



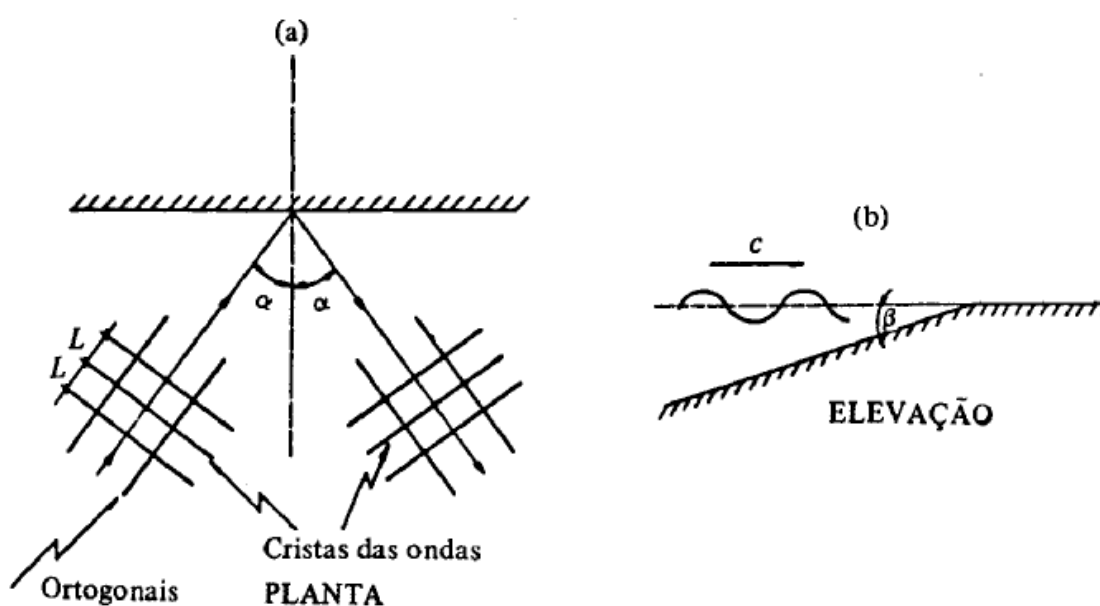
## HIDRÁULICA MARÍTIMA

### NOTA DE AULA 05

#### FENÔMENOS DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

##### REFLEXÃO DAS ONDAS

A reflexão das ondas de superfície em meio fluido obedece às mesmas leis gerais da reflexão das ondas em outros meios contínuos. A figura abaixo mostra o processo de reflexão.



(Fonte: Mason, J. 1984)

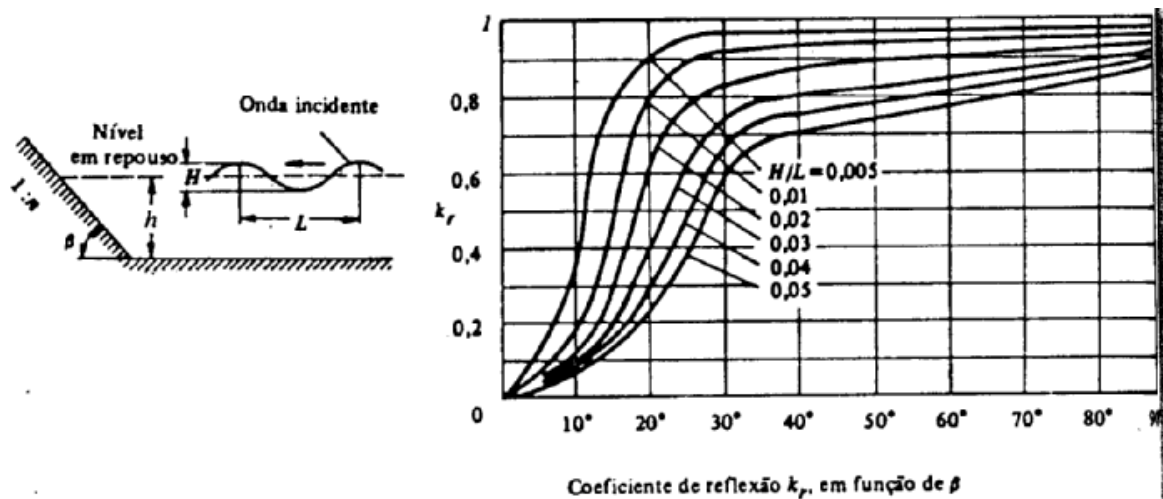
Na figura (a) está representada a incidência de frentes de uma onda com comprimento de onda  $L$  num obstáculo. Pelas leis da reflexão, o ângulo de reflexão será igual ao ângulo de incidência. As ondas refletidas poderão interferir com as ondas incidentes gerando um esquema bi-dimensional de interferência. Caso a incidência seja normal ( $\alpha = 0$ ) e o obstáculo constituído por uma parede vertical, teremos reflexão total, com a formação de *clapotis*.

Se as ondas incidirem num plano inclinado como na figura (b) com ângulo de inclinação  $\beta$  com a horizontal, teremos uma reflexão parcial das ondas. A reflexão parcial das ondas pode ser caracterizada pelo coeficiente de reflexão  $k_r$  definido por:

$$k_r = \frac{H_r}{H_i}$$



onde  $H_r$  é a altura da onda refletida e  $H_i$  é a altura da onda incidente. O coeficiente de reflexão  $k_r$  depende de inúmeros fatores que influenciam a dissipação de energia no obstáculo refletor. O gráfico de Greslou e Mahe serve para determinação do coeficiente de reflexão para a incidência de uma onda num fundo taludado liso, no caso de águas profundas.



(Fonte: Mason, J., 1984)

## REFRAÇÃO DAS ONDAS

A celeridade **C** de uma onda é diretamente proporcional à profundidade **d** em que se propaga. Assim, se uma onda progressiva tiver sua linha de crista formando um determinado ângulo com as curvas de nível do fundo do mar, a onda deverá sofrer uma deformação, porque as partes da crista que se deslocam em águas de maior profundidade terão maior celeridade. A linha de crista da onda tenderá a encurvar-se e alinhar-se com as curvas de nível do fundo do mar.

Este fenômeno é conhecido como **refração das ondas**. A sua importância no estudo de obras portuárias decorre principalmente do fato de que a refração, juntamente com o fenômeno da deformação das alturas das ondas devido à variação de profundidade, determina a altura das ondas e o grau de agitação nas bacias portuárias.

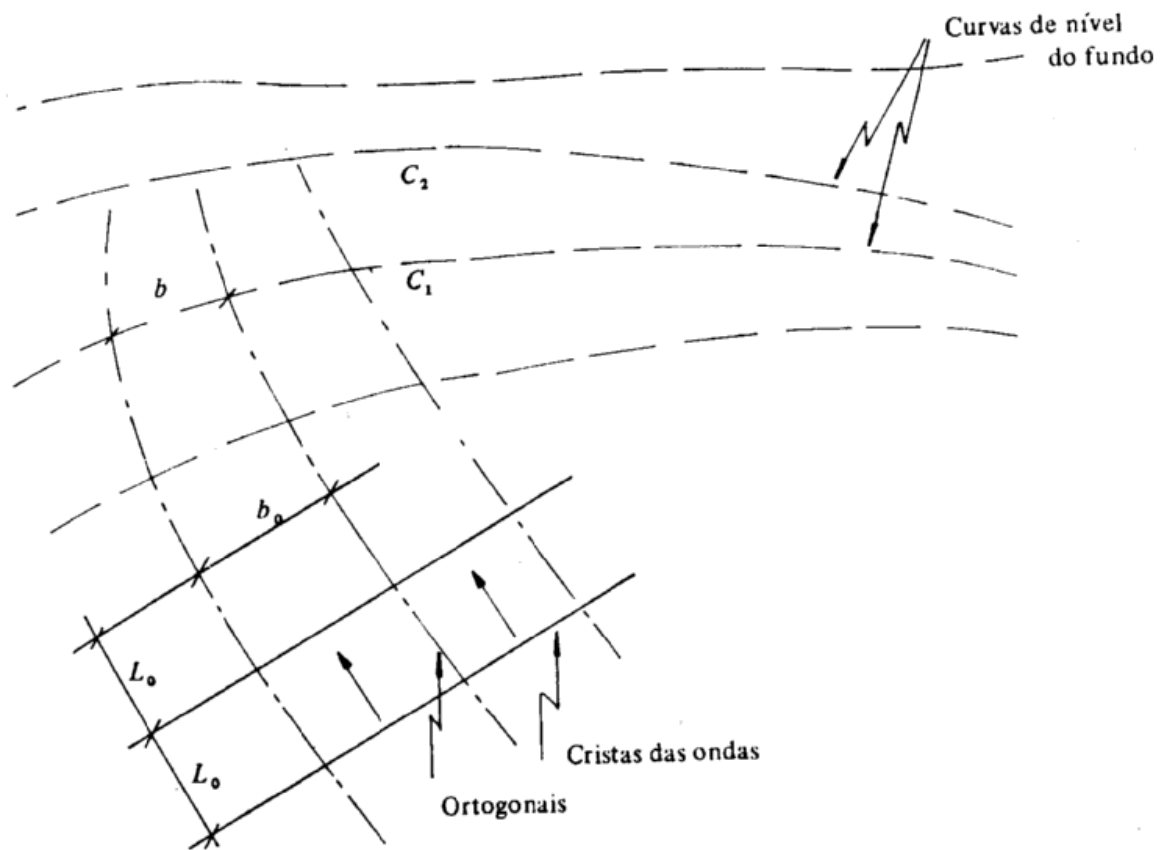
O fenômeno da refração pode afetar a batimetria do fundo da bacia portuária, com assoreamento dos canais de acesso e bacia de evolução.

No estudo da refração das ondas temos dois problemas a resolver:

- a) a determinação da altura das ondas:



b) a mudança de direção das ortogonais.



### REFRAÇÃO DAS ONDAS

(Fonte: Mason, J., 1984)

O primeiro pode ser resolvido pela equação  $H = K_R H_0$  na qual o coeficiente  $\sqrt{(b_0/b)}$  será agora denominado coeficiente de refração  $K_R$ . A determinação da altura das ondas deverá ser aplicada a cada estágio do avanço da onda entre as curvas de nível.

$$K_R = \left(\frac{b_0}{b}\right)^{1/2}$$



O segundo problema, isto é, a mudança da direção das cristas das ondas (ou das ortogonais) sobre as diferentes curvas de nível é resolvido por meio da Lei de SNELL, sendo que para a refração ela é dada por:

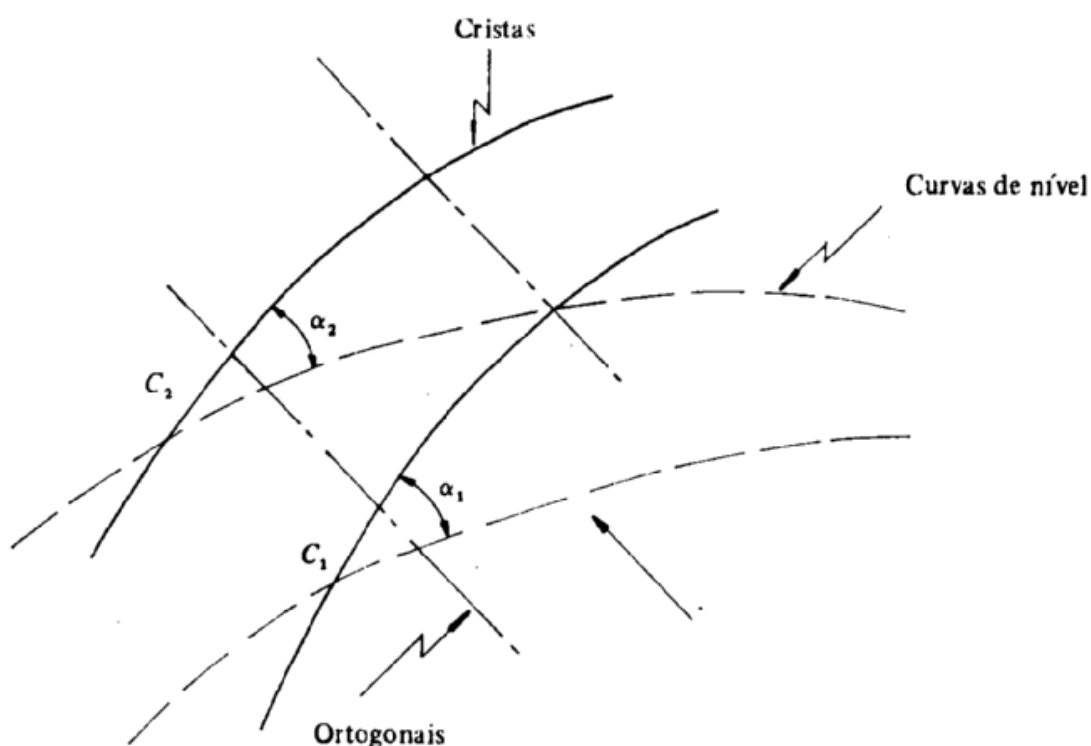
$$\sin(\alpha_2) = \frac{C_2}{C_1} \sin(\alpha_1)$$

onde:

$\alpha_1$  : o ângulo da crista da onda com a curva de nível do fundo, sobre a qual está passando;

$\alpha_2$  : o ângulo análogo com a curva de nível seguinte;

$C_1$  e  $C_2$  : celeridades da onda levando em conta a profundidade junto a cada curva de nível.



(Mason, J. 1984)

### DIFRAÇÃO DAS ONDAS

A difração das ondas se constitui no fenômeno pelo qual ocorre uma transferência lateral de energia ao longo da crista, quando esta é interrompida por algum obstáculo.

Na figura (a) seguinte, mostra-se um trem de ondas que se propaga na direção 1-2 quando é interrompida por um quebra-mar. Na zona (I) as ondas prosseguem normalmente na sua trajetória.



A zona (II) é a zona de difração e as ondas sofrem uma expansão lateral, podendo as cristas, nesta região, serem assimiladas a arcos de círculo. Na zona (III) as ondas sofrem reflexão pelo quebra-mar, formando-se um esquema complexo de interferência.

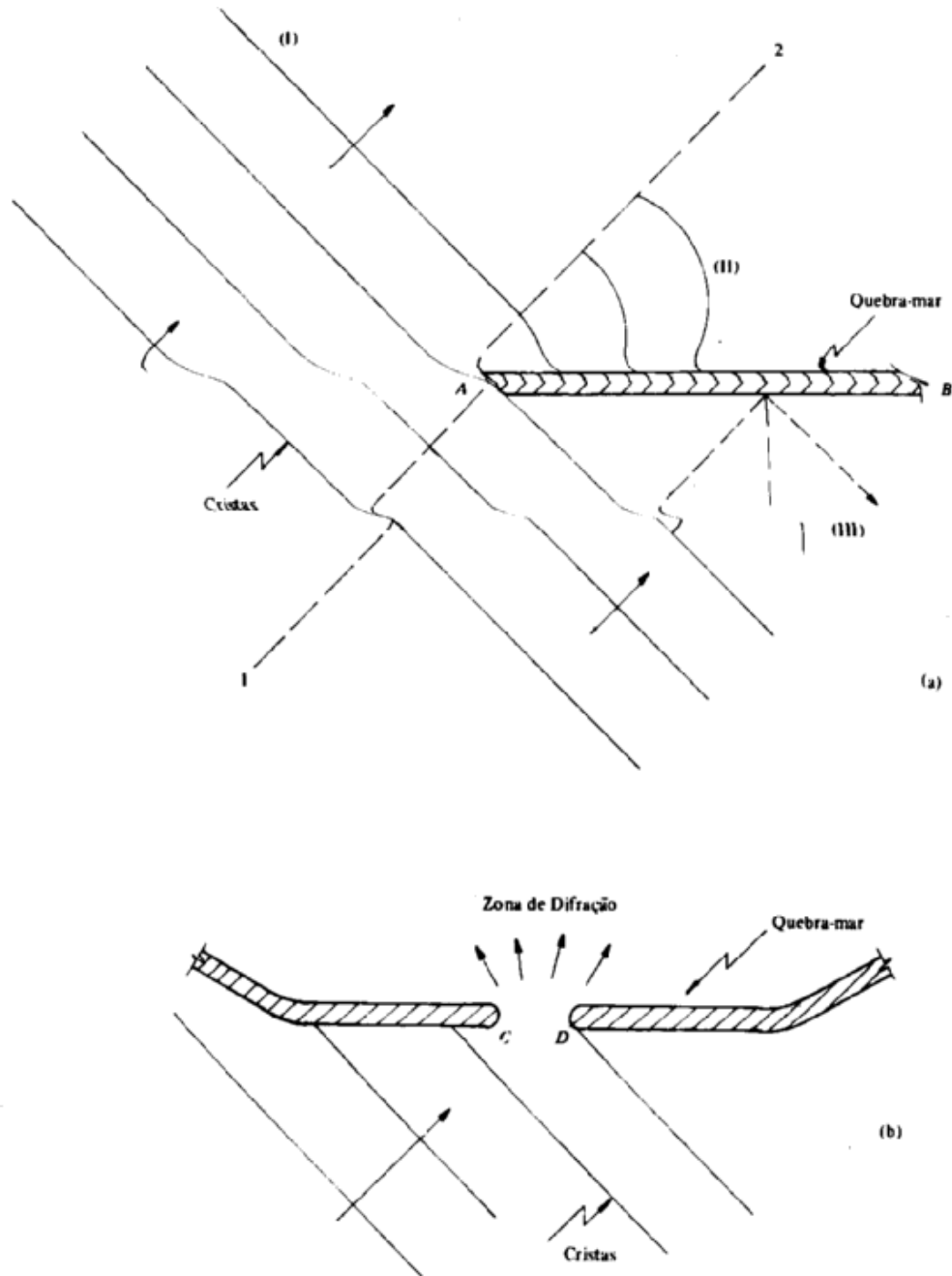
Na figura (b) um trem de ondas incide num quebra-mar destacado que tem uma abertura C-D. A abertura C-D passa a se constituir num centro de difração da onda para a zona delimitada pelo quebra-mar.

O estudo do problema da difração é muito complexo e não pode ser abordado neste curso em sua forma completa pois exige um arcabouço matemático bem além do ministrado nos cursos de cálculo e matemática aplicada da engenharia civil.

Porém, o problema central da difração, que é a determinação da altura das ondas difratadas e a forma de suas cristas pode ser resolvido pelo emprego de gráficos de soluções particularizadas para diversos casos mais comuns. O livro SHORE PROTECTION MANUAL apresenta a solução para muitas condições de incidência das ondas e das obras de obstáculo.

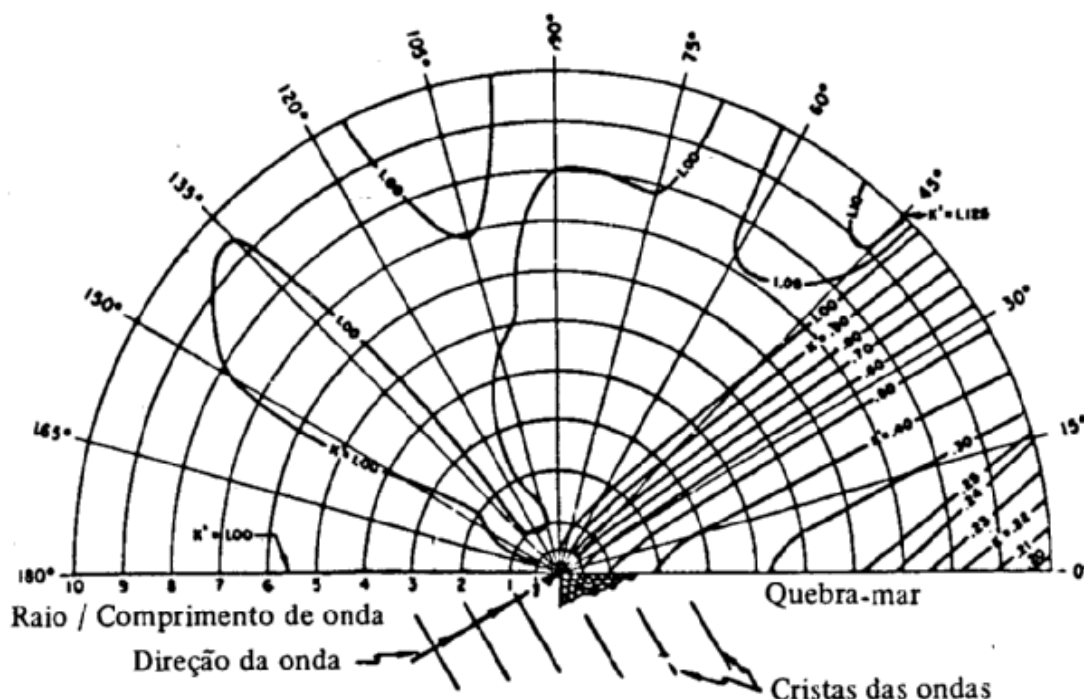
As ondas difratadas apresentam uma relação entre a altura da onda difratada  $H_d$  e a onda incidente dada pelo coeficiente de difração  $k_d$ :

$$k_d = \frac{H_d}{H}$$



(Fonte: Mason, J., 1984)

Os valores de  $k_d$  são apresentados nos gráficos como mostrado na figura seguinte:



(Fonte: Mason, J., 1984)

### ARREBENTAÇÃO DE ONDAS

À medida que uma onda se propaga desde alto mar se aproximando da linha da costa, ocorre uma diminuição de seu comprimento de onda  $L$  e conseqüentemente sua celeridade  $C$ , ao mesmo tempo em que cresce a componente horizontal das velocidades orbitais  $u$ . A onda consegue se propagar enquanto a celeridade de propagação da onda propriamente dita  $C$  ainda seja superior à velocidade de giro orbital das partículas dadas por  $u$  e  $w$ . No momento que  $u$  se iguala ou ultrapassa o valor de  $C$ , a crista da onda tenta se propagar mais rápido do que a celeridade  $C$  o que é impossível. Assim a crista da onda se empina e cai promovendo o fenômeno conhecido por arrebentação.

O estudo da zona de arrebentação é muito importante na hidráulica marítima, pois todas as estruturas portuárias ou costeiras situadas nesta região estarão sujeitas à violência e turbulência resultante do processo de dissipação da energia na arrebentação, sendo recomendável se evitar o projeto de estruturas singelas nesta região.

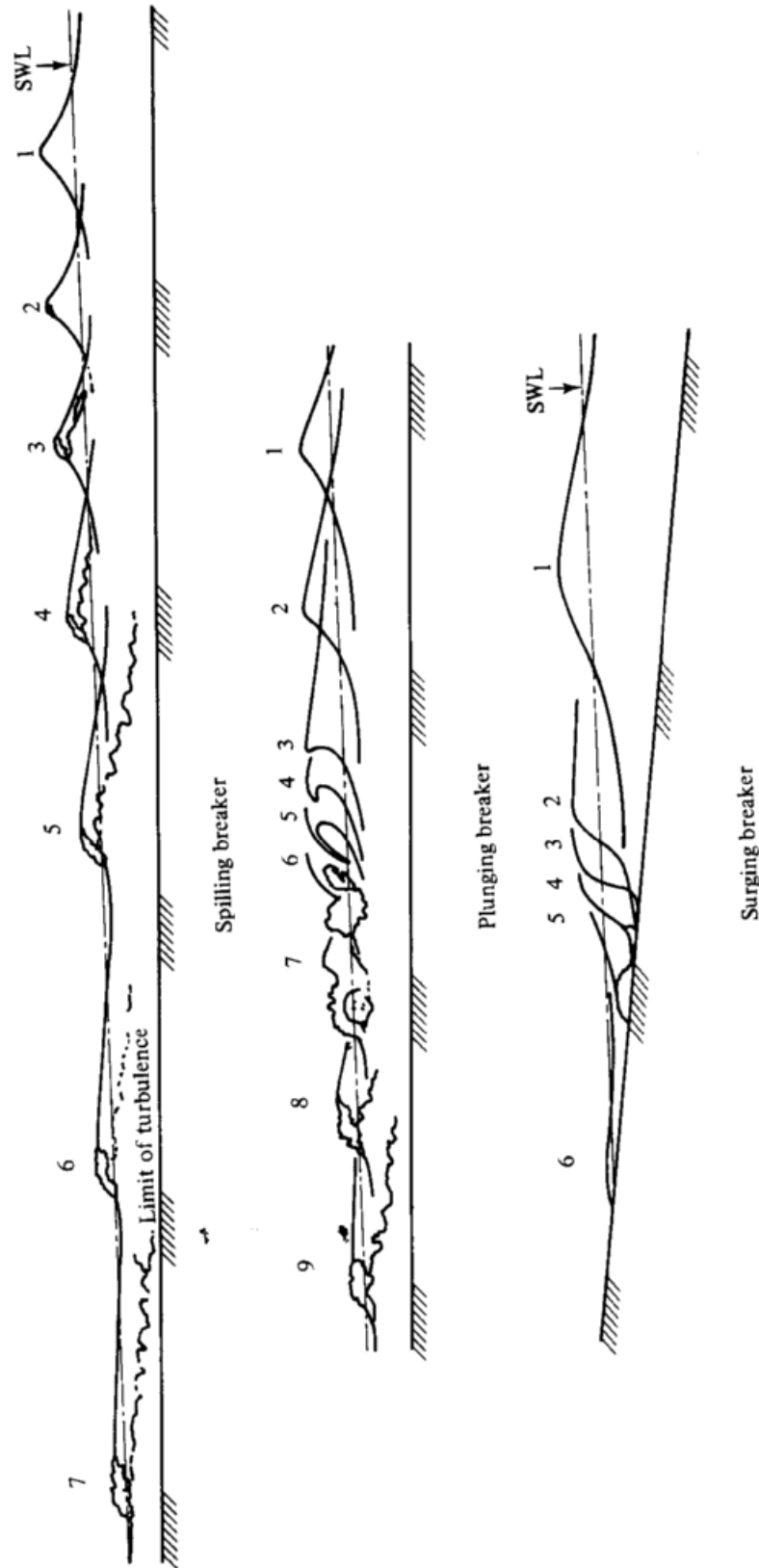
O processo de arrebentação depende de uma série de fatores, sendo o mais importante a declividade do fundo na zona de arrebentação, junto à praia. A arrebentação é classificada em três tipos segundo a declividade do fundo:



- **arrebentação progressiva** (na literatura inglesa denomina-se *spilling breaker*), para fundos com declividade muito suave, quase horizontalizada. Neste caso não se nota uma quebra de onda propriamente dita mas um trem de várias ondas dentro da zona de arrebenção com cristas pouco empinadas, caracterizando-se por uma “espumagem” das ondas. Não há grande turbulência e o risco para banhistas é muito pequeno. Exemplo no Ceará: Praia do Arpoeiro- Acaraú, Jericoacoara, etc;
- **arrebentação em voluta** ( na literatura inglesa denomina-se *plunging breaker*), para fundos com maior declividade. Neste caso a crista da onda se empina para frente e mergulha contra a parte da depressão da onda. Este tipo de onda se torna espetacular quando o ar é aprisionado no mergulho, formando o chamado *tubo de arrebenção* permitindo manobras espetaculares de surfistas. É o tipo de onda mais comum no litoral brasileiro, podendo ser observada em qualquer parte do litoral do Ceará, como na praia do Futuro em Fortaleza. Os risco para banhistas são maiores, principalmente quando combinada com fenômenos de refração e correntes costeiras;
- **arrebentação em intumescência** (na literatura inglesa denomina-se *surging breaker*) para fundos bastante íngremes, sendo caracterizada por uma estreita ou sequer inexistente zona de surf e por uma alta reflexão. São ondas bastante perigosas porque quebram de forma abrupta na praia e, por reflexão, arrastam de volta para o mar sedimentos promovendo erosão da praia. Devem ser evitadas até mesmo por banhistas mais experientes, pois o risco de afogamento é muito elevado nessas condições.

A figura seguinte, proveniente do livro WATER WAVES MECHANICS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS de Robert Dean e Robert Dalrymple da World Scientific, mostra os três tipos de onda aqui citados.





**Figure 4.22** Three types of wave breaking on beaches. Small figures denote different stages of the breaking process. (Figure courtesy of I. A. Svendsen.)

(Fonte: Dean & Dalrymple, 1995)



Ao engenheiro que lida com obras costeiras ou portuárias é importante conhecer aonde se dará a quebra da onda segundo os critérios aqui citados. O critério mais aceito na comunidade acadêmica é o que estabelece que a onda quebra quando a sua altura alcança uma fração da profundidade da água. O primeiro critério foi o de McCowan (1894) que estabeleceu que:

$$H_b = 0,78d_b$$

onde  $H_b$  seria a altura da onda na quebra e  $d_b$  seria a profundidade do mar na quebra da onda.

O segundo critério, mais moderno, se deve a Weggel (1972) que após inúmeras medições e ensaios de laboratório concluiu que há uma relação entre a altura da onda no momento da quebra com a declividade  $m$  do fundo do mar na zona de arrebentação. A equação fica:

$$H_b = kd_b$$

na qual  $k$  é dado pela equação abaixo:

$$k = b(m) - a(m) \frac{H_b}{gT^2}$$

$$a(m) = 43,8(1 - e^{-19m})$$

$$b(m) = 1,56(1 + e^{-19,5m})^{-1}$$

Nesta equação, o valor de  $k$  se aproxima de **0,78** quando a declividade da praia se aproxima de zero. Nota-se que esta equação é implícita, tendo o valor da altura da onda em ambos membros da mesma. A solução deve ser tentada da seguinte forma:

Como uma primeira aproximação, a profundidade da quebra da onda pode ser determinada pelo coeficiente de deformação da onda  $K_s$  e fórmulas de refração para curvas de nível retas e paralelas à praia, se as condições de alto mar forem conhecidas.

Chamando  $\theta_0$  ao ângulo formado pela tangente à ortogonal da onda (sentido de propagação da onda para a praia) com a linha normal à praia numa profundidade considerada de águas



profundas e, de  $\theta$ , ao mesmo ângulo numa profundidade mais próxima à praia, que são equivalentes às relações  $b_0$  e  $b$  dadas por:

$$K_R = \left( \frac{b_0}{b} \right)^{1/2} = \left( \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^{1/2}$$

tem-se:

$$H = H_0 \left( \frac{C_0}{2nC} \right)^{1/2} \left( \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^{1/2}$$

Para águas rasas isto se aproxima para:

$$H = H_0 \left( \frac{C_0}{2\sqrt{gd}} \right)^{1/2} \left( \frac{\cos \theta_0}{1} \right)^{1/2}$$

Sendo assumido que o ângulo de quebra é pequeno. Usando a critério de McCowan tem-se:

$$kd_b = H_0 \left[ \frac{C_0}{2\sqrt{gd_b}} (\cos \theta_0) \right]^{1/2} \quad \text{o qual sendo resolvido para } d_b \text{ encontra-se:}$$

$$d_b = \frac{1}{g^{1/5} k^{4/5}} \left( \frac{H_0^2 C_0 \cos \theta_0}{2} \right)^{2/5} \quad (\text{profundidade de quebra})$$

valendo para uma praia plana onde  $d=mx$ , sendo  $x$  a distância contada da praia e  $m=\tan \beta$ , sendo a inclinação da praia. A distância da linha de arrebentação da costa é dada por:

$$x_b = \frac{d_b}{m} = \frac{1}{mg^{1/5} k^{4/5}} \left( \frac{H_0^2 C_0 \cos \theta_0}{2} \right)^{2/5}$$



Finalmente, a altura da onda na quebra  $H_b$  é estimada através de:

$$H_b = k m x_b = \left( \frac{k}{g} \right)^{1/5} \left( \frac{H_0^2 C_0 \cos \theta_0}{2} \right)^{2/5}$$

Deve-se empregar  $k=0,78$  como uma primeira boa aproximação.

### EXERCÍCIOS DE HIDRÁULICA MARÍTIMA MODELO PARA NTF-5

Para uma onda progressiva que tenha um período  $T=6,5$  seg e uma altura em águas profundas  $H_0=4$  m, incidindo sobre uma zona costeira que tinha uma declividade de 5%, com contornos batimétricos retos e paralelos à linha da costa, em mar aberto, determine:

- A profundidade possível de ocorrer arrebentação da onda empregando o critério de McCowan;
- A distância contada da linha da costa para a zona do início da arrebentação;
- A altura provável de quebra da onda durante a arrebentação.

#### SOLUÇÃO:

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi} = \frac{9,81 \times 6,5^2}{2 \times \pi} = 65,96 m \cong 66 m$$

$$C_0 = \frac{L_0}{T} = \frac{66 m}{6,5 seg} = 10,15 seg$$

O critério de McCowan fixa o valor de  $k = 0,78$  para a relação  $H_b = k d_b$  :

Como a onda quebrará numa zona de costa, em mar aberto, com contornos batimétricos retos e paralelos, o ângulo  $\theta_0$  será  $0^\circ$ , e portanto,  $\cos \theta_0 = 1$ . Obs:  $\theta_0$  = ângulo formado pela tangente à ortogonal da onda (sentido da propagação) com a linha normal à praia numa profundidade de águas profundas.

Lembrando que  $K_R = (b_0/b)^{1/2} = (\cos \theta_0 / \cos \theta)^{1/2}$

A equação da profundidade de quebra é:



$$d_b = \frac{1}{g^{1/5} k^{4/5}} \left[ \frac{H_0^2 C_0 \cos \theta_0}{2} \right]^{2/5}$$

$$d_b = \frac{1}{9,81^{1/5} (0,78)^{4/5}} \left[ \frac{4^2 \times 10,148 \times 1}{2} \right]^{2/5} = 4,485m \quad \mathbf{d_b = 4,49 m}$$

b) A distância da praia para a linha de arrebentação:

$$x_b = \frac{d_b}{m} = \frac{4,485}{0,05} = 89,70m \quad \text{Logo, a zona de arrebentação começa em } \mathbf{x_b = 89,70m}$$

d) A altura da onda na quebra é dada por:

$$H_b = k d_b = 0,78 \times 4,485 = 3,498m \quad \text{Logo, } \mathbf{H_b = 3,5 m}$$

ATENÇÃO: O critério de McCowan ( $k=0,78$ ) não é absoluto e pode conduzir a erros apreciáveis, em virtude da teoria das ondas progressivas não ter 100% de validade na zona de arrebentação. O critério de fato mais correto para que ocorra a quebra da onda, é encontrar uma profundidade em que a velocidade horizontal das partículas **u** coincida com a celeridade da onda **C** nesta profundidade.

Isto só é possível através de simulação computacional pois só existem duas equações de solução para três variáveis ( $d_b$ ;  $H_b$  e  $L_b$ ), ou seja, somente conhecendo-se uma relação correta entre  $H_b/d_b$  ou  $L_b/d_b$  seria possível se obter uma solução analítica explícita.

Simulações computacionais indicaram que a altura correta de quebra da onda é com  $H_b \cong 3,9$  m numa profundidade aproximada de 2,8 m. Mas isto seria relativo à **queda do tubo de arrebentação da onda na praia**.

O critério de McCowan que resultou neste caso um  $H_b = 3,5$  m e  $d_b = 4,49$  m assinala a posição onde começa a se formar o tubo de arrebentação que se propaga por 89,7 m até atingir a praia. Ele continua sendo importante para definir a priori para a engenharia de hidráulica marítima, onde começa a ocorrer o processo de formação do tubo na zona de arrebentação.

## REFERÊNCIAS

- MASON. J.. (1984). **Obras Portuárias**. Editora Campus. Portobrás. 282p. Rio de Janeiro.RJ
- DEAN. R.G., DALRYMPLE, R.A. (1994) **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. World Scientific. New York. 353p
- USACE. (1996) **Shore Protection Manual**. Volume I e II. Vicksburg. 1996.