

## Modelo Numérico de Boussinesq Adaptado para a Propagação de Ondas de Embarcação em Águas Rasas

**Maria Francisca do Nascimento**

*Aquamodelo Consultoria e Engenharia*

*mfnascimento@yahoo.com*

**Claudio Freitas Neves**

*Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ*

*neves@peno.coppe.ufrj.br*

**Geraldo de Freitas Maciel**

*Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/UNESP*

*maciel@dec.feis.unesp.br*

*Recebido: 22/10/07 - revisado: 21/02/08 - aceito: 15/09/10*

---

### RESUMO

*Este trabalho apresenta os resultados da adaptação de um modelo numérico de hidrodinâmica costeira do tipo Boussinesq (FUNWAVE) à geração e propagação de ondas de embarcações em águas rasas. Tal modelo torna-se assim capaz de simular situações de ondas de embarcações em canais de navegação e hidrovias ao se propagarem em direção às margens, levando em conta transformações sofridas pelas ondas, quais sejam, refração, arrebentação, espreamento e geração de correntes. A aplicação do modelo, desde que devidamente validado, poderá ajudar na análise de processos erosivos em margens de canais de navegação, hidrovias e lagos decorrentes de ondas de embarcação.*

**Palavras-chave:** *ondas de embarcação, modelos de Boussinesq, fenômenos costeiros.*

---

### INTRODUÇÃO

Com a crescente valorização, no Brasil, do transporte hidroviário e da navegação de recreio em lagos, a preocupação ambiental no que se refere à preservação das margens tornou-se um assunto emergente. Órgãos ambientais procuram limitar a velocidade de navegação, como forma de restringir o impacto causado pelas ondas. No caso de hidrovias, porém, a passagem das embarcações por locais de largura restrita torna a ação erosiva das ondas mais intensa. Adota-se como critério que a velocidade máxima permitida seja aquela que gere altura máxima de onda igual à maior altura de onda de vento na mesma localidade. Parte-se do princípio de que não haverá interferência importante nas margens se, no máximo, houver equivalência com o que ocorre naturalmente em determinadas condições ambientais. Tal prática é questionável, tendo em vista as diferenças existentes entre os dois tipos de ondas: enquanto os resultados teóricos utilizados

para as ondas de vento admitem a hipótese de cristas longas (ou seja, unidirecional), as ondas de embarcação apresentam um padrão bi-dimensional em planta. Por outro lado, em canais onde não exista pista de vento suficiente para geração de ondas, tal critério pode se mostrar demasiadamente restritivo.

É fato conhecido que ondas geradas por embarcações provocam impactos sobre as margens e sobre o fundo de corpos de água rasos. São relatados por Blume (2002) casos ocorridos no Rio Paramatta, Austrália; Marlborough Sound, Nova Zelândia; Baía de São Francisco e Rio James, Estados Unidos. Verheij e Knaap (1995) realizaram estudos sobre erosão provocada por ondas de embarcação em Sarawak, Malásia. Atualmente, o *Quebec Department of Transport* (2003) estuda o problema de erosão no Rio São Lourenço, Canadá, onde 86% da erosão foi atribuída à ação das ondas de embarcação. Estudos de Brebner *et al.* (1966) também no Rio São Lourenço revelavam que, naquela época, a porcentagem de erosão provocada pela ação de ondas de embarcação era de apenas 1 a 2%. A com-

paração entre estes percentuais revela que provavelmente o aumento do tráfego de embarcações agravou o problema de erosão naquele rio.

O relatório de impacto ambiental produzido por Galinkin *et al.* (2001), sobre a situação atual da Hidrovia do rio Paraguai, diz que os comboios, que navegam com baixa velocidade, produzem ondas com níveis energéticos baixos, potencialmente pouco impactantes para as margens do rio. No entanto em algumas localidades, foram observados efeitos de ondas geradas por lanchas voadeiras e empurradores (quando navegam sozinhos) produzindo ondas altas que atacavam as margens. Conclui-se que o efeito das ondas de embarcação naquela região deve ser objeto de maiores estudos.

**Tabela 1 - Comparação entre modelos de ondas de embarcação (Nascimento 2007).**

Tipo	autores	modelo
● $\mathcal{R}$	Ertekin <i>et al.</i> , 1986	equações Green-Naghdi
● $\mathcal{R}$	Wu, 1987	Wu e equações KdV
● $\mathcal{R}$	Casciola & Landrini, 1996	Wu e equações KdV
● $\mathcal{R}$ $\approx$	Jiang, 2000	não linear total, Nwogu 1993
● $\approx$	Jiang, Henn & Sharma, 2002	não linear total, Nwogu 1993
● $\approx$	Liu & Wu, 2002	não linear total, Nwogu 1993
● $\approx$	Nwogu & Demirbilek, 2004	não linear total, Nwogu 1993
● $\approx$	Dam <i>et al.</i> , 2006	fracamente linear, não Mad-sen&Sorensen, 1992
● $\approx$	Nascimento, 2007	FUNWAVE, não linear total, Nwogu 1993
● =	pressão móvel	
● =	modelo de placas, pressão linear	
$\mathcal{R}$ =	resistência de navio	
$\approx$ =	propagação da onda e padrão	

Modelos numéricos que sirvam de referência em estudos de riscos causados por estas ondas tornam-se, então, uma ferramenta muito útil, devido ao baixo custo e rápida resposta, para avaliação de possíveis danos ambientais provocados. No que se refere aos modelos numéricos de propagação incluindo a simulação de fenômenos costeiros, são destacados da literatura quatro modelos, a saber: Stockstall e Berger (2001) (ondas e correntes geradas por embarcações navegando em hidrovias), Belibassakis (2003) (problema de propagação-refração-difração de ondas geradas por embarcações navegando próximo a regiões costeiras), Nwogu e Demirbilek (2004) (ondas e correntes geradas por embarcações em canais restritos) e Dam *et al.* (2006) (problema de propagação-refração-arrebentação de ondas geradas por embarcações em canais de navegação). A partir de um modelo hidrodinâmico (Navier-Stokes, equações de águas rasas ou equações de Boussinesq) é possível, com a adição de uma fonte conveniente, tornar tal modelo apto a reproduzir o fenômeno de ondas de embarcação. Se tal modelo incluísse ainda a possibilidade de simulação de fenômenos característicos de águas costeiras (refração, arrebentação, etc), ele seria capaz de reproduzir também a propagação e a ação dessas ondas junto à margem. Isto motivou Nascimento (2007) a modificar um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Boussinesq (FUNWAVE) de forma a investigar a sua aplicabilidade na simulação da propagação de ondas de embarcação e sua ação nas margens. A Tabela 1 resume investigações sobre o assunto na literatura.

O modelo FUNWAVE resolve as equações não-lineares de Boussinesq, conforme deduzidas por Wei e Kirby (1995) e reproduz a maioria dos fenômenos relacionados à transformação da onda em fundos de profundidade variável, quais sejam, dispersão em frequência, dispersão de amplitude, difração, refração pelo fundo e por correntes, transferência de energia entre componentes harmônicas e dissipação de energia por arrebentação da onda e atrito de fundo.

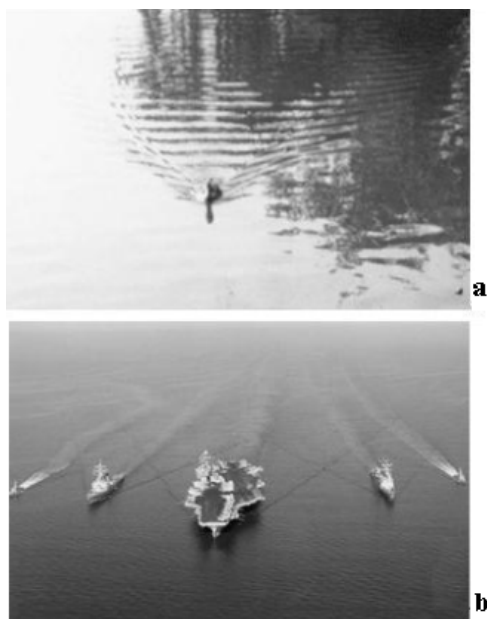
## CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS DE EMBARCAÇÃO

As ondas de embarcação são classificadas, segundo a profundidade relativa ( $h/\lambda$ ), em ondas de águas profundas ( $h/\lambda \geq 0,5$ ) ou de águas rasas ( $h/\lambda < 0,04$ ), onde  $h$  é a profundidade da coluna de

água onde a embarcação se desloca e  $\lambda$  é o comprimento da onda.

### Águas profundas

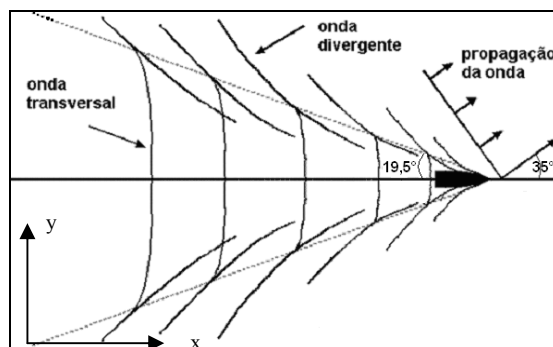
Em águas profundas, como relata Stoker (1957), as ondas de embarcação têm um comportamento muito peculiar: a perturbação gerada segue o objeto em movimento sem mudar sua forma, confinada em uma região atrás do mesmo, de tal modo que apresenta sempre uma forma em V, seja o objeto um pato nadando numa lagoa ou um grande porta-aviões (Figura 1).



**Figura 1 - a) Ondas geradas por um pato; b) Ondas geradas por tipos diferentes de embarcações.**  
Fonte: Gallery of Fluid Dynamics (2002)

A primeira explanação e o tratamento teórico desse fenômeno foram dados por Kelvin (1824-1907) e, por este motivo, também é conhecida como Teoria de Kelvin de Ondas de Embarcação ou Ondas de Kelvin. Este pesquisador concluiu que, em águas profundas, uma embarcação (ou qualquer objeto) que se desloque com velocidade constante gera sempre ondas confinadas em uma região com a forma de um V, com semi-ângulo igual a  $19,5^\circ$  em relação ao eixo imaginário do curso da embarcação e se propagam em um ângulo igual a  $35^\circ$  também em relação a esse eixo. Nessa região, surgem dois conjuntos distintos de ondas, um parece emanar da curvatura do barco na proa, chamado sistema divergente, e outro posicionado aproximadamente em

ângulos retos ao curso do barco, chamado sistema transversal (Figura 2).



**Figura 2 - Padrão Kelvin de ondas de embarcação em águas profundas.** Fonte: Coastal Engineering (2002)

Um parâmetro muito importante para caracterizar as ondas em águas profundas é o número de Froude referido ao comprimento da embarcação ( $F_L$ ). Originalmente proposto por William Froude (1810-1879), durante suas pesquisas para estabelecer leis de semelhança para estudos em escala reduzida da resistência de ondas ao avanço da embarcação, tal número é baseado na razão entre a velocidade e a raiz quadrada do comprimento de um objeto movendo-se em um corpo de água. O número de Froude do comprimento é dado por:

$$F_L = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

onde:  $L$  é o comprimento da embarcação,  $V$  é a velocidade da embarcação e  $g$  é a aceleração da gravidade. Em função desse número, o comportamento das ondas transversais e divergentes é analisado.

A celeridade das ondas transversais ( $C_T$ ) é igual à velocidade do barco. A celeridade das ondas divergentes ( $C_D$ ) é dada como função também do ângulo de propagação. Tem-se então, segundo Sørensen (1967):

$$C_T = V \quad (2)$$

$$C_D = V \cos \theta \quad (3)$$

$$\theta = 35,27 \left( 1 - e^{12(F_h - 1)} \right) \quad (4)$$

$$F_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

onde:  $F_h$  é o número de Froude da profundidade, que será discutido adiante, e  $\theta$  é o ângulo da propagação da onda.

A celeridade da onda está relacionada ao comprimento ( $\lambda$ ) e à profundidade local ( $h$ ) pela relação de dispersão dada pela Teoria Linear, ou seja:

$$C^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (6)$$

### Águas rasas

Em águas rasas, Havelock (1908) aplicando uma aproximação semelhante à de Kelvin, deduziu equações para definir o padrão de ondas divergentes e transversais para velocidades subcrítica e supercrítica em função do número de Froude da profundidade  $F_h$ , ou seja,  $F_h < 1$  e  $F_h > 1$ . Em águas rasas, tais ondas sofrem mudanças consideráveis em relação às ondas de águas profundas. Os resultados de Havelock (1908) mostraram que, em águas rasas, podem surgir três diferentes padrões de ondas dependendo do valor de  $F_h$ . Desde que seja satisfeita a relação  $F_h < 1$  (velocidade subcrítica), o padrão geral das ondas é o mesmo para águas profundas sendo que, para  $0 < F_h < 0,7$ , o ângulo da envoltória  $\tau$ , que é o limite da forma em V onde as ondas divergentes e transversais ficam confinadas, apresenta o mesmo valor  $19,5^\circ$  como em águas profundas. No intervalo  $0,7 \leq F_h < 1$ , ocorre um aumento de  $\tau$  que varia dentro do intervalo  $19,5^\circ < \tau < 90^\circ$ . Para  $F_h = 1$  (velocidade crítica), as ondas transversais e divergentes combinam-se para formar uma simples onda (similar a uma onda solitária segundo Sorensen, 1967) com  $\tau = 90^\circ$ . Para  $F_h > 1$  (velocidade supercrítica), as ondas transversais desaparecem, pois a velocidade da onda não pode exceder a velocidade crítica da embarcação, e somente é encontrado o sistema divergente. Nesta situação, ocorre o inverso, ou seja, para o intervalo  $1 < F_h < 3$ , ocorre uma diminuição de  $\tau$  que varia dentro do intervalo  $90^\circ < \tau < 19,5^\circ$ ; para  $F_h \geq 3$  tem-se  $\tau = 19,5^\circ$  (condição similar ao número de Mach na aerodinâmica). Assim, para  $F_h > 1$ , o ângulo  $\tau$  é dado por:

$$\tau = \arcsen\left(\frac{\sqrt{gh}}{V}\right) = \arcsen\left(\frac{1}{F_h}\right) \quad (7)$$

Dessa maneira, a variação dos ângulos da envoltória e da propagação, em relação a  $F_h$  (Figura

3), é representada pelas expressões a seguir e pelos gráficos da Figura 4.

### Ângulo da Envoltória, $\tau$

$$F_h < 0,7 \Rightarrow \tau = 19,5^\circ \quad (8)$$

$$0,7 \leq F_h < 1,0 \Rightarrow \tau = 19,5^\circ \left(1 + e^{12(F_h-1)}\right) \quad (9)$$

$$F_h \geq 1,0 \Rightarrow \tau = \arcsen\left(\frac{1}{F_h}\right) \quad (10)$$

### Ângulo de Propagação, $\theta$

$$F_h < 0,7 \Rightarrow \theta = 35,27^\circ \quad (11)$$

$$0,7 \leq F_h < 1,0 \Rightarrow \theta = 35,27^\circ \left(1 - e^{12(F_h-1)}\right) \quad (12)$$

$$F_h \geq 1,0 \Rightarrow \theta = \arccos\left(\frac{1}{F_h}\right) \quad (13)$$

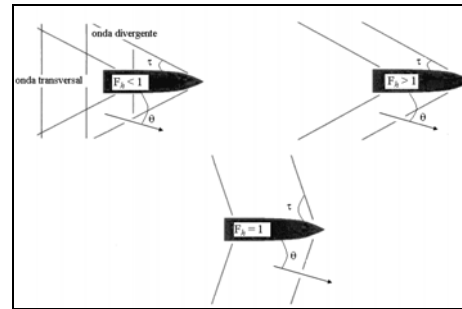


Figura 3 - Esquema ilustrativo dos ângulos da envoltória ( $\tau$ ) e da propagação ( $\theta$ ) em relação à  $F_h$  no padrão de ondas em águas rasas. Fonte: Coastal Engineering (2002)

## METODOLOGIA

### Modelo FUNWAVE para ondas de embarcação

Como já relatado, o modelo FUNWAVE (Wei e Kirby, 1995) é um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Boussinesq que resolve as equações não-lineares de Boussinesq deduzidas por Nwogu (1993). Este modelo reproduz a maioria dos fenômenos relacionados à transformação da onda em fundos de profundidade variável. Para a geração de ondas de embarcações, uma modificação nas equações governantes do modelo FUNWAVE se faz necessária de modo que a forçante geradora seja uma perturbação móvel representada por uma pres-

são hidrostática (Figura 5). A implementação de tal forçante é direta, basta adicionar à equação da quantidade de movimento um gradiente de pressão que provoca perturbações na superfície livre. Tem-se então que as equações de Nwogu (1993), base para o modelo FUNWAVE (Wei e Kirby, 1995) e modificada por Nascimento (2007) para geração e propagação de ondas de embarcação, são as seguintes:

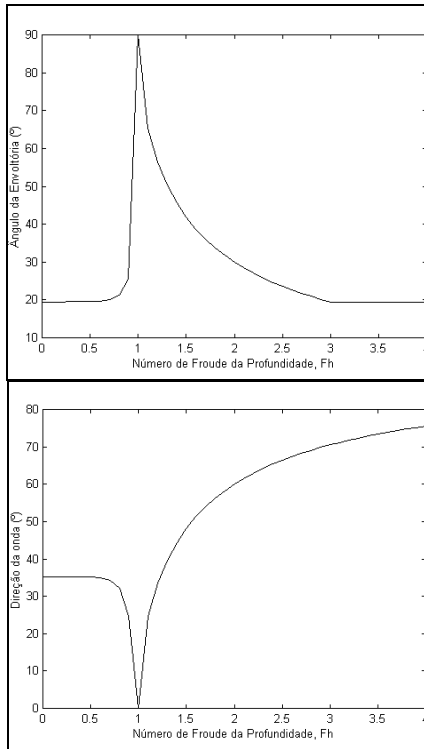


Figura 4 - Variação dos ângulos da envoltória e da propagação em relação à  $F_h$ .

*Equação da continuidade*

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[ u_\alpha + \left( z_\alpha + \frac{1}{2} (h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot (h u_\alpha)) + \left( \frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6} (h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) \right] \right\} = 0$$

*Equação da conservação da quantidade de movimento*

$$\begin{aligned} & u_{at} + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot u_{at}) + \nabla (\nabla \cdot (h u_{at})) \right\} \\ & + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot u_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (h u_\alpha) + \eta \nabla \cdot u_\alpha]^2 \right\} \\ & + \nabla \cdot \left\{ (z_\alpha - \eta) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot (h u_\alpha)) - \eta \left[ \frac{1}{2} \eta \nabla \cdot u_{at} + \nabla \cdot (h u_{at}) \right] \right\} \\ & = - \frac{\nabla P}{\rho} \end{aligned} \quad (15)$$

onde:  $\eta$  é a elevação da superfície;  $h$  é a profundidade;  $u_\alpha = (u, v)$  é o vetor velocidade horizontal na profundidade  $z = z_\alpha = -0,531h$ ;  $g$  é a aceleração da gravidade; o índice  $t$  indica a derivada parcial relativa ao tempo,  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  o operador gradiente

horizontal, e  $P$  é pressão móvel. Para verificar a resposta do modelo FUNWAVE à adição de um gradiente de pressão em vista a analisar a propagação da onda gerada, foi escolhida a distribuição de pressão apresentada por Li e Sclavounos (2002) para ser acrescentada às equações do modelo FUNWAVE. Tem-se então:

$$P(x, y) = \rho g D \cos^2 \left( \pi \frac{x}{L} \right) \cos^2 \left( \pi \frac{y}{L} \right) \quad (16)$$

onde:  $x = x_0 + Vt$ ,  $0 < t < t_f$

para  $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$  e  $-\frac{B}{2} \leq y \leq \frac{B}{2}$

onde:  $\rho$  = massa específica da água;  $D$  = calado da embarcação;  $L$  = comprimento da embarcação;  $B$  = boca da embarcação;  $V$  = velocidade do centro da embarcação;  $x_0$  = posição inicial da pressão em  $t = 0$ ;  $t_f$  = tempo no qual o ponto de aplicação da pressão percorreu a distância  $Vt_f$ .

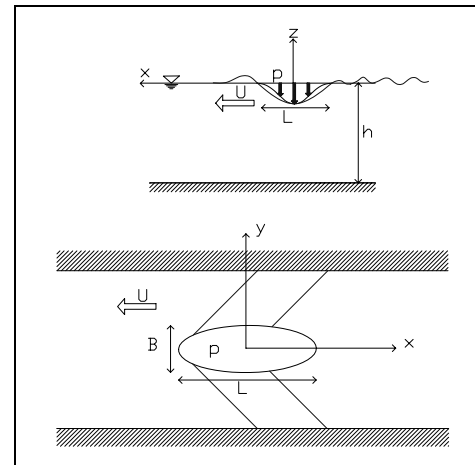


Figura 5 - Representação da pressão móvel como geradora de ondas de embarcação.

**Condições de Contorno**

Para condições de contorno, o modelo admite contornos absorventes (camada esponja) de

ondas com diferentes frequências e direções, simuladas por termos dissipadores de energia presentes na equação de conservação da quantidade de movimento. Com esta condição, é possível evitar os efeitos nas margens, garantido a absorção da energia da onda.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar a aplicabilidade do Modelo FUNWAVE modificado, foram simuladas duas diferentes situações de embarcações deslocando-se em canais trapezoidais. Na Tabela 2 são apresentadas as dimensões das embarcações em cada situação e na Figura 6 as respectivas dimensões dos canais para cada modelo simulado.

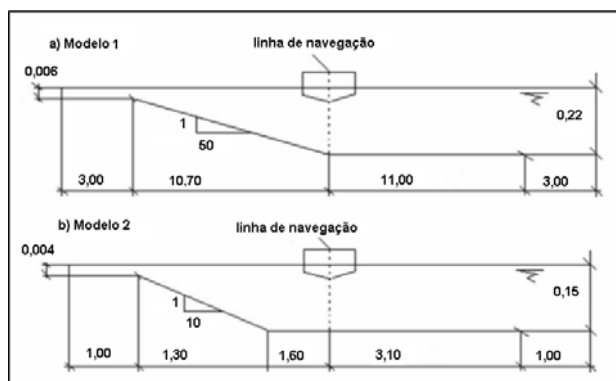
**Tabela 2 – Dimensões das embarcações**

Modelos	L (m)	D (m)	B (m)
1	1,80	0,08	0,20
2	1,5	0,061	0,15

Para as condições de cada caso, o domínio foi dividido em segmentos de reta com espaçamento de tamanho  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , conduzindo a  $m_x$  e  $n_y$  pontos de cálculo. Os cálculos foram realizados para passos de tempo  $\Delta t$ , respeitando-se a condição do modelo

para o número de Courant,  $\left( \Delta t < \frac{0,5 \Delta x}{\sqrt{g h_{\max}}} \right)$ , resul-

tando em um tempo total de cálculo denominado  $n_t$ .



**Figura 6 - Geometria dos canais a serem simulados pelo FUNWAVE, indicando a posição da linha de navegação (dimensões em metros).**

Na Tabela 3 estão indicados os valores desses parâmetros para cada caso considerado.

**Tabela 3 - Parâmetros de cálculo do modelo FUNWAVE**

Modelo	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	$\Delta t$ (s)	$m_x$	$n_y$	$n_t$
1	0,07	0,08	0,01	641	104	2001
2	0,07	0,1	0,01	891	281	3001

### Representação dos padrões de onda

Utilizando os dados referentes ao Modelo 1 nas Tabelas 1 e 2, foram simuladas numericamente situações cujos números de Froude da profundidade ( $F_h$ ) correspondiam a 0,8, 1,0 e 1,1. Com estes valores de  $F_h$  foi possível observar diferentes padrões de ondas gerados de acordo com a teoria cujas velocidades das embarcações são, respectivamente, 1,18, 1,47 e 1,62 m/s. Para os valores de  $F_h$  selecionados, os valores de  $\tau$  e  $\theta$  esperados no lado do canal com profundidade constante (Equações 8 a 13) são apresentados na Tabela 4. Os resultados numéricos destes padrões, que são apresentados na Figura 7, mostraram-se em concordância com os resultados previstos pela teoria de Havelock (1908).

**Tabela 4 – Ângulos de propagação e envoltória para  $F_h$  definidos**

$F_h$	$\tau$ (graus)	$\theta$ (graus)
0,8	21,27	32,07
1,0	90	0
1,1	65,38	24,62

### Refração

Na Figura 7(a, b e c) observa-se claramente o efeito de refração no lado inclinado do canal com o aumento gradual do ângulo da envoltória desde a linha de navegação até o topo da margem. Observa-se a tendência das cristas de onda tornarem-se paralelas ao contorno. O padrão complexo de ondas foge do comportamento típico das ondas regulares descritas pela Lei de Snell. Um estudo mais detalhado do fenômeno de refração das ondas de embarcação deve ser melhor investigado, tanto em modelo físico quanto numérico.

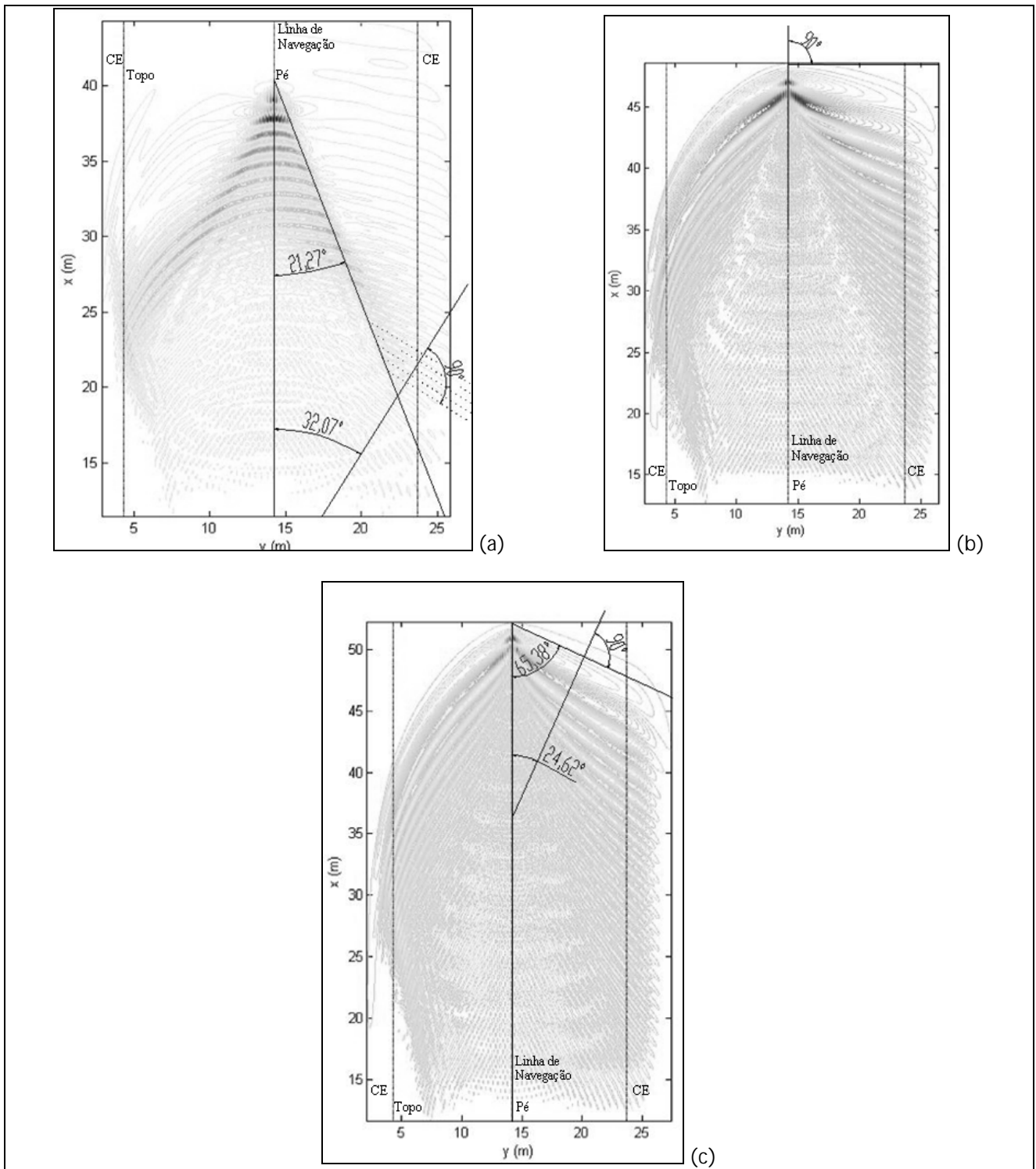
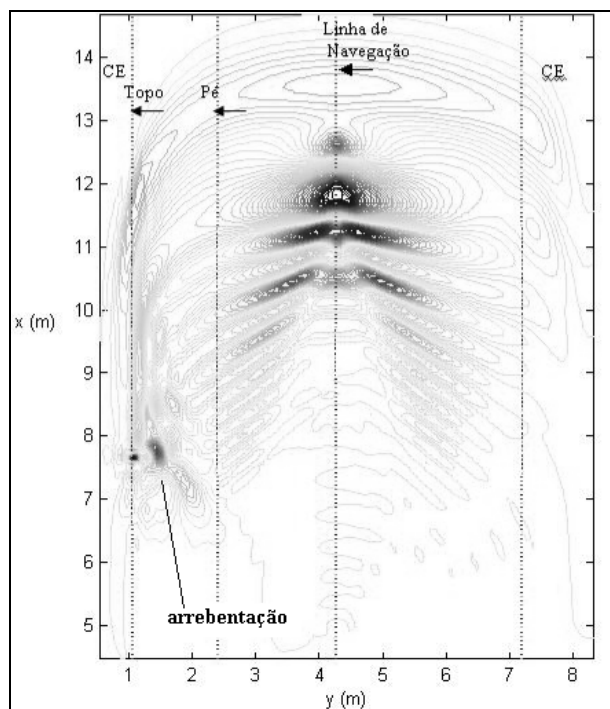


Figura 7 - Padrão de ondas de embarcação gerado para as condições do Modelo 1:  
a)  $F_h = 0.80$ , b)  $F_h = 1.0$  e c)  $F_h = 1.1$

## Arrebentação

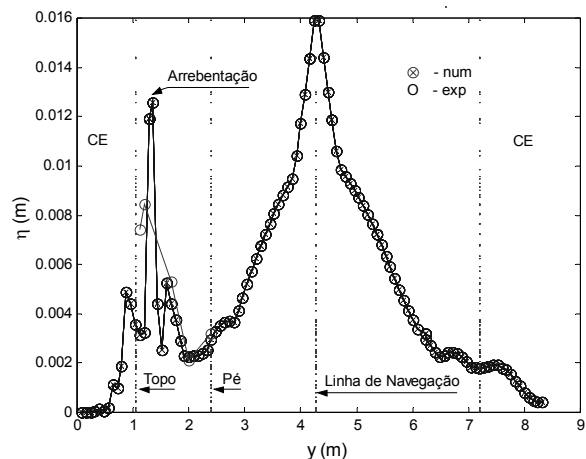
Para analisar a aplicabilidade do Modelo FUNWAVE modificado na representação de arrebentação de uma onda de embarcação incidindo na margem, as condições adotadas para embarcação e canal são aquelas referentes ao Modelo 2 nas Tabelas 1 e 2. O Modelo 2 reproduz as condições do experimento realizado por Johnson (1968), que investigou os efeitos da onda de embarcação propagando sobre uma margem inclinada em um canal, com medições de altura de onda obtidas através da técnica da estereoscopia. No resultado apresentado por Johnson (1968) foi possível observar o efeito de arrebentação da onda cuja magnitude ( $H_b$ ) foi estimada, no instante do registro, como sendo aproximadamente  $H_b = 81,28$  cm no protótipo ou  $H_b = 8,1$  mm no modelo físico reduzido.



**Figura 8 - Padrão de ondas de embarcação gerado para o Modelo 2 (numérico).**

O teste de arrebentação foi o que se mostrou mais sensível a variações de declividade do fundo, de profundidade no pé do talude e de número de Froude da profundidade. Foram analisadas 26 combinações desses parâmetros com o objetivo de confrontar os valores calculados das alturas de onda com os valores apresentados por Johnson (1968). A Figura 8 representa a superfície de água perturbada pela embarcação. Observa-se, na margem inclinada,

uma região onde predominam picos de alturas de onda, os quais supõe-se representar a localização de ocorrência da arrebentação, de acordo com a metodologia de observação de Johnson (1968). No experimento de Johnson, a arrebentação ocorre aproximadamente a 4,12 m da popa do barco, enquanto que no modelo numérico este valor é de aproximadamente 3,90 m, ou seja, um erro de 5,3% aproximadamente.



**Figura 9 - Comparação entre o comportamento das alturas máximas das ondas geradas para o Modelo Johnson (experimental) e o Modelo 2 (numérico).**

Na Figura 9 é representado o comportamento da altura máxima de onda. Comparando com os valores experimentais observou-se um comportamento muito semelhante de ambos os resultados junto ao pé da margem onde a onda sofre um efeito de rebaixamento e logo em seguida começa a se elevar, como efeito de refração (conservação do fluxo de energia) até arrebentar próximo ao topo do talude. O ponto de arrebentação, no entanto apresentou valores diferentes, enquanto  $H_b$  (altura de arrebentação) no experimento foi da ordem de 8,0mm, no modelo foi de aproximadamente 12,5mm, ou seja, um erro de aproximadamente 36%, um valor que, em protótipo, torna-se considerável e superestima o valor real.

No entanto, a boa representação do modelo numérico na simulação das cristas da onda antes da arrebentação é um forte indício da adequação do modelo para representar a propagação das ondas. É sugerido então mais análises de calibração dos parâmetros do modelo numérico e comparação com mais dados experimentais, especialmente em modelos de grande escala ou mesmo em situações protótipo.



Levando-se em conta o critério de arrebentação de McCowan tem-se que  $H_b$  experimental é da ordem de 10mm e  $H_b$  numérico da ordem de 15,625mm, que correspondem aproximadamente com a posição que se encontram nos registros. Não foi possível analisar no registro de Johnson, se a altura de arrebentação observada corresponde à altura máxima de arrebentação, pois o registro é de um determinado instante que pode não ser o instante em que a altura de arrebentação é máxima.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo deste trabalho foi apresentar o estudo da propagação das ondas de embarcação para águas rasas através da simulação numérica, utilizando um modelo hidrodinâmico que levasse em consideração os efeitos de transformação das ondas em águas rasas. A proposta de investigação foi a modificação do modelo FUNWAVE, de uso corrente em engenharia costeira, que é um modelo numérico de propagação de ondas baseado nas equações de Boussinesq, que reproduz a maioria dos fenômenos relacionados à transformação da onda em fundos de profundidade variável, quais sejam, dispersão em frequência, dispersão de amplitude, difração, refração pelo fundo e por correntes, transferência de energia entre componentes harmônicas e dissipação de energia por arrebentação da onda e atrito de fundo.

A metodologia utilizada para a adaptação do modelo à geração de ondas por embarcação foi a adição de uma pressão móvel na equação da quantidade de movimento. Tal procedimento mostrou-se viável para a utilização do modelo na simulação da propagação de ondas geradas por embarcações.

Os resultados dos padrões de ondas se mostraram adequadamente compatíveis com aqueles descritos na literatura.

Os resultados do efeito de refração mostraram que as ondas do modelo seguem o comportamento típico desse fenômeno, ou seja, a tendência das cristas de ondas ajustarem-se ao contorno do fundo. A aplicação da Lei de Snell para descrever o efeito de refração das ondas de embarcação não se mostrou adequada, devido à forte característica não-linear e ao espalhamento do padrão de onda bidimensional em planta. Este resultado contraria a prática usual em projetos de engenharia de se assemelhar as ondas de embarcação às ondas geradas por vento para estimativa de ação sobre as margens.

O incentivo à experimentação física no que tange analisar o comportamento das velocidades e a propagação da onda se faz pertinente para confirmar os resultados numéricos e estabelecer um modelo conceitual da ação dessas ondas na costa, estabelecendo os parâmetros de velocidade, altura, comprimento e período de onda que realmente atua nestas.

O modelo foi capaz de simular o efeito de arrebentação, mas ainda há a necessidade de calibração dos parâmetros de arrebentação do modelo e também mais resultados experimentais para efeito de comparação.

A validação do modelo FUNWAVE modificado (FUNWAVE+Ship) para a simulação de propagação de ondas de embarcação foi realizada pela comparação dos resultados numéricos com resultados experimentais de casos relatados na literatura. Dessa maneira, o modelo FUNWAVE+Ship apresenta-se como o primeiro modelo de propagação de ondas de embarcação que leva em conta os fenômenos costeiros de refração, arrebentação, geração de correntes e até espraiamento. Este fato representa uma inovação tecnológica pioneira na utilização de modelos de ondas de embarcação que, até então, eram capazes de simular apenas os efeitos de refração e geração de correntes.

Reitera-se assim, a importância de realizações de modelos experimentais para melhor estabelecer conceitos sobre a propagação dessas ondas e a validação dos resultados numéricos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com recursos do Projeto CAPES/PROCAD 0144/01-0 – “Amigos de Boussinesq – Rede Cooperativa de Pesquisa sobre Hidrodinâmica Costeira de Águas Rasas”, e do “Projeto ONDISA – Monitoramento de Ondas no Lago de Ilha Solteira” – Convênio FINEP 01.05.0958.00, Fundo de Transporte Aquaviário, reunindo equipes da COPPE/UFRJ, da FEIS/ UNESP e do I-PH/UFRGS. Os autores agradecem especialmente ao IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, onde ensaios experimentais foram realizados, especialmente ao Prof. Paulo Kroeff de Souza e ao engenheiro Marcelo Joares Patines, pelo desenvolvimento e pela montagem do aparato experimental no canal de velocidades do IPH/UFRGS, cujos resultados serão apresentados em trabalho futuro.

## REFERÊNCIAS

- BLUME, A., 2002. "High-speed vessel wake wash". In: *Ship Effects Workshop*, Gulport, MS. In: <http://chl.wes.army.mil/research/navigation/GulfportWorkshop/AlamBlume.pdf>. Acesso em: junho/2002.
- COASTAL ENGINEERING, 2002. "High speed craft wash: Wave generation of HSC". In: [http://www.qub.ac.uk/waves/fastferry/hsc/fast\\_ferry\\_hp.htm](http://www.qub.ac.uk/waves/fastferry/hsc/fast_ferry_hp.htm) .. Acesso em: julho de 2002.
- BELIBASSAKIS, K.A., 2003. "A coupled-mode technique for the transformation of ship-generated waves over variable bathymetry regions", *Applied Ocean Research*, v. 25, pp.321-336.
- BREBNER, A., HELWIG, P.C., CARRUTHERS, J., 1966. "Waves produced by ocean-going vessels: a laboratory and field study". In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*. American Society of Civil Engineers, pp.455-465, Tokio.
- CASCIOLA, C.M., LANDRINI, M., 1996. "Nonlinear long waves generated by a moving pressure disturbance", *Journal of Fluid Mechanics*, v. 325, p. 399-418.
- DAM, K.T., TANIMOTO, K., NGUYEN, B.T., AKAGAWA, Y., 2006. "Numerical study propagation of ship waves on a sloping coast", *Ocean Engineering*, v. 33, nº 3-4, pp.350-364.
- ERTEKIN, R.C., WEBSTER, W.C., WEHAUSEN, J.V. 1986. "Waves caused by a moving disturbance in a shallow channel of finite width". *Journal of Fluid Mechanics*, v. 169, pp.275-292.
- GALLERY OF FLUID DYNAMICS: "Waves". In: [www.eng.vt.edu/fluids/msc/gallery/waves](http://www.eng.vt.edu/fluids/msc/gallery/waves). Acesso em: maio de 2002.
- GALINKIN, M., OLIVEIRA, C.A., CALHEIROS, D.F., 2001. *Retrato da Navegação no Alto Rio Paraguai*. In: CE-BRAC/ICV/WWF, Brasília, Brasil, pp.50-51.
- HAVELOCK, T.H., 1908. "The propagation of groups of waves in dispersive media with application to waves on water produced by a traveling disturbance", In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, v. 81, pp.398-430.
- JOHNSON, J.W., 1968. "Ship waves in shoaling waters". In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering*, pp.488-498, London.
- LI, Y., SCLAVOUNOS, P. D., 2002. "Three-dimensional nonlinear solitary waves in shallow water generated by advancing", *Journal of Fluid Mechanics*, v. 470, pp.383-410.
- NASCIMENTO, M.F., 2007. *Estudo numérico da propagação para águas rasas de ondas geradas por embarcações*. Tese de Doutorado em Engenharia Oceânica. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 189p.
- NWOGU, O., 1993. "Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 119(6), pp.618-638.
- NWOGU, G.O., DEMIRBILEK, Z., 2004. "Numerical modeling of ship-induced currents in confined waterways. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, pp.256-268, Lisboa.
- QUEBEC DEPARTMENT OF TRANSPORT, 2003. "St-Laurent Centre". In: <http://lavoieverte.qc.ec.gc.ca> . Acesso em: maio de 2003
- SORENSEN, R.M., 1967. "Investigation of ship-generated waves", *Journal of the Waterways and Harbor Division*, American Society of Civil Engineers, Feb, pp.85-99.
- STOCKSTILL, R.L., BERGER, R.C.; 2001. "Simulating barge drawdown and currents in channel and backwater areas", *Journal Waterways, Ports, Coastal and Ocean Div of*, pp.290-298.
- STOKER, J.J., 1957. "Waves caused by a moving pressure point. Kelvin's theory of the wave pattern created by a moving ship". In: *Water waves the mathematical theory with application*, chapter 8. Interscience Publishers, New York.
- VERHEIJ, H.J., KNAAP, F.C.M. van der, 1995. "River bank erosion in Sarawak, Malaysia". In: *PIANC-PCDC, Third Seminar on Ports and Inland Waterways*, Goa, India. In: [http://www.wldelft.nl/rnd/publ/thema.html?hydro code=Z7C](http://www.wldelft.nl/rnd/publ/thema.html?hydro%code=Z7C)
- WEI, G., KIRBY, J.T, 1995. "Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, pp. 251-261.
- WILSON JÚNIOR, G., 1999. *Nota técnica sobre o movimento de sedimentos no rio Paraguai durante o período de seca*. In: Relatório sobre a viagem de estudos realizada no rio Paraguai, no trecho Cáceres (MT) a Porto Murtinho (MS), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- WU, T-Y.T., 1987. "Generation of upstream advancing solitons by moving disturbances", *Journal Fluid Mechanics*, v. 184, p. 75-99.

## ***A Boussinesq Model Adapted to Ship Waves Propagation in Shallow Water***

### **ABSTRACT**

*This paper presents the results of an adaptation of a coastal hydrodynamic numerical model (FUNWAVE) of the Boussinesq class, to simulate the generation and propa-*

*gation of ship waves in shallow water. This adaptation enables the model to simulate situations of ship waves in navigation canals and waterways, taking into account coastal phenomena such as refraction, breaking, run-up and currents. Validation of the model may help to analyze erosive processes caused by ship waves on the banks of navigation canals, waterways and lakes.*

**Key-words:** *ship waves, Boussinesq models, shore processes.*