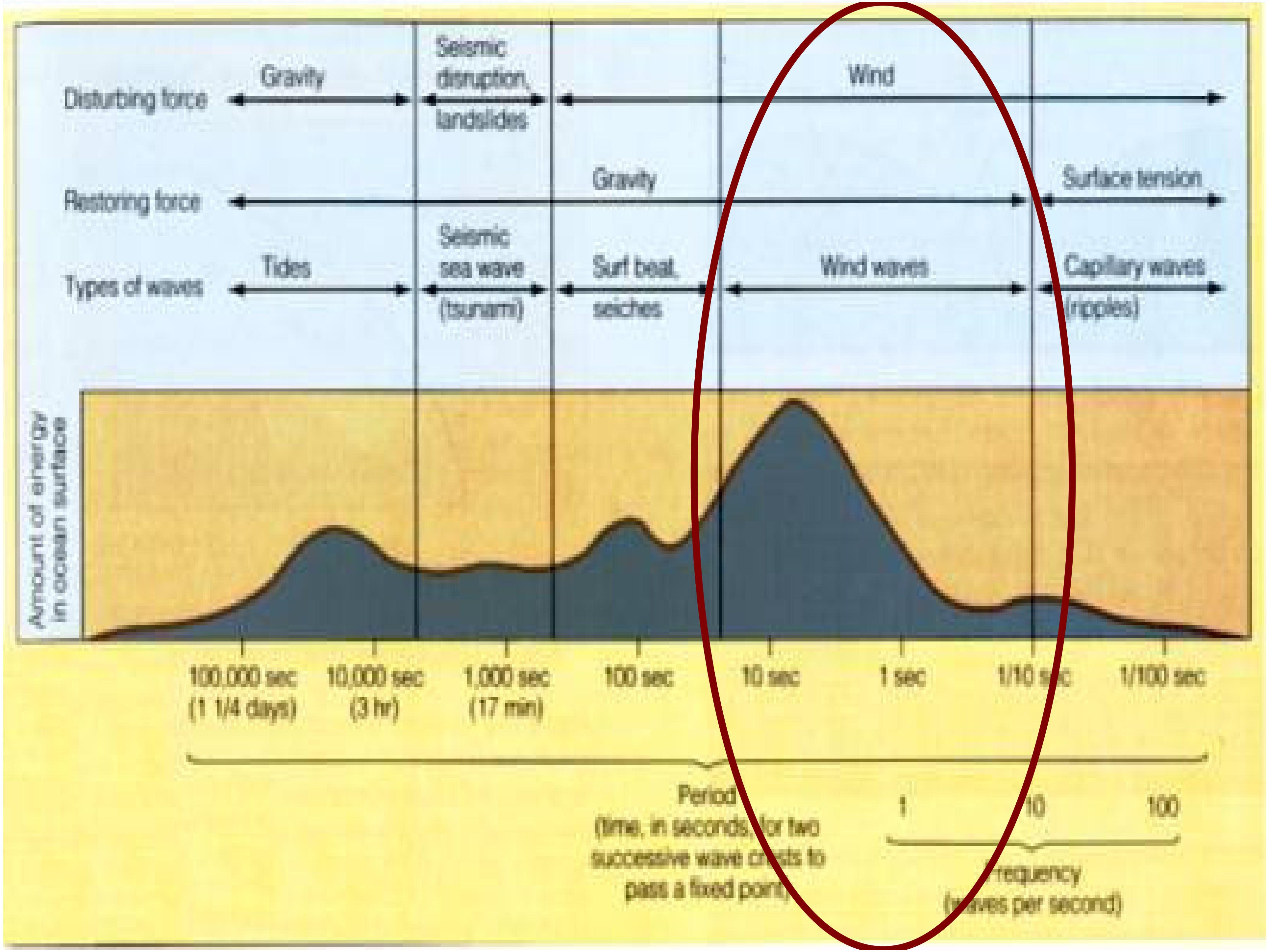
ONDAS DE SUPERFÍCIE NO OCEANO



Disturbing force
Gravity
Seismic disruption, landslides
Wind
Restoring force
Gravity
Surface tension
Types of waves
Tides
Seismic sea wave (tsunami)
Surf beat, seiches
Wind waves
Capillary waves (ripples)
Amount of energy in ocean surface
100,000 sec (1 1/4 days)
10,000 sec (3 hr)
1,000 sec (17 min)
100 sec
10 sec
1 sec
1/10 sec
1/100 sec
Period (time, in seconds, for two successive wave crests to pass a fixed point)
1
10
100
Frequency (waves per second)

MECÂNICA DAS ONDAS (TEORIA LINEAR)

Hipóteses:

- Movimento irrotacional;
- Fluido incompressível;

EXISTÊNCIA DE UM POTENCIAL DE VELOCIDADE QUE SATISFAZ A EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\nabla \cdot \nabla \phi = 0.$$

CALCULANDO O DIVERGENTE DE UM GRADIENTE

EQUAÇÃO DE LAPLACE EM DUAS DIMENSÕES

$$\boxed{\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0}$$

POTENCIAL DE VELOCIDADE EM FUNÇÃO DAS COMPONENTES HORZ. E VERT.

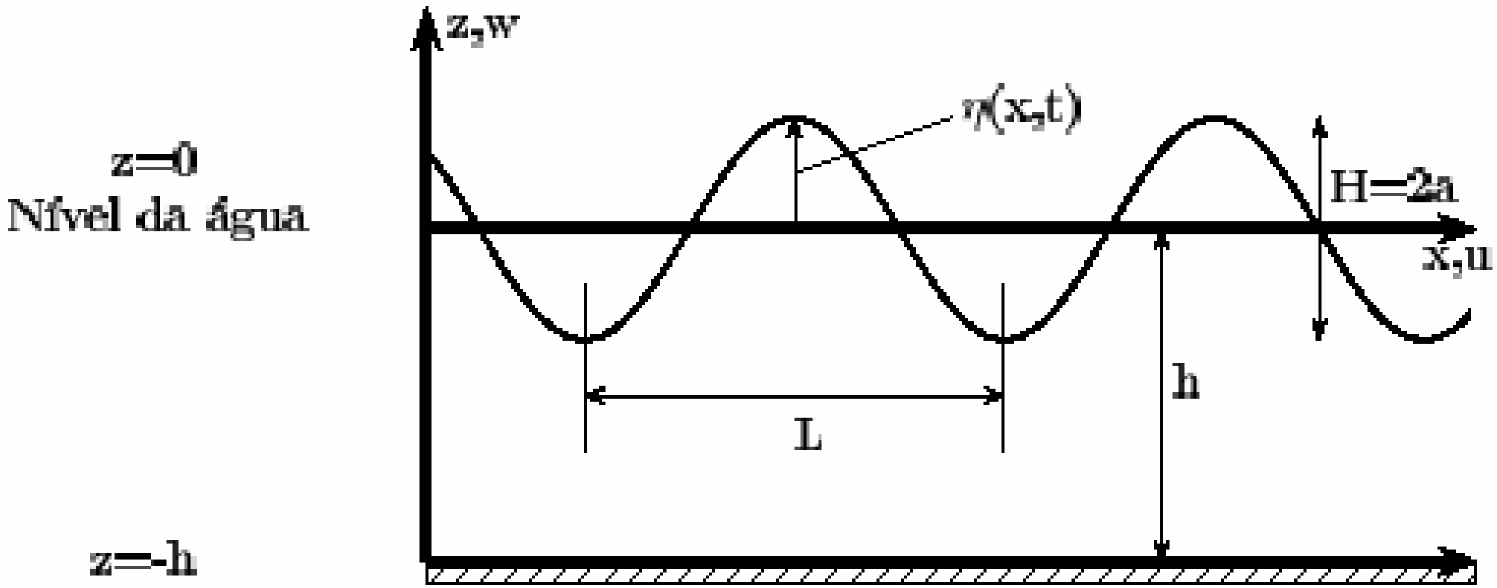
$$u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$w(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$$

CONSERVAÇÃO DO MOMENTO

EQUAÇÃO DE BERNOULLI NÃO ESTACIONÁRIA

$$\boxed{-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho_w} + gz = 0}$$



CONDIÇÃO DE CONTORNO DINÂMICA NA SUPERFÍCIE LIVRE (CCDSL)

Hipótese:

•Na superfície livre ($z = \eta$) a pressão é igual a pressão atmosférica ($p = 0$) .

SUBSTITUINDO NA EQUAÇÃO DE BERNOULLI

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho_w} + gz = 0$$

$$\Downarrow$$

CCDSL

$$\boxed{-\frac{\partial\phi}{\partial t} + g\eta = 0 \qquad \text{em} \qquad z = 0}$$

CONDIÇÃO DE CONTORNO CINEMÁTICA NA SUPERFÍCIE LIVRE (CCCSL)

Hipótese:

•Velocidade vertical da superfície livre deve ser igual a velocidade vertical do fluido.

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u\frac{\partial \eta}{\partial x} \qquad \text{em} \qquad z = \eta$$

A escala da altura de onda é muito pequena quando comparada com o comprimento fazendo com que o termo de inclinação seja desprezível! Desta forma aplica-se a condição em z=0

CONDIÇÃO DE CONTORNO CINEMÁTICA NA SUPERFÍCIE LIVRE (CCCSL)

Hipótese:

•Velocidade vertical da superfície livre deve ser igual a velocidade vertical do fluido.

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u\frac{\partial \eta}{\partial x} \qquad \text{em} \qquad z = \eta$$

SUBSTITUINDO O W DADO POR:

CCCSL

$$\boxed{-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \qquad \text{em} \qquad z = 0}$$

CONDIÇÃO DE CONTORNO CINEMÁTICA NO FUNDO (CCCF)

DE MANEIRA SEMELHANTE A SUPERFÍCIE NÃO EXISTE FLUXOS ATRAVÉS DO FUNDO

CCCF

$$\boxed{w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad \text{em} \qquad z = -h}$$

ASSIM O PROBLEMA DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE PELA TEORIA LINEAR É A RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE LAPLACE APLICANDO AS 3 CONDIÇÕES DE CONTORNO CITADAS.

APLICANDO O MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE VARIÁVEIS E UTILIZANDO UMA SOLUÇÃO PERIÓDICA, UMA SOLUÇÃO OBTIDA PARA O SISTEMA É:

$$\phi(x,z,t) = \frac{ag}{\omega}\frac{\cosh\left[k(h+z)\right]}{\cosh\left[kh\right]}\cos(kx-\omega t)$$

$a = \frac{H}{2}$ → AMPLITUDE

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ → FREQÜÊNCIA ANGULAR

$k = \frac{2\pi}{L}$ → NÚMERO DE ONDA

FAZENDO UMA PEQUENA MANIPULAÇÃO ALGÉBRICA COM A EQUAÇÃO

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho_w} + gz = 0$$

E COM A EQUAÇÃO CCCSL

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \qquad \text{em} \qquad z = 0$$

DETERMINA-SE QUE:

$$\boxed{-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{g}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \qquad \text{em} \qquad z = 0.}$$

APLICANDO A SOLUÇÃO OBTIDA

$$\phi(x,z,t) = \frac{ag}{\omega}\frac{\cosh\left[k(h+z)\right]}{\cosh\left[kh\right]}\cos(kx-\omega t)$$

NA EQUAÇÃO ANTERIOR:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{g}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \qquad \text{em} \qquad z = 0.$$

CHEGA-SE NA RELAÇÃO DE DISPERSÃO:

$$\boxed{\omega^2 = gk\tanh(kh).}$$

POR DEFINIÇÃO, UMA ONDA AO SE PROPAGAR PERCORRERÁ A DISTÂNCIA DE UM COMPRIMENTO DE ONDA L EM UM PERÍODO T.

LEMBRANDO QUE:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{E} \quad k = \frac{2\pi}{L}$$

A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA, OU VELOCIDADE DE FASE É:

$$C = \frac{L}{T} \quad \text{ou} \quad \frac{\omega}{k}$$

SUBSTITUINDO A REL. DE DISPERSÃO NA EQ. DA VELOCIDADE DE FASE:

$$C^2 = \frac{g}{k}\tanh(kh)$$

COMBINANDO A EQ. DA VELOCIDADE DE FASE COM A RELAÇÃO ANTERIOR:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

AS EQUAÇÕES ANTERIORES COM A REL. DE DISPERSÃO DESCREVEM A MANEIRA COM A QUAL UM CAMPO DE ONDAS COM DIFERENTES FREQÜÊNCIAS IRÁ SE DISPERSAR SOBRE OS OCEANOS FORMANDO OS GRUPOS DE ONDAS.

A ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE PODE SER OBTIDA ATRAVÉS DA EQUAÇÃO (CCDSL) E REPRESENTADA POR :

$$\eta = \frac{1}{g}\left[\frac{\partial\phi}{\partial t}\right]_{z=0}$$

SUBSTITUINDO NA SOLUÇÃO PERIÓDICA E DIFERENCIANDO EM RELAÇÃO AO TEMPO t:

$$\eta = a\,\mathrm{sen}\,(kx - \omega t)$$

QUE REPRESENTA A ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE PARA UM TREM DE ONDAS LINEARES

CONSIDERANDO DOIS TRENS DE ONDAS DE MESMA ALTURA, SE PROPAGANDO NA MESMA DIREÇÃO E COM PEQUENAS DIFERENÇAS NAS SUAS FREQÜÊNCIAS E NÚMEROS DE ONDAS. PODEMOS REPRESENTAR SUA SUPERPOSIÇÃO COM UMA SIMPLES SOMA :

$$\boxed{\eta = \eta_1 + \eta_2}$$

$$\boxed{\eta = 2a\cos\left[\frac{1}{2}(k_1 - k_2)x - \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right] \times \operatorname{sen}\left[\frac{1}{2}(k_1 + k_2)x - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t\right]}$$

$$C_g = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k}$$

APLICANDO A RELAÇÃO DE DISPERSÃO NA DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE DE GRUPO E DIFERENCIANDO:

$$C_g = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2kh}{\operatorname{senh}(2kh)}\right] C$$

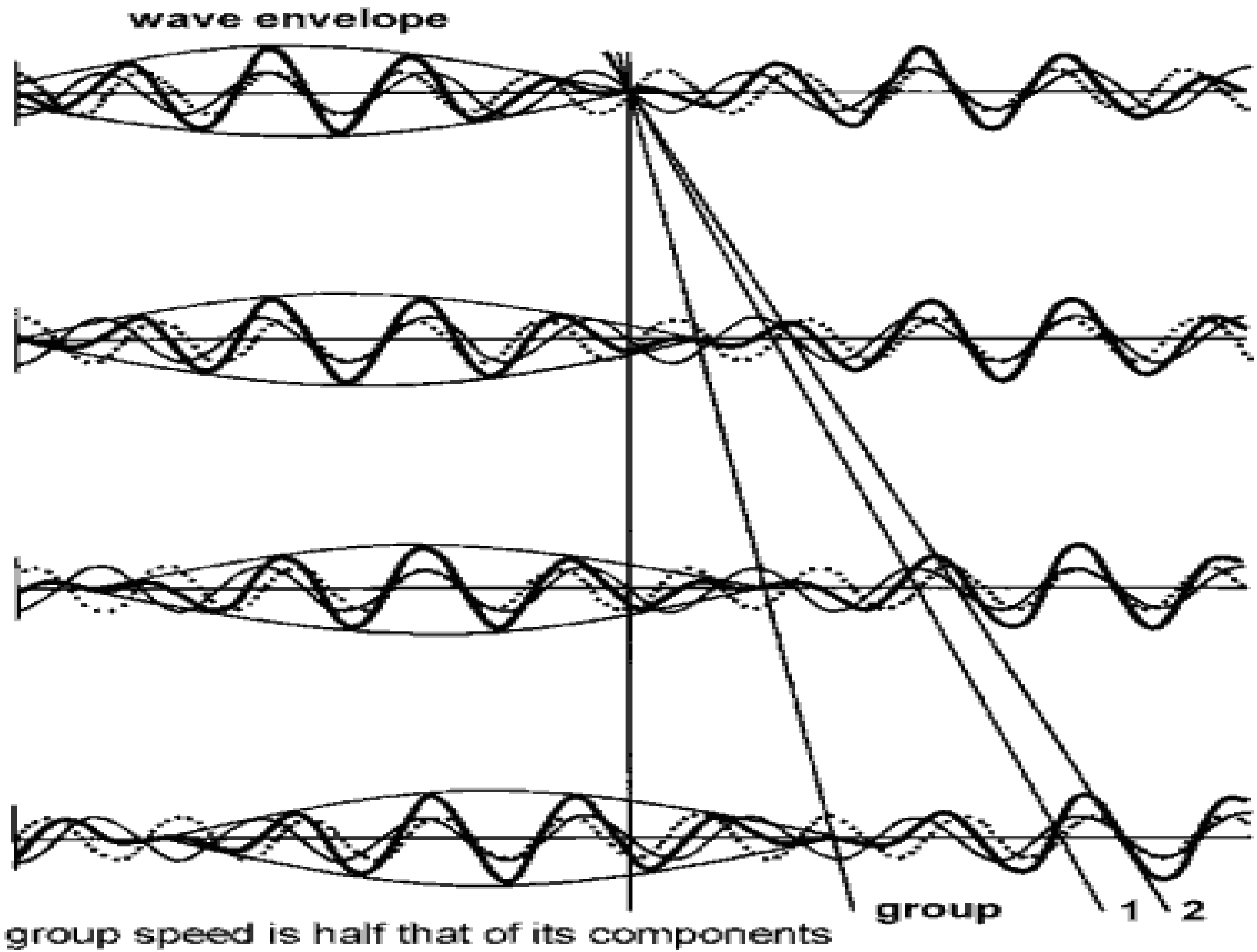
A NATUREZA ASSINTÓTICA DA FUNCÃO HIPERBÓLICA FAZ COM QUE:

$$C_g = 1/2C$$

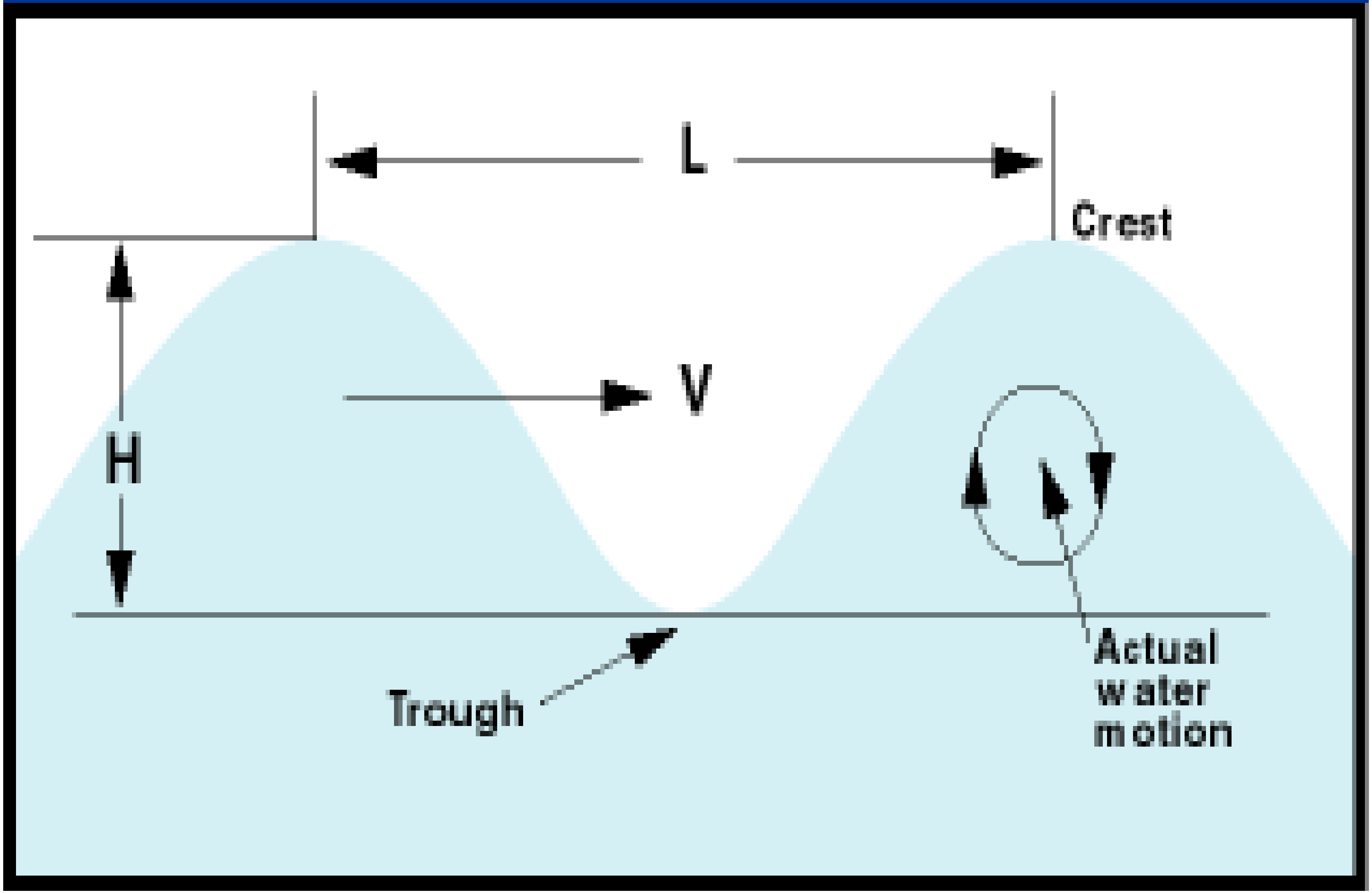
Dispersiva em águas profundas

$$C_g = C$$

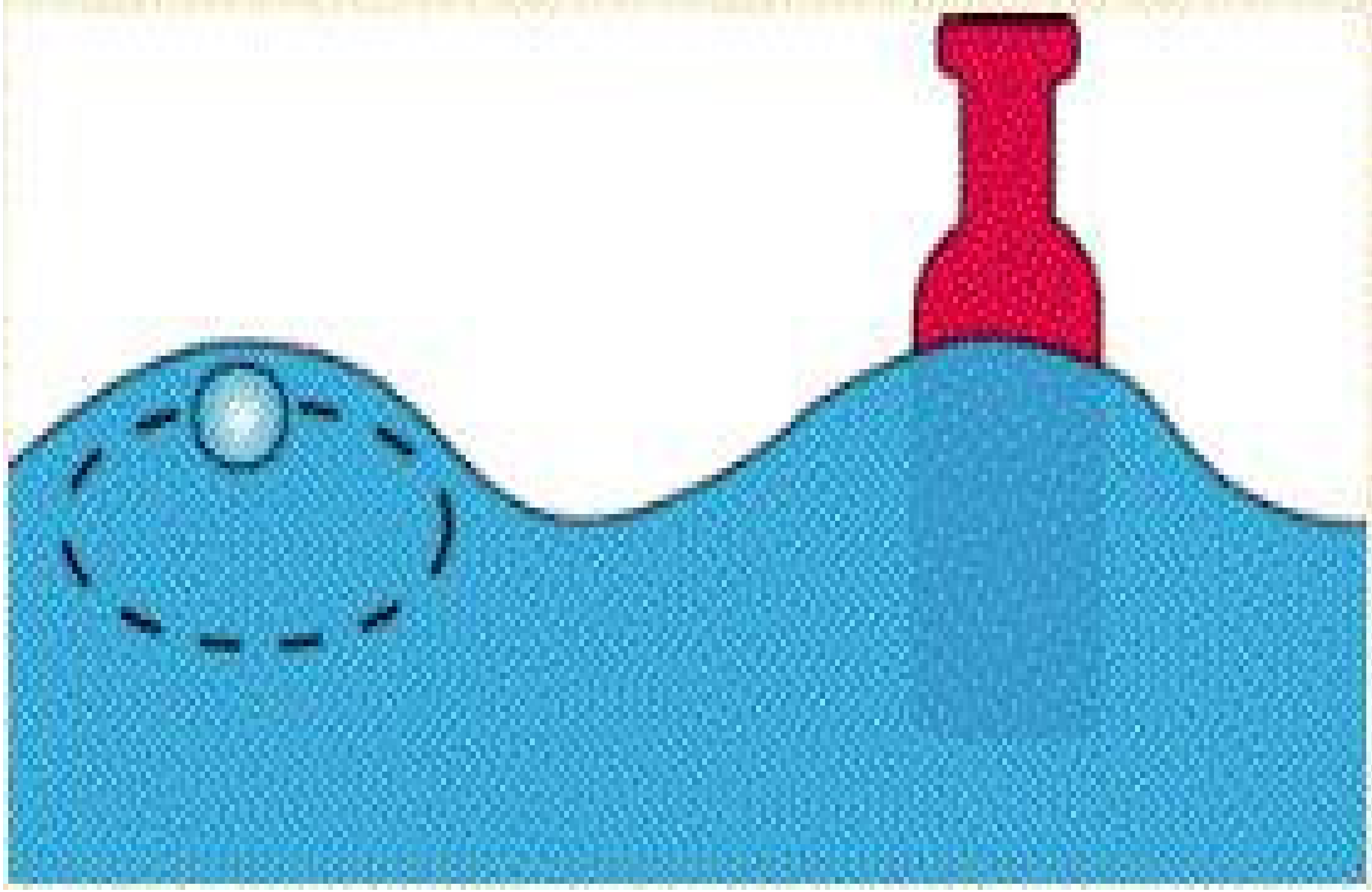
Não dispersiva em águas rasas

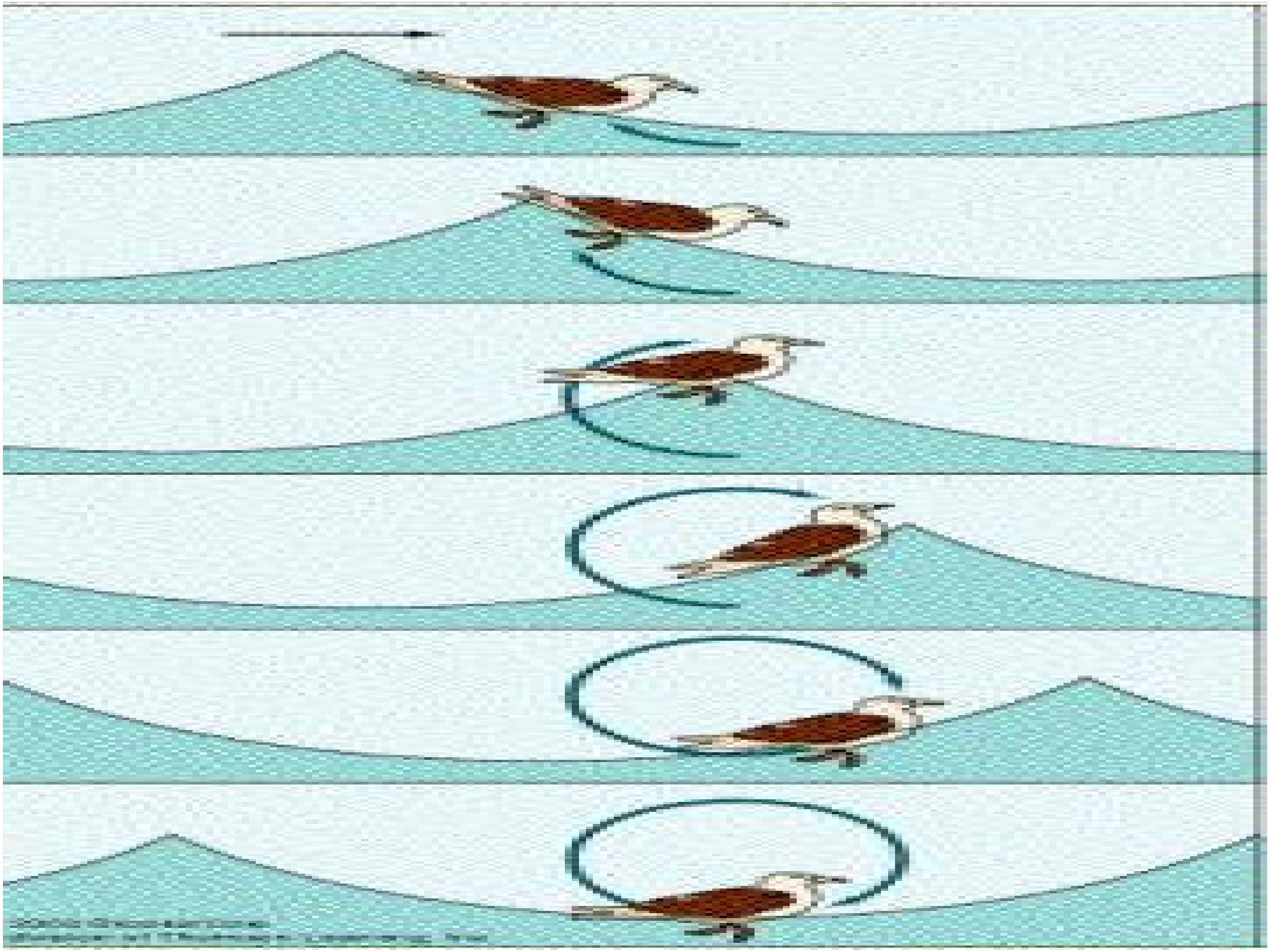

wave envelope
group
1
2
group speed is half that of its components

MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS

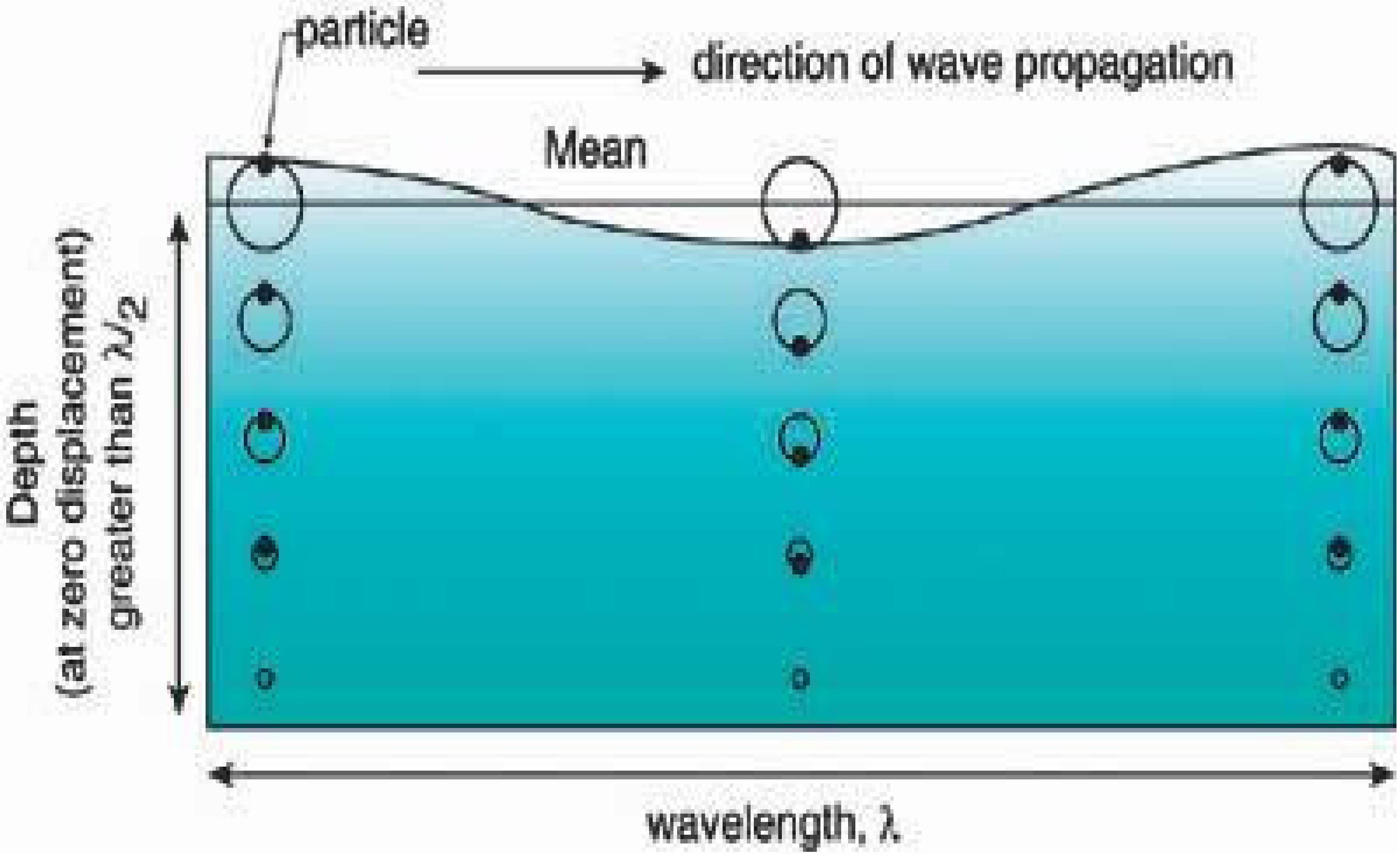


MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS

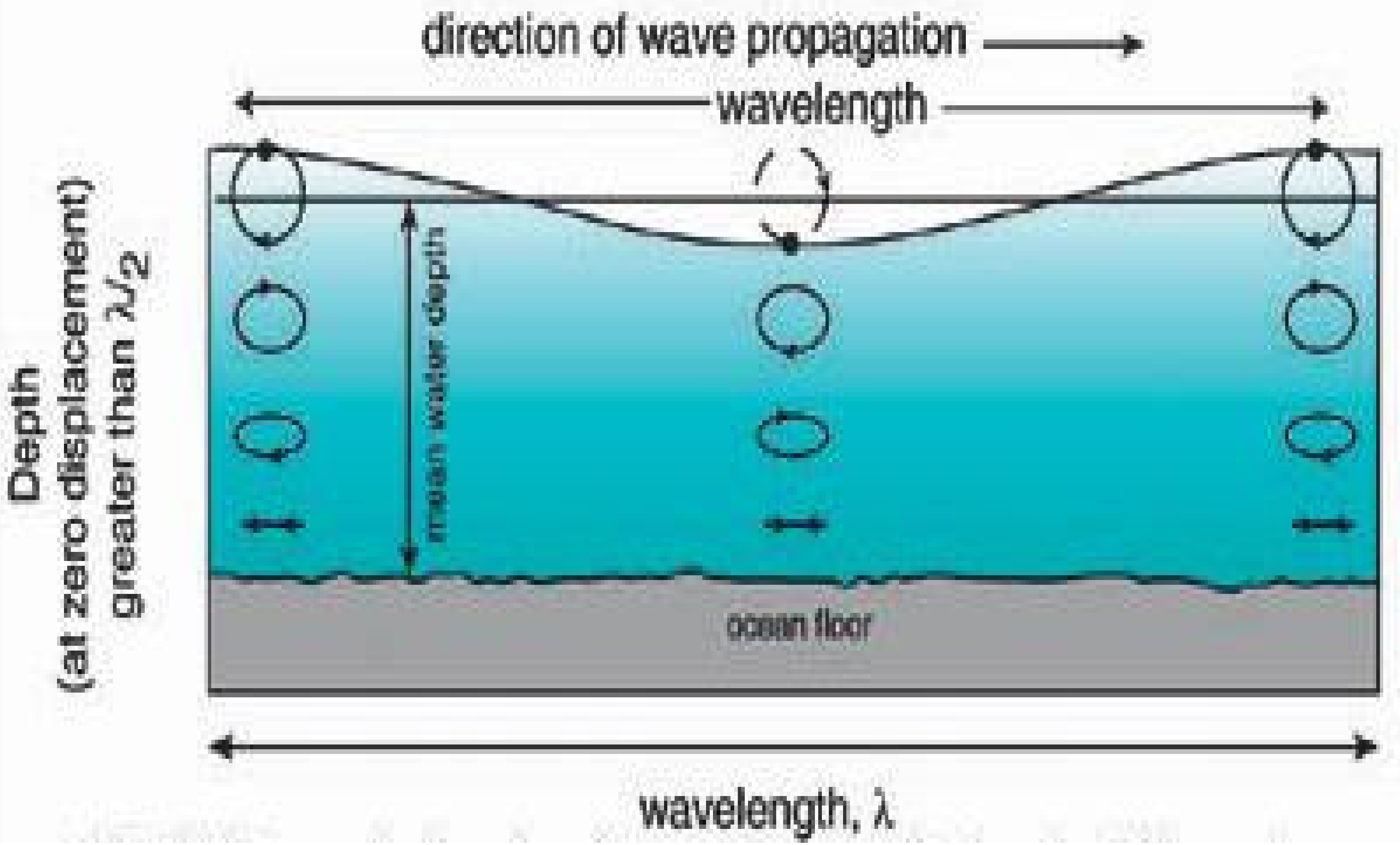




MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS



MOVIMENTO ORBITAL DAS PARTÍCULAS

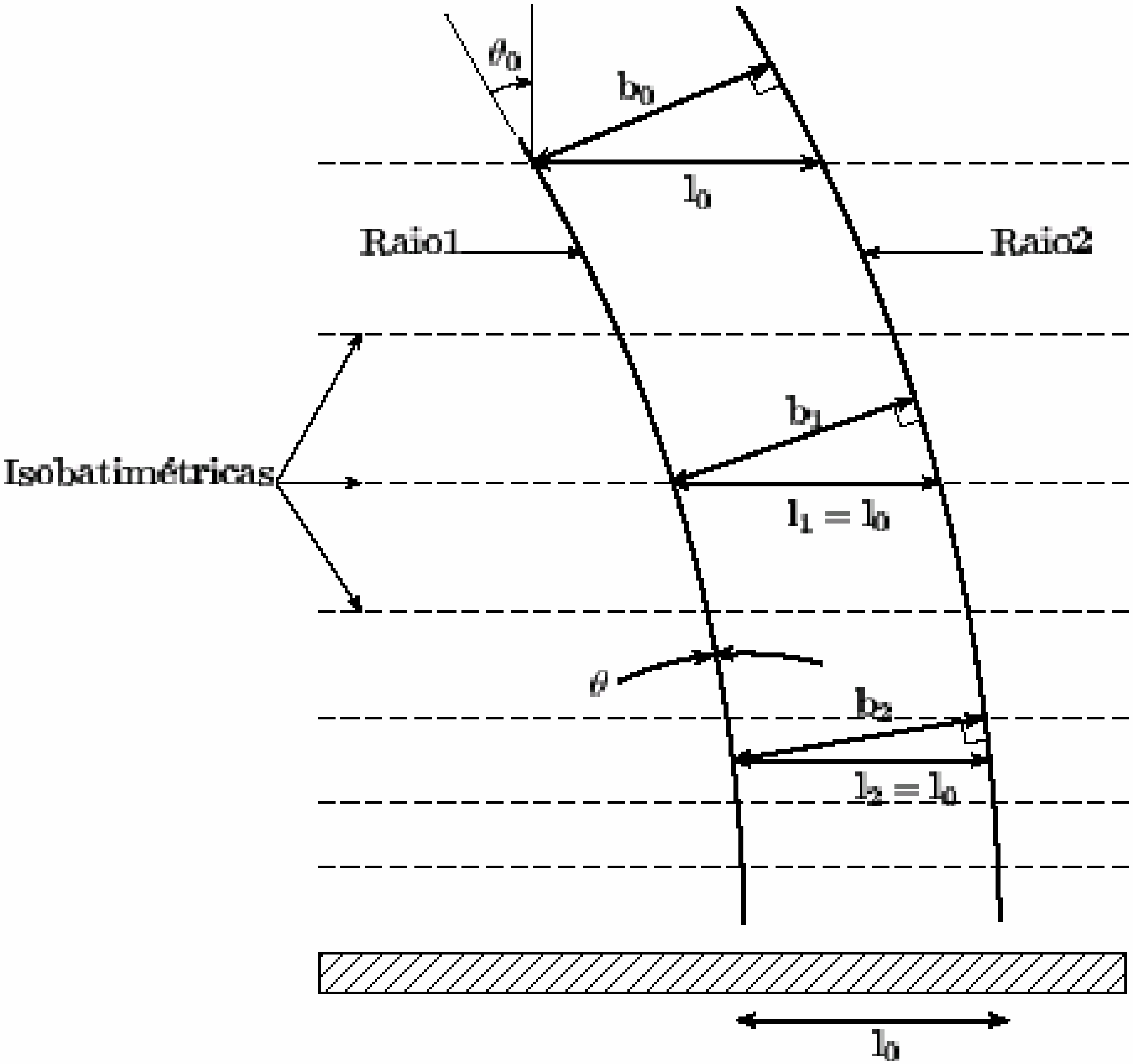


TRANSFORMAÇÃO DAS ONDAS

Hipóteses:

- Inclinação do fundo varia lentamente;
- Transmissão de energia entre os raios de onda é constante;
- O período de onda e constante.

CONSIDERANDO UMA FRENTE DE ONDAS QUE SE DESLOCA EM DIREÇÃO A COSTA SOBRE UMA BATIMETRIA DE LINHAS RETAS E PLANAS.



θ_0
b_0
l_0
Raio1
Raio2
Isobatimétricas
b_1
$l_1 = l_0$
θ
b_2
$l_2 = l_0$
l_0

Conservação de Energia:

$$\boxed{\bar{E}_0 C_{g_0} = \bar{E}_1 C_{g_1} = \bar{E}_2 C_{g_2}}$$

Empinamento (shoaling):

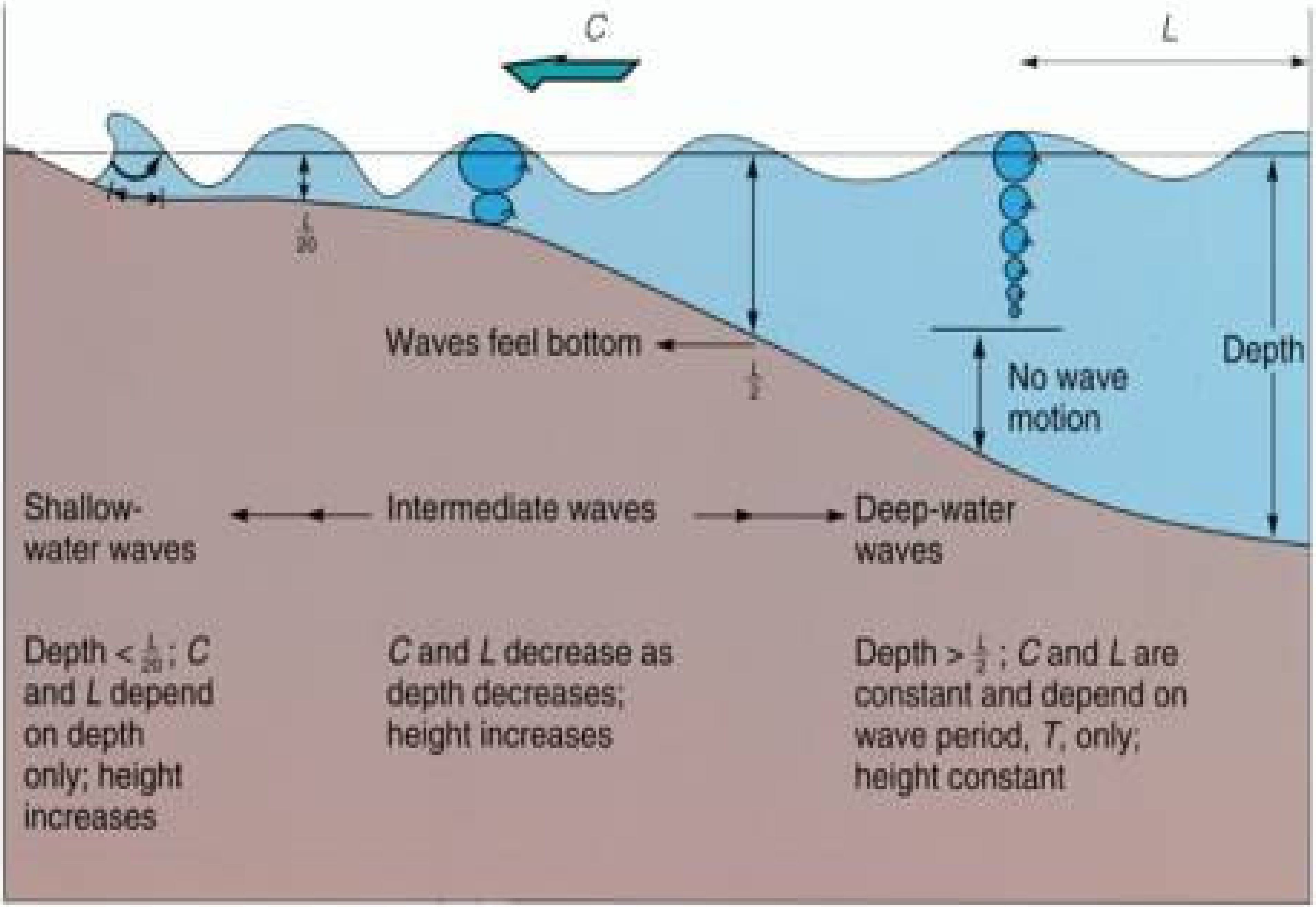
A definição de energia por unidade de área:

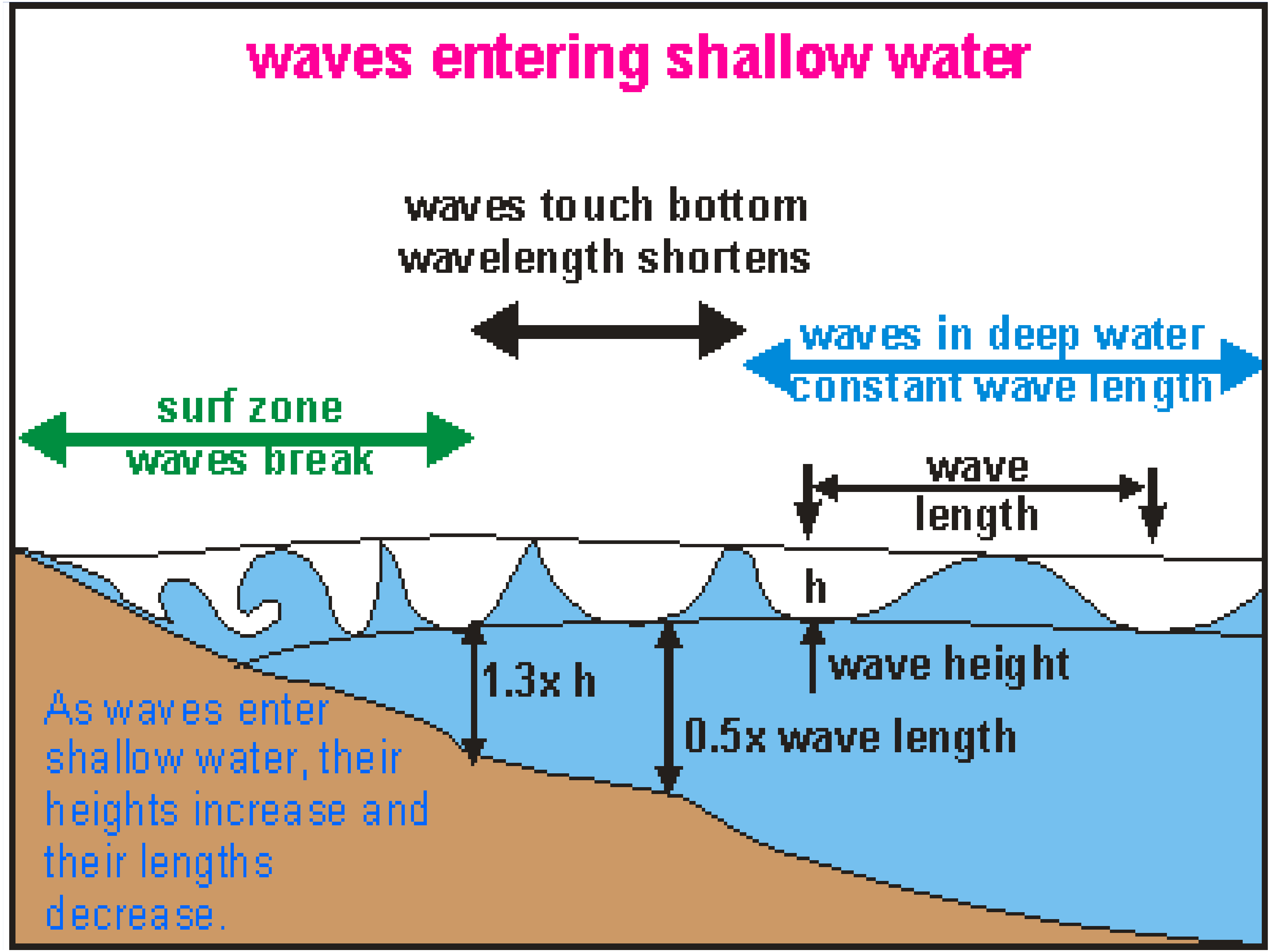
$$\bar{E} = \frac{1}{8}\rho_w g H^2$$

Aplicada a relação de conservação de energia pode-se determinar a altura de onda em qualquer ponto:

$$\boxed{\frac{H_2}{H_1} = K_s = \sqrt{\frac{C_{g_1}}{C_{g_2}}}}$$

Coeficiente de empinamento. A esbeltez (H/L) da onda aumenta à medida que se aproxima da costa.

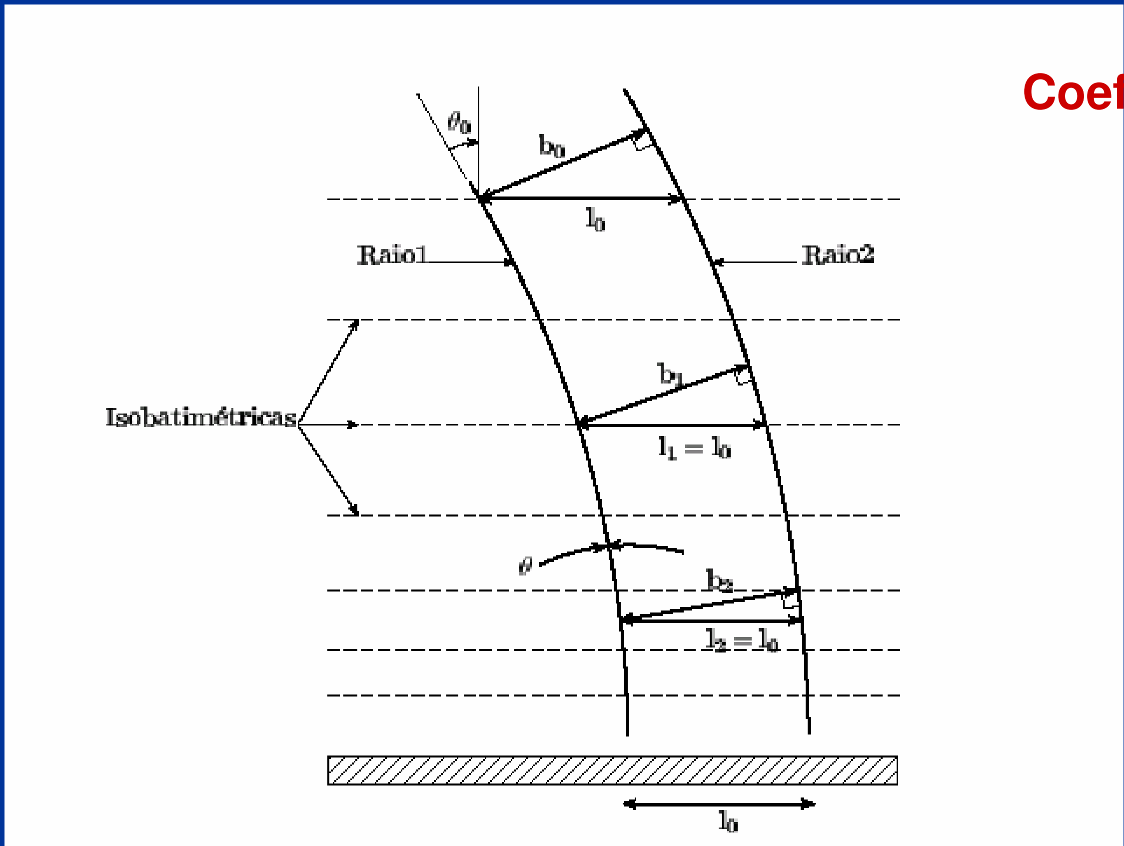

C
L
Waves feel bottom
No wave motion
Depth
Shallow-water waves
Intermediate waves
Deep-water waves
Depth < L/20; C and L depend on depth only; height increases
C and L decrease as depth decreases; height increases
Depth > L/2; C and L are constant and depend on wave period, T, only; height constant


waves entering shallow water
waves touch bottom
wavelength shortens
waves in deep water
constant wave length
surf zone
waves break
wave
length
h
1.3x h
wave height
0.5x wave length
As waves enter shallow water, their heights increase and their lengths decrease.

Refração

A lei de Snell:

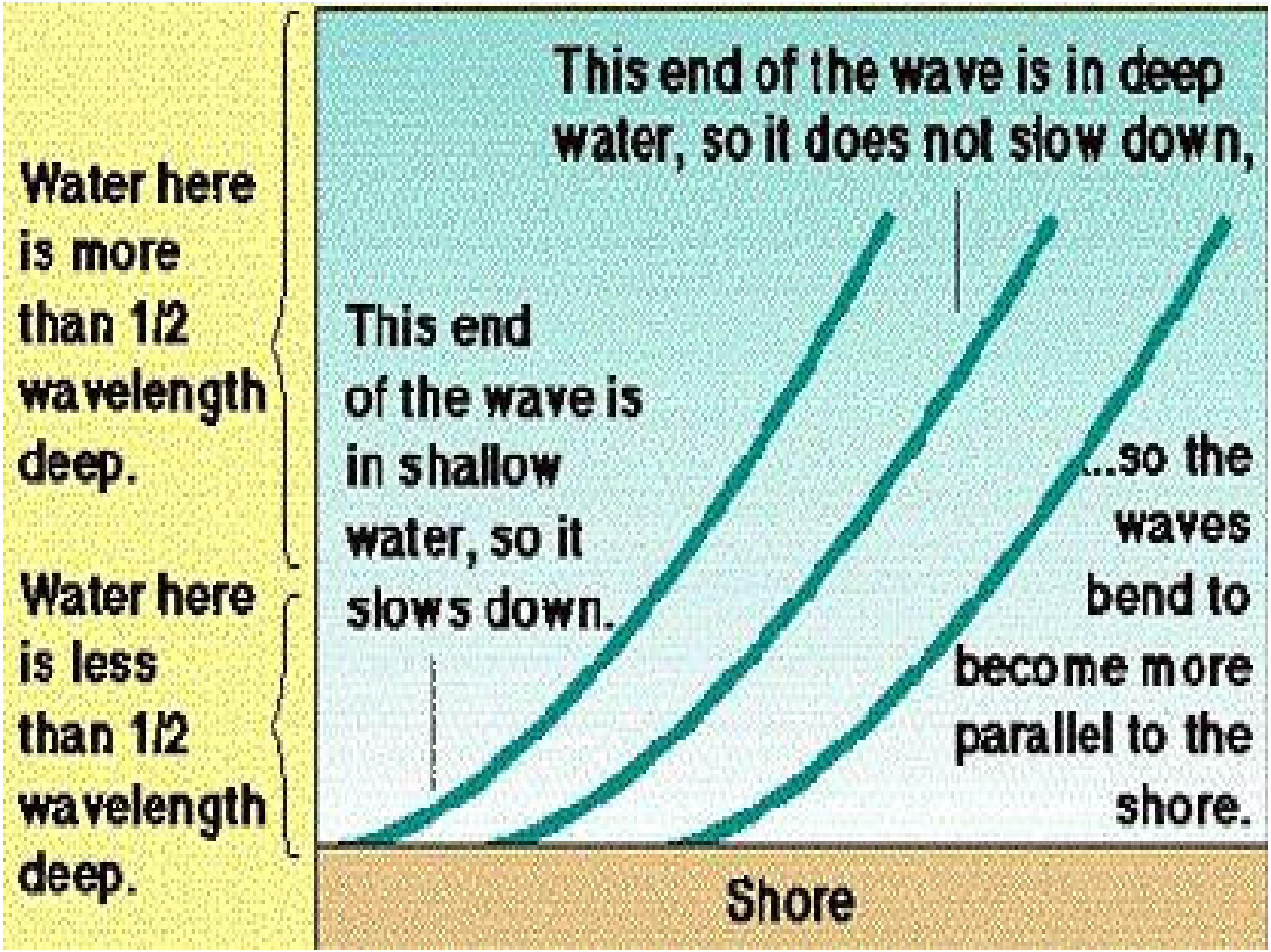
$$\frac{\operatorname{sen}\theta}{C} = \frac{\operatorname{sen}\theta_0}{C_0}$$

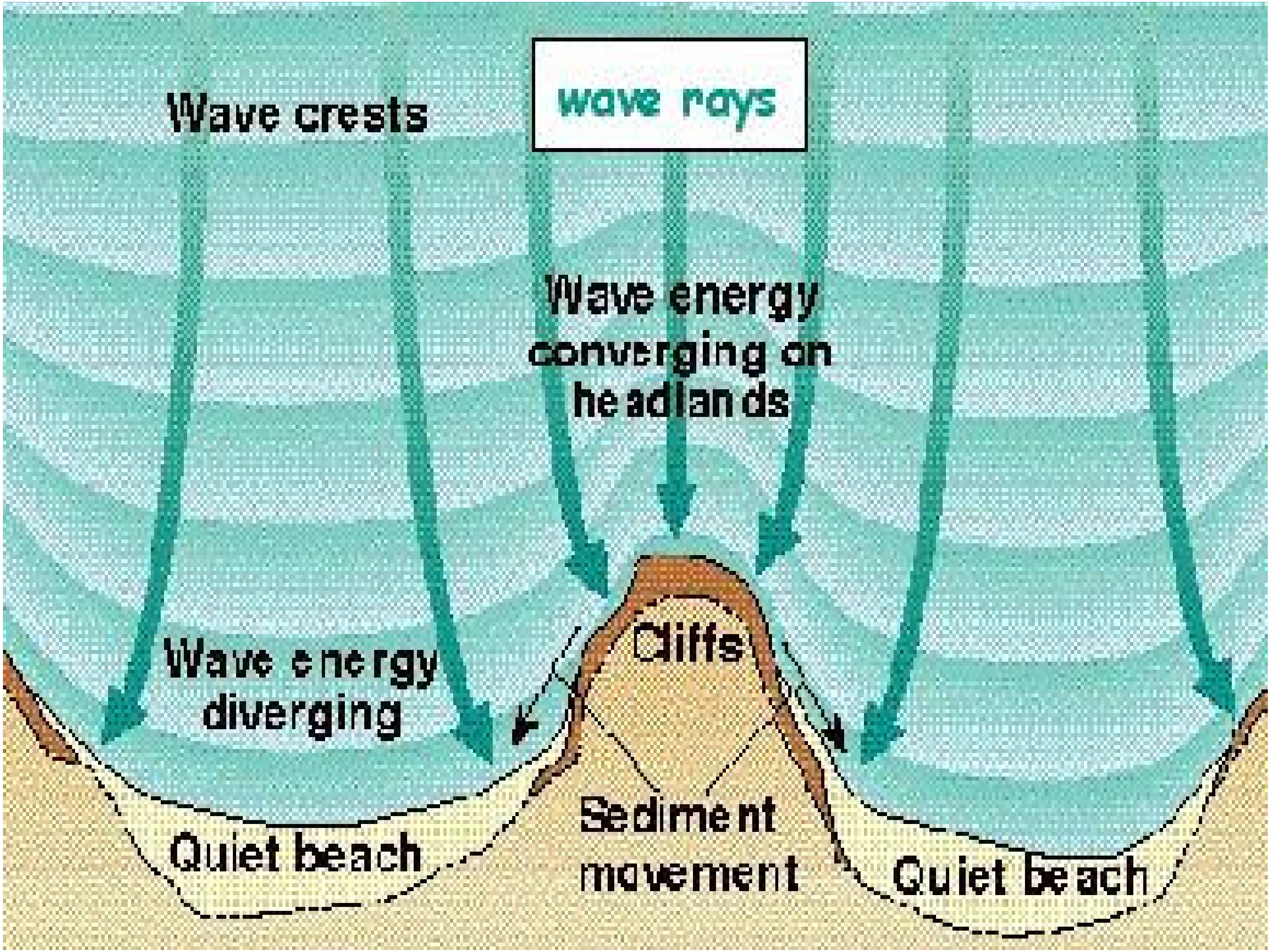


Coeficiente de refração.

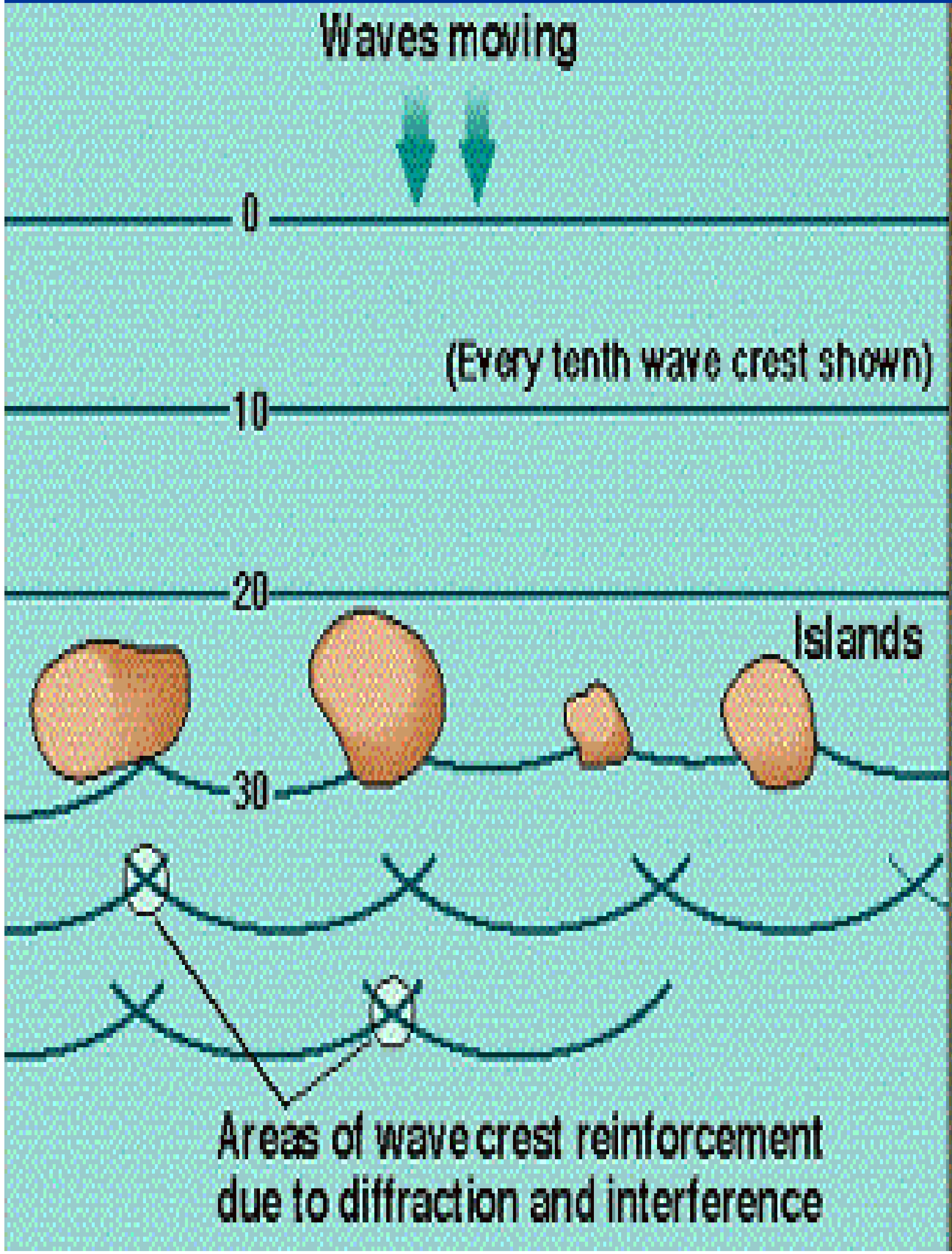
$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}}\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = K_s K_r$$

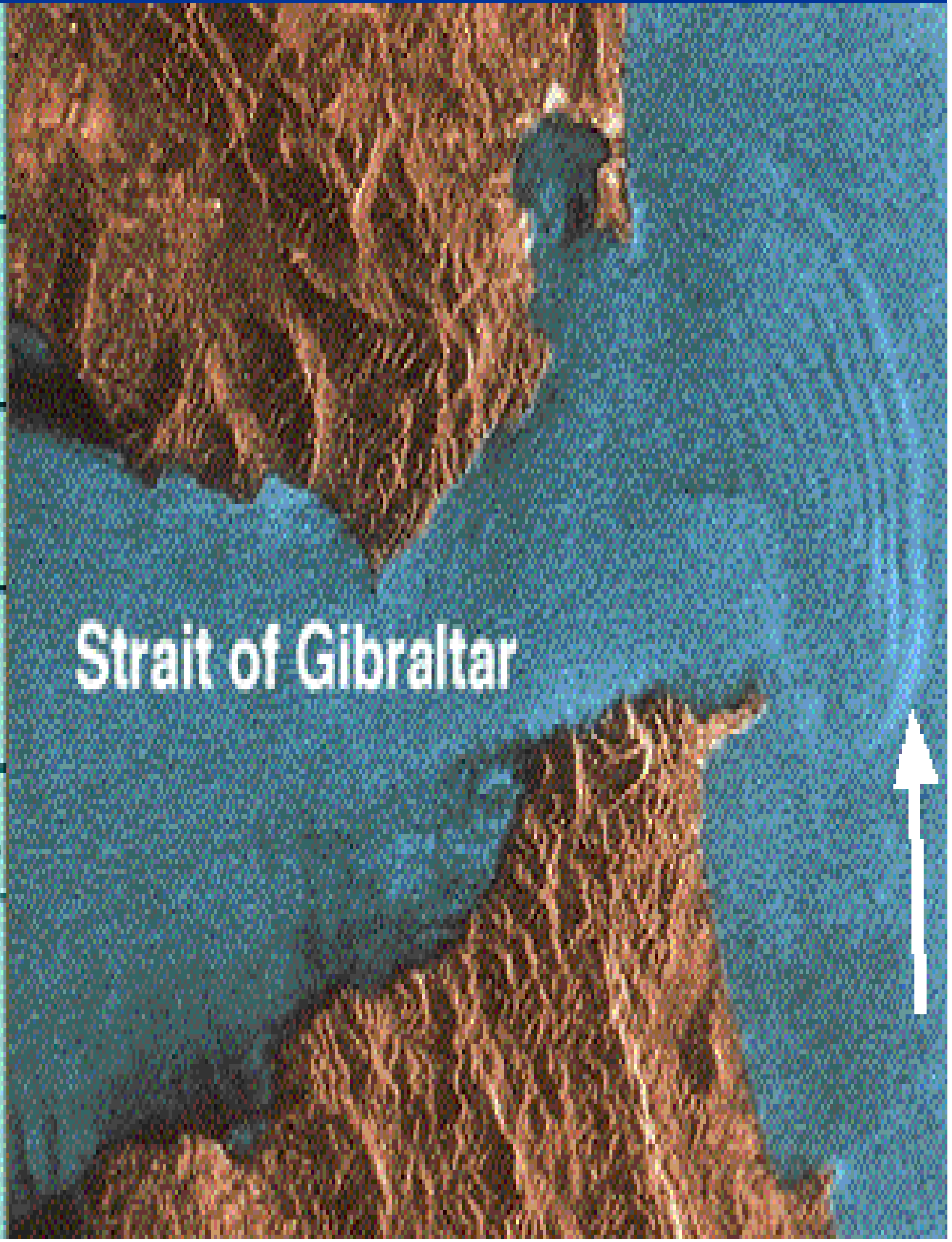

Water here is more than 1/2 wavelength deep.
Water here is less than 1/2 wavelength deep.
This end of the wave is in deep water, so it does not slow down,
This end of the wave is in shallow water, so it slows down.
...so the waves bend to become more parallel to the shore.
Shore


Wave crests
wave rays
Wave energy converging on headlands
Cliffs
Wave energy diverging
Sediment movement
Quiet beach
Quiet beach

Difração:

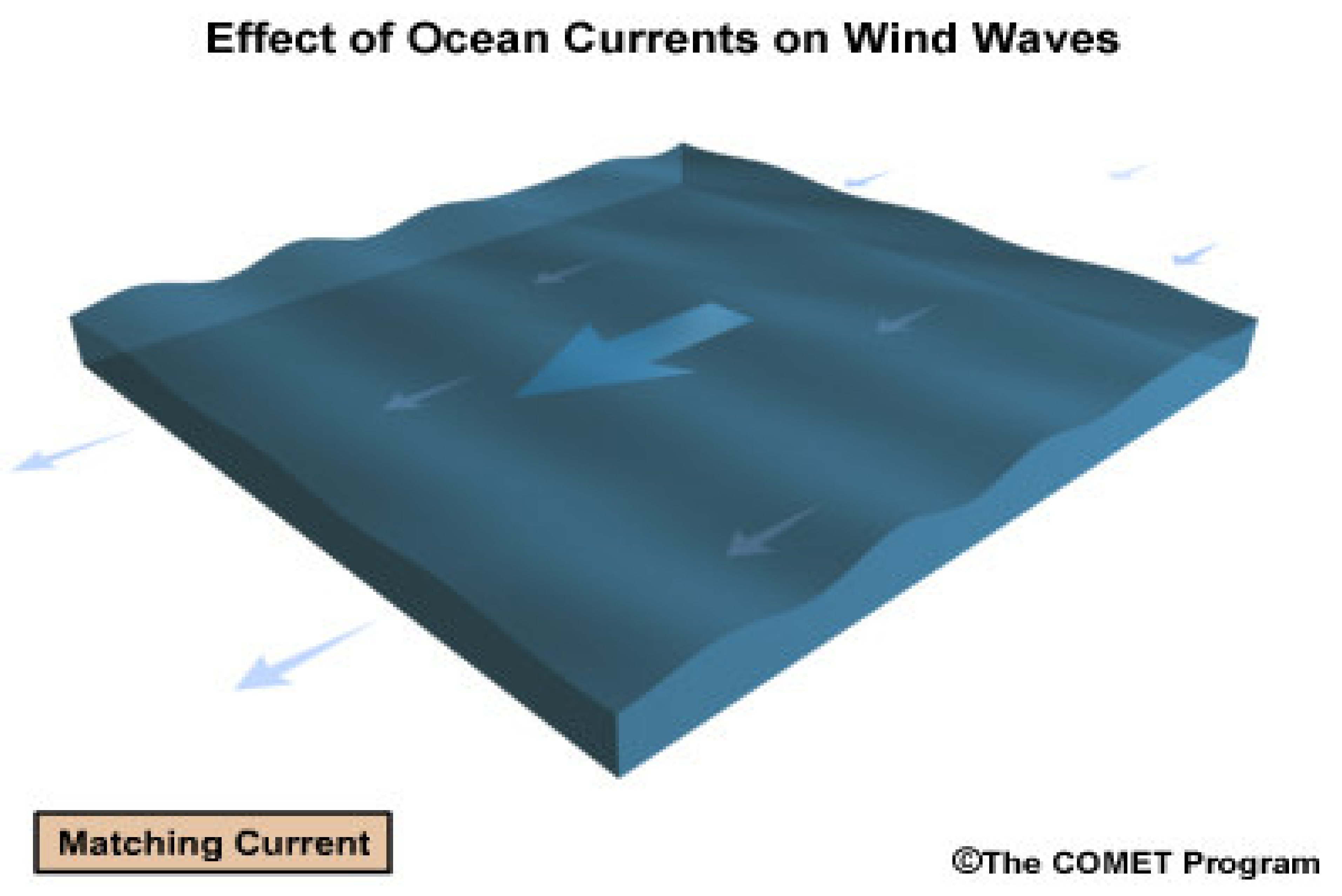


Waves moving
0
(Every tenth wave crest shown)
10
20
Islands
30
Areas of wave crest reinforcement
due to diffraction and interference

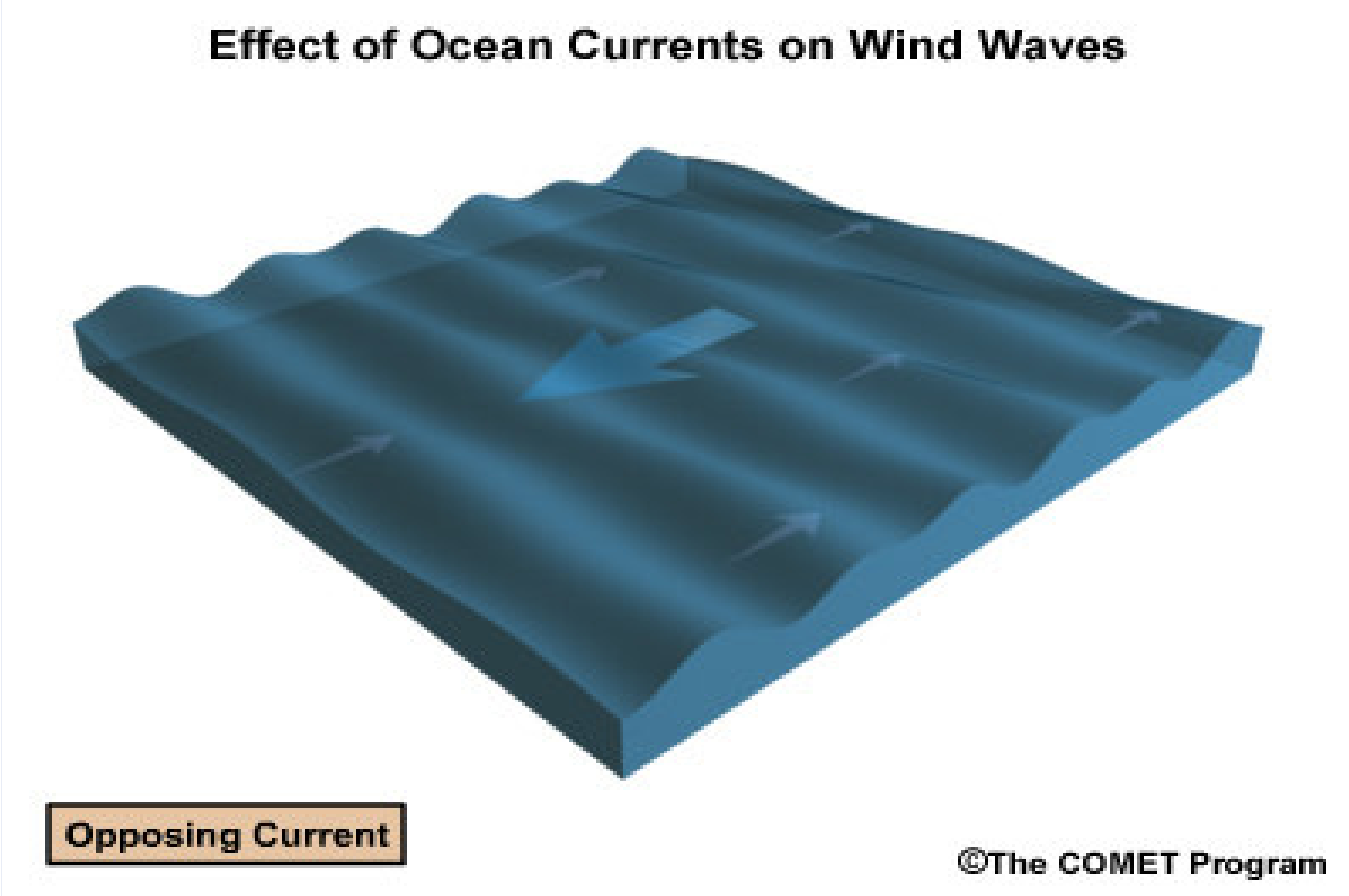


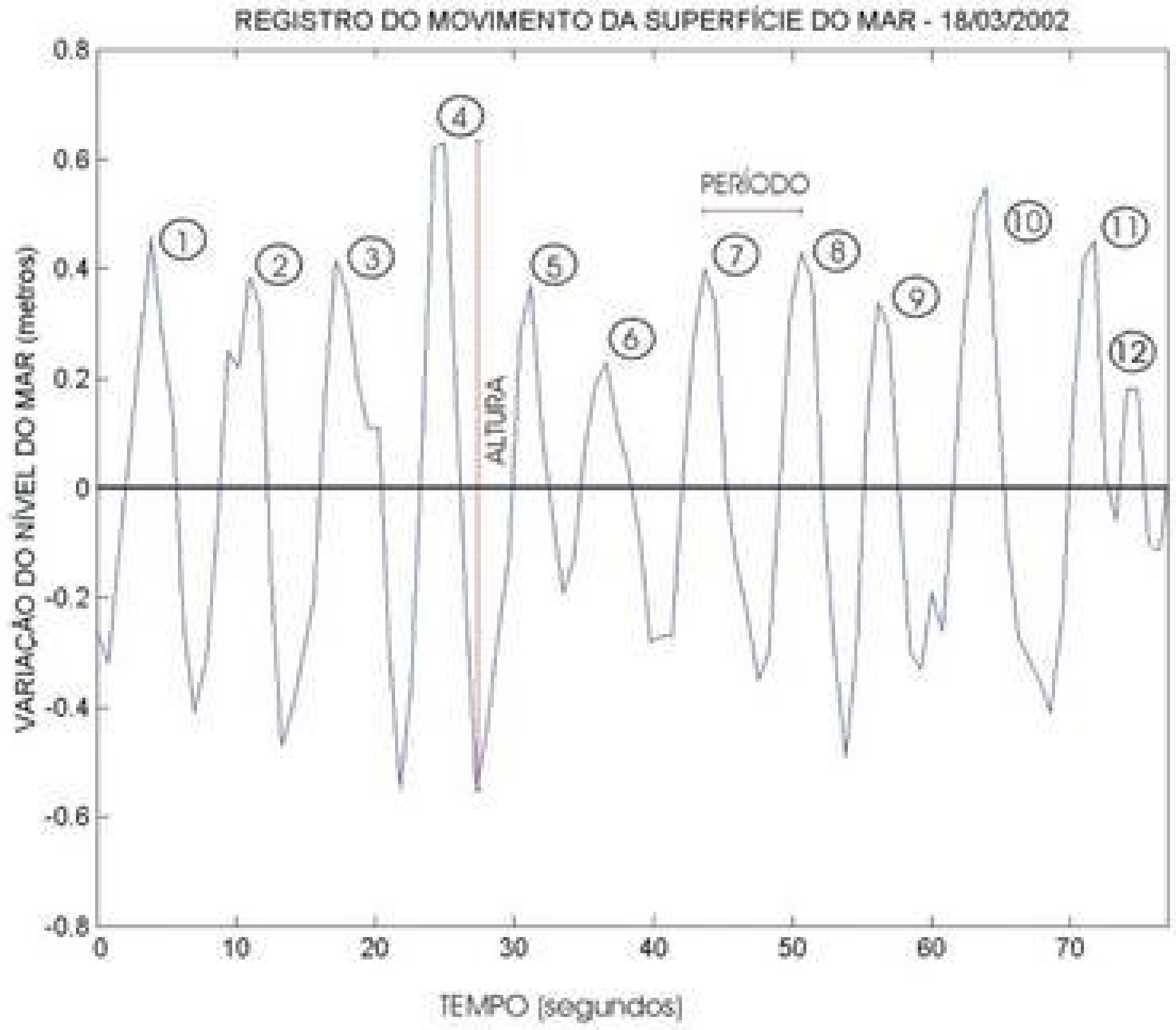
Strait of Gibraltar

Efeitos relacionados a correntes:

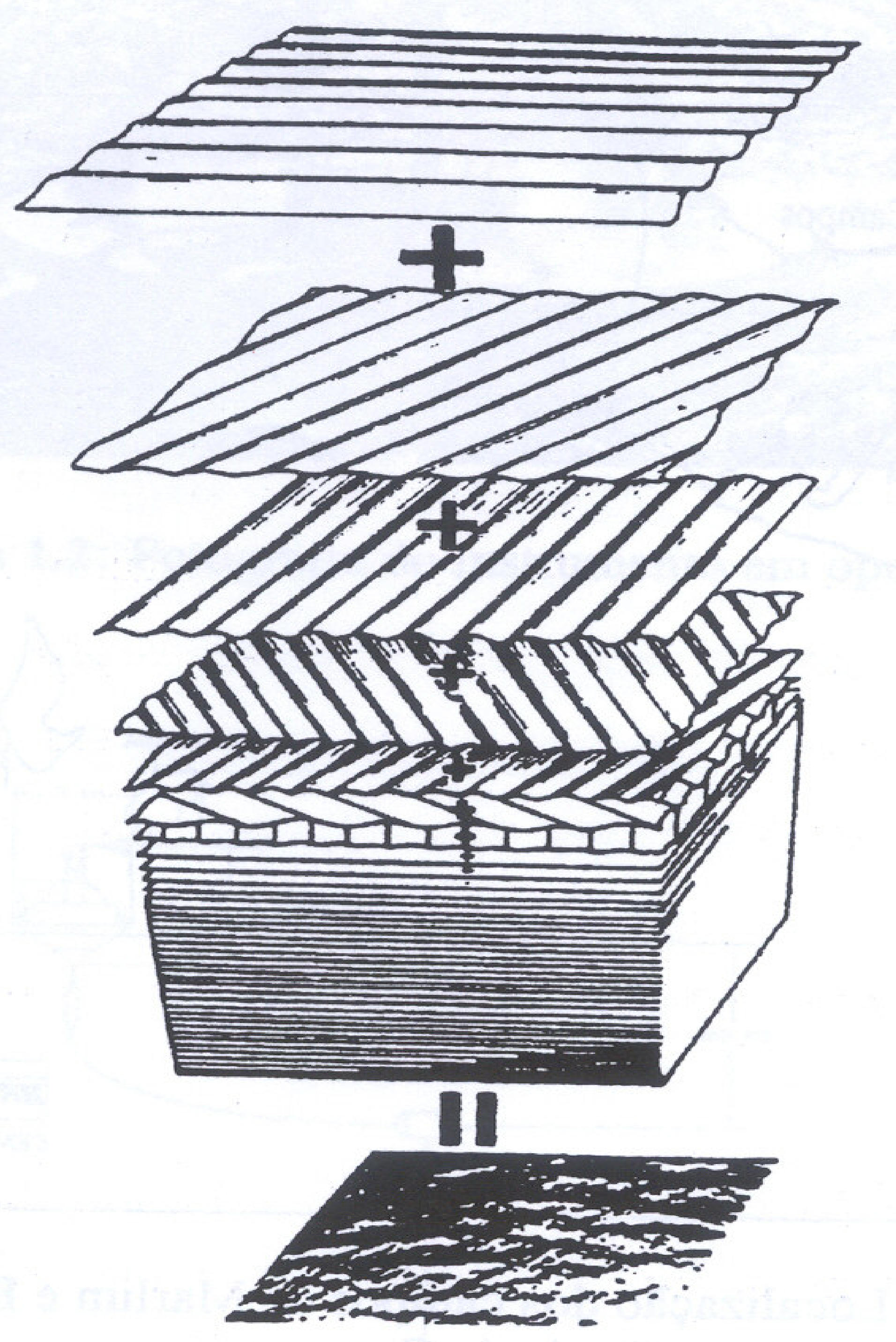


Efeitos relacionados a correntes:





REGISTRO DO MOVIMENTO DA SUPERFÍCIE DO MAR - 18/03/2002
VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR (metros)
TEMPO (segundos)
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
0
10
20
30
40
50
60
70
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
ALTURA
PERÍODO



REPRESENTAÇÃO ESPECTRAL DA SUPERFÍCIE DO MAR:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \operatorname{sen}(\omega_i t + \phi_i),$$

Da equação de energia por unidade de área:

$$E = \frac{\rho_w g}{8} \sum_{i=1}^{N} H_i^2$$

$$\frac{\bar{E}}{\rho_w g} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N} a_i^2 = \sigma^2$$

Variância do registro

$N \to \infty$

Espectro contínuo de freqüência

$$F(f)\Delta f = \frac{a_i^2}{2}$$

Caso a área do espectro seja a variância do registro, têm-se o espectro de variância

$$\sigma^2 = \int_0^\infty F(f)\mathrm{d}f.$$

Altura Significativa

$$H_s = 4\sigma$$

A inclusão de componentes de ondas com direções variadas faz com que o modelo de Fourier adotado fique da forma:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{N} a_i \operatorname{sen}\left[k_i(x\cos\theta_i + y\operatorname{sen}\theta_i) - \omega_i t + \phi_i\right]$$

Espectro direcional

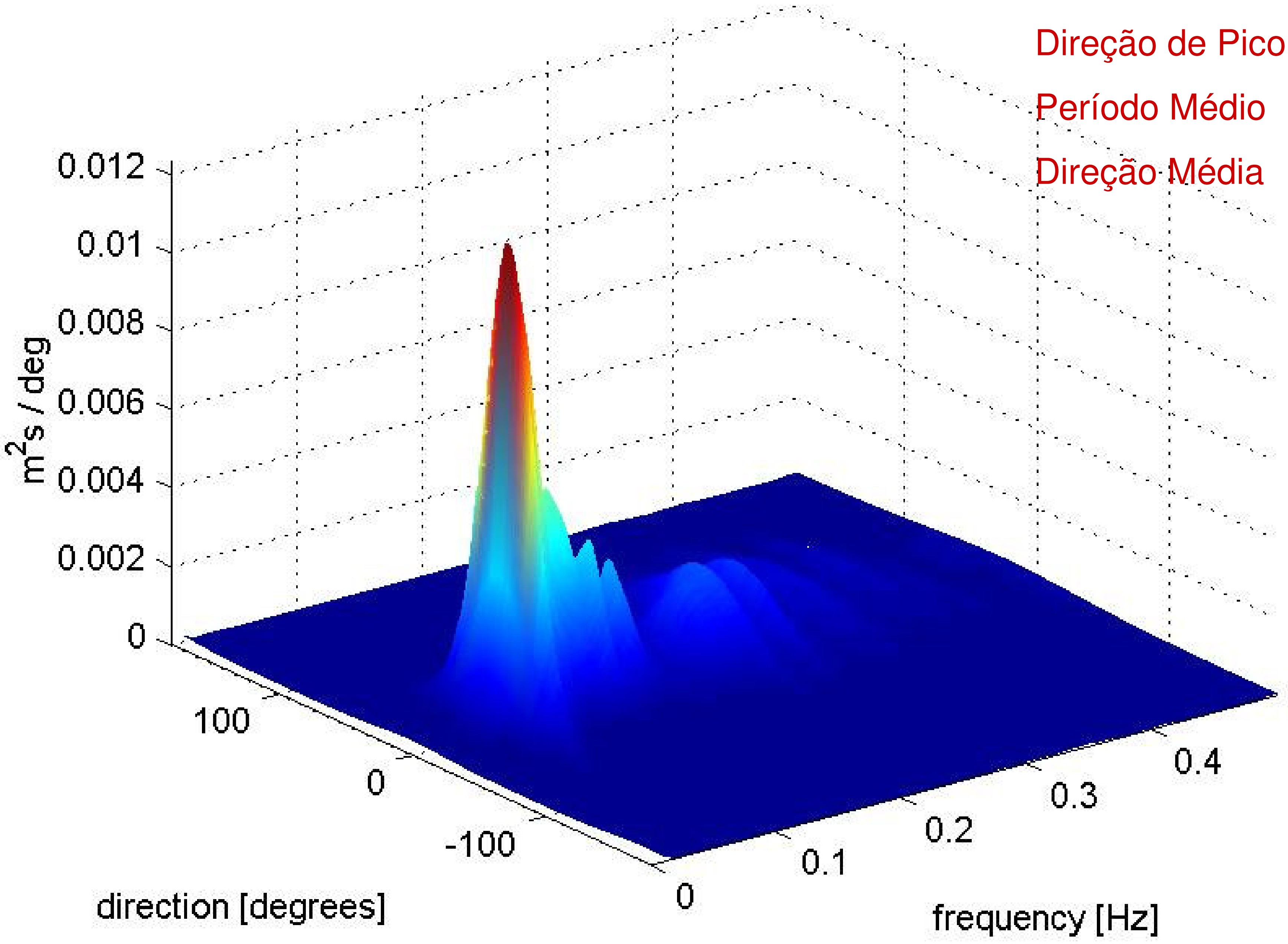
$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f, \theta) \mathrm{d}f \mathrm{d}\theta.$$

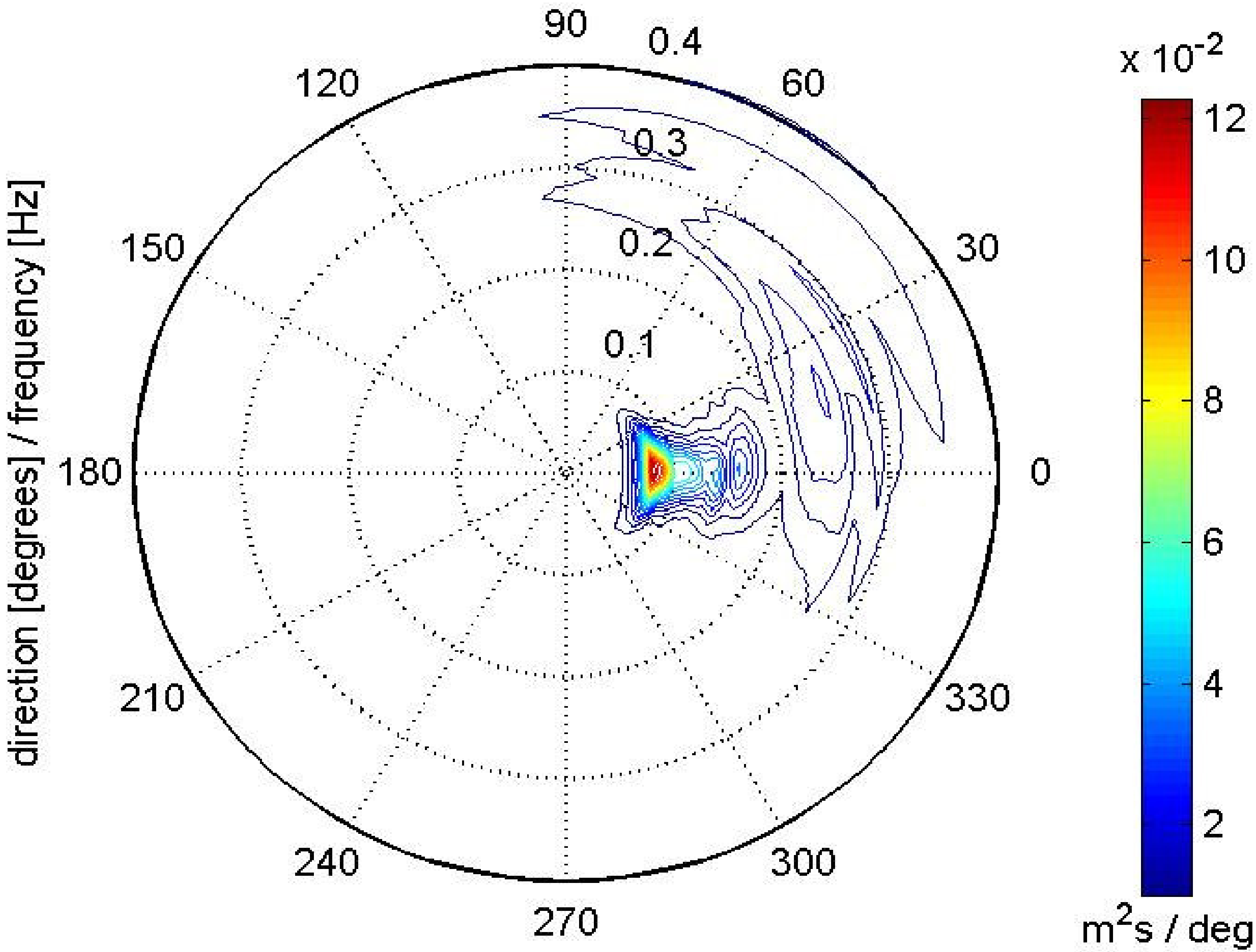
Período de Pico

Direção de Pico

Período Médio

Direção Média

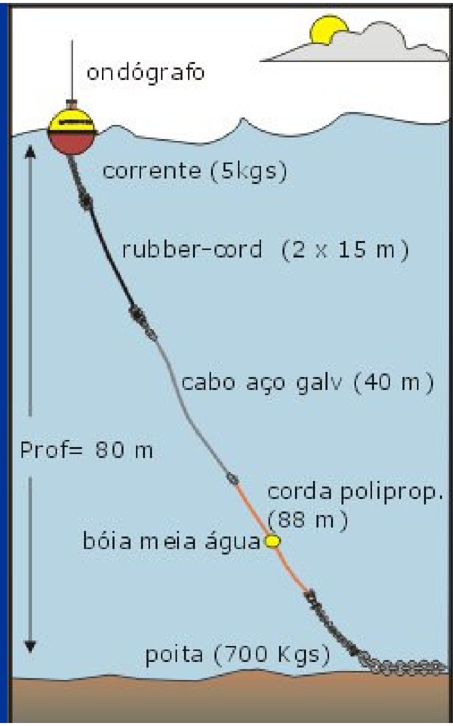


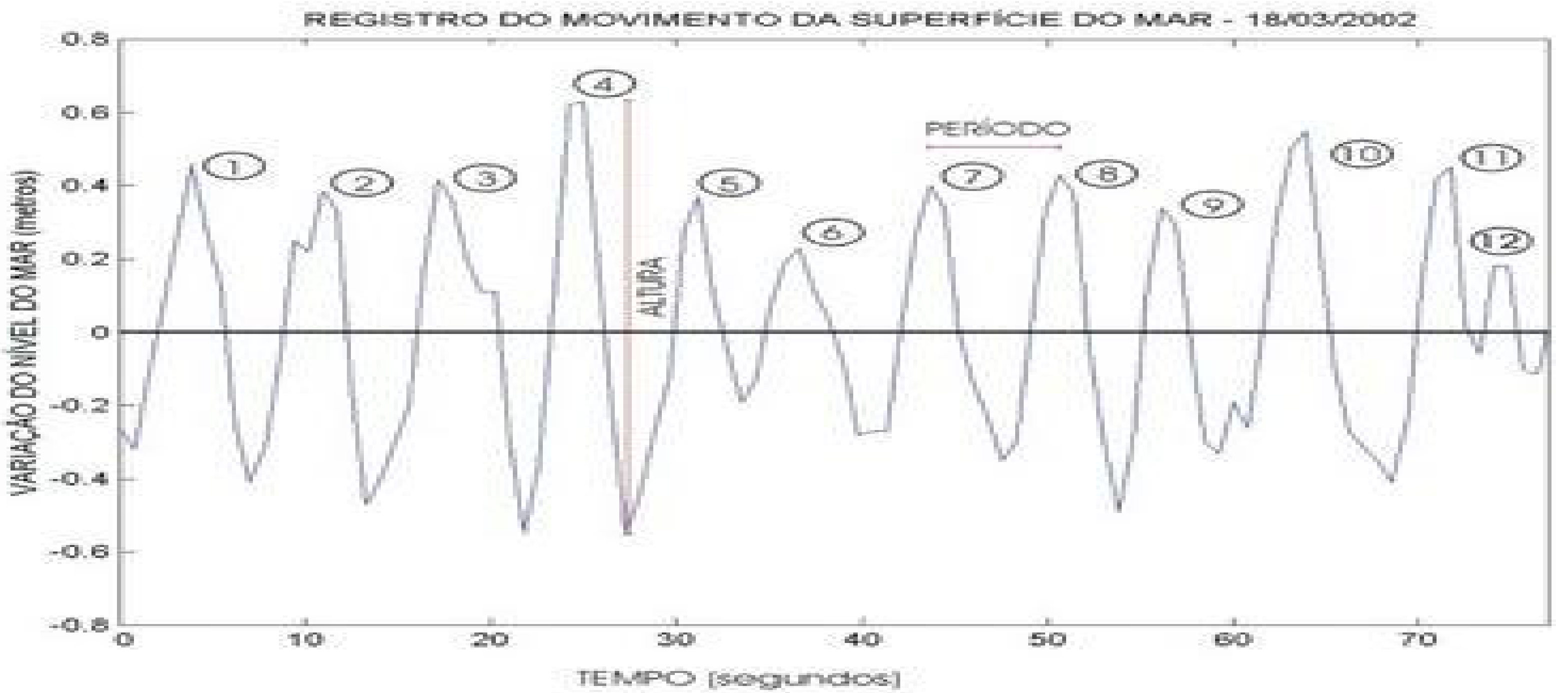


90
0.4
120
60
0.3
150
0.2
30
0.1
180
0
210
330
240
300
270
direction [degrees] / frequency [Hz]
x 10^-2
12
10
8
6
4
2
m^2s / deg


NÃO
BARCOS

FUNDEIO


ondógrafo
corrente (5kgs)
rubber-cord (2 x 15 m)
cabo aço galv (40 m)
Prof= 80 m
corda poliprop. (88 m)
bóia meia água
poita (700 Kgs)


REGISTRO DO MOVIMENTO DA SUPERFÍCIE DO MAR - 18/03/2002
VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR (metros)
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
TEMPO (segundos)
0
10
20
30
40
50
60
70
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
PERÍODO
ALTURA

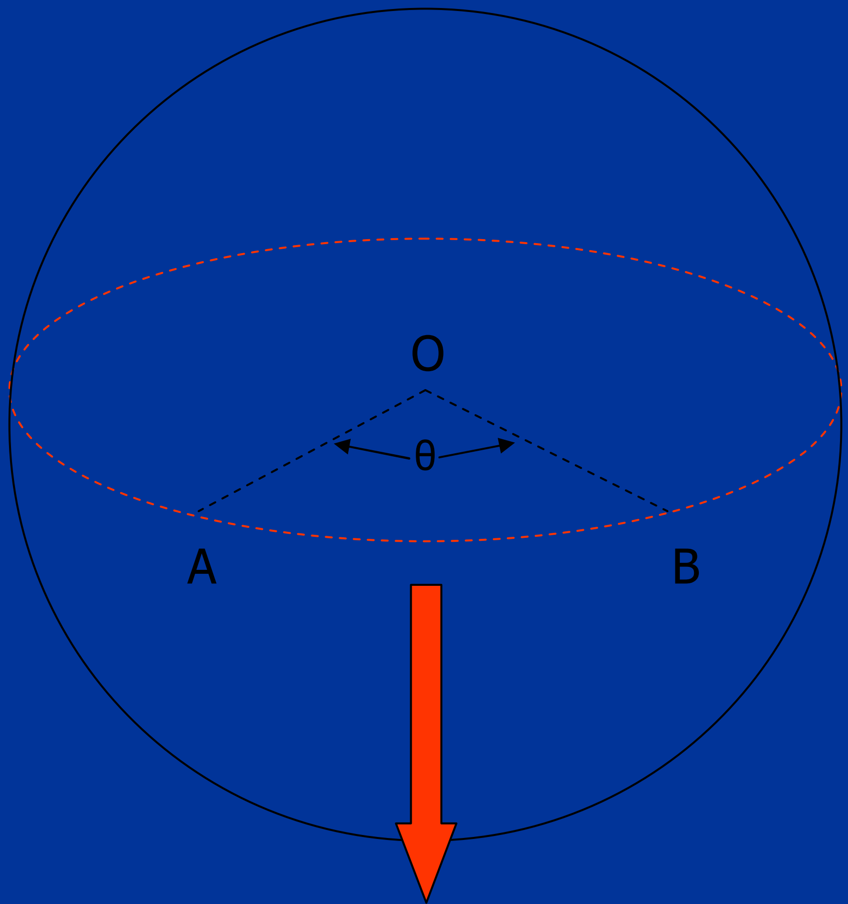
VAGA (*WIND SEA*) X MARULHO (*SWELL*)

PROPAGAÇÃO DE *SWELL*

- Propagação por longa distâncias;
- Pouca perda de energia (dissipação viscosa e quebra);
- Pouca modificação por interação com outros sistemas de ondas;
- Grande concordância com a teoria linear;
- Associação com fontes quase pontuais de sua origem;
- Propagação em Grande círculo.

GRANDE CÍRCULO

- Círculo sobre a esfera cortado por um plano que passa através do centro da esfera.



O arco AB corresponde a menor distância entre A e B.

Aplicando a definição de velocidade na velocidade de grupo para águas profundas:

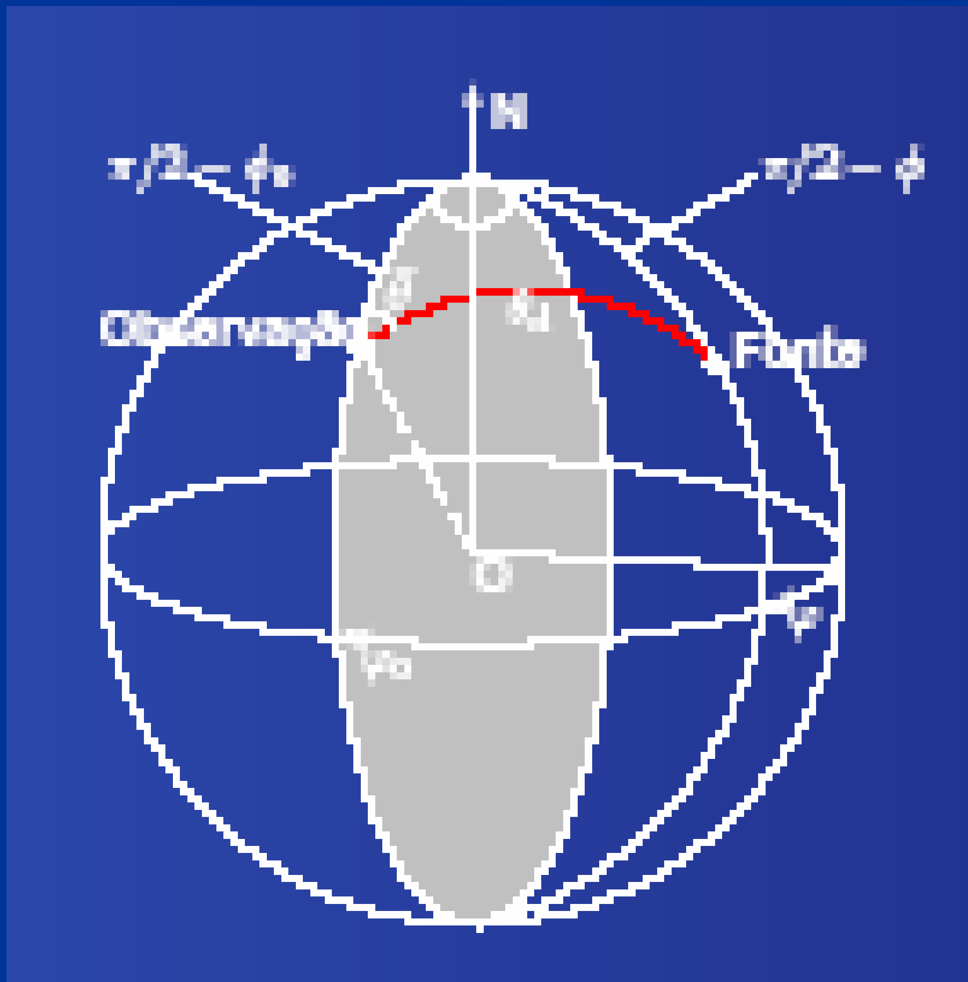
$$C_g = \frac{g}{4\pi f} \longrightarrow \boxed{C_g(f) = \frac{d}{t - t_o}}$$

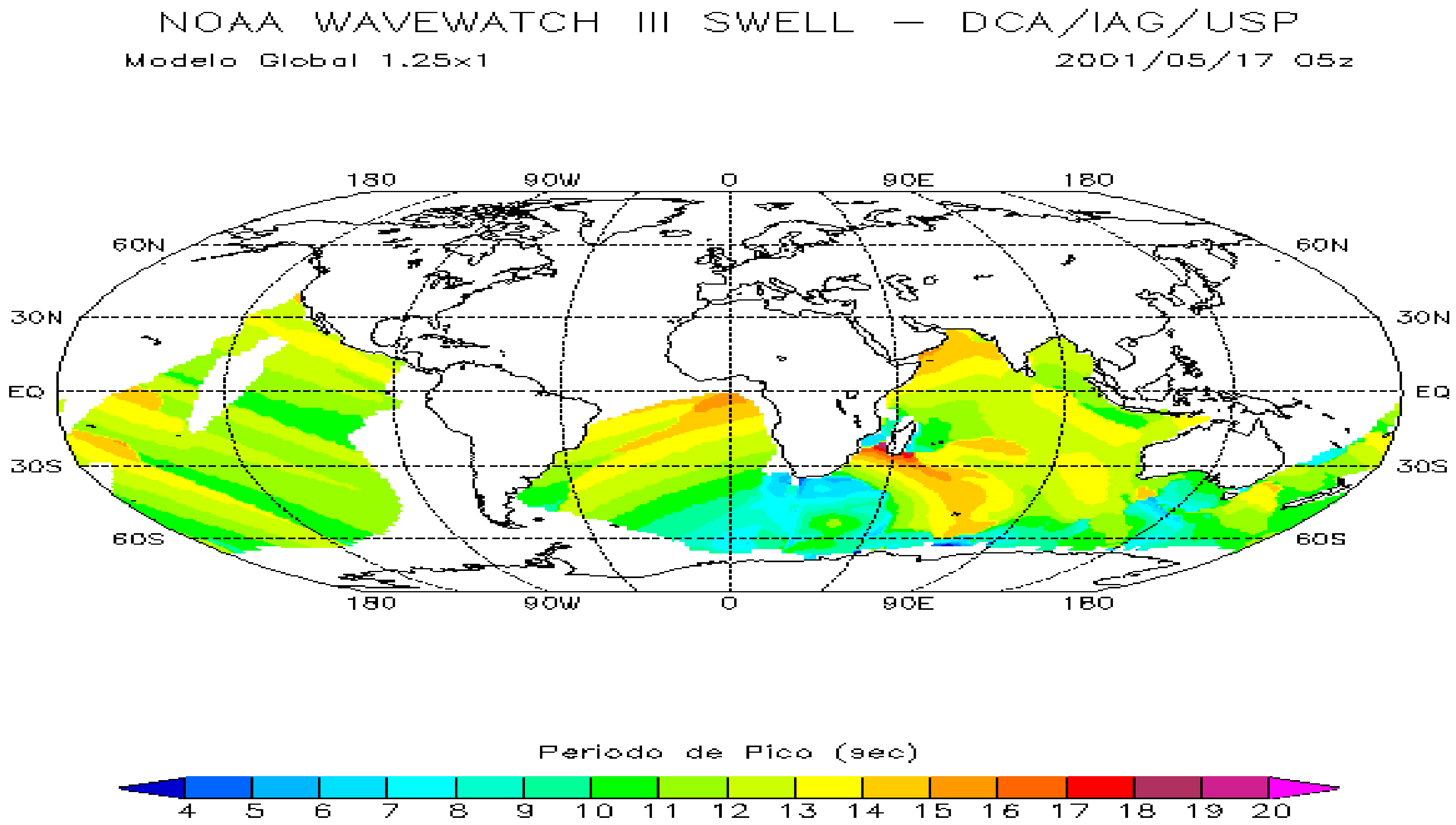
Em um evento sobre o oceano, ocorrido há um dado tempo, numa determinada região, a freqüência de onda dominante observada em um ponto distante aumenta linearmente por uma taxa inversamente proporcional a distância percorrida.

$$\boxed{\frac{df}{dt} = m_{ft} = \frac{g}{4\pi d} \approx \left(\frac{f - f_o}{t - t_o}\right)}$$

A distância até a fonte de origem é:

$$d = \frac{g}{4\pi m_{fe}}.$$




NOAA WAVEWATCH III SWELL — DCA/IAG/USP
Modelo Global 1.25x1
2001/05/17 05z
180
90W
0
90E
180
60N
30N
EQ
30S
60S
Periodo de Pico (sec)
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20

PRÓXIMA AULA

- FÍSICA DA GERAÇAO DE ONDAS;
- MODELAGEM DE ONDAS;
- PREVISÃO DE ONDAS
- ESTUDO DE CASOS
- CLIMATOLOGIA DE *SWELL*