# ESTUDO NUMÉRICO DE ONDAS MONOCROMÁTICAS PROPAGANDO NO EMBAIAMENTO DA REGIÃO DA CURVA DA JUREMA, VITÓRIA, ES

*Fábio Pavan Piccoli[1] & Julio Tomás Aquijes Chacaltana[2]*

**RESUMO -** Ondas propagando-se em direção à costa sofrem importantes transformações, que são de fundamental importância para o entendimento das mudanças da linha de costa e dos processos que ocorrem nas proximidades da linha de costa. Os modelos numéricos são instrumentos utilizados por engenheiros e oceanógrafos como um método de estudos desses processos dentro de uma pequena margem de erro. Neste trabalho de pesquisa são realizadas simulações numéricas para avaliar a interação de ondas monocromáticas com uma região costeira complexa, o pequeno embaiamento da Curva da Jurema. Esta região está localizada na Baia do Espírito Santo e vêm sofrendo processos de erosão intensos. As simulações foram realizadas usando o modelo numérico FUNWAVE 2.0, fundamentado nas equações do tipo Boussinesq de Wei et al. (1995). A grade computacional não-uniforme utilizada tem espaçamentos típicos de 5x5m. Em concordância com o observado em campo, os resultados de simulações de ondas incidentes do quadrante de Nordeste e de Sudeste mostraram que as amplitudes das ondas são quase que totalmente dissipadas dentro do embaiamento e se aproxima de zero junto à praia. Os processos de refração, de difração e de reflexão da onda incidente com a profundidade e os contornos da costa são evidenciados, no campo de onda, e estes processos podem ser responsáveis pelo aparecimento de um super-harmônico no espectro de onda proveniente de Sudeste.

**ABSTRACT -** Water waves propagating in direction to the coast suffer important deformations, which are important for several processes occurring on the nearshore. Numerical models are used for engineers and oceanographers as tools for study those coastal processes with a small range of error. In this work numerical simulations are realized for investigated the interaction of monochromatic incident waves with a complex coastal area, “Curva da Jurema”. This region is located in Espírito Santo Bay and suffering erosion processes. The numerical simulations are run by using the numeric model FUNWAVE 2.0, based on the Boussinesq-type equations of Wei et al. (1995). Non-uniform grid used has typical length from 5mx5m. The results of simulation of the incident waves of the Northeast and Southeast quadrant had shown that the waves amplitude are almost that totally dissipated inside of the embayament and it approaches zero close to the beach. The refraction, diffraction and reflection processes of the incident wave with the depth and the coastal boundaries are evidenced, in field wave, and these processes can be responsible for the appearance of a super-harmonic on the wave spectrum proceeding from Southeast.

**Palavras-chave: Equações de Boussinesq, Erosão Costeira, Modelagem Numérica.**

1) Doutorando em Engenharia Ambiental da UFES, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910 Vitória. E-mail: fabio_p_p@hotmail.com.br
2) Professor Adjunto da UFES, CT, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910 Vitória. E-mail: juliotac@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a propagação em direção à costa, as ondas *swell* geradas em águas profundas são influenciadas pela plataforma continental e sofrem uma série de modificações devido ao gradiente batimétrico. Essas modificações, tais como refração, difração, reflexão e quebra, alteram as características das ondas (forma, altura, comprimento, velocidade e direção) durante sua propagação (MUEHE, 1996; SILVESTER e HSU, 1997; SILVA et al., 2004). Próximo da linha de costa, dependendo da intensidade dessas modificações das ondas, pode ocorrer a quebra da onda gerando uma zona de forte turbulência onde o fluxo de energia é dissipado, assim, diminuindo a altura da onda em direção à costa (FREDSØE e DEIGAARD, 1997). Essa turbulência, causada pela quebra da onda, pode mobilizar e colocar os sedimentos em suspensão, os quais serão transportados pelas correntes induzidas pelas ondas, tais como as correntes longitudinais (longshore currents) e as correntes de retorno (rip currents) (LIN e LIU, 1998).

Após o final da quebra de uma onda em sua progressão através da zona costeira, existe um uprush, um fluxo de água sobre a face da praia (beachface). Logo em seguida, o backwash causado pela gravidade o que resulta em um refluxo de água com velocidade inicialmente baixa; entretanto, a aceleração pode ser rápida com as condições de regime de fluxo superficial alcançados. A velocidade do refluxo depende da declividade da face da praia, da perda de volume por percolação, do volume de água neste refluxo, e da adição de água da zona efluente. Estes fluxo e refluxo definem o espraiamento que são importantes na morfologia da linha de costa.

Os modelos numéricos têm-se mostrado uma importante ferramenta para simular a propagação de ondas de gravidade quando viajam em direção a região costeira; para compreender processos erosivos instalados numa região específica da linha de costa; ou para o entendimento sobre o comportamento das ondas quando interagem com portos, marinas ou quebra-mares.

No presente trabalho será usado o modelo numérico FUNWAVE 2.0, fundamentado nas equações de Boussinesq, para avaliar o padrão de ondas no ambiente costeiro marinho, especificamente para uma região complexa da Baía do Espírito Santo, o embaiamento da Curva da Jurema pertencente à Ilha de Vitória.

## 2. MODELO DO TIPO BOUSSINESQ TOTALMENTE NÃO-LINEAR DE ONDAS

O modelo numérico FUNWAVE2D 2.0 produzido pelo Center for Applied Coastal Research (CACR) é capaz de simular ondas de superfície em regiões costeiras incluindo zona de surfe externa e interna. O modelo é baseado nas equações do tipo Boussinesq de Wei et al (1995) para segunda ordem de dispersão e as novas equações são solucionadas em coordenadas curvilíneas generalizadas conforme Shi et al. (2001).

As equações de Boussinesq totalmente não-linear derivada por Wei et al. (1995) são determinadas por

Conservação da Massa (COM):

$$\eta_t + \nabla \cdot \mathbf{M} = 0 \qquad \text{Equação 1}$$

onde

$$\mathbf{M} = (h+\delta\eta)\left\{\mathbf{u}_\alpha + \mu^2\left[\frac{1}{2}z_\alpha^2 - \frac{1}{6}\left(h^2 - h\delta\eta + \delta^2\eta^2\right)\right]\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}_\alpha) + \mu^2\left[z_\alpha + \frac{1}{2}(h-\delta\eta)\right]\nabla[\nabla\cdot(h\mathbf{u}_\alpha)]\right\} + O\left(\mu^4\right) \qquad \text{Equação 2}$$

Equação da Quantidade do Movimento (EQM):

$$\mathbf{u}_{\alpha t} + \delta(\mathbf{u}_\alpha\cdot\nabla)\mathbf{u}_\alpha + \nabla\eta + \mu^2\mathbf{V}_1 + \delta\mu^2\mathbf{V}_2 = O\left(\mu^4\right) \qquad \text{Equação 3}$$

onde

$$\mathbf{V}_1 = \frac{1}{2}z_\alpha^2\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u}_{\alpha t}) + z_\alpha\nabla[\nabla\cdot(h\mathbf{u}_{\alpha t})] - \nabla\left[\frac{1}{2}(\delta\eta)^2\nabla\cdot\mathbf{u}_{\alpha t} + \delta\eta\nabla\cdot(h\mathbf{u}_{\alpha t})\right] \qquad \text{Equação 4}$$

$$\mathbf{V}_2 = \nabla\left\{(z_\alpha - \delta\eta)(\mathbf{u}_\alpha\cdot\nabla)[\nabla\cdot(h\mathbf{u}_\alpha)] + \frac{1}{2}\left(z_\alpha^2 - \delta^2\eta^2\right)(\mathbf{u}_\alpha\cdot\nabla)(\nabla\cdot\mathbf{u}_\alpha)\right\} + \frac{1}{2}\nabla\left\{[\nabla\cdot(h\mathbf{u}_\alpha) + \delta\eta\nabla\cdot\mathbf{u}_\alpha]^2\right\} \qquad \text{Equação 5}$$

onde $\eta$ á a elevação da superfície, $h$ é a profundidade da água em repouso (still water depth), $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$ é o operador derivada horizontal e o subscrito $t$ é a derivada parcial com respectivo tempo. $\delta = \frac{a_0}{h_0}$, $\mu = k_0 h_0$ são escalas de não-linearidade e dispersão respectivamente, onde $a_0$, $h_0$ e $k_0$ são a amplitude típica de onda, a profundidade da água em repouso e o número de ondas, respectivamente.

$$z_\alpha = \left[(1+2\alpha)^{1/2} - 1\right]h \approx -0.531h \qquad \text{Equação 6}$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(\frac{z_\alpha}{h}\right)^2 + \frac{z_\alpha}{h} \approx -0.390 \qquad \text{Equação 7}$$

$\mathbf{u}_\alpha$ é a velocidade na profundidade na coordenada $z = z_\alpha$: $\mathbf{u}_\alpha = (\nabla\phi)_{z=z_\alpha}$. Sendo $\phi$ o potencial de velocidade.

O modelo numérico FUMWAVE 2.50 é escrito em linguagem Fortran f77. O arquivo contém os comprimentos das variáveis dimensionais, onde o usuário pode mudar os valores das dimensões do domínio para atender os requerimentos da simulação.

Existem poucos cálculos explícitos da propagação da onda em regiões costeiras e nenhum processo da zona de surfe tem sido ainda feito usando modelos baseados na Teoria de Boussinesq. O extenso termo médio do resultado do modelo utilizado para obter predições de correntes médias não tem sido preparado. Com isso, as aproximações do modelo de Boussinesq podem fornecer uma vantagem sobre os processos mais estabilizados do uso de um campo de tensão de radiação para mover um campo de corrente média variando lentamente.

## 3. ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo compreende a uma região abrigada da Curva da Jurema localizada na Ilha de Vitória, dentro da Baía do Espírito Santo (Figura 1).

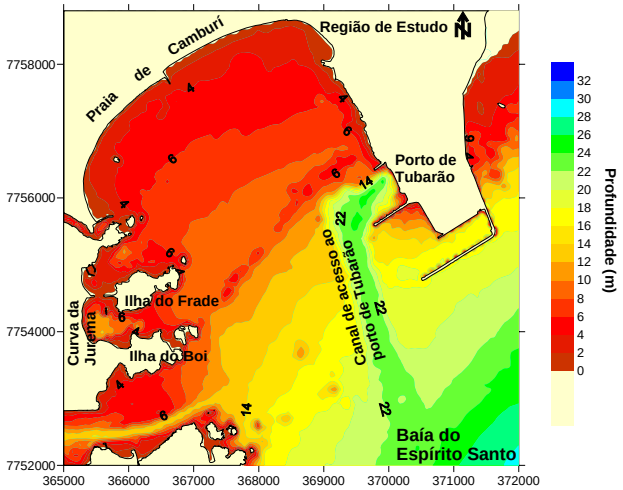


Figura 1: Localização da Baía do Espírito Santo.

Localizada na parte leste da Ilha de Vitória, de latitude 20,30° S e de longitude 40,30° W, a Curva da Jurema apresenta inúmeros quiosques e excelente local para práticas esportivas (vela, jet-sky e passeios de lancha) dando ao usuário 800 metros de extensão e diversas opções de lazer (Figura 2). Essa pequena praia se formou após o aterro da região da Praia do Suá em Vitória, que alterou os contornos da ilha de Vitória, devido ao grande desenvolvimento urbano da capital. Sobre o aterro foram construídos a Praça do Papa, o Shopping Vitória, a Enseada do Suá e aproximou a ilha do Boi à ilha de Vitória em que deixou de ser uma ilha independente, ajudando assim a delinear a praia da Curva da Jurema.

Figura 2: Imagem aérea da região de estudo, Curva da Jurema. Fonte: http://www.mar.mil.br/eames/Curiosidades.htm.

Atualmente a praia vem apresentando um processo erosivo intenso em sua porção sul, próximo à entrada da ilha do Boi (Figura 3). Este problema tem retirado sedimento da praia, devido à ação de ondas, marés e correntes, deixando uma menor faixa de areia para os banhistas e preocupando os comerciantes do local, no qual pode ter certo risco para seus quiosques devido à ação do mar e migração dos usuários para locais com maior faixa de areia.

Figura 3: Fotos da área de erosão da praia da Curva da Jurema. Fonte: Fábio Pavan Piccoli, 2007

As principais ondas que entra nessa pequena baía são ondas incidentes do quadrante nordeste e sudeste. A praia, por ser cortada no centro pela ilha do Frade, apresenta duas entradas para o oceano. Nestas entradas as ondas propagam em direção à praia e sofrem vários processos que influenciam no estado hidrodinâmico do embaiamento, como a refração, difração, espraiamento, interação onda-onda e, além das correntes geradas devido à ação destas ondas. Tais processos ocorrem devido à presença de obstáculos na região, como a presença da ilha do Frade, costões rochosos, Ponte, morfologia da praia, entre outros.

Estudos de Albino et al. (2001) observaram que ocorrem maior difração e dissipação de energia das ondas a partir do porto de Tubarão e na entrada da Baía do Espírito Santo e os dados

obtidos sobre o clima de ondas da região pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias), entre março de 79 a setembro de 80, nos arredores do Porto de Tubarão, Vitória, foram utilizados pela RAM Engenharia (1994) para obter as alturas e períodos mais freqüentes da Baía do Espírito Santo (Figura 4).

A Ponta de Tubarão protege a baía contra as ondas incidentes de NE desenvolvendo uma área com ondas inferiores a 0,3 m e, é ainda responsável pela difração das ondas que passam de NE para SE e terminando praticamente incidente de S, dentro da baía, próximo à linha de costa, (Albino et al., 2001).

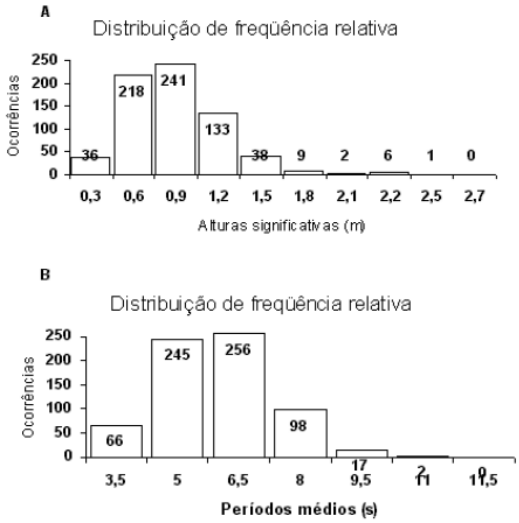


Figura 4: Distribuição das freqüências das alturas de ondas significativas nas proximidades do porto de Tubarão, Vitória (A). Distribuição das freqüências dos períodos nas proximidades do porto de Tubarão, Vitória, ES (B). Fonte: Adaptado de Albino (1999).

## 4. CONDIÇÕES INICIAIS DE SIMULAÇÕES

No estudo de propagação de ondas na Curva da Jurema foram considerados dois padrões de ondas, o primeiro com ondas vindas de sudeste e o segundo com ondas vindas de nordeste-leste. A Figura 5a mostra o domínio rotado paralelamente às cristas da onda de sudeste com 45°. Na Figura 5b mostra o domínio para a simulação de ondas de Nordeste rotado com um ângulo de 10°, aonde as ondas vindas desse quadrante são difratadas pelo porto de Tubarão e refratadas pelos contornos batimétricos da Baía do Espírito Santo onde propagam com um pequeno grau de incidência.

A grade usada para representar a região da Curva da Jurema é constituída por 901x551 pontos com espaçamento médio de 5m, proporcionando um domínio de aproximadamente 4000m na direção –X e 2750m na direção –Y. A profundidade de geração das ondas é de aproximadamente 12m. Camadas de absorção de energia de ondas foram colocadas na região da praia no interior do embaiamento da Curva da Jurema, para diminuir a reflexão do arco praial.

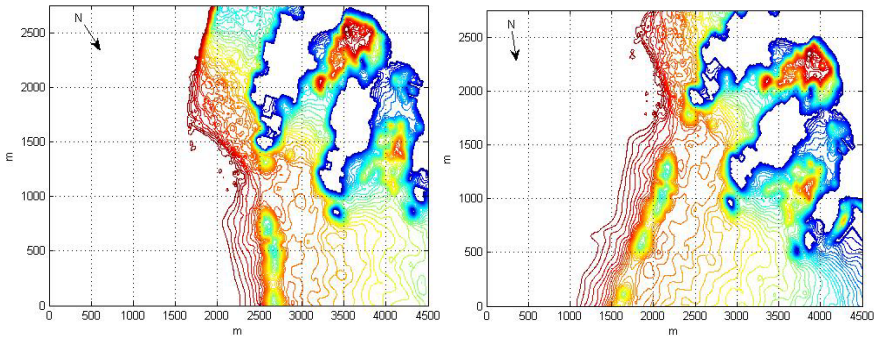


Figura 5: Domínios para a simulação de ondas do quadrante Sudeste (superior) e Nordeste (inferior).

Diversas simulações numéricas foram realizadas considerando ondas monocromáticas. Neste trabalho serão apresentados dois cenários de ondas monocromáticas de períodos de 8s e 10s e ambos considerando uma altura de 0,8m, valor de altura significativa típica para a região. O tempo de simulação para os cenários de sudeste e nordeste foram, respectivamente, de 2000 e 900 segundos que para um incremento de tempo de 0,1s, corresponde a um total de 20001 e 9001 passos de tempo. O incremento de tempo foi escolhido de forma a satisfazer o critério de estabilidade do modelo FUNWAVE e tempo de simulação de forma a garantir que a onda tenha percorrido todo o domínio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Simulação de ondas do Quadrante Sudeste

As simulações da propagação de ondas do Sudeste para a região da Curva da Jurema mostram que as ondas são espalhadas quase que completamente pelos processos combinados de refração, difração e reflexão nos contornos rochosos da região de estudo. Os resultados mostrados a seguir são para ondas de 0,8m de altura e período de 8s, dentro dos padrões de alta energia de onda que chegam à Baía do Espírito Santo.

Na região é possível observar pela Figura 6 que as ondas são altamente difratadas e refratadas na entrada do embaiamento da Curva da Jurema pelos costões rochosos da Ilha do Boi e ilha do Frade (Figura 1) que atuam como grandes dissipadores de energia de onda. A simulação mostrou que as ondas de 0,8m colidem com os contornos rochosos da região e são refletidas ao longo do domínio.

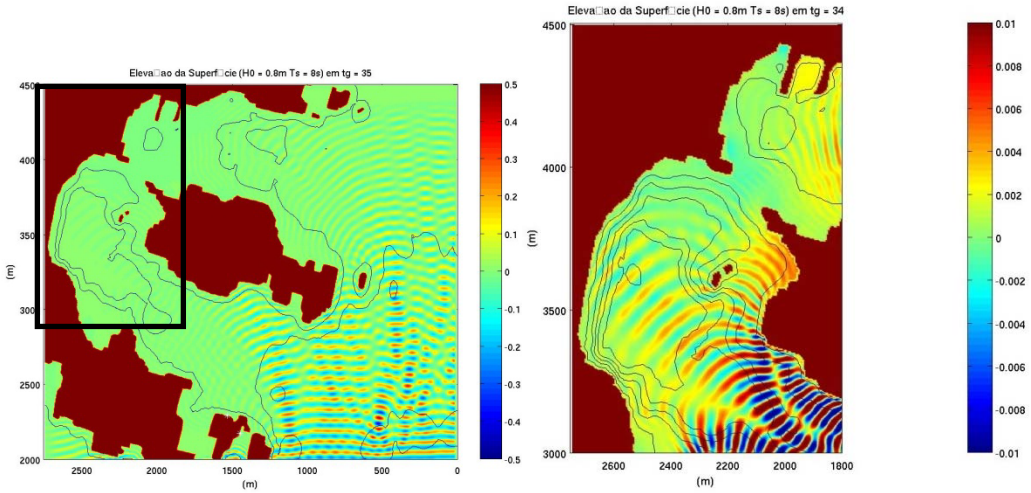


Figura 6: Elevação da Superfície (m) na Região da Curva da Jurema. Simulação de ondas de sudeste com $Ts = 8s$ e $H_0 = 0{,}8m$

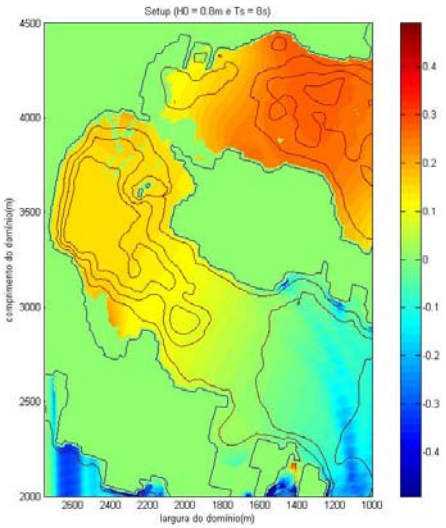


Figura 7: Setup e Setdown (cm) na Região da Curva da Jurema gerado por ondas de $Ts = 8s$ e $H_0 = 0{,}8m$

Os valores do Setup e Setdown dentro do embaiamento, região próxima à praia, são muito pequenos com cerca de +0,48cm para o Setup e -0,35cm para o Setdown (Figura 7). Na entrada do embaiamento da Curva da Jurema, nos costões rochosos, o Setup e Setdown apresentaram valores maiores com aproximadamente +2,3 cm e -3,1 cm respectivamente.

As alturas significativas máximas encontradas dentro do embaiamento foram de aproximadamente 2cm muito menor que a encontrada nas proximidades da entrada do embaiamento (aproximadamente 1,0m), tendo uma dissipação da amplitude de quase 97,5% da altura de 0,8m gerada em profundidade de 12m.

É de esperar que as pequenas alturas dentro do embaiamento traduzam pequenos movimentos da água. Dentro do embaiamento foram distribuídas estações de monitoramento próximas à praia, para a análise de velocidades e elevação da superfície (Figura 8). Pode ser observada na análise espectral da Figura 9 que as freqüências das ondas geradas (0,125Hz) originam ondas de

superharmônicos ou ondas de infragravidade (surf beat) de ordem maior de 20 segundos e chegando até valores maiores que 100 segundos aproximadamente, porém com pequena energia.

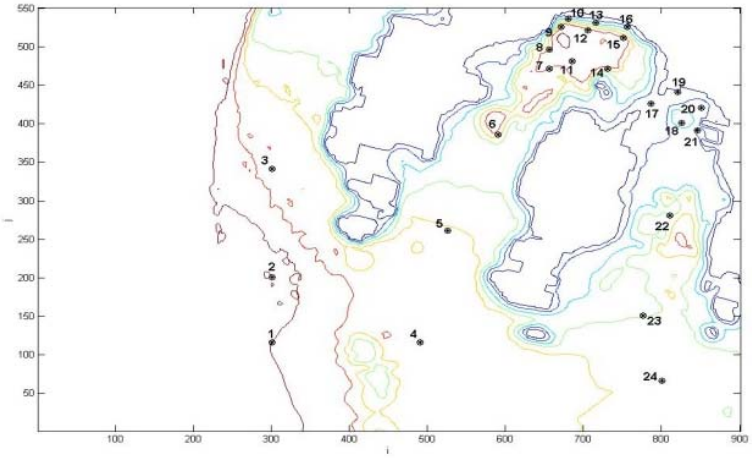

Figura 8: Localização das estações amostrais de ondas no domínio de sudeste.

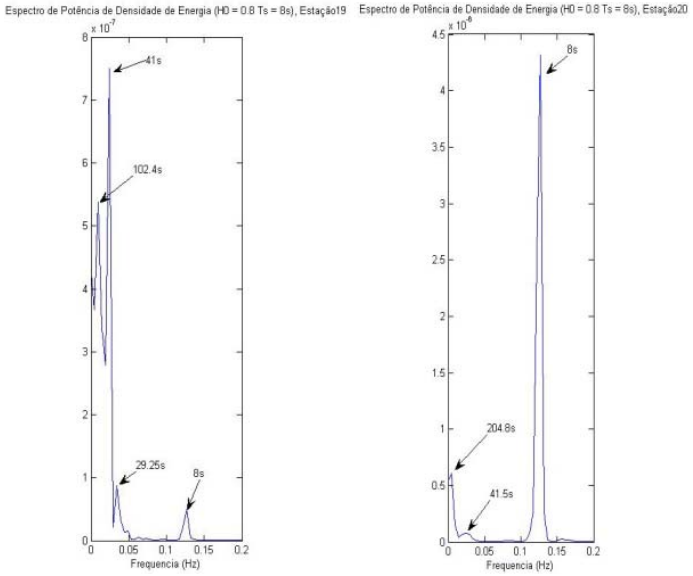


Figura 9: Espectro da energia de ondas de 8 segundos nas estações 19(esquerda) e 20(direita).

Encontra-se em Thompson e Briggs (1993) explicações teóricas para o surgimento de ondas longas em regiões costeiras. As tensões de radiação em que abaixa o nível da água local sob as ondas curtas mais altas e eleva o nível da água nas ondas curtas baixas. Dessa forma o agrupamento nas ondas de vento induz um movimento de componente de baixa freqüência em qualquer profundidade. Os movimentos de baixa freqüência, ou ondas longas, são ligados aos grupos de ondas curtas. Essas ondas propagam na velocidade de grupo de ondas curtas e são conhecidas como ondas longas de “Bound”. Geralmente essas ondas podem causar aumento da propagação de ondas longas livres em águas rasas quando a energia de ondas curtas é dissipada, como na zona de surfe, ou parcialmente bloqueada, como em entradas de locais abrigados. Uma vez que as ondas longas livres são efetivamente refletidas por uma costa, também é esperada a propagação de ondas longas em direção ao mar. Essas podem ser parcialmente refletidas de volta para a costa pelas variações de

profundidade. Ondas longas propagando livremente na costa (ondas de borda) podem também ser formadas. Essas ondas podem causar problemas em portos através da ressonância das oscilações de freqüências na escala de ondas longas.

As componentes da velocidade (U, V, W) no fundo, em profundidade média e na superfície foram registradas a ser igual e próximo de zero nas estações de 5 a 16, mas nas outras estações localizadas fora do embaiamento apresentaram velocidades médias, mostradas nas tabelas abaixo, durante a passagem de aproximadamente 10 períodos de onda. As velocidades de fundo nas estações mostraram um fluxo de retorno (Tabela 2 e Tabela 4) nas estações de 1 a 4, indicado pelos números negativos das componentes de velocidade. Isso pode ser explicado pela reflexão da onda nos contornos de terra e pela declividade batimétrica da região, pois a onda propaga de uma região de maior profundidade para uma região de menor profundidade.

Tabela 1: Valores das médias das componentes das velocidades no fundo para cada Estação em determinado nível z com passagem de 10 períodos de onda.

| Estações | z(m) | U(cm/s) | V(cm/s) | W(cm/s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -11,995 | -0,181 | -0,003 | -0,001 |
| 2 | -12,000 | -0,159 | -0,018 | 0,000 |
| 3 | -9,643 | -0,189 | -0,033 | 0,001 |
| 4 | -9,280 | -0,082 | 0,020 | 0,000 |
| 5 | -8,249 | -0,057 | -0,005 | 0,000 |
| 6 | -8,899 | -0,001 | 0,007 | 0,000 |
| 7 | -9,974 | -0,004 | 0,001 | 0,000 |
| 8 | -9,827 | -0,005 | -0,001 | 0,000 |
| 9 | -9,682 | -0,002 | -0,001 | 0,000 |
| 10 | -3,325 | -0,002 | 0,001 | 0,000 |
| 11 | -11,338 | -0,005 | 0,000 | 0,000 |
| 12 | -10,744 | -0,005 | 0,001 | 0,000 |
| 13 | -3,930 | -0,006 | 0,000 | 0,000 |
| 14 | -8,290 | -0,013 | 0,005 | -0,001 |
| 15 | -10,651 | -0,004 | 0,003 | 0,000 |
| 16 | -2,667 | -0,003 | 0,002 | 0,000 |

Tabela 2: Valores das médias das componentes das velocidades em profundidade média para cada Estação em determinado nível z com passagem de 10 períodos de onda.

| Estações | z(m) | U(cm/s) | V(cm/s) | W(cm/s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -7,997 | -0,161 | -0,004 | -0,009 |
| 2 | -8,000 | -0,139 | -0,018 | -0,009 |
| 3 | -6,429 | -0,166 | -0,032 | 0,004 |
| 4 | -6,186 | -0,082 | 0,021 | -0,002 |
| 5 | -5,499 | -0,056 | -0,004 | -0,002 |
| 6 | -5,932 | -0,001 | 0,007 | -0,001 |
| 7 | -6,649 | -0,004 | 0,001 | 0,000 |
| 8 | -6,551 | -0,005 | -0,001 | 0,000 |
| 9 | -6,455 | -0,002 | -0,001 | 0,000 |
| 10 | -2,216 | -0,002 | 0,001 | 0,000 |
| 11 | -7,558 | -0,005 | 0,000 | 0,000 |
| 12 | -7,162 | -0,005 | 0,001 | 0,000 |
| 13 | -2,620 | -0,006 | 0,000 | 0,000 |
| 14 | -5,527 | -0,013 | 0,005 | 0,000 |
| 15 | -7,101 | -0,004 | 0,003 | 0,000 |
| 16 | -1,778 | -0,003 | 0,002 | 0,000 |

Tabela 3: Valores das médias das componentes das velocidades na superfície da água para cada Estação em determinado nível z com passagem de 10 períodos de onda.

| Estações | z(m) | U(cm/s) | V(cm/s) | W(cm/s) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -0,001 | -0,001 | -0,007 | -0,027 |
| 2 | -0,001 | 0,020 | -0,017 | -0,026 |
| 3 | -0,001 | 0,019 | -0,026 | 0,009 |
| 4 | 0,000 | -0,078 | 0,024 | -0,004 |
| 5 | 0,000 | -0,046 | 0,003 | -0,005 |
| 6 | 0,001 | -0,001 | 0,008 | -0,002 |
| 7 | 0,001 | -0,004 | 0,001 | 0,000 |
| 8 | 0,001 | -0,005 | -0,001 | 0,000 |
| 9 | 0,001 | -0,002 | -0,001 | 0,000 |
| 10 | 0,001 | -0,002 | 0,001 | 0,000 |
| 11 | 0,001 | -0,005 | -0,001 | 0,000 |
| 12 | 0,001 | -0,005 | 0,001 | 0,000 |
| 13 | 0,001 | -0,006 | 0,000 | 0,000 |
| 14 | 0,001 | -0,012 | 0,005 | 0,000 |
| 15 | 0,001 | -0,004 | 0,003 | 0,000 |
| 16 | 0,001 | -0,003 | 0,002 | 0,000 |

A simulação numérica para um caso de uma onda monocromática de altura de 0,8m e período de 8s mostrou que a praia da Curva da Jurema está bem protegida da ação de ondas vindas do quadrante sudeste devido à geometria da entrada do embaiamento na qual é muito complexa. Porém a propagação de ondas que passam da entrada do embaimento atua na formação de ondas de freqüências menores das que foram geradas, ondas de infragravidade, na região interna.

### 5.2. Simulação de ondas do Quadrante Nordeste

Os seguintes resultados numéricos mostram a simulação de ondas monocromáticas propagando-se no interior da região do embaiamento da Curva da Jurema. Foram simulados alturas de 0,8 m e período de 10 segundos. Em todas as simulações as ondas vindas do quadrante Nordeste-Leste não apresentaram efeitos significativos na praia localizada dentro do embaiamento. Portanto os resultados mostrados serão apenas para ondas com altura de 0,8m e período de 10 segundos, considerados aqui como os mais intensos da região. Os resultados são apresentados no último instante de simulação de t = 900 segundos.

As ondas do quadrante Nordeste ao chegar à Baía do Espírito Santo sofrem forte efeito de difração no porto de Tubarão que junto com a refração ocasionada pela variação de profundidade, ocasionam uma rotação nas cristas em direção à costa dissipando sua energia até chegar à praia da Curva da Jurema. Nesse processo a energia da onda vai diminuindo em direção a Curva da Jurema, e dentro do embaiamento a onda novamente começa a ser refratada e difratada pelos contornos batimétricos e da costa. A simulação mostra que as ondas impactam quase que diretamente nas ilhas do Boi e do Frade e entram frontalmente à região da Curva da Jurema (Figura 10). Mesmo as ondas entrando com as cristas quase que paralelamente à praia da Curva da Jurema, a sua energia é fortemente dissipada pelos efeitos que a onda sofre ao passar pelos contornos de costa.

Ao entrar no embaiamento a onda é refratada para as laterais nos costões rochosos das ilhas do Boi e do Frade e pela refração as cristas tendem a se alinhar com a linha de costa na entrada do embaiamento, isso gradativamente ocasiona diminuição na altura da onda que continua sua propagação em direção à praia, onde são refletidas e refratadas para a praia da Curva da Jurema com um forte decaimento em sua altura. A altura média calculada dentro do embaiamento, próxima a praia foi de 10cm. A onda simulada gerou um setup máximo de aproximadamente +0,75cm e indicados pelas regiões avermelhadas na Figura 11 e um setdown máximo de aproximadamente -1,2cm, indicado pela região azul na Figura 11. Essas diferenças no nível da água podem gerar correntes do nível mais alto para o mais baixo. As velocidades geradas pela onda simulada são mostradas na Figura 13 com uma magnitude média de 2,046 cm/s e máximas magnitudes no estreitamento da ponte e em regiões rochosas da entrada do embaiamento.

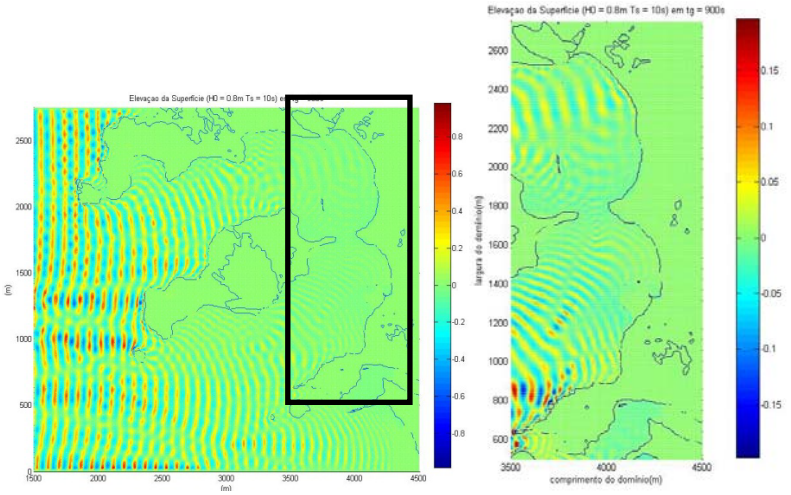

Figura 10: Elevação da Superfície (m) na Região da Curva da Jurema. Simulação de ondas de nordeste com $Ts = 10s$ e $H_0 = 0{,}8m$

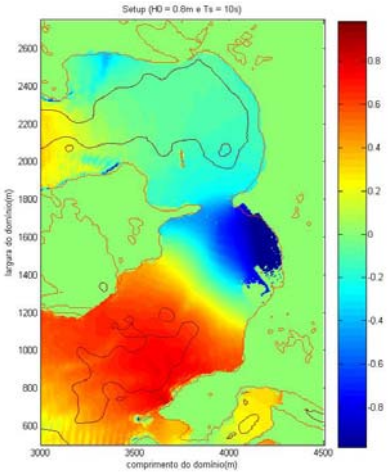

Figura 11: Setup e Setdown (cm) na Região da Curva da Jurema gerado por ondas de $Ts = 10s$ e $H_0 = 0{,}8m$

Procedendo de forma análoga ao caso de Sudeste, foram colocadas estações de monitoramento de dados de elevação e velocidade de onda (Figura 12) para a análise de ondas de Nordeste que propagam em direção à praia.

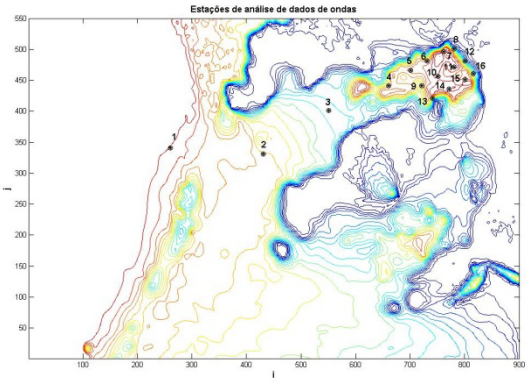


Figura 12: Domínio mostrando as estações de registro de ondas.

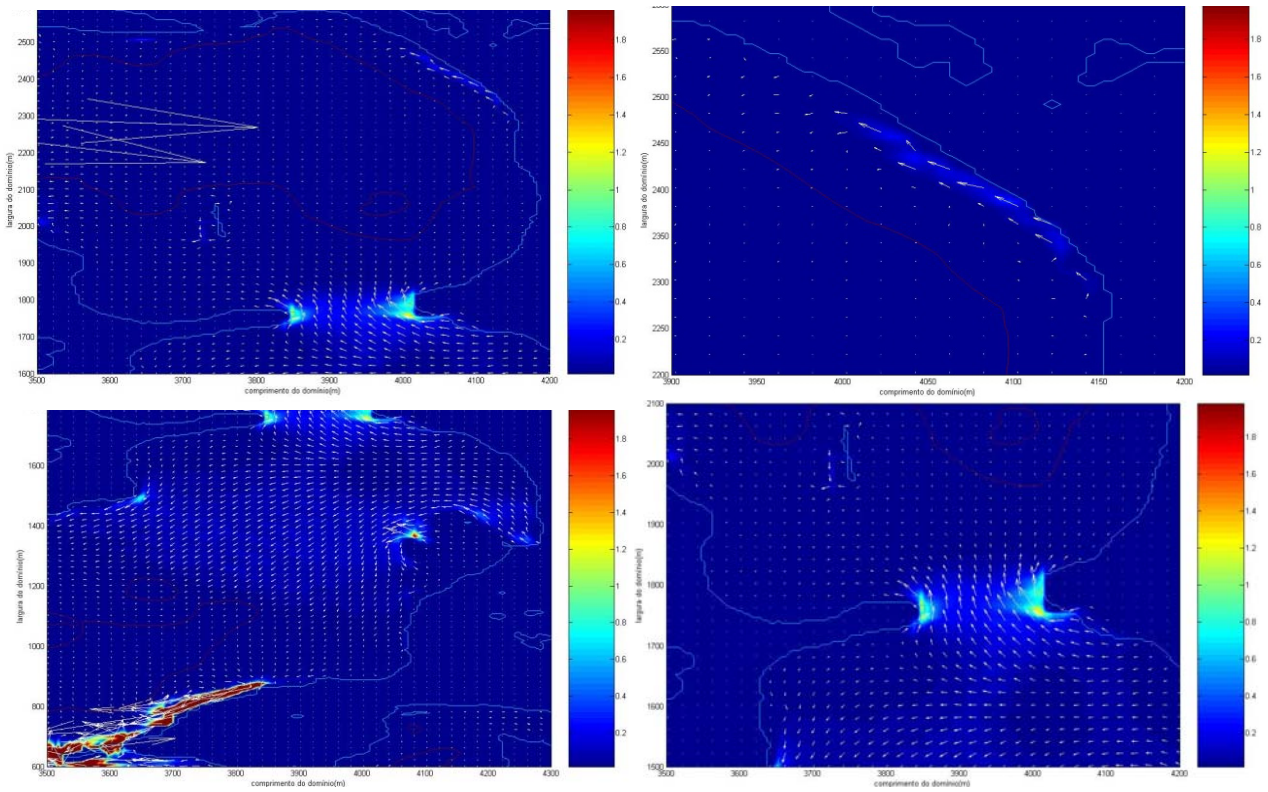

Figura 13: Campo de Velocidade em cm/s no interior da região da Curva na simulação de ondas com $Ts = 10s$ e $H_0 = 0{,}8m$.

Nas Estações 1, 2, 3 e 4 da Figura 14, onde se encontra de fora para dentro do embaiamento, a energia das ondas propagando em direção à praia vai diminuindo e é possível observar o aparecimento de subharmônicos, com período de 5 segundos (0,2Hz). Os subharmônicos podem ser devido aos processos de reflexão das ondas nos contornos da costa. A energia das outras estações diminui para os valores próximos de zero. A estação 12, que se localiza perto da linha de praia, apresenta maiores valores de energia de onda de todas as estações que se localizam dentro do embaiamento (Estações 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16). Para esta estação 12 foi elaborada uma visualização gráfica para as componentes da velocidade (U, V e W) e nível da superfície (z). Na Figura 15 é mostrada as variações temporais da elevação da superfície livre, componentes de velocidade longitudinal (V), transversal (U) e vertical (W) para profundidades localizadas nos níveis de fundo, de profundidade média e de superfície. As elevações da superfície não superaram $5cm$ e $-5cm$ de nível (z) e a magnitude das velocidades oscilaram dentro de $-5cm/s$ e $5cm/s$ em todos os níveis de profundidade indicando um comportamento explicado pela Teoria de ondas de pequena amplitude, onde as oscilações da elevação da superfície livre são proporcionais às oscilações da velocidade.

Os resultados de ondas de Nordeste não mostraram efeitos significantes em comparação às ondas de sudeste, nas quais surgiram superharmônicos ou ondas longas, na região da praia da Curva da Jurema.

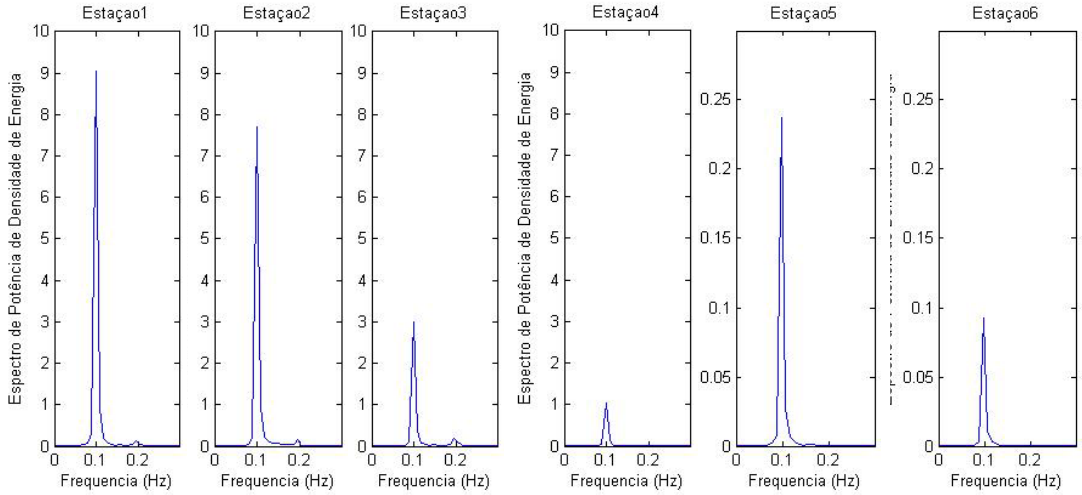


Figura 14: Análise espectral nas estações 1-6.

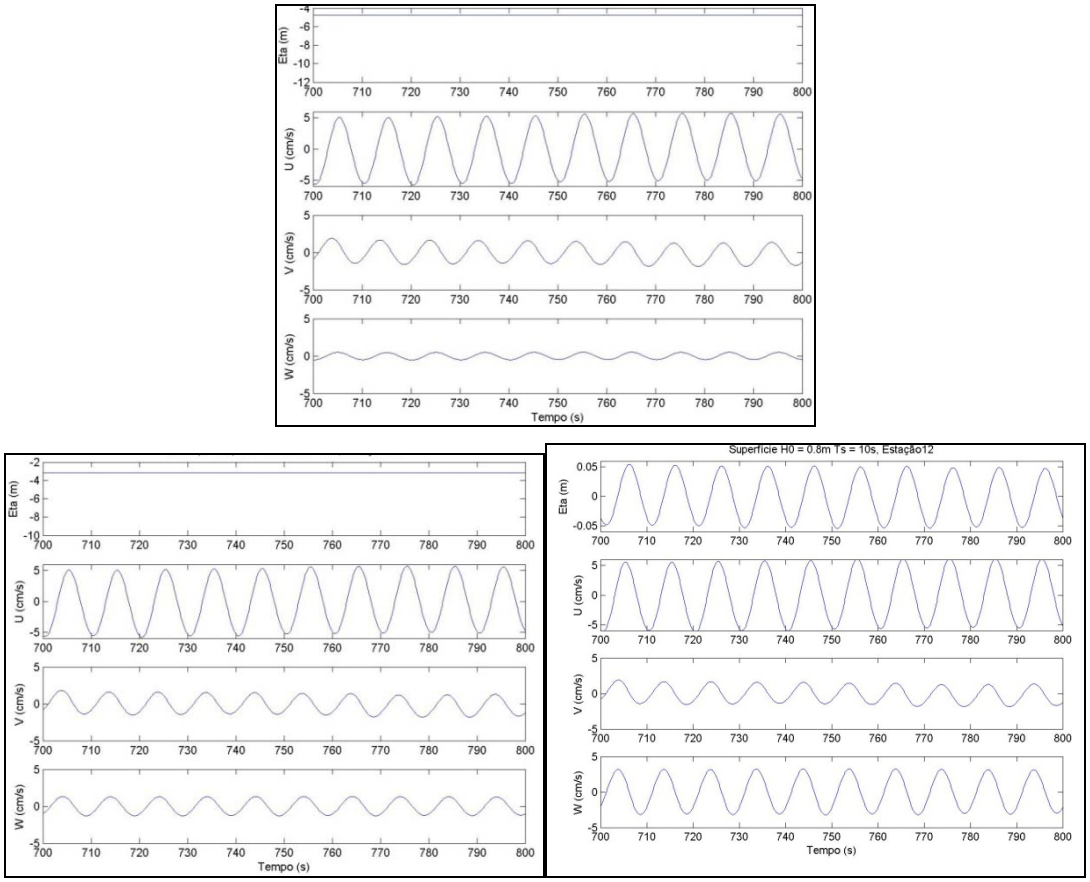


Figura 15: Gráfico de componentes de velocidade (U,V e W) e de nível (z) para uma onda de $Ts = 10s$ e $H_0 = 0{,}8m$ no fundo (superior), em profundidade média (meio) e na superfície (inferior).

## 6. CONCLUSÕES

Com o avanço das pesquisas marinhas, vários pesquisadores têm utilizado a modelagem numérica para a previsão de ondas em regiões costeiras. As equações do tipo Boussinesq já vêm sendo muito utilizadas para estudos de ondas em regiões costeiras. O modelo numérico empregado neste estudo é o FUNWAVE (KIRBY et al., 2005) que é fundamentado nas equações Boussinesq em coordenadas curvilíneas.

Os resultados das simulações no modelo numérico FUNWAVE mostraram a propagação de ondas monocromáticas em um domínio físico complexo da Baía do Espírito Santo. O domínio de estudo consistia de uma área abrigada à ação das ondas (Curva da Jurema).

Nessa região o modelo FUNWAVE reproduziu adequadamente os processos não-lineares das ondas quando propagam em águas rasas. A região apresenta duas entradas de ondas que são bem protegidas através da presença de ilhas. Neste domínio os processos de refração, difração, reflexão e empinamento da onda nos contornos da costa foram fundamentais para a distribuição e espalhamento da energia da onda que propaga para a praia da Curva da Jurema. As ondas de Nordeste foram as que conseguiram entrar no embaiamento, mas com um efeito muito pequeno na praia. As causas da erosão podem não ser somente devido à ação de ondas de gravidade. A ação da maré, ondas locais e uma possível onda longa estacionária dentro do embaiamento, como observado pelas simulações de ondas de sudeste em que gerou superharmônicas dentro do embaiamento próximo à praia, podem ser importantes para a retirada do sedimento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Laboratório de Simulação de Escoamento com Superfície Livre (LABESUL), pelo espaço físico e disponibilidade de materiais para a realização deste trabalho. Agradeço a agência financiadora FAPES pela disponibilidade de Recursos de fundamental importância para a realização desse trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINO, J (1999). **Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga a Povoação**, ES. Tese de doutoramento. Programa de Pós Graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências USP.
- ALBINO, J.; OLIVIERA, R.; MAIA, L. P.; ALENCASTRE,K (2001). **Processos atuais de sedimentação marinha e praial do litoral de Vitória, ES**. Relatório n. 198. 2506/ 2000 FACITEC & Prefeitura Municipal de Vitória.
- FREDSØE, F.; DEIGAARD, R (1997). **Mechanicals of Coastal Sediment Transport**. Advanced Series on Ocean Engineering, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering – Technical University Denmark. Singapore, New Jersey, Hong Kong: ed. World Scientific. v. 3.
- KIRBY, J. T.; LONG, W.; SHI, F (2005a). **FUNWAVE 2.0: Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model on Curvilinear Coordinates. Part I. Model Formulations.** University of Delaware,

Center for Applied Coastal Research, Dept. of Civil & Environmental Engineering. Newark, Delaware.

- KIRBY, J. T.; LONG, W.; SHI, F (2005b). **FUNWAVE 2.0: Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model on Curvilinear Coordinates. Part II. User's Manual.** University of Delaware, Center for Applied Coastal Research, Dept. of Civil & Environmental Engineering. Newark, Delaware.
- LIN, P.; LIU, P. L. –F (1998). **A numerical study of breaking waves in the surf zone.**. Journal of Fluid Mechanical, v. 359, p. 239-264.
- MUEHE, D (1996). Geomorfologia Costeira. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfolgia: exercícios, técnicas e aplicações.** ed. Bertrard Brasil, Rio de Janeiro. Cap.6, p.191-238.
- SILVA, C.G.; PATCHINEETAM, S.M.; NETO, J.A.B.; PONZI, V.R.A (2004). Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na Linha de Costa. In: NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E (orgs). **Introdução à Geologia Marinha.** Rio de Janeiro: ed. Interciência, Cap. 8, p. 175-218.
- SILVESTER, R.; HSU, R., C (1997). **Coastal Stabilization**. Advanced Series on Ocean Engineering, University of Western Australia. Singapore, New Jersey, Hong Kong: ed. World Scientific. v. 14.
- SHI, F.; DALRYMPLE, R. A.; KIRBY, J. T.; CHEN, Q.; KENNEDY, A (2001). **A Fully Nonlinear Boussinesq Model in Generalized Curvilinear Coordinates.** Coastal Engineering, vol. 42, p. 337-358.
- THOMPSON, E. F.; BRIGGS, M. J (1993). **Surf Beat in Coastal Waters.** U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station. Technical Report CERC-93-12.
- WEI, G.; KIRBY, J. T.; GRILLI, S. T.; SUBRAMANYA, R (1995). **A Fully nonlinear Boussinesq Model Equations for Surface Waves. I. Highly Nonlinear, Unsteady Waves.** Journal of Fluid Mechanics, 294, 71-92.