

## ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDA APLICADA À ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA.

Guilherme da Costa Silva<sup>1</sup>; Paolo Alfredini<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Professor da UNIMONTE (Centro Universitário Monte Serrat)

Av. Professor Lúcio Martins Rodrigues, 120 – Cidade Universitária Fone: +55 11 3039-3244.

<sup>1</sup>Doutor em Engenharia Civil na área de Hidráulica Marítima pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e-mail: [guilherme.silva@poli.usp.br](mailto:guilherme.silva@poli.usp.br)

<sup>2</sup>Professor Livre-Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e-mail: [alfredin@usp.br](mailto:alfredin@usp.br), [paolo.alfredini@poli.usp.br](mailto:paolo.alfredini@poli.usp.br)

### RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico de propagação de ondas sobre batimetrias irregulares. O modelo foi baseado nas equações de declividade suave formulada por Berkhoff em 1972, na qual é possível reproduzir o efeito combinado de refração, difração e empolamento da onda além da dissipação de energia devido a arrebentação e atrito de fundo. Os resultados obtidos do modelo MIKE 21 NSW - NEARSHORE SPECTRAL WIND-WAVE, baseado nas equações de conservação da densidade de agitação do espectro da onda e o MIKE 21 BW - BOUSSINESQ WAVE, baseado na solução numérica da nova forma das equações bidimensionais de Boussinesq, foram comparados com os do modelo desenvolvido neste trabalho. O método manual das cristas, que levam em conta apenas a refração das ondas e os modelos físicos, permitiram complementar as avaliações dos limites de aplicação.

### ABSTRACT

In this paper is described the development of numerical model of propagation of water waves on a gently sloping bathymetry with arbitrary water depth. The model was based on the numerical solution of the Elliptic Mild-Slope equation formulated by Berkhoff in 1972. It is capable of reproducing the combined effects of shoaling, refraction and diffraction beyond energy dissipation, due to wave breaking and bed friction. The MIKE 21 NSW (NEARSHORE SPECTRAL WIND), which is derived from the equation of conservation for the spectral wave action density and MIKE 21 BW - BOUSSINESQ WAVE MODEL, which is based on the numerical solution of a new form of the bidimensional Boussinesq equations, were compared with the results obtained from the developed model. The manual method of the crest, which considers only wave refraction and physical model tests were used to evaluate application limits for the developed model.

Palavras-Chave: hidráulica marítima, propagação de ondas, engenharia costeira, engenharia portuária

### 1. INTRODUÇÃO

Os municípios do litoral centro-sul do Estado de São Paulo, que corresponde a uma área de grande interesse para a política de Gerenciamento Costeiro do Estado, apresentam um grande potencial de desenvolvimento de atividades náuticas e pesqueiras, necessitando, no entanto, de obras que visem o melhoramento das condições de navegação pelas barras. A realização de estudos em modelo matemático que contemplem este caso e outros, vem se tornando um imperativo a indicar a necessidade do desenvolvimento de modernas ferramentas numéricas para atender aos questionamentos não somente da Engenharia Portuária e Costeira, mas também ao licenciamento ambiental de tais obras.

Diante deste panorama, procurou-se implementar um modelo numérico que apresente as deformações da agitação num trecho costeiro de interesse, capaz de subsidiar dados, por exemplo, para cálculos de transporte de sedimentos litorâneo longitudinal na zona de arrebentação; ou o grau de agitação das ondas em uma bacia portuária, os quais determinarão os esforços e a estabilidade das obras de acostagem.

As metas atingidas pelo projeto de pesquisa foram:

- Desenvolvimento de um modelo de propagação de onda que apresente as deformações de refração, difração,

reflexão e dissipação devido ao atrito de fundo e arrebentação de agitação monocromática em trecho costeiro.

- Comparação dos resultados obtidos com elaborações convencionais manuais e outros modelos de propagação de ondas que efetuam as mesmas elaborações, visando aferir a confiabilidade dos procedimentos.

- Aplicação do modelo desenvolvido em algumas áreas costeiras.

### 2. MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Basicamente o estudo se deu nos modelos de propagação de ondas baseados em equações de balanço de energia e de agitação (Modelo MIKE 21 NSW) e baseados nas equações de balanço de massa ou momentum (por exemplo as equações de Hamiltonian, de declividade suave e de Boussinesq). No primeiro caso, a propagação das ondas de superfície contempla os efeitos de refração, empolamento, advecção, geração e dissipação de energia e interações não lineares. No segundo caso, os modelos são capazes de reconstruir a elevação da superfície do mar, considerando os mesmos efeitos, além da difração, arrebentação, reflexão e, eventualmente, efeitos não lineares, embora a geração de vento seja ausente nestes modelos.

## 2.1 Modelos Lineares (Modelo EDS)

O modelo de propagação desenvolvido baseou-se nas equações de declividade suave reformulada por Berkhoff (1972). À equação original foram incluídos efeitos de processos dissipativos, tais como dissipação por atrito de fundo e dissipação através da arrebentação da onda. A equação de declividade suave, que é no senso estrito um modelo elíptico linear, pode ser escrita na dependência do tempo:

$$\nabla(C.C_g \nabla \zeta) - \frac{C_g}{C} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

sendo  $\zeta$  a elevação da superfície,  $C$  a celeridade da onda,  $C_g$  a celeridade de grupo e  $\nabla$  o operador gradiente horizontal.

A solução numérica da equação de declividade suave adotado foi a proposta por Copeland (1985) e Madsen e Larsen (1987) que reduz a equação original num sistema de equações hiperbólicas de primeira ordem (equações 2 e 3), que são resolvidas através de esquemas de diferenças finitas.

$$\frac{C_g}{C} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + i\omega \frac{C_g}{C} \zeta + \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} = S \quad j=1,2 \quad (2)$$

$$\frac{C_g}{C} \frac{\partial Q_j}{\partial t} + i\omega \frac{C_g}{C} Q_j + C_g^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} = 0 \quad j=1,2 \quad (3)$$

Sendo  $S$  uma função fonte, introduzida para levar em conta a dissipação das ondas devido à arrebentação e atrito de fundo e  $Q(x,y,t)$  um pseudofluxo complexo. Sua vantagem é a redução do tempo computacional comparado com as soluções baseadas em técnicas de elementos finitos, além de incorporar efeito combinado da refração, difração e reflexão das ondas, possibilitando a obtenção das características do campo de ondas, por exemplo: as alturas e rumos ao redor de um quebra-mar. O esquema numérico testado utilizou diferenças finitas implícitas com as variáveis complexas  $Q$  e  $\zeta$  definidas em uma grade retangular alternada. O método baseou-se no algoritmo direcional alternado (ADI-Alternating Direction Implicit) e as equações foram resolvidas por meio do algoritmo Double Sweep.

## 2.2 Modelos não lineares (Boussinesq)

A teoria original de Boussinesq, deduzida para casos restritivos, foi estendida a soluções mais gerais ao longo dos anos. Lin e Clark (1959) estenderam a solução da teoria de Boussinesq a incluir difração e refração de onda sobre um fundo horizontal, enquanto que Mei e Le Mehauté (1966) estenderam a teoria para levar em conta variação da batimetria. Vários modelos do tipo Boussinesq propostos são capazes de descrever a propagação das ondas incluindo termos não lineares e aprimorando as características de dispersão da frequência. Apesar de serem assintoticamente equivalentes, cada uma delas apresenta aplicação diferente aos casos de Engenharia. O modelo de propagação de ondas não linear utilizado para a comparação com o modelo desenvolvido foi o módulo MIKE 21 BW, que é baseado na solução numérica aprimorada das equações de Boussinesq formuladas por Madsen et al.

(1991) e Madsen e Sørensen (1992). O modelo bidimensional no domínio de tempo é capaz de reproduzir os efeitos combinados da maioria dos fenômenos de onda de interesse da Engenharia Costeira e Portuária.

O método numérico usado é baseado no esquema denominado SYSTEM 21, que foi introduzido por Abbott et al., (1973) e estendido aos modelos de ondas curtas por Abbott et al. (1978).

## 2.3 Modelos espectrais (MIKE 21 NSW)

As equações básicas, a descrição dos termos fontes e os métodos da solução numérica do módulo MIKE 21 NSW são baseados na aproximação proposta por Holthuijsen et al. (1989). Este modelo, assim como o modelo HISWA (Hindcasting Shallow Water Waves), é paramétrico, direcionalmente desacoplado e estacionário. A parametrização da equação da continuidade no domínio da frequência é executada pela introdução das quantidades de movimento de ordem zero e de primeira ordem do espectro de agitação, como variáveis dependentes. Isto leva aos seguintes pares de equações:

$$\frac{\partial(C_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{g\theta}m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(C_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{g\theta}m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (5)$$

onde  $m_0(x,y,\theta)$  é o momento de ordem zero do espectro de agitação,  $m_1(x,y,\theta)$  o momento de primeira ordem,  $C_{gx}$  e  $C_{gy}$  são as componentes nas direções  $x$  e  $y$  da celeridade de grupo,  $C_{g\theta}$  é a velocidade de propagação, que representa a variação da agitação no rumo  $\theta$ ,  $T_0$  e  $T_1$  são os termos fonte. Os momentos  $m_n(\theta)$  são definidos como:

$$m_n(\theta) = \int_0^\infty \omega^n A(\omega, \theta) d\omega \quad (6)$$

onde  $\omega$  é a frequência absoluta e  $A$  é a densidade espectral da agitação da onda.

Ambos modelos são capazes de descrever a propagação das ondas curtas em regiões costeiras (água rasa) com batimetria irregular, considerando efeitos de empolamento ("shoaling"), refração, efeitos de crescimento e dissipação das ondas devido à geração de vento, dissipação de fundo e arrebentação da onda (em águas profundas e rasas), incluindo a influência das correntes nestes fenômenos.

A implementação do modelo MIKE 21 NSW é feita por método de diferenças finitas. Os momentos de ordem zero e de primeira ordem do espectro de agitação são calculados em uma grade retangular de um número de direções discretas. Na direção  $x$  diferenças avançadas lineares são aplicadas, enquanto que nas direções  $y$  e  $\theta$  é possível escolher entre diferenças finitas "upwind", diferenças centradas e diferenças "upwind" quadráticas.

## 3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O modelo físico de Praia Mole, em Vitória (ES) (Figura 1), do qual se dispunha de dados medidos experimentalmente em bacia de ondas no Laboratório de Hidráulica da

EPUSP, possibilitou a comparação dos resultados com o modelo desenvolvido (EDS) e o modelo MIKE 21 BW. O trecho do litoral da área em questão situa-se no litoral do Espírito Santo ao norte do Porto de Tubarão. A Figura 3 mostra as saídas obtidas pelo modelo desenvolvido EDS e pelo modelo MIKE 21 BW para uma onda de Nordeste de 1.58m de altura e 12 s de período.

As figuras 4 a 7 mostram as saídas obtidas pelo modelo desenvolvido (EDS), MIKE 21 BW e NSW e por métodos manuais; para uma onda de sul com período de 12s e altura de 1 m, propagado na Baía de Santos (SP) (Figura 2).



Figura 2 – Localização da área de estudo – Santos (SP)

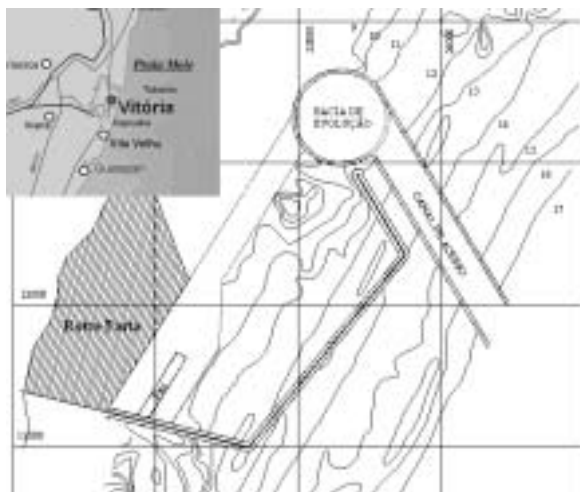


Figura 1 - Localização da área de estudo – Praia Mole

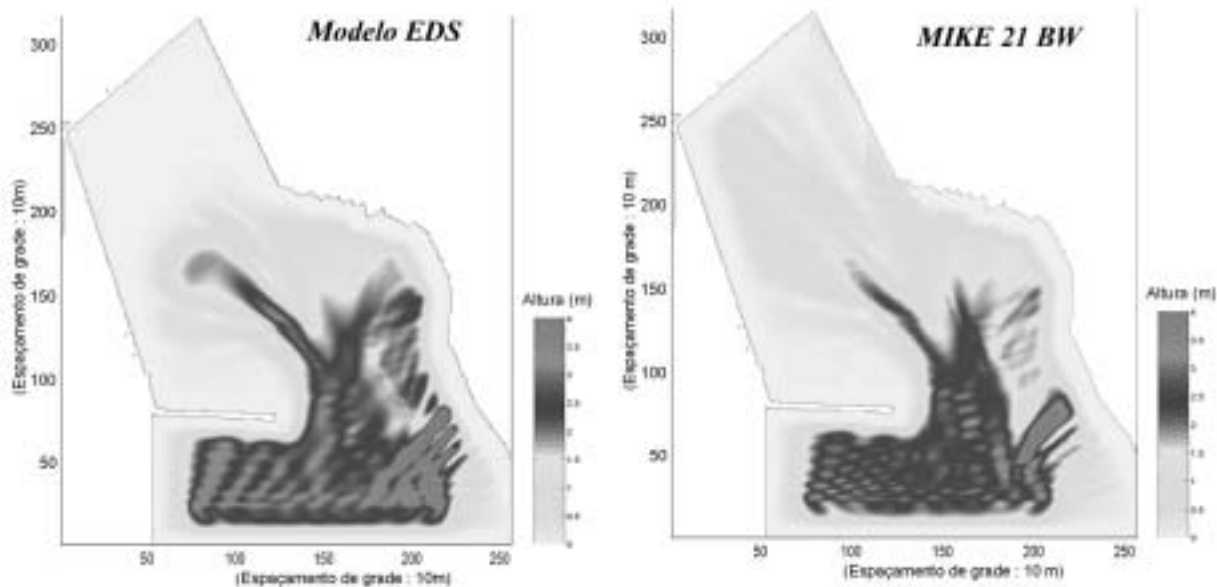


Figura 3 - - Alturas das ondas relativas obtidas pelo modelo EDS e MIKE 21 BW ( $H_{inicial} = 1.58$  m;  $T = 12$  s)

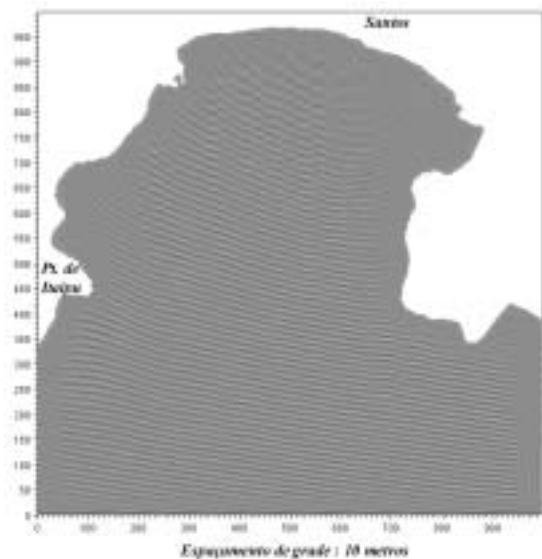


Figura 4—Cristas de ondas do modelo EDS : T=12s;n=1

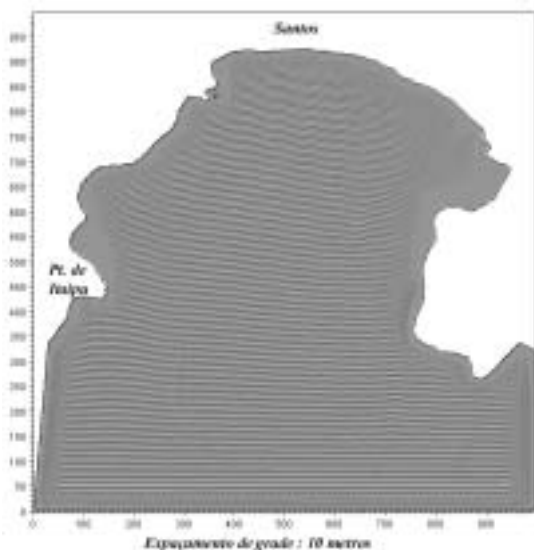


Figura 5—Cristas de ondas do MIKE21BW : T=12s;n=1

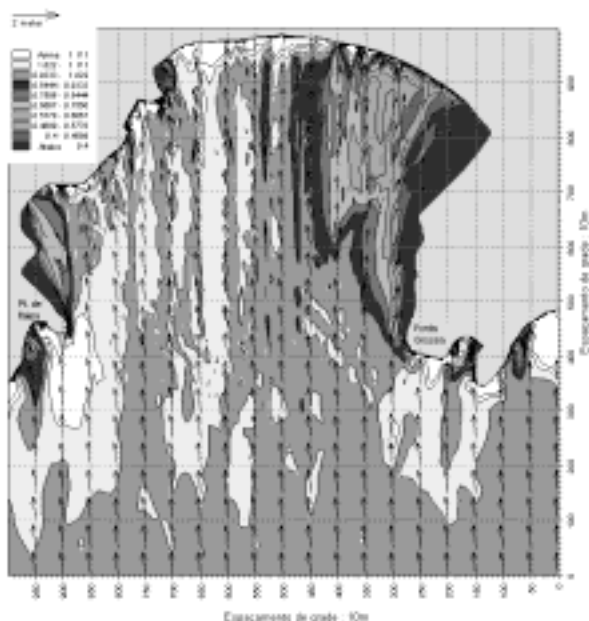


Figura 6—Altura e rumos do MIKE21NSW- T=12s



Figura 7—Cristas de ondas obtidas pelo método manual: T=12s; n=5

#### 4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

O método manual das cristas constitui um excelente instrumento de trabalho para confrontar os traçados das frentes teóricas com os reais, como, por exemplo, de fotografias aéreas. Por outro lado, as técnicas que traçam as ortogonais de ondas podem levar a padrões de ortogonais caóticos e, portanto, de difícil interpretação, principalmente quando ocorrem cáusticas muito complexas, já que o programa não apresenta em suas formulações o efeito de difração

As formulações de equações básicas de onda em grades retangulares tornam-se mais comuns. Isto permite comparar, com maior facilidade, as saídas de outros modelos (numéricos ou físicos), pois em cada ponto da malha têm-se todas as informações relativas às características das ondas, tais como altura, período e rumo de propagação. Já pelo método das ortogonais tais informações estão disponíveis ao longo da trajetória da ortogonal.

Para os modelos baseados das equações de massa e de continuidade, o tamanho de grade escolhido deverá ser suficiente para prover uma resolução adequada das principais características das ondas consideradas. Tanto para o modelo desenvolvido (EDS), quanto para o modelo MIKE 21 BW, de 7 a 10 pontos da grade por comprimento de onda são suficientes para a maioria das aplicações práticas. A maior das restrições da forma clássica das equações de Boussinesq está na aplicação do modelo em águas rasas, ou seja, limitado a uma relação entre a profundidade e o comprimento de onda em água profunda  $h/L_0$ . Os erros da celeridade crescem gradualmente, na medida em que  $h/L_0$  aumenta, e alcança cerca de 5% quando  $h/L_0=0.22$ , que é o limite prático para água profunda para estes casos.

Em relação ao modelo MIKE 21 BW, o passo de tempo deve ser suficientemente pequeno para calcular o menor período de onda individual. Para a maioria das aplicações práticas, valores entre 8 a 10 passos de tempo por período são suficientes. Caso os termos de água profunda não estejam presentes, o período de onda mínimo deverá estar

entre 25 a 50 passos de tempo, para evitar instabilidade e atenuação da energia da onda. O tempo total de simulação deverá ser tal que as ondas alcancem toda a área modelada e, a partir deste tempo (período inicial), a simulação deve continuar pelo menos 12 a 20 minutos, para calcular os parâmetros estatísticos tais como a altura da onda significativa,  $H_{m0}$ .

No modelo EDS não é possível visualizar a propagação das ondas ao longo do tempo, como no modelo MIKE 21 BW, já que pelas formulações propostas por Copeland e Madsen apenas nos últimos passos de tempo, após a convergência, a saída representa para solução final. No meio do processo iterativo, as saídas não têm significado físico. Por outro lado, o tempo de simulação no modelo EDS, em média, foi menor que no modelo de Boussinesq. No estudo de caso da Baía de Santos e do porto de Praia Mole o tempo de processamento foi cerca de 30% menor.

Uma nítida vantagem do modelo NSW sobre os demais (Equação de declividade suave e de Boussinesq) é o tempo de processamento dos cálculos de propagação das ondas. Boa parte se deve ao espaçamento da grade não necessariamente ter as dimensões dos comprimentos de ondas. O tamanho da grade nas direções perpendiculares ao rumo de propagação principal da onda pode assumir valores de até 10 vezes um comprimento de onda. Isto permite que o modelo seja aplicado em áreas mais profundas e com uma abrangência maior que os modelos acima citados. Outro ponto importante é a inclusão de efeitos de vento, ausentes nos modelos de declividade suave e de Boussinesq. Efeitos cruzados de propagação de um marulho com vaga, ou seja, de propagação de dois tipos de ondas simultaneamente, o programa MIKE 21 NSW não é capaz de modelar. Neste caso, é necessário realizar a propagação separada das ondas (marulho e vaga) e, posteriormente, superpor os resultados.

#### 4.1. Comparação entre modelos

Os modelos baseados nas equações de declividade suave permitem determinar as propagações de ondas dentro de uma área confinada com maior rapidez que o modelo de Boussinesq. Sua principal desvantagem está no fato de que efeitos não lineares, dispersão de frequência e direcionalidade são negligenciadas. Com os avanços computacionais, além do melhor entendimento das transformações não lineares dos espectros de ondas, o desenvolvimento de modelos do tipo Boussinesq ganha maior relevância, principalmente sobre movimento de ondas longas responsáveis por efeitos de ressonância em portos. Ambos os modelos, para ondas curtas regulares, apresentaram resultados muito próximos.

A vantagem dos modelos espectrais (baseados nas equações de balanço de energia e de agitação) em relação aos modelos baseados nas equações de balanço de massa ou momentum é a do tamanho da área de abrangência de estudo. Pode ser aplicado em amplas áreas costeiras, que é o fator limitante do modelo EDS e de Boussinesq, e em águas mais profundas, fator limitante também para o modelo de Boussinesq. Em áreas portuárias e confinadas, onde os efeitos de vento não são tão preponderantes e em que efeitos de ressonância são mais relevantes, os mode-

los baseados nas equações de balanço de massa ou momentum são os mais recomendados. A escolha do modelo de propagação de ondas depende da área de projeto, da qualidade das informações, dos recursos computacionais e da finalidade do estudo. A tabela 1 mostra a escala de aplicação de cada modelo e a base das equações.

Tabela 1 - Escala de aplicação de cada modelo

Base das Equações	Modelos	Escala de aplicação	Modelos estudados
Balanço de energia ou agitação	Modelos espectrais	• Macro e meso escala • Regiões costeiras	• HISWA • MIKE 21 NSW
Balanço de massa ou momentum	Modelos lineares	• Regiões costeiras • Abrigo portuário	Modelo desenvolvido (EDS)
	Modelos não lineares	Abrigo portuário	Boussinesq

## 5. AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta pesquisa contou com o apoio de bolsa de estudo de Doutorado da FAPESP, que possibilitou a aquisição dos módulos MIKE 21 NSW e BW para finalidades acadêmicas.

Os autores agradecem ao Almirante Alberto dos Santos Franco pela cessão do código fonte do programa Refronda ao LHEPUSP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B., PETERSEN, H. M. & SKOVGAARD, O. (1978) - "On the Numerical Modelling of Short Waves in Shallow Water", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 16, No 3, pp. 173-203.
- ABBOTT, M. B., MCCOWAN, A D & WARREN, I. R. (1984) - "Accuracy of Short-Wave Numerical Models". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No 10, PP. 1287-1301.
- BERKHOFF, J. C. W. (1972) - "Computation of Combined Refraction-Diffraction. Proc. 13th Coastal Eng". Conf., Vancouver 1972, ASCE. New York, Vol. 1, Chap. 24, pp. 471-490.
- BRASIL; MINISTÉRIO DA MARINHA, Diretoria de Hidrografia e Navegação - "Dados de vagas e marulhos do Banco Nacional de Dados Oceanográficos dos sub-quadrados de MARS DEN da costa paulista de 1956 a 1996".
- \_\_\_ - "Folhas de Bordo das cartas náuticas da costa paulista". Niterói.
- \_\_\_; MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis, Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias - "Campanha de Medições na Baía de Santos". Rio de Janeiro (RJ), 1974.

- COPELAND, G.J.M. (1985a) - "A practical alternative to the mild-slope wave equation". *Coastal Engineering*, Vol. 9, pp. 125-149.
- CTH/DAEE (1976) - "Estudo reduzido do Porto de Praia Mole: Modelo Tridimensional - Estudo da 1a e 2a etapas de Implantação do Porto", Relatório Parcial no1.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE SOFTWARES - Módulos do software MIKE 21.
- HOLTHUIJSEN, L.H., BOOIJ, N., AND HERBERS, T.H.C. (1989) - "A Prediction Model for Stationary, Short-crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents". *Coastal Engineering*, Vol. 13, pp. 23-54.
- MADSEN, P. A.; MURRAY, R. & SØRENSEN, O. R. (1991), "A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics (Part 1)". *Coastal Engineering*, Vol. 15, No 4, pp. 371-388.
- MADSEN, P. A. & SØRENSEN, O. R. (1992) - "A New Form of the Boussinesq Equations with Improved Linear Dispersion Characteristics, Part 2: A Slowly-Varying Bathymetry". *Coastal Engineering*, Vol. 18, No 1, pp. 183-204.
- NUCLEBRÁS/CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - "Relatórios trimestrais de progresso da campanha de medições oceanográficas na região das praias do Una e do Rio Verde, no Litoral Sul do Estado de São Paulo". Belo Horizonte, 1982 a 1985.
- SILVA, G. C. - "Análise comparativa de metodologias de modelagem numérica da propagação de ondas aplicada à Engenharia Costeira e Portuária". Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2003.