*. Dissertação de Mestrado - PPGEC – FEIS-UNESP, 2005.

***Water Wave-Submerged Vegetation Interaction: Part II: Experimental And Numerical Model***

**ABSTRACT**

*This study is based on the observation that water waves acting on banks protected by submerged aquatic vegetation are less affected by erosion than unprotected ones. In this context, a wave energy dissipation model was proposed. It was based on the hypothesis that all the attenuated energy is fully transmitted to the vegetation. The basic equations of the numerical model are established based on a dynamic analogy between vegetation and viscoelastic beams. Those equations are numerically solved and coupled to an energy model, based on equations found in the literature. The experimental results (the banks of Ilha Solteira reservoir), have been compared with the theoretical and numerical results, both concerning dynamics and energy, showing good agreement of the numerical model developed.*

*Key-words: gravitational water waves, vegetation, energy dissipation, water wave-vegetation interaction, numerical and experimental results.*