

Estudo sobre Tensões no Fundo Induzidas por Ondas em Viveiros de Camarão

Marcelo Carvalho dos Santos Cunha, Claudio Freitas Neves
Programa de Engenharia Oceânica/COPPE/UFRJ
marcelocdsc@gmail.com; neves@peno.coppe.ufrj.br

Ada Cristina Scudelari
Departamento de Engenharia Civil/UFRN
ada@ct.ufrn.br

Recebido: 24/08/07 – revisado: 29/10/07 - aceito: 26/08/10

RESUMO

A ação do vento sobre o espelho d'água de viveiros de camarão em geral é considerada como benéfica para esta atividade pois favorece a oxigenação da água. Porém, as ondas de curto período, geradas nesta situação, são muito esbeltas, fortemente não lineares e geralmente são refletidas pelas margens e amplificadas. Dependendo da lâmina d'água, associada à fase em que se encontra a criação ou a despesca, as ondas induzem tensões críticas no fundo que ressuspendem os sedimentos, eventualmente provocam excessivo estresse nos camarões e acabam prejudicando a produção. Utilizando métodos de previsão de ondas em águas restritas, fazem-se estimativas de altura e período, calculam-se as tensões no fundo associadas a tais ondas para fundos de areia fina e silte, em 3 condições típicas de lâmina d'água encontradas em viveiros de camarão no Nordeste brasileiro. Verifica-se a influência da extensão do viveiro (pista de ação do vento) para a formação da onda.

Palavras Chave: carcinicultura; transporte de sedimentos; ondas em viveiros; gerenciamento costeiro.

INTRODUÇÃO

A carcinicultura é uma atividade que depende primordialmente da engenharia para o sucesso do empreendimento tanto em aspectos construtivos e operacionais, quanto em aspectos legislativos. No primeiro caso, citam-se: seleção do local ideal para o empreendimento; construção dos viveiros; preparo dos seus fundos nas entressafras; captação de água e estruturas de abastecimento; aeração mecânica e circulação hidrodinâmica; e drenagem na despesca e tratamento dos efluentes. No segundo caso, citam-se aspectos legislativos, tais como licenciamento ambiental e práticas e operações de acordo com a legislação. Cunha (2006) apresenta de modo abrangente uma revisão sobre aspectos aquícolas, sócio-econômicos, legislativos e ambientais da carcinicultura, enfatizando neste último caso que, além dos impactos da atividade no ambiente, deve também ser estudado e monitorado o micro-ambiente do viveiro.

De fato, no viveiro se encontra a principal chave para a longevidade do empreendimento, uma vez que é nele onde todos os processos físico-

químicos interferem diretamente ou indiretamente na engorda do camarão. Considerando o hábito do camarão de viver no fundo, deve-se dar atenção especial aos processos bentônicos, os quais dependem diretamente da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento, denominada "tensão de cisalhamento bentônica".

Muitos estudos foram encontrados na literatura sobre a influência de aeradores na tensão de cisalhamento no fundo dos viveiros, porém nenhum retratava a influência de outros importantes fatores naturais: ventos e ondas. Em função de consideráveis extensões de pistas na superfície livre dos viveiros, o vento é o principal responsável pela geração de ondas e estas promovem, através de movimentos orbitais, circulação hidrodinâmica ao longo de toda coluna d'água. Dependendo das condições da profundidade do viveiro e da altura e do período da onda, estes movimentos orbitais geram tensões de cisalhamento no fundo que, por sua vez, ditam processos de ressuspensão/erosão de sedimentos e decomposição de matéria orgânica, sendo determinantes na saúde do fundo do viveiro, onde exatamente vivem os camarões. Além disso, através de reflexões múltiplas nas margens, formam-se padrões bidimen-

sionais em planta (ondas cruzadas), que provocam movimentos circulares junto ao fundo; outra possibilidade são ondas de período muito longo e modos ressonantes, com pequenas alturas porém valores significativos de velocidades. Finalmente, deve-se considerar a ação das ondas junto aos taludes dos viveiros, que não só afetam sua estabilidade, como também induzem a erosão e produção de sedimentos, que se dirigirão para o fundo, seja por gravidade seja através de correntes de densidade.

CRITÉRIOS E TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE VIVEIROS

Diversos fatores desempenham importante papel no sucesso da carcinicultura marinha. A seleção do sítio apropriado para a construção dos viveiros pode minimizar impactos ambientais e problemas associados à baixa produtividade (Preston *et al.*, 2002, Howerton, 2001). O solo deve ter pH compatível com faixas aceitáveis para o camarão, além de argila e textura apropriada com homogeneidade e gradiente suave na distribuição do tamanho das partículas, de forma a possibilitar uma boa compactação e evitar perdas por infiltração e percolação, além de diminuir riscos de erosão nos taludes dos diques. Fatores como alcance da maré, proximidade com corpos d'água, disponibilidade hídrica, topografia, vegetação e qualidade da água e do solo também devem ser considerados na seleção (Beltrame e da Costa, 2004; Boyd, 1998; Treece, 2002).

O vento é outro fator importante a ser considerado no projeto geométrico da fazenda, pois ao induzir tensões sobre a superfície do espelho d'água do viveiro, o vento incidente tem como resultado positivo a mistura e o esfriamento na coluna d'água, que evitam o superaquecimento e a estratificação no viveiro. Porém, ele gera ondas de superfície, as quais erodem margens dos diques, além de ressuspender sedimentos do fundo. Por isso, Tiensoongrasmee (1982) e Treece (2002) recomendam a construção de viveiros de forma a minimizar a pista exposta ("fetch"), com o lado de maior dimensão perpendicular ao vento de maior intensidade. Para isso, deve-se, antes do projeto do viveiro, planejar uma campanha completa de medição, de forma a determinar os ventos reinante e dominante, caracterizar as rajadas e as durações de vento.

O projeto geométrico da fazenda também tem grande peso no sucesso do empreendimento. Os principais aspectos considerados no projeto são

os diques, os canais de adução, o sistema de bombeamento, os canais de distribuição, as comportas de drenagem, o sistema de energia elétrica e as instalações de apoio (Beltrame e da Costa, 2004). Todos estes aspectos têm como principal foco a eficiência na produtividade que ocorre no interior dos viveiros, em cujo fundo os camarões vivem.

O MICRO-AMBIENTE DE UM VIVEIRO DE PRODUÇÃO

Para que a safra seja bem sucedida, é necessário que o viveiro reproduza as condições físico-químicas necessárias para o crescimento do camarão. Para tal, diversos parâmetros de qualidade de água devem ser controlados, e é necessário entender como estes se influenciam e interagem. A temperatura e as concentrações da salinidade e dos sólidos em suspensão definem a densidade da água, que influencia a circulação hidrodinâmica no interior dos viveiros. A concentração de sólidos em suspensão e a quantidade de fitoplâncton presente no viveiro regem a turbidez da água e, conseqüentemente, a penetração dos raios solares; esta, por sua vez, dita a estratificação térmica e conseqüentemente o grau de mistura e difusão de substâncias no interior do viveiro, tais como o oxigênio dissolvido produzido pelo fitoplâncton, da coluna d'água para o fundo do viveiro. Deve ser ressaltado que é exatamente no fundo dos viveiros que ocorrem as maiores concentrações de metabólicos – que influenciam o ciclo do nitrogênio e assim o pH da água – e matéria orgânica oriunda de restos de ração e processos de ressuspensão de sedimentos do fundo, demandando assim oxigênio para os processos de decomposição. A Figura 1 mostra um esquema de interações nos parâmetros de qualidade de água no interior de um viveiro.

Além do mais, todo este micro-ecossistema não está isolado, ou seja, é influenciado também por fatores externos. Qualidade da água captada no estuário e enfermidades viróticas são alguns dos principais exemplos de fatores externos que influenciam a produção de camarões no interior de um viveiro. Por se assentarem em ambientes costeiros, fenômenos típicos como marés, ventos e ondas também influenciam direta ou indiretamente o micro-ambiente dos viveiros. A maré desempenha imprescindível papel nas operações de captação de água e drenagem; já as ondas nos estuários podem comprometer a estrutura dos diques externos e de bom-

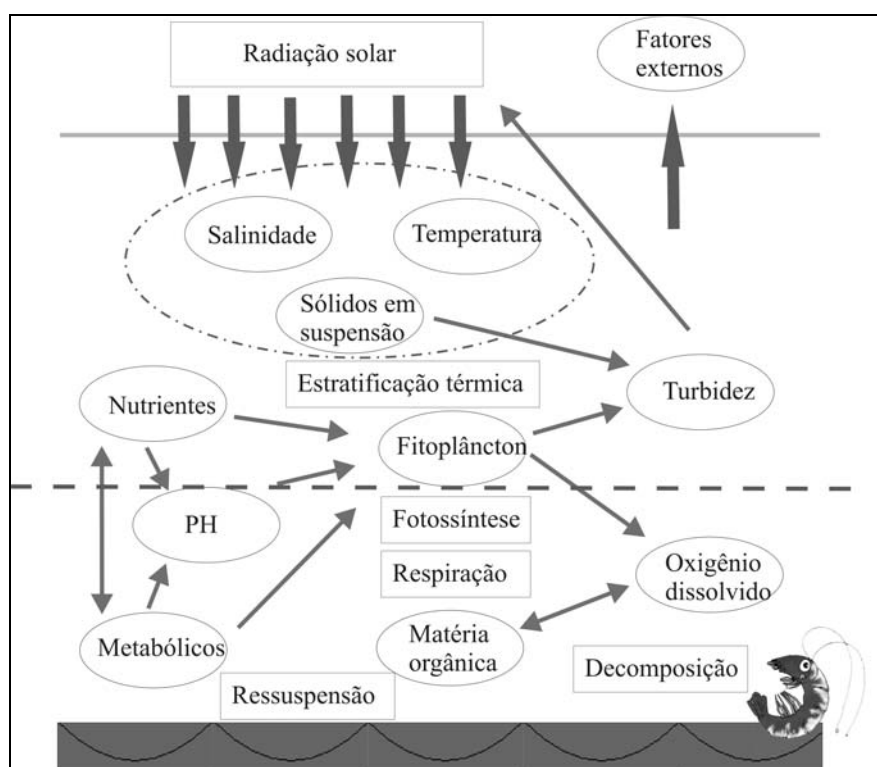


Figura 1 – Interações no interior de um viveiro (SL = superfície livre; CLB = camada limite bentônica).

beamento de água. Porém, este estudo dará especial atenção à geração de ondas no interior dos viveiros, pela sua forte influência para a saúde do fundo dos viveiros, onde vivem os camarões.

CAMADA LIMITE BENTÔNICA E TENSÕES DE CISALHAMENTO

Processos naturais, tais como transporte de nutrientes para o fundo dos viveiros, decomposição bacteriana da matéria orgânica, desnitrificação e sedimentação removem continuamente poluentes da coluna d'água (Tucker, 1999). Boa parte dos nutrientes que entram no viveiro através das rações é desperdiçada pelos camarões, acaba se sedimentando e é processada no fundo (Preston *et al.*, 2002). Portanto, o fundo dos viveiros de camarão desempenha um papel importante para a boa qualidade da água, e os processos que lá ocorrem devem ser compreendidos para um melhor gerenciamento da atividade.

Segundo Peterson (1999), o fundo de corpos d'água naturais pode ser descrito através de uma camada bentônica limite, situada entre a inter-

face água-sedimento e a coluna d'água, dentro da qual ocorrem os processos de ressuspensão e as reações bioquímicas nos sedimentos em suspensão e depositados no fundo. Segundo o autor, a tensão cisalhante no fundo influencia diretamente o transporte de massa, de quantidade de movimento e de calor nesta camada bentônica limite; sobre este tema, ver também Boudreau (1997).

A matéria orgânica em forma particulada está sujeita a taxas de trocas difusivas bem mais intensas em suspensão do que se floculada e sedimentada no fundo dos viveiros. Logo, há uma decomposição mais eficiente se as partículas se mantêm em suspensão nos viveiros (Peterson, 1999, 2000; Boyd, 1998). Wainright e Hopkinson (1997) concluíram que a ressuspensão de partículas depositadas no fundo de corpos costeiros rasos intensifica os fluxos difusivos na camada bentônica limite, melhorando a taxa de decomposição da matéria orgânica e aumentando a demanda bioquímica de oxigênio. A taxa de decomposição, que pode ser avaliada pela diferença entre a taxa de respiração e a disponibilidade de carbono, ambos em $g\ C/m^2.dia$, é mais intensa na coluna d'água do que no fundo, pois se dá em condições bem misturadas e aeróbicas. Ainda segundo os autores, a ressuspensão resulta também em um aumento

nas taxas locais de mineralização da matéria orgânica, e transfere em até 50% o local desse fenômeno, do bentos para a coluna d'água. A ressuspensão também influencia a produção primária no viveiro, pois altera a desnitrificação em camadas anaeróbicas do fundo dos viveiros, diminuindo a perda de nitrogênio inorgânico dissolvido na coluna d'água para a forma de N_2 . Assim, a disponibilidade de nitrogênio dissolvido para o fitoplâncton aumenta.

Assim, a qualidade do fundo dos viveiros está intimamente ligada à tensão de cisalhamento bentônica. Através de regressões lineares com diversas faixas de valores do número de Reynolds crítico ($Re^* = u_* D / \nu$, onde u_* é a velocidade de atrito, D é o diâmetro do grão e ν é a viscosidade cinemática da água) na curva de Shields, Peterson (1999) demarca seis zonas críticas no fundo dos viveiros, mostradas na Tabela 1, cujos nomes são os materiais de fundo que seriam ressuspensos para cada faixa específica de tensão cisalhante bentônica. O autor sugere que, onde $\tau < 0,001 \text{ N/m}^2$, ocorre deposição, enterramento de matéria orgânica e mistura com minerais do solo, criando condições anaeróbicas no fundo, onde o consumo de oxigênio dissolvido se dá de forma mais rápida que a difusão de oxigênio pelos poros do bentos. A faixa ideal de τ seria entre $0,003 \text{ N/m}^2$ e $0,03 \text{ N/m}^2$, pois mantém em suspensão e oxigenação a matéria orgânica como detritos e restos de alimentação, mas sem ressuspender os minerais já depositados no fundo. Já em faixas com $\tau > 0,1 \text{ N/m}^2$ ocorre erosão do fundo, escoriando o solo e criando fonte de sólidos em suspensão que irão se depositar futuramente em zonas de menor turbulência; estes locais devem ser protegidos com enrocamento.

O PROCESSO DE GERAÇÃO DE ONDAS E SUA INFLUÊNCIA NO FUNDO DE VIVEIROS

O vento desenvolve importante papel na carcinicultura, pois realiza aeração natural na coluna d'água, influencia a hidrodinâmica do corpo d'água e é o principal responsável na geração de ondas, não somente nos estuários, mas também no interior dos viveiros. Ao atuar sobre a superfície da água, o vento transmite uma tensão de cisalhamento que pode ser calculada pela formulação (CHL, 2002a):

$$\tau = \rho_{ar} C_D V_{10} |V_{10}| \quad (1)$$

onde V_{10} é o vento a uma altura de 10 metros do chão, em m/s; ρ_{ar} é a massa específica do ar, e C_D é o coeficiente de arraste, que varia com a velocidade do vento segundo a expressão (CHL, 2002a):

$$C_D = 0,001(0,8 + 0,065.V_{10}) \quad (2)$$

As tensões de cisalhamento são responsáveis por ondas de capilaridade na superfície d'água, que, ao arrebentarem, promovem o aprisionamento de bolhas de ar na água, aumentando assim a área da superfície da interface água-ar e conseqüentemente maximizando as trocas de oxigênio.

Segundo CHL (2002a), a geração de ondas por ventos se dá através da atuação do vento em uma de-terminada pista, supondo que seu campo seja bem organizado e próximo à superfície d'água, podendo ser representado por um valor médio em sua direção e intensidade ao longo de toda a pista. Para o "estado de mar em pleno desenvolvimento" a altura significativa H_s e o período de pico do espectro T_p são expressos através das equações:

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 4,13 \times 10^{-2} \left(\frac{gX}{u_*^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 2,727 \left(\frac{gX}{u_*^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

onde X é o comprimento da pista, g é a aceleração da gravidade e u_* é a velocidade de atrito, definida como $u_* = \sqrt{\tau / \rho_{ar}}$. Esta condição de geração é limitada por duração do vento e geometria da pista.

Quando a propagação da onda é tida como em águas profundas (ou seja, a profundidade é maior que a metade do comprimento de onda), as partículas desenvolvem um movimento orbital circular, cujo raio diminui exponencialmente na coluna d'água e atinge valor nulo no fundo, conforme mostra a Figura 2. Já em águas rasas (ou seja, a profundidade é menor que um vigésimo do comprimento de onda), o movimento orbital é elíptico, onde o eixo horizontal $2A$ da elipse não se altera ao longo da coluna d'água, e o eixo vertical $2B$ diminui desde a superfície até atingir valor nulo no fundo. Nas demais situações de profundidade em relação ao comprimento de onda, diz-se que as ondas encontram-se em águas intermediárias, as trajetórias são elípticas cujo eixo maior (horizontal) varia como a função

Tabela 1 – Zonas de fundo de viveiros (PETERSON, 1999).

Zonas no fundo	Tensão de cisalhamento bentônica τ (N/m ²)	Diâmetro do grão (μ m)	Aeração do sedimento J_z^* (g/m ² .dia)
areia	0,1 – 2,3	63 – 3000	3,1 – 14
silte	0,03 – 0,1	4 – 63	1,7 – 3,1
argila	0,01 – 0,03	0,1 – 4	1,0 – 1,7
ração	0,003 – 0,01	12 – 100	0,5 – 1,0
células	0,001 – 0,003	1 – 12	0,3 – 0,5
morta	0 – 0,001	0 – 1	0 – 0,3

coseno hiperbólico, até um valor finito próximo ao fundo, dado pela equação (6). As expressões para estes movimentos orbitais e outros conceitos básicos da teoria linear de ondas podem ser encontradas em CHL (2002a) e em Dean e Dalrymple (1984).

Em águas intermediárias e rasas, o movimento oscilatório das partículas gerado pelas ondas induz uma tensão de cisalhamento no fundo, expressa através da formulação (CHL, 2002b):

$$\tau_{wm} = f_w \rho \frac{u_{bm}^2}{2} \quad (5)$$

onde f_w é o fator de atrito de onda, u_{bm} é o valor máximo da componente horizontal da velocidade orbital induzida pela onda e ρ é a densidade da água. A parametrização do fator de atrito se dá através das máximas componentes horizontais do deslocamento e da velocidade orbital da partícula, definidos pelas expressões (Dean e Dalrymple, 1984):

$$A_{bm} = \frac{H}{2 \sinh(kh)} \quad (6)$$

$$u_{bm} = A_{bm} \cdot \sigma \quad (7)$$

Na parametrização do fator de atrito da onda, são considerados dois regimes na camada limite: laminar e turbulento. Se o número adimensional

$Re_{bl} = \frac{A_{bm} u_{bm}}{\nu}$ for menor que 2000, o escoamento na camada limite é laminar e o fator de atrito é $f_w = \frac{2}{\sqrt{Re_{bl}}}$. Se Re_{bl} for maior que 2000, então o

escoamento é turbulento, e obtém-se o fator de atrito da onda através da expressão (CHL, 2002b):

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) &= \\ &= \log_{10} \left(\frac{A_{bm}}{k_n} \right) - 0,17 + 0,24(4\sqrt{f_w}) \end{aligned} \quad (8)$$

onde k_n é a rugosidade do fundo, adotada como o diâmetro mediano dos sedimentos do fundo.

Porém, definido o valor da tensão τ_{wm} , há de se verificar as condições do escoamento no fundo, através de outro número adimensional,

$Re_r = \frac{k_n u_{b*}}{\nu}$, onde u_{b*} é a velocidade de atrito no

fundo, definida por $u_{b*} = \sqrt{\tau_{wm}/\rho}$. Caso $Re_r > 3,3$, o escoamento encontra-se em regime turbulento de parede rugosa, e o valor de τ_{wm} encontrado anteriormente está correto. Caso $Re_r < 3,3$, diz-se então que o escoamento turbulento é de parede lisa, e o valor do fator de atrito deve ser obtido através da expressão (CHL, 2002b):

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\sqrt{4f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{4f_w}} \right) &= \\ &= \log_{10} \left(\sqrt{\frac{Re_{bl}}{50}} \right) - 0,17 + 0,06(4\sqrt{4f_w}) \end{aligned} \quad (9)$$

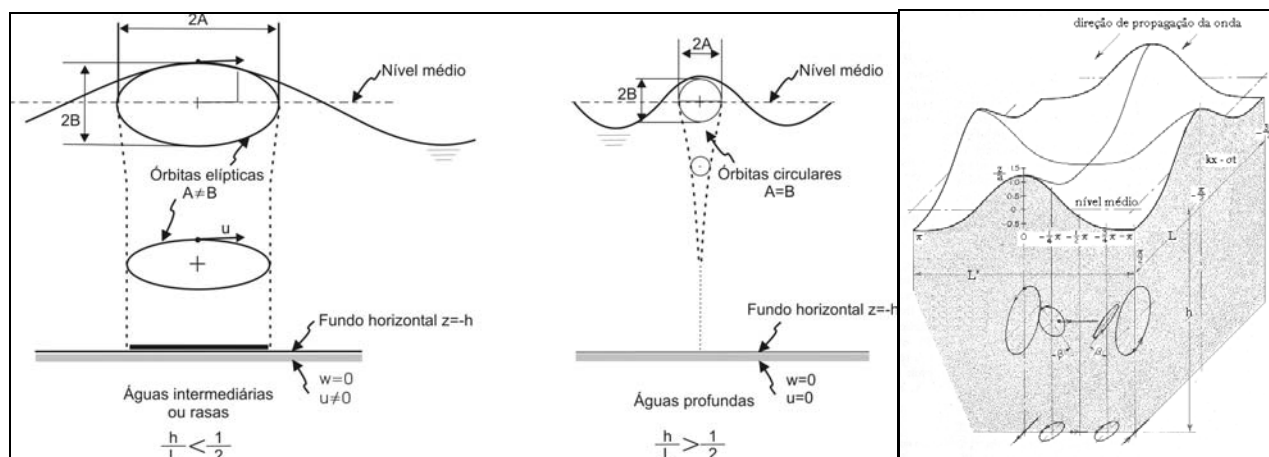


Figura 2 – Movimento orbital das partículas: para ondas planas de cristas longas (à esquerda) e para ondas de cristas curtas (à direita) (Wiegel, 1964).

Portanto, as ondas de gravidade geradas pelos ventos promovem circulação em toda coluna d'água e, dependendo da profundidade local, estes movimentos orbitais também podem ressuspender sedimentos depositados no fundo. Em estuários e lagunas, o vento encontra pistas suficientes para gerarem ondas que se propagam em águas intermediárias; já no interior dos viveiros, a pista é menor e, conseqüentemente, as ondas atuam em menores escalas, mas dependendo das condições do vento e do comprimento e da profundidade dos viveiros, podem induzir tensões no fundo. A geração de ondas depende não somente da pista exposta ao vento, que é bem menor no viveiro do que no estuário, mas também é fortemente ligada à duração do vento.

Outro fator a ser considerado na agitação de ondas no interior dos viveiros é o talude das margens dos diques, o qual, quanto mais íngreme, maior a re-flexão de ondas (Figura 3). Isto produz a formação de um padrão de ondas cruzadas ("short crested waves") cujas velocidades são tridimensionais, e as partículas fluidas descrevem círculos horizontais jun-to ao fundo (Figura 2). Além disso, a interação onda-onda favorece o surgimento de oscilações ressonantes no interior do viveiro, com períodos maiores do que aqueles das ondas individuais.

Eventualmente, após reflexões múltiplas, todo o sistema pode entrar em ressonância. Para uma bacia retangular, com dimensões a e b , os períodos dos modos próprios de oscilação podem ser estimados pela relação:

$$T_{mn} = \frac{2}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{n^2b^2 + m^2a^2}} \quad (10)$$

onde T_{mn} é o período de oscilação (s), a é a largura do viveiro (m), b é o comprimento (m), h é a profundidade (m), n é o modo de oscilação correspondente à largura, m é o modo de oscilação correspondente ao comprimento e g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$). Neste caso, a superfície livre seria dada pela expressão:

$$\eta(x, y, t) = \frac{1}{2} H_r \cos\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{mn}}\right) \quad (11)$$

e as velocidades associadas U e V nas direções x e y , respectivamente, seriam (Dean e Dalrymple, 1984):

$$\begin{aligned} U &= \frac{gH_r}{2} \frac{mT_{mn}}{2b} \cos\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{mn}}\right) \\ V &= \frac{gH_r}{2} \frac{nT_{mn}}{2a} \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{mn}}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

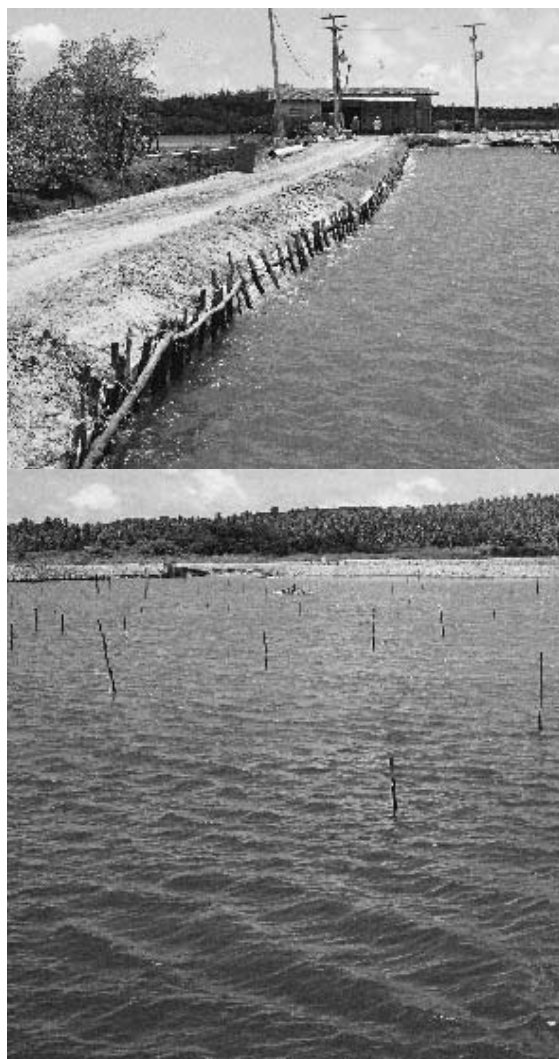


Figura 3 – Reflexão de ondas na margem do viveiro.
(Foto: Claudio F. Neves, Lagoa de Guaraíras, RN, 2006)

DISCUSSÃO SOBRE IMPACTOS NA PRODUÇÃO DE CAMARÕES

Com as formulações de CHL (2002a,b) e Dean e Dalrymple (1984), foi construída a Figura 4, que mostra a evolução do período de pico e da altura significativa da onda gerada com um vento hipotético de 10 m/s em um viveiro com uma profundidade média de 1,2 m, e as conseqüentes tensões de cisalhamento geradas pelas ondas sobre fundo de areia fina com diâmetro mediano 0,1 mm. Com uma pista de 50 m, o vento consegue gerar ondas de 1,6 s de período de pico e 4,0 cm de altura significativa, capaz de gerar tensões de $0,04 \text{ N/m}^2$ no fundo. Com

pistas de até 150 m, a camada limite tem escoamento laminar, e ondas de 2,3 s de período de pico e 6,1 cm de altura significativa geram tensões de $0,103 \text{ N/m}^2$, próximas ao limite de $0,1 \text{ N/m}^2$ proposto por Peterson (1999), embora inferior ao valor crítico de $0,15 \text{ N/m}^2$ obtido no diagrama de Shields para diâmetro de 0,1 mm. Pistas superiores a 200 m já geram ondas que promovem escoamento turbulento de parede rugosa na camada limite, o que pode ser verificado no gráfico pela queda da tensão de cisalhamento.

Com o objetivo de analisar mais detalhadamente a influência de diferentes profundidades do viveiro e distintas classes de ondas nas tensões geradas no fundo dos viveiros, foram estudados, com dados de profundidade e material de fundo e período e altura de ondas, alguns cenários de propagação de ondas em viveiros. Tomando o valor de 1,2 m para a profundidade média de viveiros típicos de camarão, apenas ondas com períodos superiores a 1,3 s se classificariam como de águas intermediárias, conseguindo exercer alguma influência no fundo destes viveiros. No caso de uma altura de 10 cm, o escoamento na camada limite seria laminar, e a máxima tensão de cisalhamento seria de $0,061 \text{ N/m}^2$, fora da faixa ideal proposta por Peterson (1999), entre 0,003 e $0,03 \text{ N/m}^2$. Apenas ondas com período de 1,3 s e altura inferior a 5 cm geram tensões bentônicas na faixa ideal proposta pelo autor. Vale lembrar ainda a máxima tensão cisalhante limite de $0,1 \text{ N/m}^2$, suficiente para ressuspender até areia e resultar em constantes escoriações no solo.

As Figuras 5 e 6 mostram, para ondas com períodos de 1,5 e 2 s, as curvas de evolução de tensões bentônicas em função do aumento da altura de onda para três diferentes grupos granulométricos, que representam os possíveis sedimentos encontrados no fundo dos viveiros. Para silte, considerou-se um diâmetro médio de $64 \mu\text{m}$ e para areia, um diâmetro médio de 0,5 mm.

Com ondas de 1,5 s de período propagando-se em viveiros de 1,2 m de profundidade, verificou-se escoamento laminar na camada limite para as duas classes granulométricas, com tensões bentônicas inferiores a $0,148 \text{ N/m}^2$, para ondas com altura de até 15 cm. Com ondas de altura superior a este valor, a camada limite entra em regime turbulento e verificam-se novas taxas de crescimento nas curvas de tensões bentônicas para ondas de alturas maiores que 20 cm a partir da transição dos regimes de escoamento na camada limite. No regime turbulento, as tensões bentônicas são mais sensíveis à rugosidade e ao tipo de sedimento do fundo, e o fator de atrito

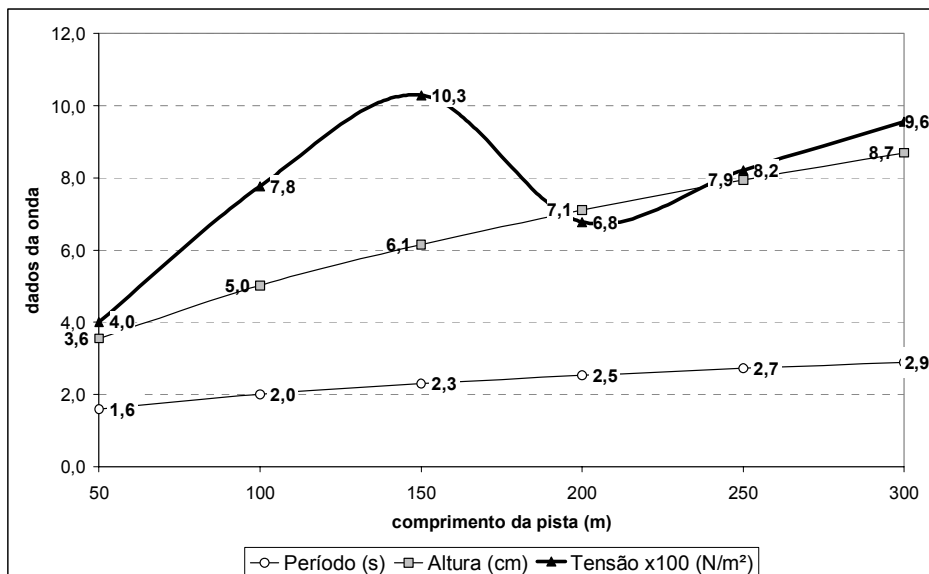


Figura 4 – Evolução do período de pico, altura significativa e tensão no fundo em função do comprimento de pista. Velocidade do vento: 10 m/s. Material de fundo: D=0,1 mm.

da onda não mais é calculado apenas em função do número de Reynolds na camada limite, fato este que explica a queda nas curvas de evolução e a distinção para as classes de silte e de areia. Ondas com 25 cm de altura geram tensões bentônicas de 0,184 N/m² para fundos arenosos e 0,146 N/m² para fundos argilosos ou siltosos. Estas tensões bentônicas, segundo Peterson (1999), são capazes de ressuspender qualquer sedimento do fundo dos viveiros, inclusive areia, resultando em escoriações e erosões prejudiciais à saúde do fundo dos viveiros e, conseqüentemente, à produção da carcinicultura. Já no caso de ondas de 2 s, alturas superiores a 10 cm já resultam em regime turbulento na camada limite, com curvas distintas para as classes granulométricas de silte e de areia.

No cenário com viveiros ligeiramente mais rasos; foram tomadas profundidades de 1,0 m a fim de se mostrar a sensibilidade da alteração da profundidade do viveiro na influência da ação de ondas no fundo dos viveiros. No caso de ondas de 1,5 s de período, as curvas foram similares aos casos com profundidade de 1,2 m, porém com valores de tensões superiores em até 171%, como é o caso de ondas com altura de 25 cm em fundos arenosos (tensões de 0,316 N/m²). Para ondas com período de 2,0 s, as curvas também foram similares, porém com valores de tensões superiores em até 138% (tensões de 0,596 N/m²).

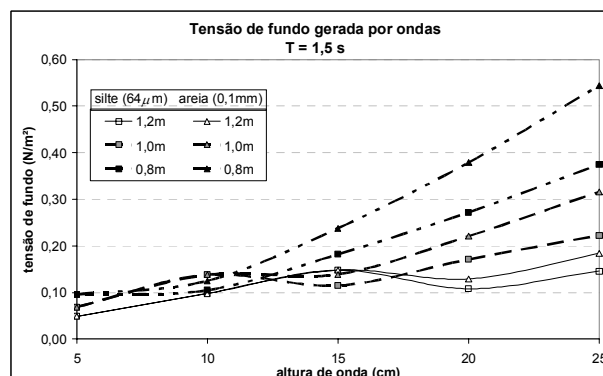


Figura 5 – Influência da altura da onda sobre as tensões bentônicas para ondas de período igual a 1,5 s e três condições de profundidade: h = 0,8m, 1,0m e 1,2m.

Já no cenário em instantes de despesca, quando o viveiro está sendo drenado e a coluna d'água diminui, foi tomado o valor de 0,8 m de profundidade, onde tanto para período de 1,5 s como para de 2 s, a camada limite entra em regime turbulento com ondas de alturas superiores a 10 cm, com tensões superiores a 0,1 N/m². No caso de ondas de 2 s de período e 25 cm de altura, a tensão causada em fundos arenosos chega a 0,84 N/m², extremamente prejudicial para o cultivo. Considerando ondas com altura máxima de 10 cm, tanto com pe-

ríodo de 1,5 s como para 2 s, em viveiros de 1,2 m de profundidade, geram tensões bentônicas inferiores a 1 N/m^2 , e se enquadram na zona de silte de Peterson (1999), capazes de difundir oxigênio dissolvido em taxas de até $3,1 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ e ressuspender materiais coesivos e não-coesivos, tais como partículas da ordem de até $63 \mu\text{m}$.

Com isso, mesmo que partículas de areia não sejam ressuspensas, o movimento nas partículas de argila ou silte do fundo aumentaria a turbidez do viveiro. Ondas com alturas superiores a 15 cm, que gerariam tensões bentônicas prejudiciais ao cultivo, podem ser consideradas pouco usuais a viveiros de ca-marão e só seriam geradas provavelmente em função de interações não lineares de ondas com correntes oriundas de aeradores ou com ondas oriundas de outros processos, tais como fenômenos de reflexão nos diques. Porém, estudos mais específicos sobre os processos de ressuspensão (e sua consequente influência na turbidez da água) de diferentes grupos de sedimentos no fundo dos viveiros em função da passagem de diferentes ondas em viveiros só poderiam ser realizados através de campanhas de medições de ondas e caracterizações granulométricas em viveiros de carcinicultura.

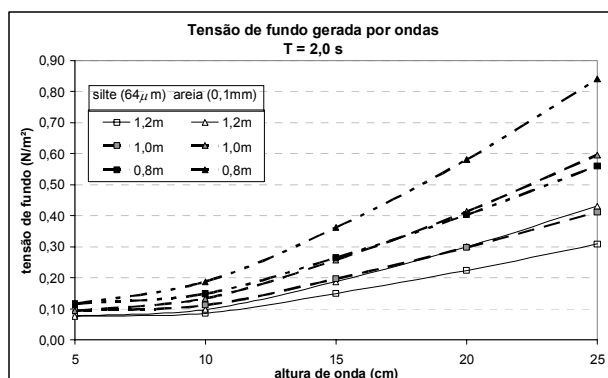


Figura 6 – Influência da altura da onda sobre as tensões bentônicas para ondas de período igual a 2,0 s e três condições de profundidade: $h = 0,8\text{m}$, $1,0\text{m}$ e $1,2\text{m}$.

PROPOSTA METODOLÓGICA DE ANÁLISE DE TENSÕES

As tensões de cisalhamento bentônicas geradas pelas ondas nos viveiros interferem na qualidade da água dos mesmos, pois são capazes de ressuspender os sedimentos depositados no fundo e influenciar o transporte de massa do fundo para a

coluna d'água. Dependendo das condições geométricas do viveiro e das ondas, as tensões podem ser benéficas ou extremamente prejudiciais ao cultivo, demonstrando um limite sustentável nos cenários de propagação de ondas nos viveiros.

Com o objetivo de melhor entender este limite, o presente artigo propõe uma análise metodológica para a avaliação das tensões de fundo geradas pelas ondas na saúde do fundo dos viveiros. A Figura 7 mostra os resultados dos cenários identificados no item anterior, com profundidades que variam de 1,2 a 0,8 m, e ondas com 1,5 a 2 s de período e 5 a 25 cm de altura. Os resultados são expressos através de dois números adimensionais que englobam todos os dados dos cenários, que são a razão entre a profundidade – e a altura de onda – e o produto da gravidade pelo quadrado do período da onda, respectivamente h/gT^2 e H/gT^2 . Em função destes parâmetros forma-se um mosaico de tensões cisalhantes no fundo, que pode ser usado para mapear o fundo de todo o viveiro, bastando para isso a estimativa da profundidade, da altura e do período de ondas lá presentes. Através do mosaico, avaliam-se diversas condições e visualizam-se faixas críticas de tensões.

As partes do mosaico onde a tensão é superior a $0,1 \text{ N/m}^2$, faixa limite para viveiros proposta por Peterson (1999), representam condições extremamente prejudiciais para o cultivo.

Porém, em relação à aplicação de formulações de mar em pleno desenvolvimento, vale ser ressaltado que pouco se sabe sobre o tempo exato em que o vento deve atuar (duração) para gerar o estado de mar em pleno desenvolvimento. Somente campanhas completas de medições de ventos poderiam elucidar questões referentes à aplicação das formulações de mar em pleno desenvolvimento de forma a apresentar resultados mais próximos à realidade. Vale também ressaltar a importância do entendimento da diferença entre ventos reinante e dominante, pois não necessariamente os ventos mais frequentes sejam os maiores responsáveis na geração de ondas, uma vez que a intensidade dos ventos deve ser também ponderada no processo.

Cabe também mencionar a influência da geometria do viveiro na agitação de ondas em seu interior. Há poucos estudos disponíveis na literatura sobre melhores arranjos e geometrias, e os que foram encontrados concernem somente a forçantes oriundas de aeradores. Porém, em relação à exposição de pistas no processo de geração de ondas e à orientação e alinhamento dos diques no processo de reflexão de ondas, muitas diferenças e melhoramentos podem ser verificados em estudos futuros.

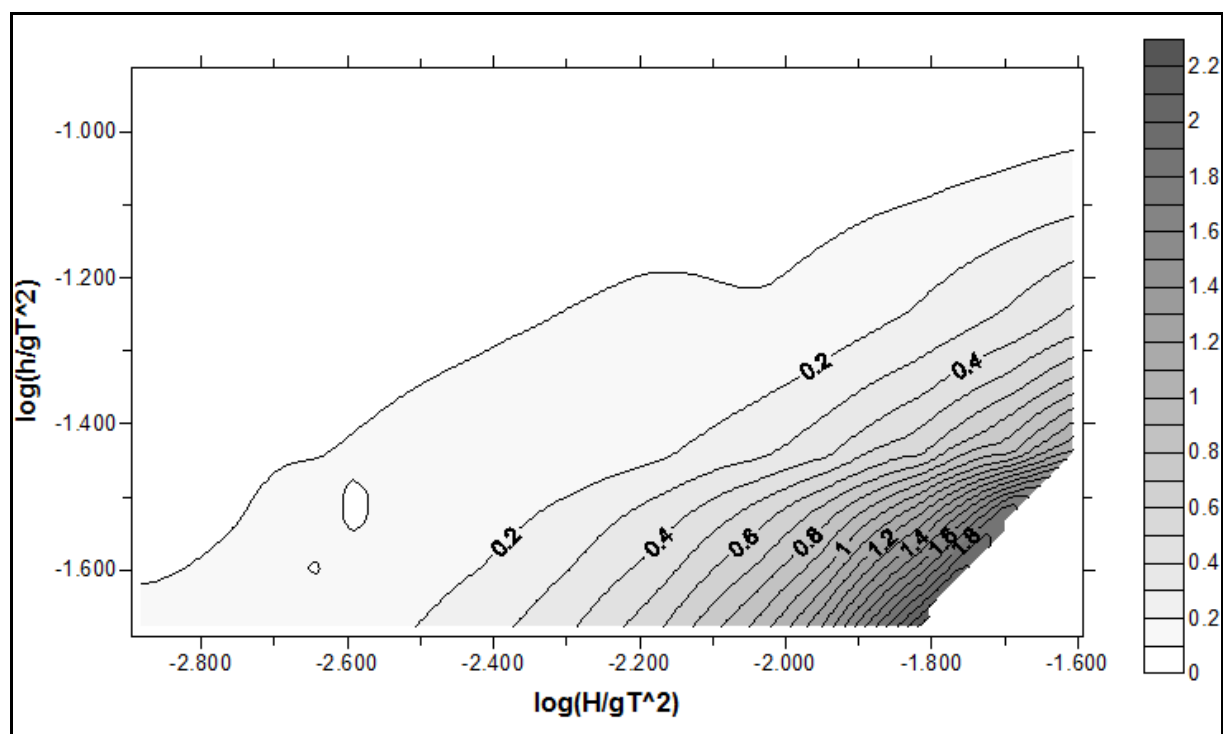


Figura 7 – Mosaico de tensões de cisalhamento no fundo de viveiros. D₅₀ = 0,1 mm. Valores em N/m².

Tabela 2 – Períodos próprios de oscilação (*a* = *b* = 200m) e velocidade no centro do viveiro (área sombreada).

T _{mn} (s) e U (cm/s)		n (comprimento)					
		0	1	2	3	4	5
m (largura)	0	--	116,6	58,3	38,9	29,1	23,3
	1	14,3	82,4	52,1	36,9	28,3	22,9
	2	0,0	6,4	41,2	32,3	26,1	21,6
	3	14,3	0,0	11,9	27,5	23,3	20,0
	4	0	3,5	0,0	8,6	20,6	18,2
	5	14,3	0,0	13,3	0,0	11,2	16,5

Para um viveiro quadrado com 200 m de lado e profundidade igual a 1,2 m, os períodos próprios de oscilação encontram-se na parte superior da Tabela 2, calculados de acordo com a expressão (10). Por razões de simetria, representam-se na mesma tabela, na parte sombreada da diagonal inferior, as velocidades no centro do viveiro para uma altura de onda igual a 10cm; os valores podem variar de 6,4 a 14,3 cm/s, respectivamente, para os modos (2,1) e (5,0).

Outro aspecto a ser levado em consideração é a complexidade dos processos bentônicos. A diversidade de materiais coesivos e não-coesivos, por exemplo, influenciada pelas fontes de metabólicos e matéria orgânica oriunda do resto das rações dos camarões, tende a formar flocos cuja movimentação e sedimentação não podem ser preditas meramente pelo diagrama de Shields, conforme foi verificado nos estudos de Peterson (1999). Estes mesmos artigos relataram os flocos chamados de neve marinha. Já estudos de Avnimelech (2003) também mencionaram o aumento no consumo de ração pelos camarões em viveiros em que o material de fundo era retirado, sugerindo a influência destes sedimentos na saúde dos camarões, principalmente em função da disponibilidade de oxigênio dissolvido no fundo. Vale ser ressaltado que, apesar do camarão viver enterrado na lama em busca de nutrientes, algumas espécies cultivadas, tais como a *Litopenaeus vannamei*, apresentam boa adaptabilidade ao cultivo em viveiros de fundo até mesmo concretado.

A profundidade do viveiro é outro aspecto essencial tanto na produtividade primária como na difusão de oxigênio dissolvido para o fundo, pois é determinante na penetração de luz solar e no grau

de estratificação da coluna d'água; porém, também exerce forte influência no processo de ressuspensão de sedimentos no fundo, pois demonstra grande sensibilidade na geração de tensões cisalhantes oriundas das ondas, e culmina em maiores taxas de respiração por parte das bactérias que decompõem a matéria orgânica e conseqüentemente aumentam a demanda bioquímica de oxigênio. Portanto, estes processos bentônicos podem causar extremos estresses no camarão, em função da variação na concentração de oxigênio dissolvido no fundo, e devem ser aprofundados em estudos mais específicos que considerem a influência da propagação de ondas, e não somente de aeradores.

CONCLUSÕES

O artigo teve por objetivo discutir a influência de tensões de cisalhamento no fundo dos viveiros geradas pela propagação de ondas. Para tal, uma revisão bibliográfica sobre formulações de geração e propagação de ondas foi apresentada, da mesma forma que formulações para escoamento na camada limite e tensões de cisalhamento. O estudo trouxe à luz uma problemática que não vem sendo considerada em estudos sobre qualidade de água em viveiros de carcinicultura, uma vez que há poucas pesquisas na literatura sobre influência de ondas no fundo dos viveiros, e pouco se sabe sobre processos bentônicos e sobre sua importância na saúde do fundo e na qualidade d'água, primordiais para a eficiência da produção de camarões.

Foi proposta a metodologia da análise dos impactos no fundo dos viveiros através de um mosaico de tensões de cisalhamento, que permite o mapeamento do fundo dos viveiros. A análise através do mosaico permite reunir em uma única figura dados integrados de profundidade, material de fundo, período e altura das ondas presentes no viveiro, através de dois números adimensionais, tendo como resultado a avaliação de quais combinações entre estes dados são benéficas ou prejudiciais para o cultivo de camarões. Porém, estudos mais aprofundados devem ser realizados, amparados por campanhas de medição de ondas no interior dos viveiros e caracterização granulométrica em todo o viveiro, de forma a melhor avaliar a geração de ondas e sua influência nos processos de ressuspensão e deposição no fundo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e pelo Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, possibilitando a realização de visitas de campo a fazendas de camarão no Rio Grande do Norte. Os autores agradecem ao Engenheiro Elizeu Augusto de Brito pelo apoio às visitas de campo, pelas informações fornecidas e pelos comentários, e ao M.Sc. Alfredo Osvaldo Dantas de Azevedo por permitir o acompanhamento dos experimentos que ele conduzia e pelas explicações apresentadas.

REFERÊNCIAS

- AVNIMELECH, Y. 2003. "Aeração e distribuição de aeradores nos viveiros de camarão". *Trabalhos da sessão especial do camarão cultivado World Aquaculture* 2003. Pp. 261-273.
- BELTRAME, E., DA COSTA, F. 2004. *Curso de Construções Aplicadas a Fazendas de Cultivo de Camarões Marinhos*. II Semana de Aqüicultura – SEMAQUI. Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BOUDREAU, B.P. 1997. "A one-dimensional model for bed-boundary layer particle exchange". *Journal of Marine Systems*. Vol. 11. Pp. 279-303.
- BOYD, C.E. 1998. *Manejo da qualidade da água na aqüicultura e no cultivo do camarão marinho. Manual de gerenciamento da qualidade da água no cultivo do camarão marinho*. Universidade de Auburn, Alabama. Associação Brasileira de Criadores de Camarão – ABCC.
- CHL - COASTAL AND HYDRAULICS LABORATORY. 2002a. "Meteorology and Wave Climate". In: *Coastal Engineering Manual*, Chapter 2. Vicksburg, Mississippi. US Army Engineering Research and Development Center.
- CHL - COASTAL AND HYDRAULICS LABORATORY. 2002b. "Sediment Transport outside the Surf Zone". In: *Coastal Engineering Manual*, Chapter 6. Vicksburg, Mississippi. US Army Engineering Research and Development Center.
- CUNHA, M.C.S. 2006. *Contribuições da engenharia costeira para a carcinicultura*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ. 185 p.

- DEAN, R.G., DALRYMPLE, R.A. 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Cornell University. World Scientific.
- HOWERTON, R. 2001. *Best management practices for hawaiian aquaculture*. Center of tropical and subtropical aquaculture. p. 148.
- PETERSON, E.L. 1999. "Benthic shear stress and sediment condition". *Aquacultural Engineering*. Vol. 21. Pp. 85-111.
- PETERSON, E.L. 2000. "Observations of pond hydrodynamics". *Aquacultural Engineering*. Vol. 21. Pp. 247-269.
- PRESTON, N., ROTHLISBERG, P., BURFORD, M., JACKSON, C. 2002. *The environmental management of shrimp farming in Australia*. In: Shrimp Farming and the Environment.
- TIENSONGRUSMEE, B. 1982. "Wind and wave action on coastal ponds". *Report of consultation / seminar on coastal fishpond engineering*. 4 a 12 de agosto de 1982. Surabaya, Indonesia. P. 192-195.
- TREECE, G.D. 2002. *Pond design and construction*. In: *Methods for improving shrimp farming in Central America*. Sea Grant College Program. Texas A&M University.
- TUCKER, C.S. 1999. *Characterization and management of effluents from aquaculture ponds in the Southeastern United States*. In: SRAC Nº 470. Southern Regional Aquaculture Center.
- WAINRIGHT, S.C., HOPKINSON Jr., C.S. 1997. "Effects of sediment resuspension on organic matter processing in coastal environments: a simulation model". *Journal of Marine Systems*. Vol.11. Pp. 352-368.
- WIEGEL, R. *Oceanographical Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1964.
- shrimp ponds in NE Brazil. The influence of pond length (wind fetch) on wave formation is also verified.*
Key-words: shrimp farming; sediment transport; waves in ponds; coastal zone management.

Study on Wave Induced Bottom Stresses in Shrimp Farms Ponds

ABSTRACT

Wind action upon the water surface of ponds in shrimp farms is usually considered beneficial because it enhances water oxygenation. However, the wind generated short period waves are very steep, strongly non linear and, upon reflection by the margins, may be amplified. Depending on the water depth which is associated with the seasons when the shrimps are raised or harvested, wave induced bottom stresses may resuspend sediments, cause stress on the animals, and sometimes lead to losses in production. Using wave forecasting formulas for fetch limited regions, wave heights and periods are estimated, bottom stresses are computed for 3 conditions of water depths found in typical