



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MODELO NUMÉRICO E ENSAIOS EM LABORATÓRIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS REGULARES

Yuri Timm Muller¹, Eduardo Puhl¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)
Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade (NECOD)
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia, Porto Alegre - RS, Brasil
e-mail: yuritimm@gmail.com

RESUMO

As ondas mais estudadas e com maior importância para a engenharia costeira são as ondas de gravidade, que são formadas pelo cisalhamento do vento com a superfície da água, onde surgem pequenas rugosidades que vão aumentando de altura e comprimento, impulsionadas pela ação contínua do vento. Modelos físicos, modelos numéricos e dados de campo são essenciais para otimização de projetos e dimensionamento de estruturas costeiras. Quando estas ferramentas são combinadas, é possível realizar etapas de validação e verificação dos resultados e análises, levando a modelos mais robustos. Para tanto, o objetivo desse estudo é realizar uma análise comparativa entre o uso de modelo numérico e experimentos em modelo físico, simulando a propagação de ondas monocromáticas incidentes em perfis de enrocamento. A ferramenta computacional Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC) foi utilizada para modelagem numérica do modelo físico canal de ondas IPH/NECOD. Conforme os resultados obtidos e as devidas comparações feitas, indica-se um desempenho satisfatório do modelo na representação dos casos estudados, apresentando diferenças da ordem de 10% em relação aos resultados no modelo físico. As discrepâncias foram associadas à consideração das velocidades uniformes na vertical e por não considerar a reflexão das ondas junto à praia.

Palavras chaves: modelagem numérica, modelagem física, ondas regulares, SMC Brasil

1. INTRODUÇÃO

As ondas na água, de modo simplificado, são definidas como perturbações causadas por diferentes forças, ocasionando flutuações do nível da água com velocidade, aceleração local e variação local de pressão. Estas ondas podem ser classificadas segundo as forças geradora/restauradora e as faixas de períodos típicos. Quando têm períodos muito pequenos (na ordem de 0,1 segundo), são denominadas ondas capilares, cuja principal força restauradora é a tensão superficial da água. Ondas com maiores períodos, podendo ser de 12 a 24 horas, são chamadas ondas de marés. Já as ondas da praia, ou ondas de gravidade, tem a gravidade como força restauradora predominante e possuem períodos da ordem de 2 a 30 segundos.

As ondas mais estudadas e com maior importância para a engenharia costeira são as ondas de gravidade, que são formadas pelo cisalhamento do vento com a superfície da água, onde surgem pequenas rugosidades que vão aumentando de altura e comprimento, impulsionadas pela ação contínua do vento. Na Hidráulica Marítima o conhecimento das características das ondas (Fig. 1) e seus efeitos sobre as estruturas como portos, diques, molhes,

quebra-mares e canais de navegação, são de fundamental importância para o projeto e construção dessas obras. Modelos físicos (bacias e canais de ondas), modelos numéricos e dados obtidos em campo são essenciais para otimização de projetos e dimensionamento dessas estruturas. Quando estas ferramentas são combinadas, é possível realizar etapas de validação e verificação dos resultados e análises, levando a modelos mais robustos. Para tanto, o objetivo desse estudo é realizar uma análise comparativa entre o uso de modelo numérico e experimentos em modelo físico, simulando a propagação de ondas monocromáticas incidentes em perfis de enrocamento.

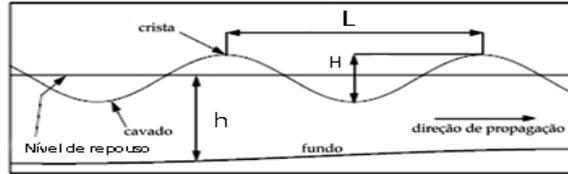


Figura 1. Principais características das ondas, onde L é comprimento de onda, h a profundidade e H a altura de onda.

2. MÉTODOS

Nesse presente estudo foi utilizada a ferramenta computacional Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC) para realizar a análise comparativa entre o modelo numérico e os dados obtidos em modelo físico. Além disso, foi realizada a comparação de diferentes configurações de malhas numéricas no modelo numérico, buscando uma melhor eficiência na modelagem. Os experimentos utilizados como referência e comparação para a modelagem numérica foram realizados por Gomes et al. (2013), os quais estão descritos na seção abaixo.

2.1 Modelo numérico SMC – Brasil:

Um dos módulos dessa ferramenta é o Modelo Integral de Propagação de Ondas, Correntes e Morfodinâmica em Praias - Mopla. É um programa que permite simular, em uma zona litorânea, a propagação de ondas desde profundidades indefinidas até a linha de costa. O Mopla é composto por seis modelos numéricos. Para a simulação dos casos utilizou-se apenas o modelo numérico de propagação de ondas monocromáticas, OLUCA – MC. Este módulo é um modelo de propagação de ondas linear, combinado de refração e difração que inclui os efeitos de empolamento (*shoaling*), dissipação de energia por cisalhamento com o fundo e quebra da onda, simulando o comportamento de ondas sobre batimetrias irregulares. O modelo é baseado na aproximação parabólica da equação da declividade suave. Equação (1) da declividade suave, desenvolvida por Berkhoff (1972), citado por GIOC (2000), pode ser escrita em função do deslocamento da superfície livre, $\eta(x, y)$, mediante a utilização de um operador de gradiente horizontal como:

$$\vec{\nabla} \cdot (C C_g \vec{\nabla} \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{c} \eta = 0 \quad (1)$$

Onde:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_j} \quad , \text{ sendo } j=1,2 \text{ as direções no plano horizontal} \quad (2)$$

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} = \text{Celeridade da onda} \quad (3)$$

$$C_g = C \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) = \text{Celeridade de grupo} \quad (4)$$

Onde a profundidade local da água é $h(x, y)$ e g a aceleração da gravidade. O número de onda local $k(x, y)$, está relacionado com a frequência angular, σ , e a profundidade, h , mediante a relação de dispersão linear (Equação 5):

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (5)$$

Onde o perfil da onda é dado por:

$$\eta = A(x, y) e^{i\sigma t} \quad (6)$$

Onde, $A(x, y)$ é a amplitude complexa com informação sobre a fase e a amplitude real da onda.

Para resolver a equação da declividade suave, o modelo OLUCA utiliza uma metodologia (Booij, 1981 apud GIOG, 2000) que consiste na partição de matrizes, que implica na separação do campo de ondas em uma onda propagando-se à frente e outra atrás, desprezando-se posteriormente a segunda. Neste caso, a aproximação impõe uma restrição ao seu modelo parabólico: as ondas devem ser propagadas dentro dos +/- 60° ao redor da direção principal de propagação. Finalmente, a aproximação parabólica levemente não linear à equação da declividade suave é dada pela Equação 7:

$$C_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(k_0 - k)C_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0 \quad (7)$$

Onde:

$$p = C C_g$$

k_o = Número de onda de referência, tomado como a média ao longo do eixo y .

D = Forma parte do termo não linear e se define Equação 8:

$$D = \frac{(\cos h \ 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4 kh} \quad (8)$$

2.2 Limitações e pressupostos do modelo OLUCA – MC:

Considera o fluido não viscoso, incompressível e de densidade constante, com fluxo irrotacional, estacionário e com as componentes longitudinal e transversal das correntes (U e V , respectivamente) não variando ao longo da coluna d'água (integrado na profundidade). Assume pressão constante na superfície livre e não considera a ação do vento. O modelo é aplicável em ambientes onde os fenômenos de refração, difração, empolamento e quebra da onda predominam, não sendo aplicável em ambientes onde o fenômeno da reflexão ocorre constantemente.

A declividade de fundo deve ser suave, no máximo 18° ou 1:3. Os contornos laterais podem ser abertos ou fechados e devem ser afastados da zona de estudo para evitar que a possível propagação de instabilidades para dentro da malha. O modelo é limitado à execução de propagação para profundidades superiores a 0,30m e necessita de pelo menos 10 pontos de cálculo por comprimento de onda para atingir sua estabilidade numérica. O ângulo de incidência das ondas na malha deve estar dentro do limite de 60° em relação ao eixo X , bem como as ondas que chegam à zona de estudo devem estar dentro desse limite. O domínio retangular para uma aplicação qualquer deve ser escolhido com precaução. O modelo OLUCA-MC permite, de acordo com o dimensionamento de matrizes, uma malha de tamanho máximo de 500 x 500.

O trabalho de Alvarez-Ellacuria et al. (2010) mostra resultados de validação de um modelo de previsão de ondas que utiliza a equação da declividade suave. As previsões do modelo foram comparadas com dados medidos em campo e apresentaram grau de validação de 78,4%. As discrepâncias não foram associadas ao modelo de propagação, mas ao modelo de geração de ondas.

2.3 Modelo Físico

O canal utilizado por Gomes et al. (2013) apresenta 42 m de comprimento e 1 m de largura, tem instalado um gerador de ondas regular do tipo articulado em uma de suas extremidades. A uma distância de 14,4 m a partir do do ponto de articulação do batedor de ondas, há um degrau dentro do canal reduz sua profundidade em 47 cm. O talude ao final do canal foi construído de Brita G ($D = 21$ mm) com inclinação 1V:3H e a profundidade na parte rasa do canal foi variada. Para as comparações foram utilizados os dados da sonda de nível capacitiva P3 que é situada a 24 m do batedor de ondas, conforme desenho esquemático (Fig. 2). Não foram obtidos dados sobre o fenômeno de reflexão no canal, apesar de serem efeitos relevantes neste tipo de experimento.

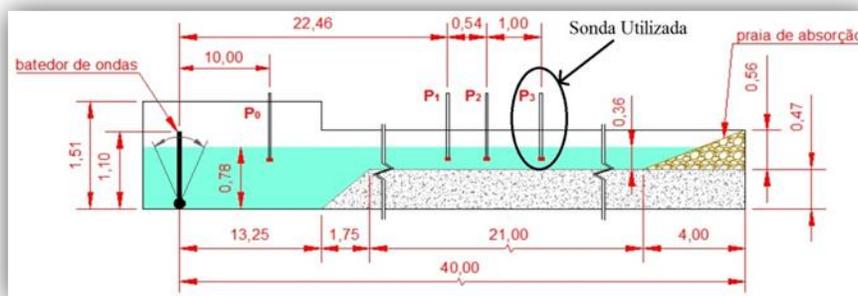


Figura 2 – Canal de ondas, com a sonda utilizada destacada (adaptado de Gomes et al., 2013).

2.4 Simulações numéricas

As simulações tiveram como base o modelo físico do canal de ondas do IPH/Necod e os experimentos realizados por Gomes et al. (2013). Com isso, no modelo numérico, foram gerados três casos de propagação de onda e duas malhas (Tabela 1), sendo caso 1 para onda A, caso 2 para onda B e caso 3 para onda C. Para fins de cálculo, se utilizou o modelo de Stokes – não linear, com dissipação de amortecimento com fundo poroso.

Onda	A	B	C
h (cm)	31,7	31,7	33,9
H (cm)	5,2	6,1	7,5
T (s)	1,3	1,4	1,7
Malha 1	Dimensões (m)	Espaçamento (m)	Nº de linhas
x	40	0,4	101
y	1	0,2	6
Malha 2			
x	40	0,1	401
y	1	0,1	11

Tabela 1 – Informações dos casos e malhas para o modelo numérico.

Onde h é altura da lâmina da água na parte rasa do canal, H é altura de onda e T o período.

Para o objetivo foi utilizado o Modelo Integral de Propagação de Ondas, Correntes e Morfodinâmica em Praias-Mopla (Fig. 3), seguindo a ordem:

- 1) Criando projeto;
- 2) Criando alternativas, onde é inserida a batimetria (a partir de arquivo xyz, imagem ou linha de costa);
- 3) Editor do plano de trabalho, onde é feita a interpolação da batimetria e definida a linha de costa (limite entre a água e terra);
- 4) Definindo a malha;
- 5) Executando o programa (janela Mopla). Na janela Mopla é possível editar a malha, criar casos (ondas ou espectro), calcular e visualizar os resultados como altura de onda, fase, frente de onda, entre outros.

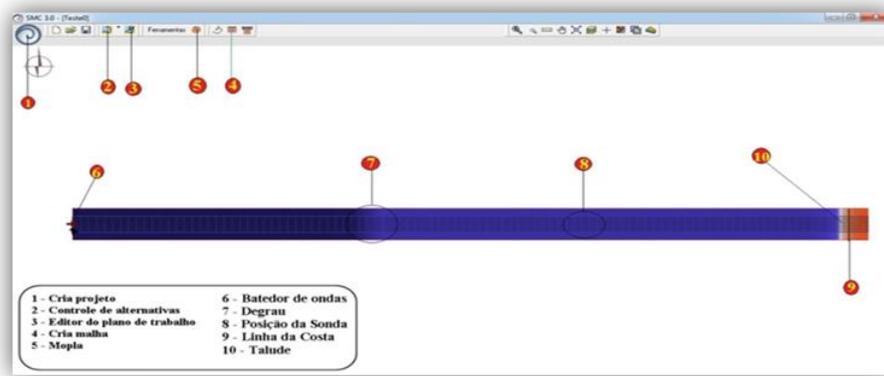


Figura 3. Interface Mopla

3. RESULTADOS

Foi feita a comparação de resultados já obtidos em ensaios no canal por Gomes et al. (2013) com resultados obtidos pelo modelo numérico. A partir da tabela 2, é possível visualizar a comparação feita entre as alturas de ondas resultantes, aquelas medidas pela sonda (ensaios no modelo físico) com as obtidas pelo modelo numérico, para os três casos. Ainda é possível visualizar a comparação dos resultados nas malhas utilizadas. Neste caso, nota-se uma pequena diferença nos valores da altura de onda, resultando em erros que variam de 2 a 7%, sendo que a malha dois apresentou os menores erros. Estima-se que essas diferenças são devidas as hipóteses e limitações do modelo numérico OLUCA – MC, principalmente relacionadas ao efeito da reflexão das ondas junto à praia, as quais só estão presentes no modelo físico.

	Onda A	Onda B	Onda C
Altura de onda medida pela sonda (m)	0,052	0,061	0,075
Altura de onda gerada pelo programa (m) - Malha 1	0,048	0,060	0,078
Altura de onda gerada pelo programa (m) - Malha 2	0,050	0,060	0,077
Erro (%) - Malha 1	6,9	2,3	4,0
Erro (%) - Malha 2	3,1	2,3	2,7

Tabela 2 – Comparação de resultados da altura de onda

A fim de comparação do detalhamento das malhas utilizadas, a Figura 4 apresenta a altura de onda na região do degrau, geradas pelo modelo para a onda C. Tem-se um pequeno decaimento na altura da onda ao chegar ao início do degrau ($X = 13\text{m}$), seguido de elevação constante até o seu final ($X = 15\text{m}$). A malha dois, de menor espaçamento e maior n° de linhas, apresenta maior detalhamento nos resultados. Apesar disso, nos dois casos a transição de profundidades se dá de maneira suave, não interferindo nas simulações e obedecendo às restrições quanto à equação da declividade suave.

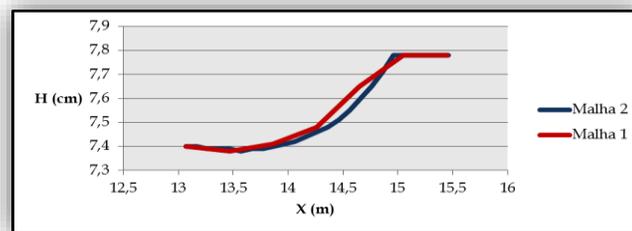


Figura 4 – Análise do refinamento das malhas numéricas pela altura de onda na região do degrau para o caso 3. Onde H representa altura de onda em centímetros e X a distância no canal a partir do bater em metros.

A Figura 5 apresenta o perfil da linha de água ao longo do canal, onde é possível visualizar o efeito do empolamento (mudança das características da onda ao chegar a águas rasas), para onda C. Observa-se a diminuição do comprimento da onda, tendo 3,9 m na parte mais profunda, já na parte rasa apresenta 2,7m. O comprimento de

onda médio, obtido na simulação do programa foi de 3,1 m. O medido por ensaio, através da sonda utilizada por Gomes et al. (2013) foi de 2,9 m. Neste caso, as ondas se encontram na regiões de águas intermediárias ($0,05 < h/L < 0,5$). Portanto as diferenças entre os resultados podem estar associadas à consideração quanto à uniformidade vertical das velocidades, típica de ambiente de águas rasas ($h/L < 0,05$).

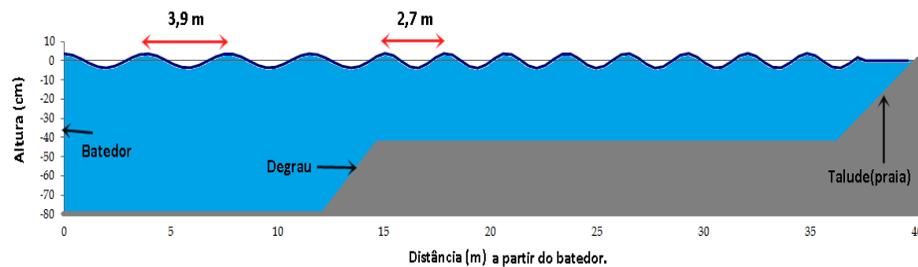


Figura 5 – Perfil da linha de água ao longo do canal IPH/NECOD obtido na simulação da propagação da onda C. Escala independente no desenho do fundo.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta os resultados para simulação numérica de ondas utilizando o modelo SMC – Mopla. As simulações foram baseadas e comparadas com resultados obtidos em modelo físico, utilizando os experimentos realizados por Gomes et al. (2013). Conforme os resultados obtidos e as devidas comparações feitas, indica-se um desempenho satisfatório do modelo na representação dos casos estudados, apresentando discrepâncias de pequena ordem (menor que 10%), quando comparados aos resultados obtidos no modelo físico. As diferenças foram associadas aos seguintes fatores, tais como: a aproximação através da integração vertical, a desconsideração do efeito de reflexão das ondas.

5. REFERÊNCIAS

- A. Alvarez-Ellacuria, A. Orfila, M. Olabarrieta, R. Medina, G. Vizoso, and J. Tintoré. 2010. “A Nearshore Wave and Current Operational Forecasting System”. *Journal of Coastal Research*: v. 26 (3): pp. 503 – 509.
- Berkhoff, J. 1972. “Computation of Combined Refraction — Diffraction”. *Coastal Engineering 1972 Proceedings*: pp. 471-490.
- Booij, N. 1981. "Gravity Waves on Water with Non-uniform Depth and Currents," Report n° 81-1, Delft University of Technology, 131 pp.
- Gomes, A.P., Silveira, J.B.P., Marques, M.G. and Endres, L.A.M. 2013. “Características das ondas a jusante de dissipador por ressalto hidráulico”. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (20. : 2013 nov. 17-22 : Bento Gonçalves, RS). ABRH.
- GRUPO DE INGENIARIA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOCI), 112 f., 2000. *Sistema de Modelado Costero*, SMC. Manual de referencia OLUCA. Universidad de Cantabria y Dirección General de Costas, Ministerio de Meio Ambiente.