

## REFRAÇÃO E DIFRAÇÃO DE ONDAS EM REGIÕES COSTEIRAS

Silvia Batista Soares<sup>1</sup>; Julio Tomás Aquije Chacaltana<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Fernando Ferrari, s/n. Goiabeiras. CEP.: 29060-970. CP 01-9011. Vitória-ES. Tel: (27) 3335-2256. Fax (27) 3335-2648. E-mail: [silviabs@npd.ufes.br](mailto:silviabs@npd.ufes.br)

<sup>2</sup> Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGEA/UFES). E-mail: [juliotac@npd.ufes.br](mailto:juliotac@npd.ufes.br)

### RESUMO

O conhecimento dos padrões de propagação das ondas associados aos processos de refração e difração é de fundamental importância no entendimento dos processos erosivos e de deposição de sedimentos em praias, já que as ondas constituem um dos principais agentes naturais de modificação da linha de costa. O objetivo desta pesquisa é conhecer os padrões de distribuição de energia na região costeira de interesse, sujeita à ação das ondas. Uma ferramenta computacional, baseada no método de diferenças finitas, foi desenvolvida para simular a propagação de ondas tipo "swell" que atingem a Baía do Espírito Santo, considerando os efeitos de refração e difração combinados. Para um fluido incompressível e um escoamento irrotacional, o modelo matemático é representado pela equação de Laplace e apropriadas condições de contornos. A teoria dos raios foi aplicada para solucionar do problema de refração (KAMPHUIS, 2000). O modelo proposto por Penny e Price (1954) é usado neste trabalho para solucionar o problema de difração. Os resultados numéricos mostraram que a região de baixios funciona como um dissipador de energia, provocando a quebra das ondas.

### ABSTRACT

Knowing the patterns of wave propagation associated with refraction and diffraction processes is very important in the understanding of erosive processes and sediments settling on beaches, since wave is one of the main natural factors responsible for changes on the shoreline. The objective of this research is to know the patterns of energy distribution on the studied coastal region subjected to wave action. A computational tool based on the finite difference method was developed for the simulation of short wave propagation of the swell type that reaches Espírito Santo Bay, taking into consideration refraction and diffraction effects combined. For an incompressible fluid and an irrotational flow the mathematical model was represented by Laplace's equation and associated with adequate boundary conditions. The ray theory was applied to the solution of the refraction problem (KAMPHUIS, 2000) and diffraction was solved using the Penny and Price's theory (1954). Numerical results show that shallow waters work as an energy dissipation region leading to the breaking of waves.

Palavras-Chave: refração, difração, modelagem computacional.

### 1. INTRODUÇÃO

A gestão de muitos problemas costeiros, provocados pela ação das ondas, pode ser facilitada pelo bom conhecimento do clima de ondas na região de interesse. Este conhecimento pode ser corretamente aplicado na previsão de erosão de praias, na avaliação do posicionamento e do alinhamento de quebra-mares. Como também, auxiliar na escolha da localização de portos e plataformas *offshore*.

A interação das ondas com o fundo do corpo d'água, com obstáculos naturais ou obras civis ou com correntes alteram seus padrões de propagação. Um exemplo famoso de alteração ocorrida pela interação onda-corrente pode ser visto próximo à África do Sul, onde a altura da onda é triplicada pela ação da corrente das Agulhas que se opõe ao seu movimento.

Em águas rasas, as ondas são influenciadas pelo fundo do corpo d'água e suas cristas tendem a se alinhar aos contornos de profundidade constante (Figura 1), processo conhecido como refração da onda. Baseado na teoria dos raios, Kamphuis (2000) apresenta o conjunto de equações que governa esse fenômeno.



Fonte: <http://cirp.wes.army.mil/cirp/presentations/ws2000/stwave/sld006.htm>

Figura 1 - Refração de ondas provocada pela topografia de fundo do corpo d'água.

A difração consiste no espalhamento radial da energia da onda, devido à interação com obstáculos naturais (ilhas) ou obras civis (quebra-mares). Ela também ocorre quando ondas se propagam sobre um fundo lamoso.

Estudos sobre a difração de ondas tiveram início com o trabalho clássico de Sommerfeld (1896), para a difração da luz nos arredores de uma barreira semi-infinita. Posteriormente, Penny e Price (1952) apresentaram uma modificação para a solução de Sommerfeld, considerando

a difração de ondas por um quebra-mar em águas de profundidade constante.

O objetivo desta pesquisa é conhecer os padrões de distribuição de energia na Baía do Espírito Santo, sujeita à ação das ondas. A teoria dos raios e a solução de Penny e Price são usadas neste trabalho para estudar o problema da refração e difração de ondas. Os resultados mostraram que a região de baixios funciona como um dissipador de energia, provocando a quebra das ondas.

## 2. MODELO MATEMÁTICO – REFRAÇÃO E DIFRAÇÃO DE ONDAS

Assumido que o escoamento de um fluido incompressível é irrotacional o problema de propagação de ondas em regiões costeiras é governado pela equação de Laplace. Baseado no princípio de superposição de efeitos, o problema pode ser estudado como sendo um problema de refração e outro de difração.

A refração foi resolvida pela teoria dos raios. Essa teoria foi desenvolvida através da geometria ótica e na Lei de Snell. O resultado obtido é a equação do espaçamento dos raios:

$$\frac{d^2 \beta}{ds^2} + p(s) \frac{d\beta}{ds} + q(s) \beta = 0 \quad (1)$$

onde:  $\beta = B/B_0$ ,  $B$  é o espaçamento entre os raios em águas intermediárias ou rasas e  $B_0$  o espaçamento entre os raios em águas profundas, ilustradas na Figura 2.

Na equação (1) as funções  $p(s)$  e  $q(s)$  são dadas pelas expressões abaixo:

$$p(s) = -\frac{\cos \theta}{C} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\sin \theta}{C} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (1a)$$

$$q(s) = \frac{\sin^2 \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - 2 \frac{\sin \theta \cos \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + \frac{\cos^2 \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (1b)$$

O modelo matemático da difração baseou-se na solução de Penney & Price (1952), válida para ondas incidindo em qualquer direção no quebra-mar.

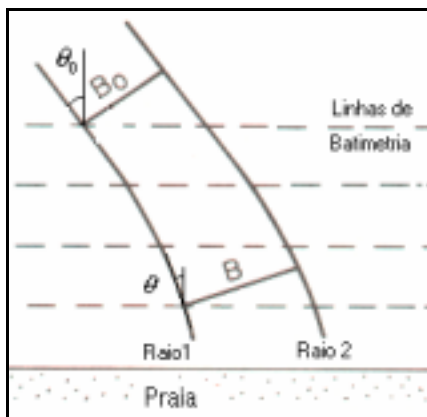


Figura 2 - Espaçamento entre os raios.

A solução em coordenadas polares é então:

$$F(r, \theta) = f(\sigma) e^{-ikr \cos(\theta - \theta_0)} + f(-\sigma') e^{-ikr \cos(\theta + \theta_0)} \quad (2)$$

onde:  $k$ : é o número de ondas

$$\sigma = 2\sqrt{kr/\pi} \sin \frac{1}{2}(\theta - \theta_0) \quad (2a)$$

$$\sigma' = -2\sqrt{kr/\pi} \sin \frac{1}{2}(\theta + \theta_0) \quad (2b)$$

Os parâmetros  $r$ ,  $\theta$  e  $\theta_0$  bem como a definição das regiões S, Q e R, onde serão calculados os coeficientes de difração são mostrados na Figura 3.

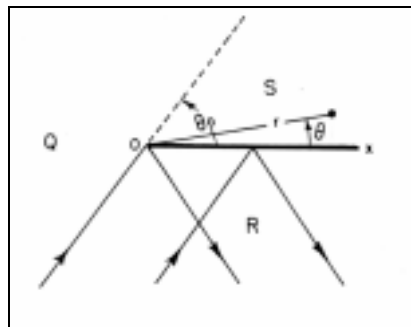


Figura 3 - Notação para a difração.

## 3. MODELO NUMÉRICO

Usando as equações (1) e (2) do modelo matemático, foi implementado um código computacional em linguagem FORTRAN 90. A representação numérica das equações (1) foi feita através do método de diferenças finitas.

Para a validação dos resultados obtidos através da utilização deste código, foram simuladas ondas em regiões hipotéticas, já testadas em algumas literaturas, por exemplo, Wiegell (1962), e os resultados se mostram satisfatórios.

## 4. REGIÃO DE ESTUDO E MALHA COMPUTACIONAL

A região de estudo é a baía do Espírito Santo, comumente chamada de baía de Camburi, ela está localizada entre as coordenadas 40°14' e 40°18' oeste e 20°16' e 20°19' sul, na região da Grande Vitória, no estado do Espírito Santo.

Algumas importantes características dessa região são:  
 i). o canal de acesso ao porto de Tubarão com profundidades de até 22m.,  
 ii). o canal de acesso ao porto de Vitória, cujas profundidades não ultrapassam 12m. e,  
 iii). uma região de baixios, disposta transversalmente aproximadamente no meio da baía, ver Figura 4.

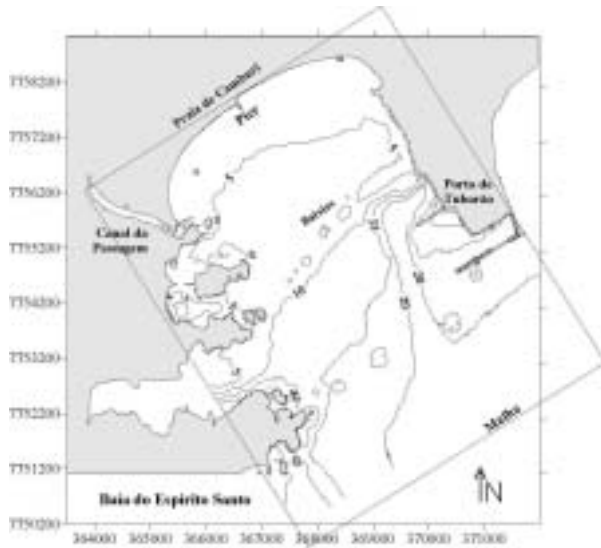


Figura 4: Baía do Espírito Santo

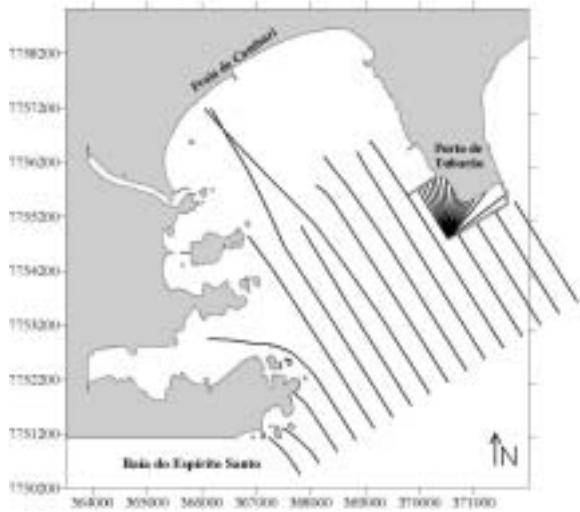


Figura 5: Traçado dos raios de energia das ondas vindas de sudeste.

Comumente a Baía do Espírito Santo é atingida por dois tipos de ondas: ondas vindas de sudeste e ondas vindas de leste, ambas com período de 5s e altura de 1m.

O posicionamento da malha utilizada para a simulação dos efeitos de refração e difração de ondas foi definido com base no alinhamento dos quebra-mares do Porto de Tubarão. Essa malha possui 312 x 360 células de 20m de comprimento (Figura 4).

## 5. RESULTADOS

A duas ondas mais comuns na baía em estudo foram simuladas. Os raios das ondas vindas de sudeste seguem paralelos até aproximadamente a região dos baixios onde ocorre a quebra da onda provocando a interrupção dos raios (Figura 5).

Dentro do Porto de Tubarão a altura da onda é bastante reduzida pela ação do quebra-mar. Em algumas regiões houve uma redução a  $0,01H_0$ , onde  $H_0$  é a altura da onda em águas profundas (Figura 6).

O traçado dos raios das ondas vindas de leste é ilustrado na Figura 7, onde se observa, ao contrário das ondas

vindas de sudeste, que essas ondas atingem a praia de Camburi.

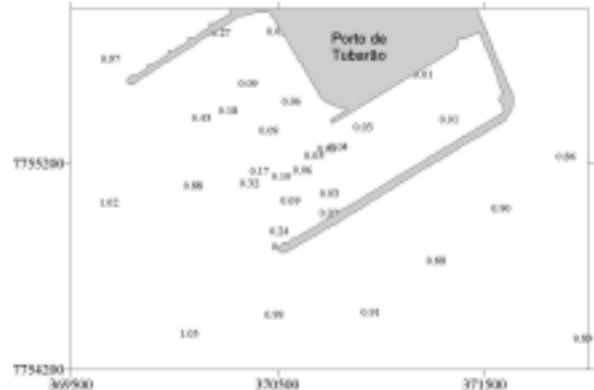


Figura 6: Coeficientes de difração das ondas vindas de sudeste.

Ao interagirem com o quebra-mar do porto essas ondas diminuem consideravelmente sua altura possibilitando sua passagem pela região de baixios.

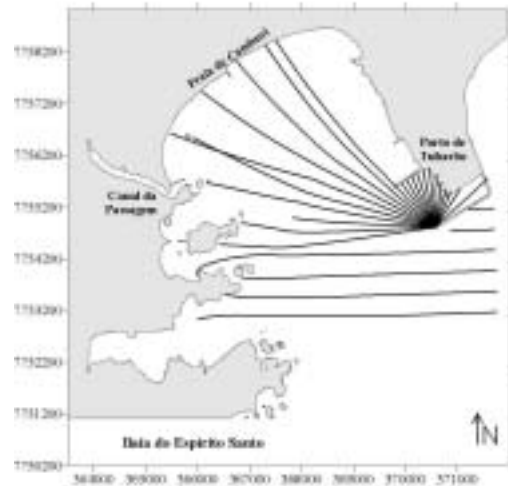


Figura 7: Traçado dos raios de energia das ondas vindas de leste.

Na região interna ao porto de uma forma geral a altura da onda é menor no caso das ondas vindas de leste do que para ondas vindas de sudeste (Figura 8).

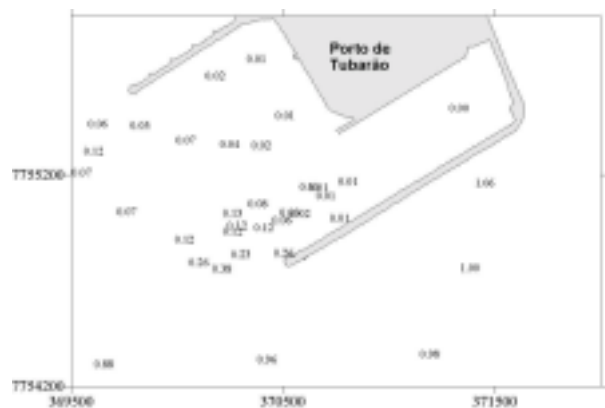


Figura 8: Coeficientes de difração das ondas vindas de leste.

## **6. CONCLUSÕES**

As ondas mais frequentemente observadas na região da baía do Espírito Santo são as ondas vindas de sudeste e leste e esses dois casos foram simulados podendo-se observar que existe uma ligeira concentração da energia das ondas no trecho que vai do canal da passagem ao pier central da praia de Camburi.

Outra característica marcante da região analisada é a presença dos baixios que para o caso das ondas vindas de sudeste são funcionam como um dissipador de energia, provocando sua quebra.

O quebra-mar do porto provoca uma redução considerável na altura das ondas incidentes simuladas para a Baía do Espírito Santo.

A ferramenta desenvolvida e aplicada na Baía do Espírito Santo pode ser utilizada em regiões onde se queira realizar estudos sobre refração e difração de ondas. Através de sua aplicação, informações dos padrões de propagação da onda e distribuição de energia da onda podem ser obtidas de forma rápida e a baixo custo.

A técnica manual de traçado dos raios é bastante tediosa (ver *Shore Protection Manual*), neste sentido, o programa agiliza a obtenção de informações para avaliações de regiões costeiras de interesse. O modelo fornece também informações sobre a difração auxiliando no projeto de *layouts* de portos em zonas costeiras.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Kamphuis, J., W. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. First Edition. Singapore: World Scientific, 2000.
- Penney W. G., Price A. T. *The Diffraction Theory of Sea Waves by Breakwater, and the Shelter Afforded by Breakwater*. Royal Soc., London, Serie A, Vol. 244, March, 1952, p.236.
- Sommerfeld A. *Mathematische Theorie der Diffraction*. *Mathematische Annalen*, Vol. 47, 1896, p. 317
- U. S. Army, Coastal Engineering Research Center, *Shore Protection Manual*, Vol. I, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1977
- WIEGEL, L. R., 1962. Diffraction of Waves by Semi-Infinite Breakwater. *Journal of the Hydraulics Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol 88, No. HY1, 27-45.