



Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



PNV-2300: Introdução à Engenharia Naval Comportamento em Ondas

<https://www.youtube.com/watch?v=mObO1pMiZ70&list=PLF29953E04820E290&index=3>



<https://www.uol.com.br/esporte/surfe/ultimas-noticias/2019/01/20/o-que-salvou-vida-de-surfista-brasileiro-que-quase-apagou-em-onda-gigante.htm>













Por que estudar comportamento no mar?

Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN



Por que estudar comportamento no mar?

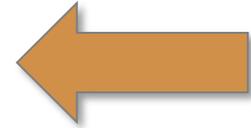
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN



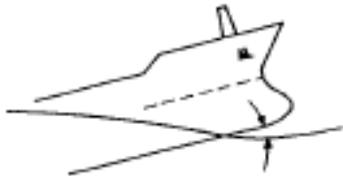
Por que estudar Comportamento no Mar?



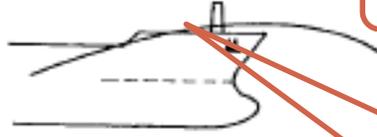
Local motions



Accelerations



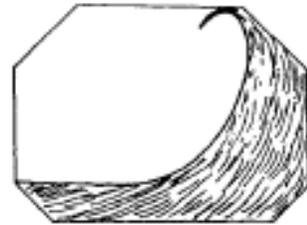
Slamming



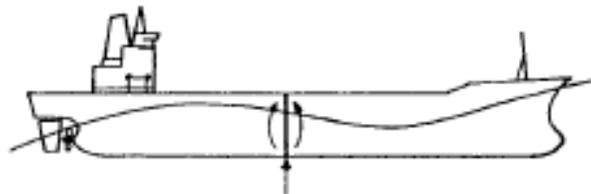
Water on deck



Effect of breaking waves



Liquid sloshing in tanks



Wave bending moments and shear forces

Reduzir cargas dinâmicas em *risers* e umbilicais

"Green water"



Segurança e conforto



Resistência adicional de ondas

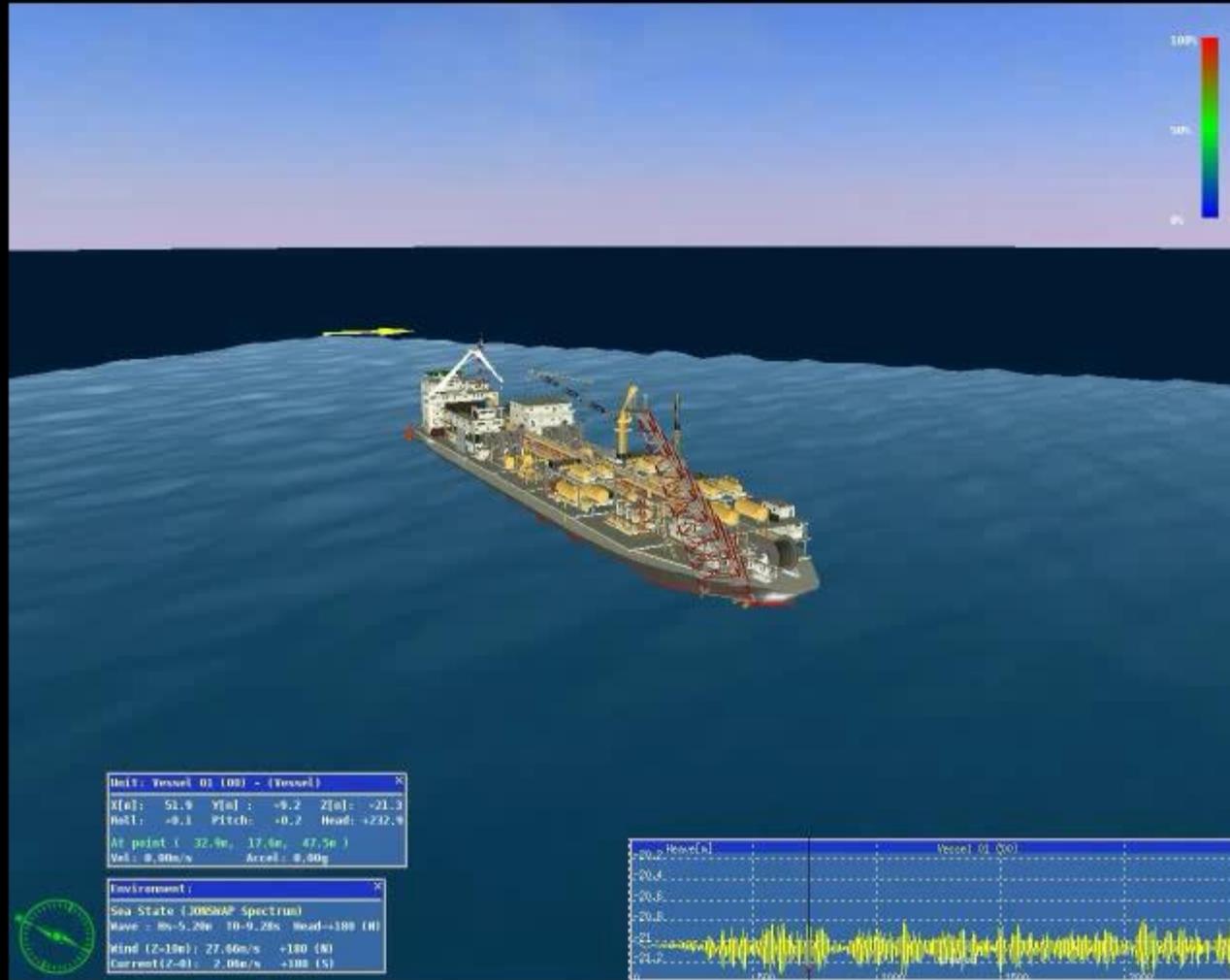
Por que estudar Comportamento no Mar?



Por que estudar Comportamento no Mar?



Por que estudar Comportamento no Mar?





Por que estudar comportamento no mar?

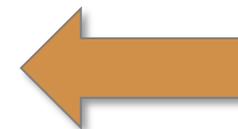
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

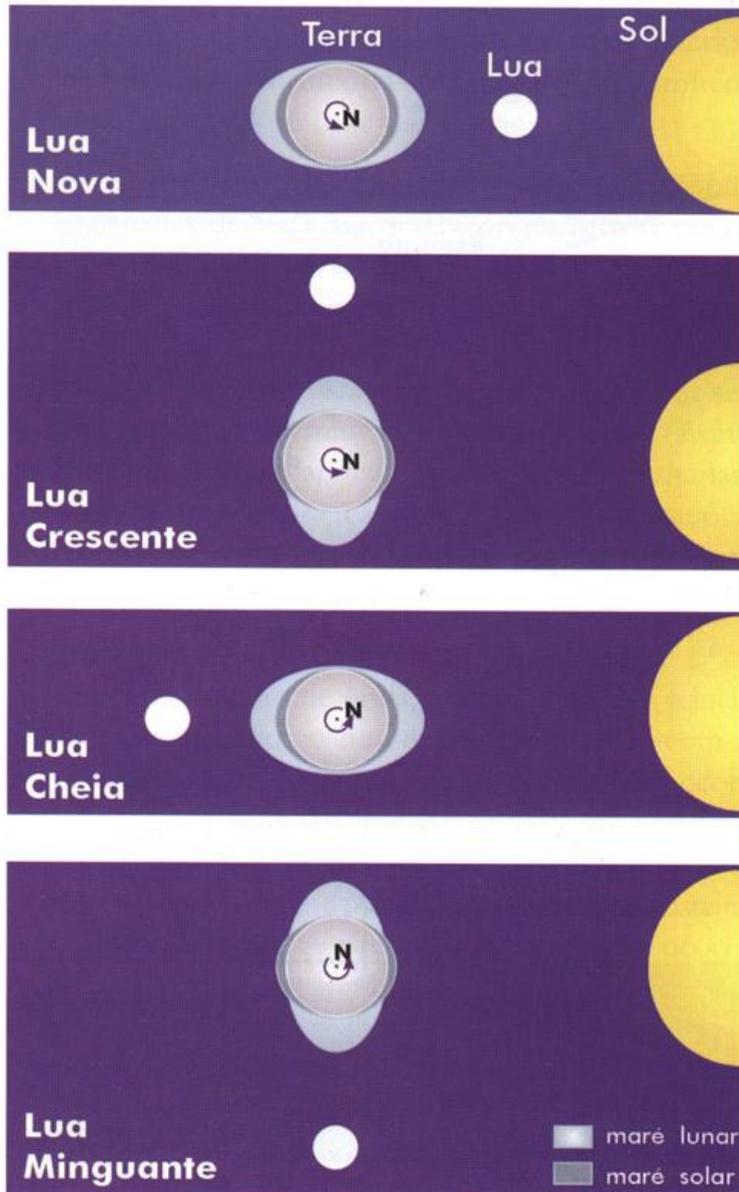
Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN



MARÉS



- **Must see:**

- <https://www.youtube.com/watch?v=sYss-N7EnEw>

- **Preamar e baixa-mar**

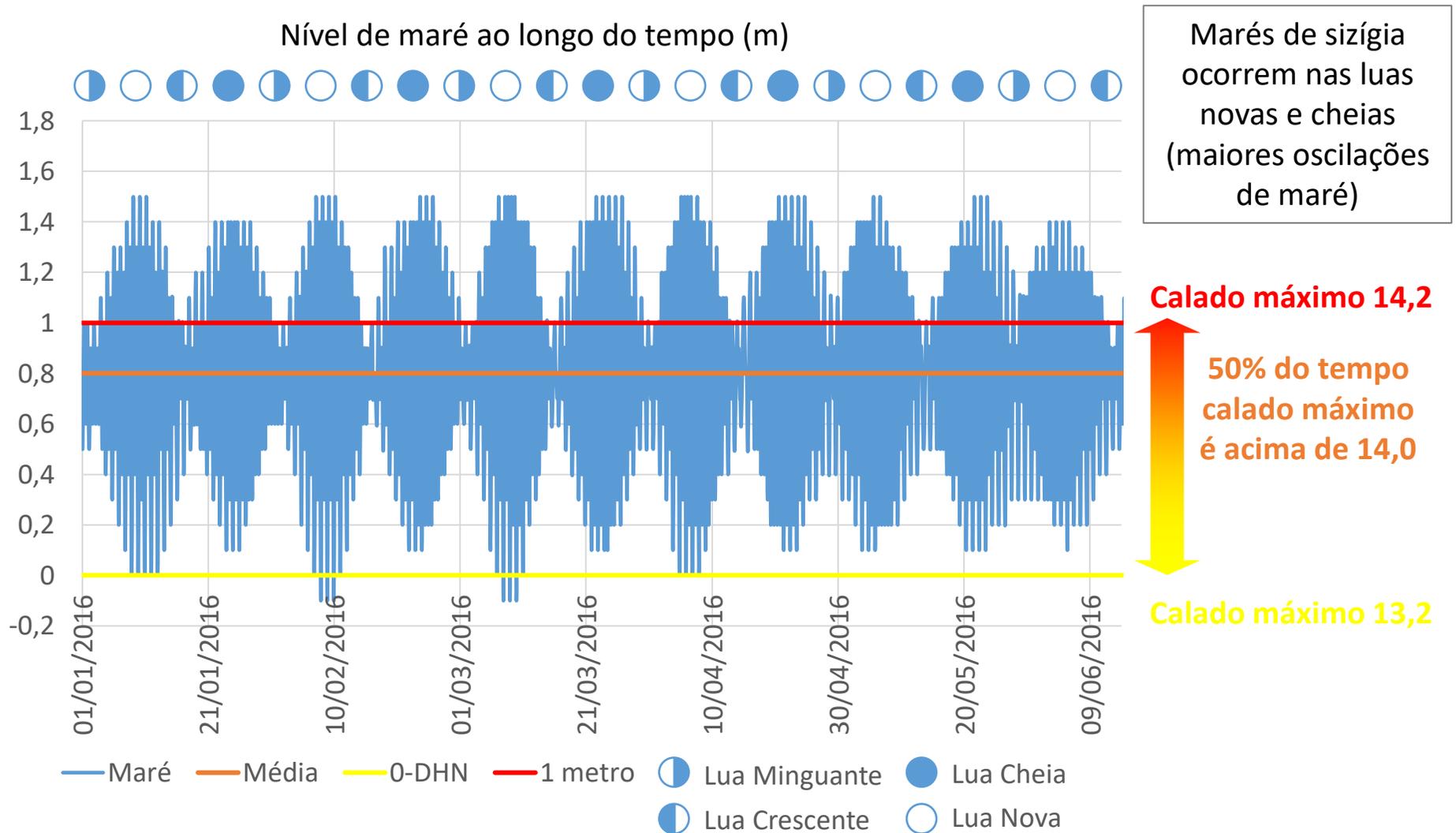
- **Período de ~12h 24min**

- **12h (rotação) + 24min (Lua)**

- **Dia lunar: 24h 48min**

- **Importância no lançamento de navios e TLPs**

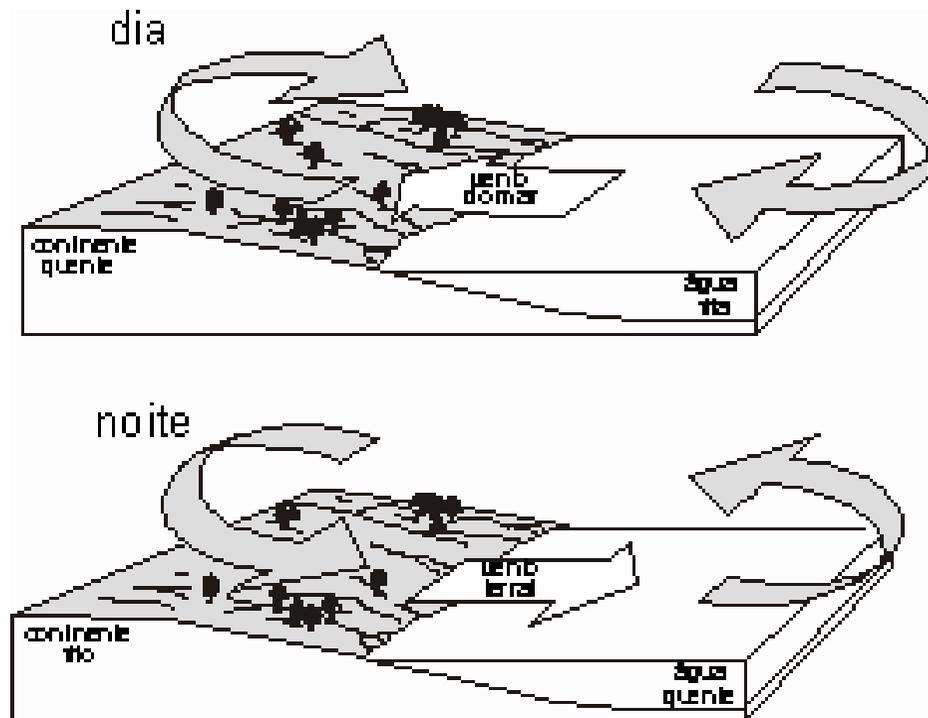
O calado máximo do porto oscila em torno de 14,0 m ao longo do tempo, e raramente chega ao 0 DHN



(1) valores registrados entre o dia 10/08/2016 e 12/08/2016

INTRODUÇÃO: brisas marinhas

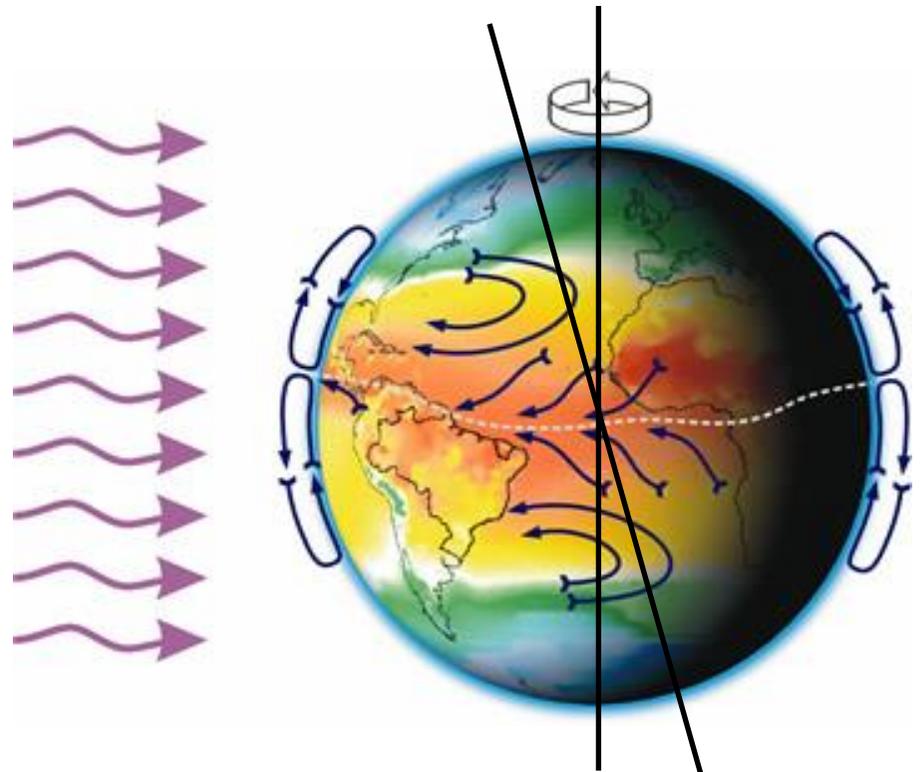
- Os raios solares aquecem a atmosfera de maneira diferenciada;
- O ar mais quente torna-se menos denso, gerando um espaço a ser preenchido por ar menos quente (convecção);
- Esses deslocamentos de massas de ar determinam a formação das brisas marinhas;



INTRODUÇÃO: ventos

- O aquecimento pelos raios solares ocorre a uma taxa de cerca de 1,5x a 2x mais por unidade de área nas regiões equatoriais do que nas polares;
- O deslocamento ascendente de massas de ar quente, dando lugar a porções de ar frio também dá origem aos ventos;

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o equador, em baixas altitudes;
- Contra-alísios: ventos que sopram do equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.



INTRODUÇÃO: correntes marinhas

- Os deslocamentos das massas de ar também dão origem às correntes marinhas;
- Influências: ventos e rotação da Terra (efeito Coriolis);
- As massas de água não interagem com as águas dos lugares por onde passam, guardando características próprias (cor, temperatura e salinidade).

INTRODUÇÃO: correntes geostróficas

- Os ventos não caminham em linha reta ao longo de um gradiente de pressão, mas são defletidos ou desviados em forma de curva devido a rotação da Terra (força de Coriolis);
- Assim, os ventos tendem a se deslocar **circularmente**;
- Ao soprarem na superfície oceânica ocasionam um **acúmulo de água na porção central** dos grandes cinturões de vento em latitudes médias;
- Como consequência, ocorre uma **elevação do nível da água** (colina de água) e um **espessamento da camada superficial**;
- Movimento (circular) de espalhamento da água a partir do topo das colinas de água, dando origem às chamadas correntes geostróficas;
- Concluindo, os ventos são a força básica que origina as maiores correntes oceânicas superficiais, mas a inércia e os efeitos geostróficos mantêm essas correntes em movimento, mesmo durante períodos em que o vento pare de soprar.

ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

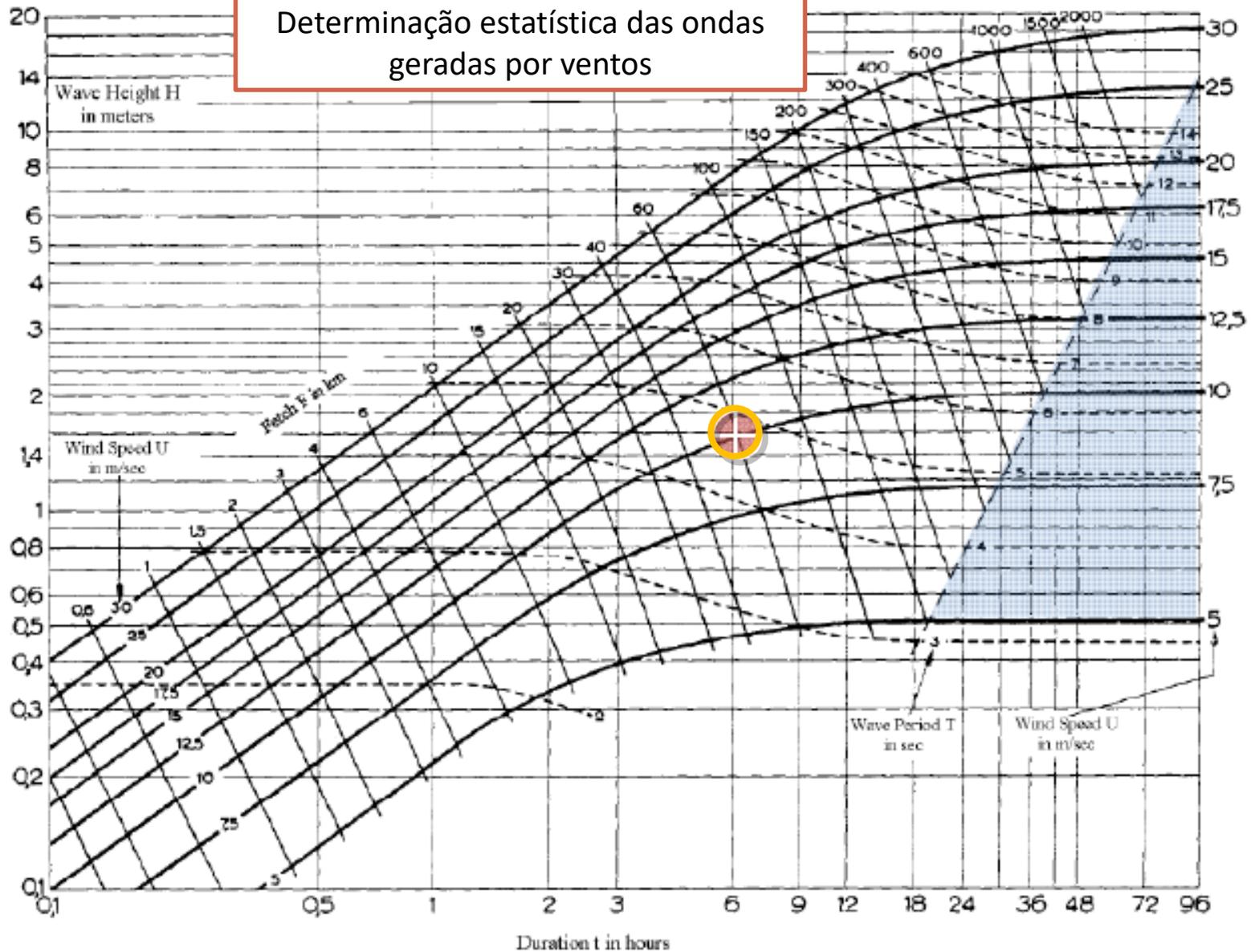
- Os ventos atuando (atrito) sobre a superfície do mar geram uma perturbação (energia sob a forma de ondas) que é capaz de se deslocar por grandes distâncias;



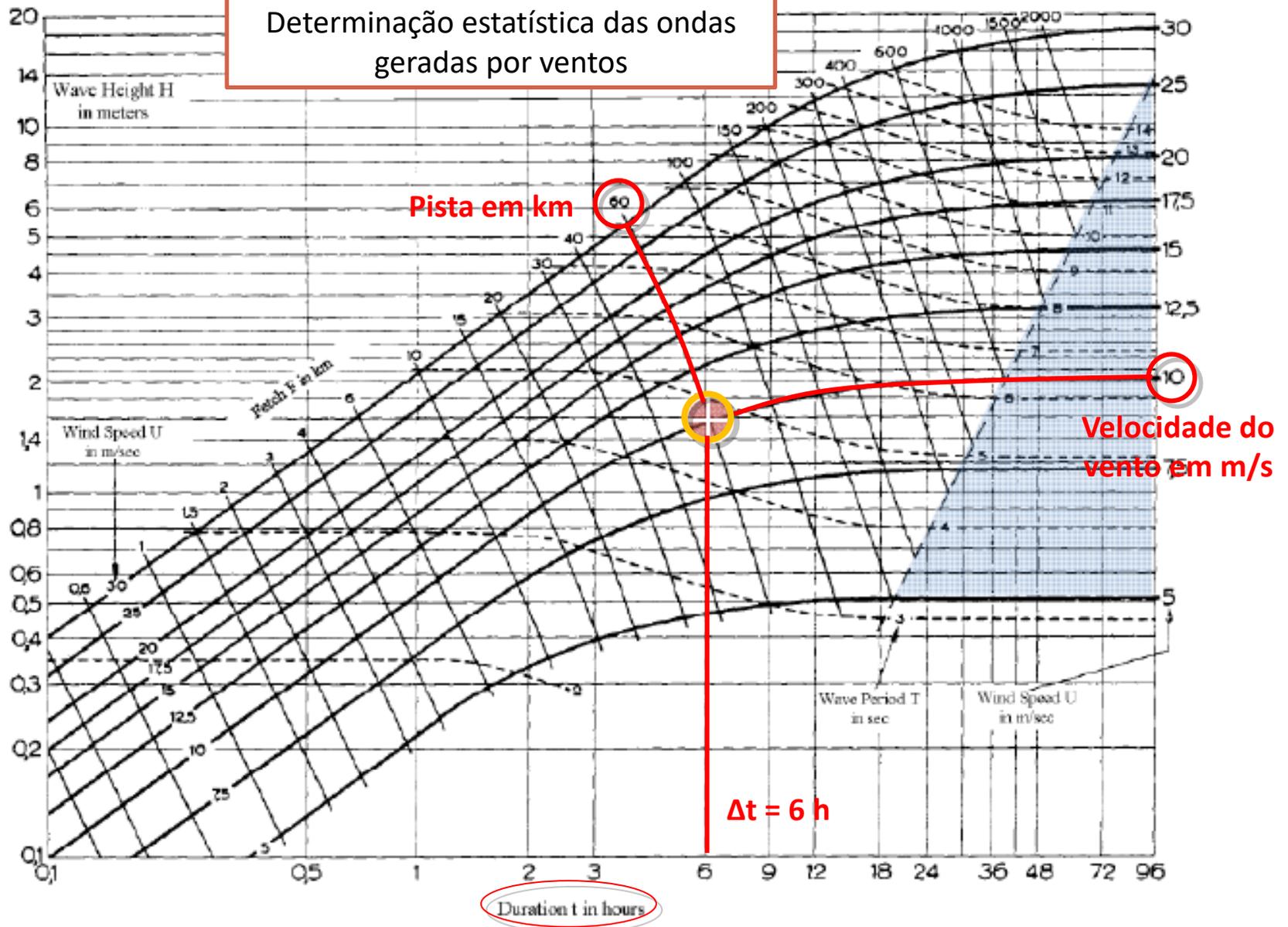
- A intensidade das ondas geradas depende: (1) da velocidade do vento; (2) do tempo de atuação do vento sobre a água; (3) da pista disponível (alcance do vento);

ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

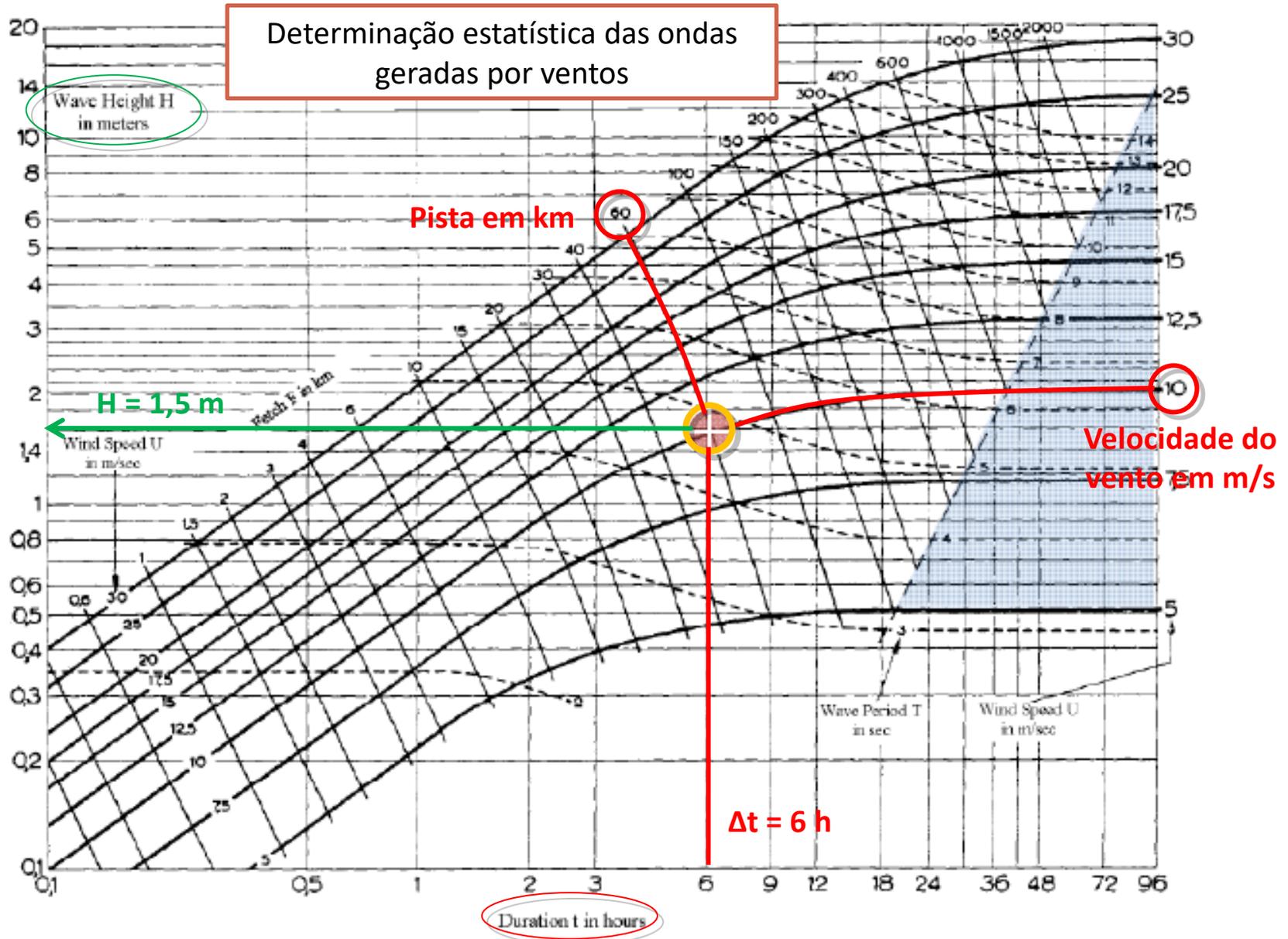
Determinação estatística das ondas geradas por ventos



ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

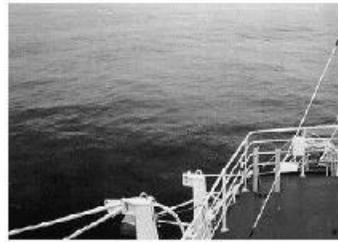


ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE



ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

- Estados de mar:



Beaufort 1



Beaufort 2



Beaufort 3



Beaufort 4



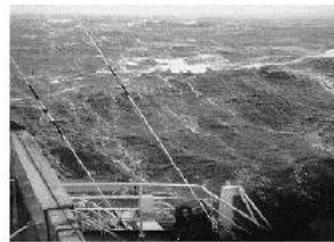
Beaufort 5



Beaufort 6



Beaufort 7



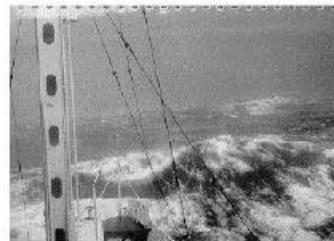
Beaufort 8



Beaufort 9



Beaufort 10



Beaufort 11



Beaufort 12

Qual a escala utilizada para medir o vento?

- A escala utilizada para medir o vento é a escala Beaufort:

Beaufort 5

Vento moderado

Altura das ondas :6-8 pés



Beaufort 6

Vento forte

Altura das ondas :9-13 pés



Beaufort 7

Quase tempestade

Altura das ondas:14 -19 pés



Beaufort 8

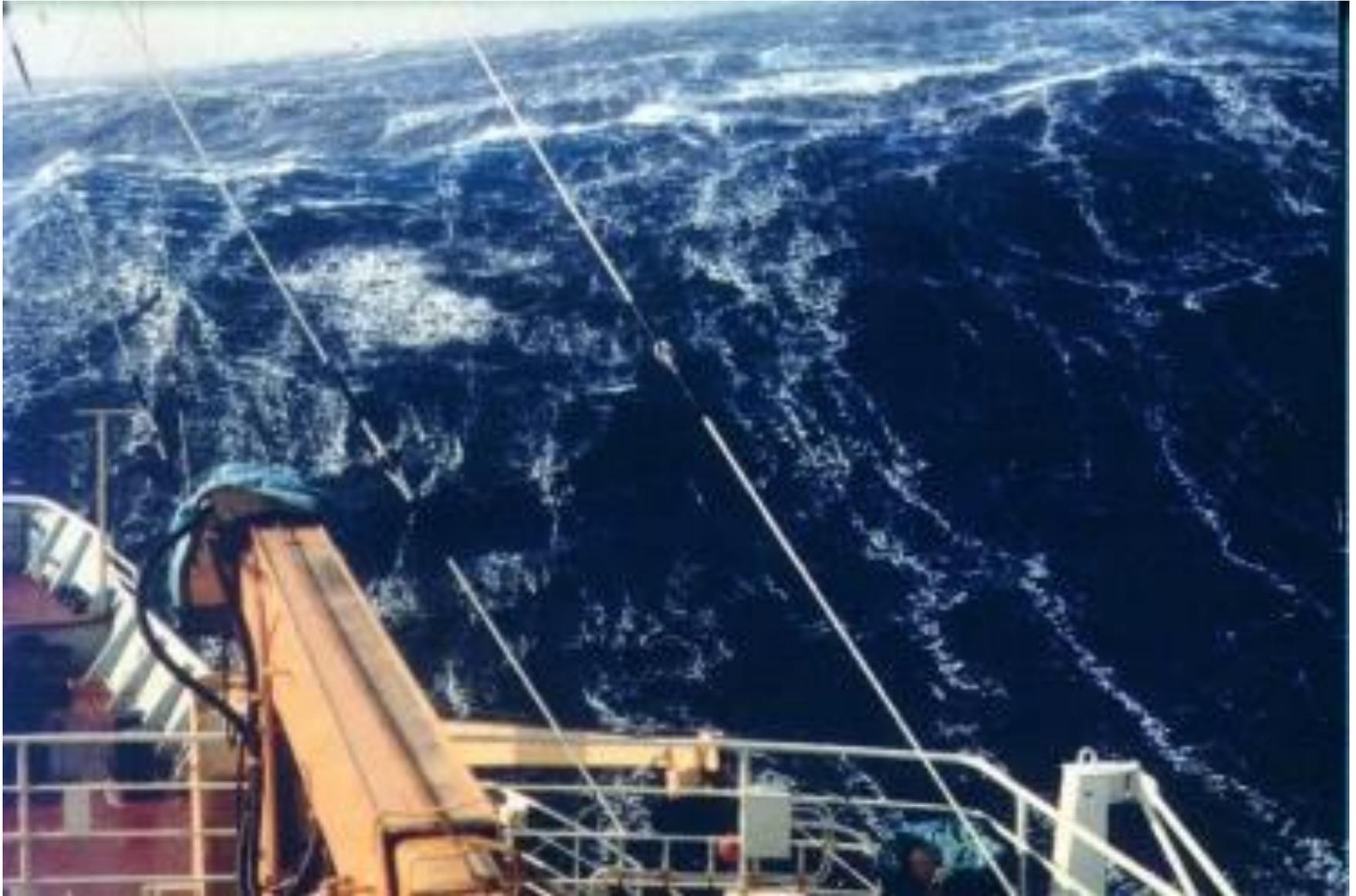
Tempestade

Altura das ondas:18 -25 pés



Beaufort 9

Tempestade forte
Altura das ondas: 23-32 pés



Beaufort 10

Ciclone

Altura das ondas: 29-41 pés



Ciclone/Tufão

Beaufort 11

Altura das ondas:37-52 pés



Furacão

Beaufort 12

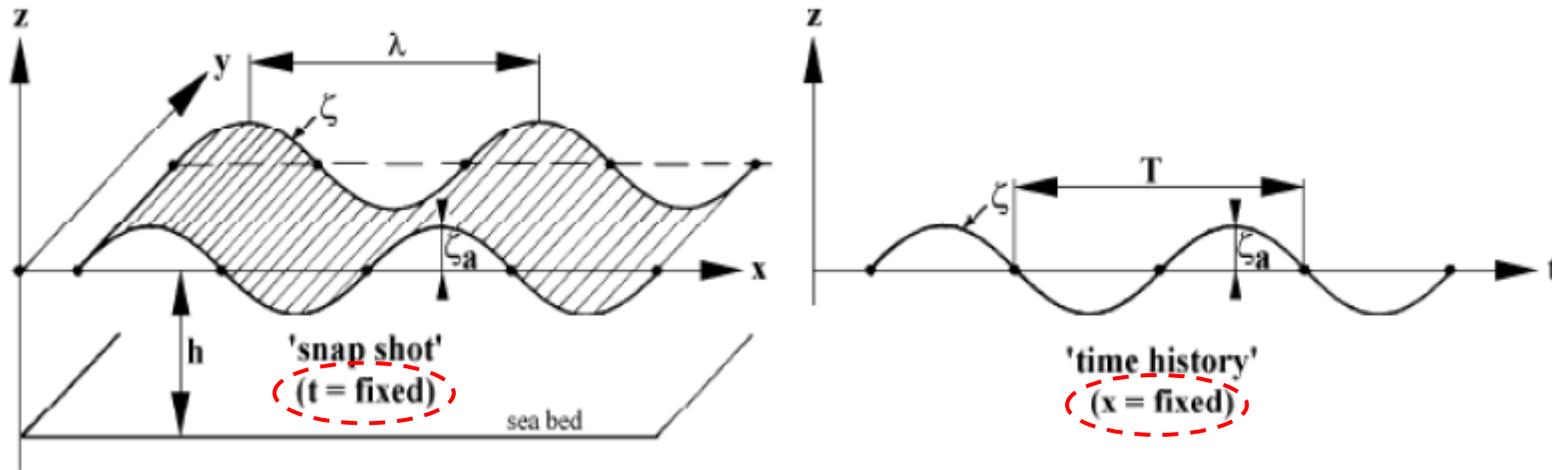
Altura das ondas: 45 ou mais pés



ONDAS REGULARES

- Onda plana: a elevação se repete para qualquer cota y ;
- O que caracteriza uma onda regular é o período de oscilação T bem definido.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

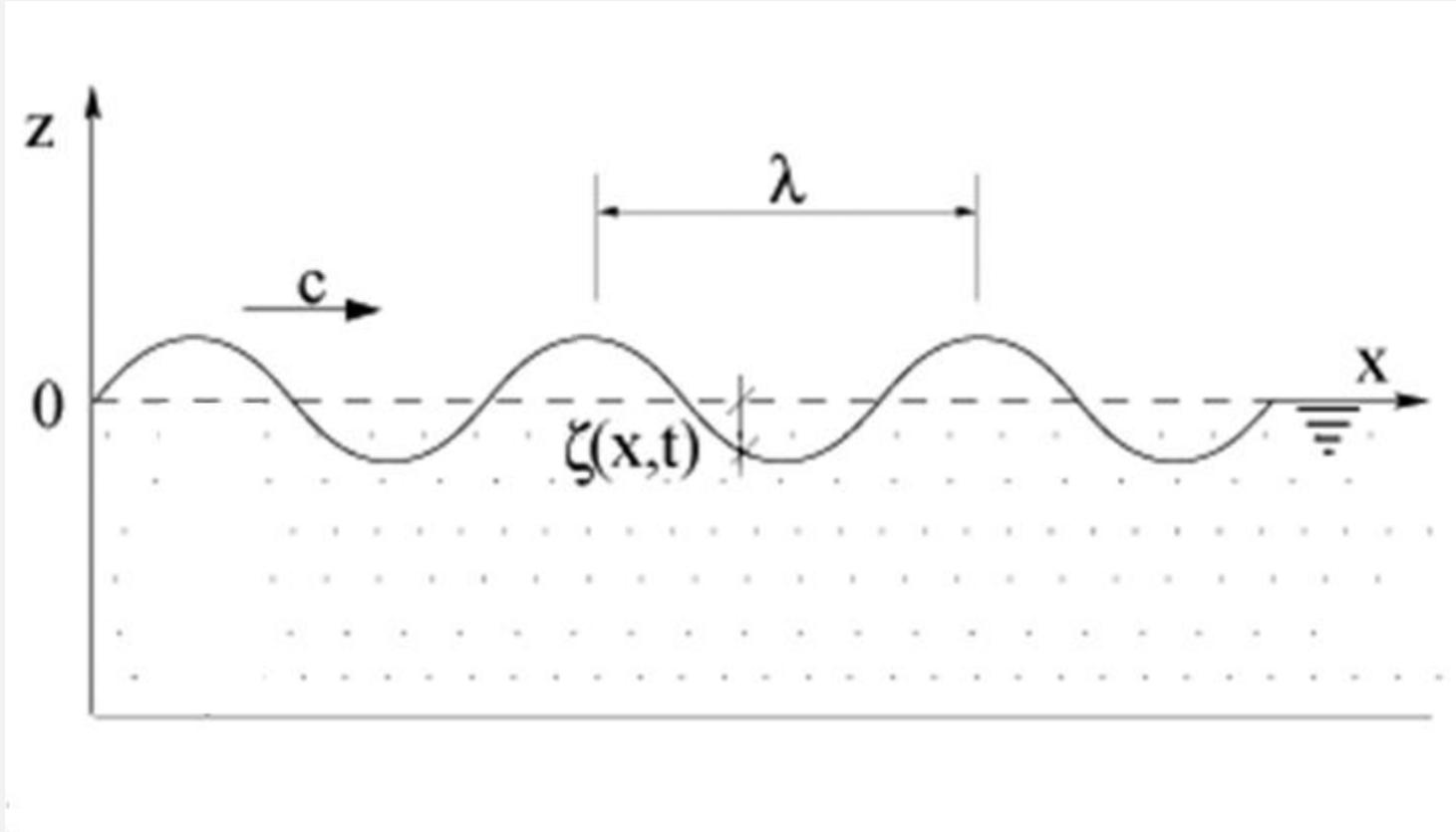


- Nota: a altura de onda H é igual ao DOBRO da amplitude $A = \zeta_a$.
- Velocidade (ou celeridade) de fase (ou de propagação) c :

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Descrição do movimento das partículas fluídas nas ondas

- Onda se propagando na superfície do mar:



- c = velocidade da onda; λ = comprimento de onda; ζ = forma para a superfície livre.

Descrição do movimento das partículas fluídas nas ondas

- v = velocidade das partículas do líquido;

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \qquad v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

- Conservação de massa (Equação da Continuidade):

$$\nabla \cdot v = 0$$

$$v = \nabla \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} i + \frac{\partial \phi}{\partial y} j + \frac{\partial \phi}{\partial z} k$$

$$\nabla \cdot \nabla \phi = \nabla^2 \phi = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

- Determinar o potencial escalar $\phi(x, z, t)$, tal que: Obs: despreza-se a componente y porque o nosso sistema é bidimensional.

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

Descrição do movimento das partículas fluídas nas ondas

- Condições de contorno: o efeito de onda decai com a profundidade.

$$z \rightarrow -\infty \Rightarrow v \rightarrow 0$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z = -\infty} = 0$$

- Equação de Bernoulli (Equação do Movimento):

$$g = -gk$$

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p + \frac{1}{2} \rho \nabla \phi \nabla \phi + \rho g z = cte$$

- $p = p_{\text{atm}} = cte$ em $z = \zeta(x,t)$:

$$-\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \nabla \phi \nabla \phi - \rho g \zeta = 0$$

$$\zeta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \phi \nabla \phi \right)$$

Descrição do movimento das partículas fluídas nas ondas

- Se $A/\lambda \ll 1$: Teoria Linear de ondas, com $\nabla\phi \rightarrow 0$ em $z \rightarrow -\infty$, em $z = \zeta(x,t)$

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

$$\zeta(x,t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

- Solução : A=amplitude da onda; T=período da onda

$$\varphi(x, z, t) = \frac{gA}{\omega} e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$$

$$\zeta(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t)$$

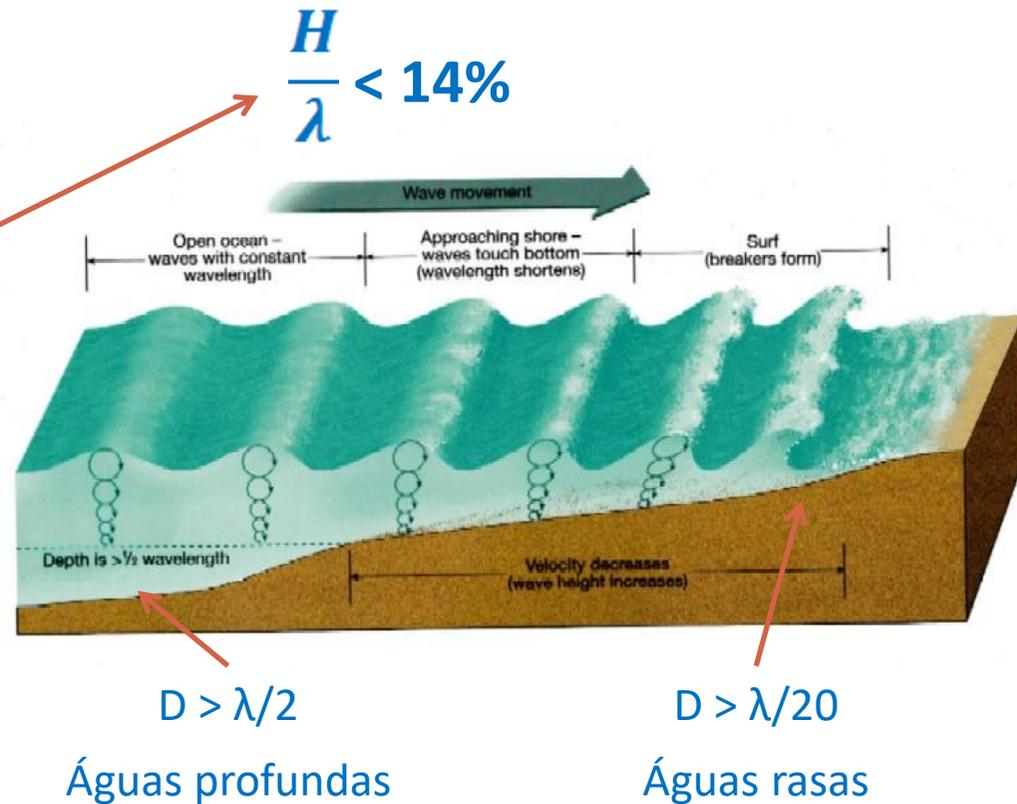
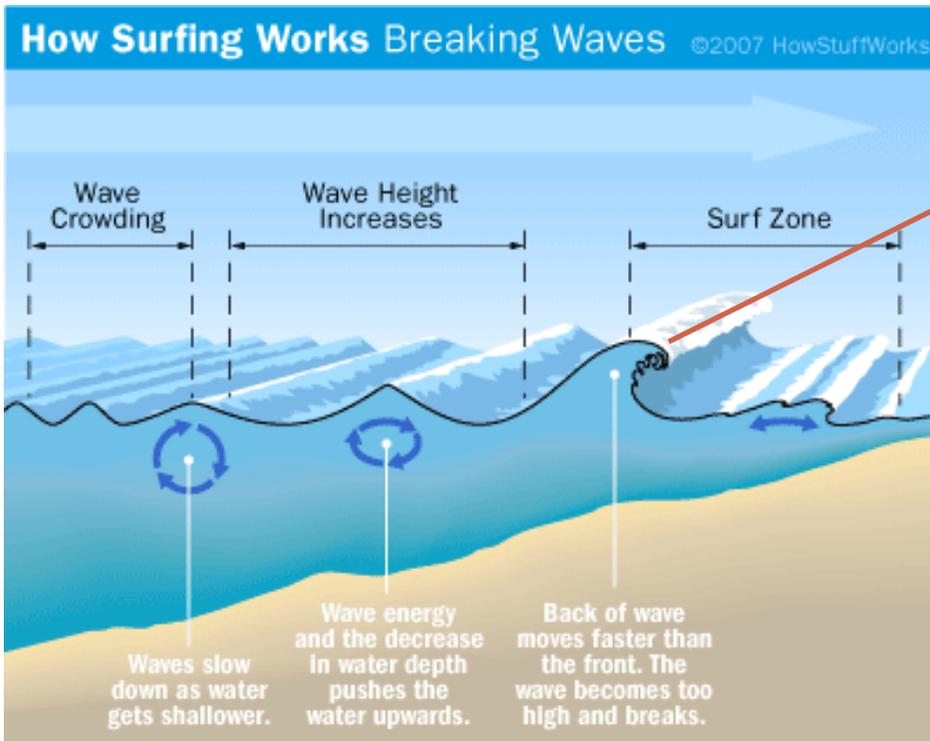
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

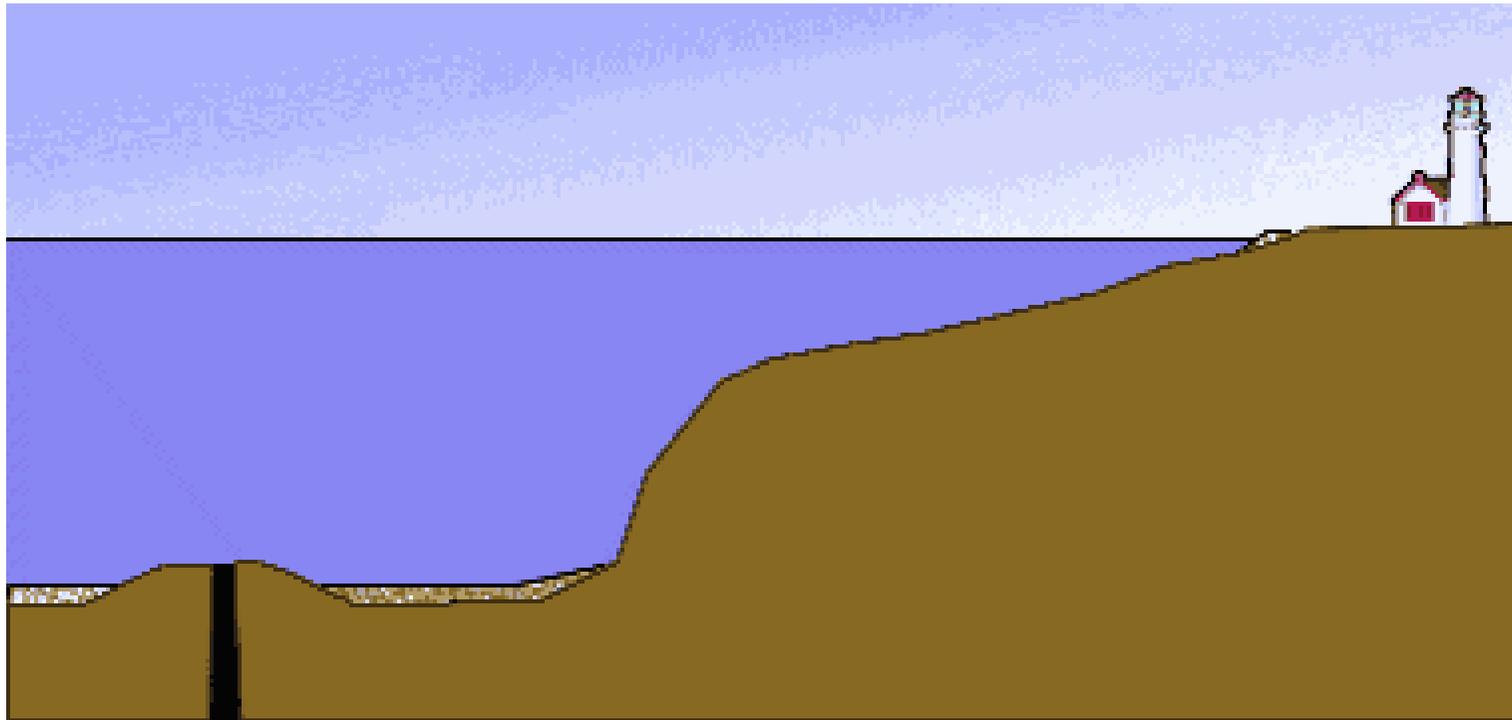
$$k = \frac{\omega^2}{g \cdot \tanh(k \cdot h)}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \rightarrow \quad c = \frac{\lambda}{T}$$

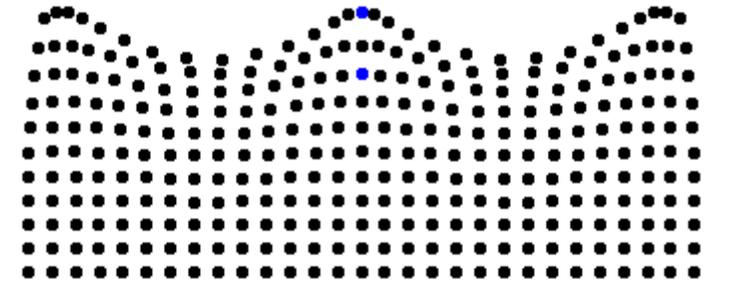
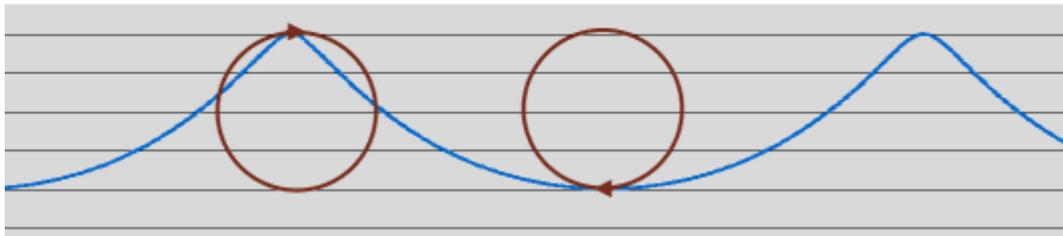


Tsunamis

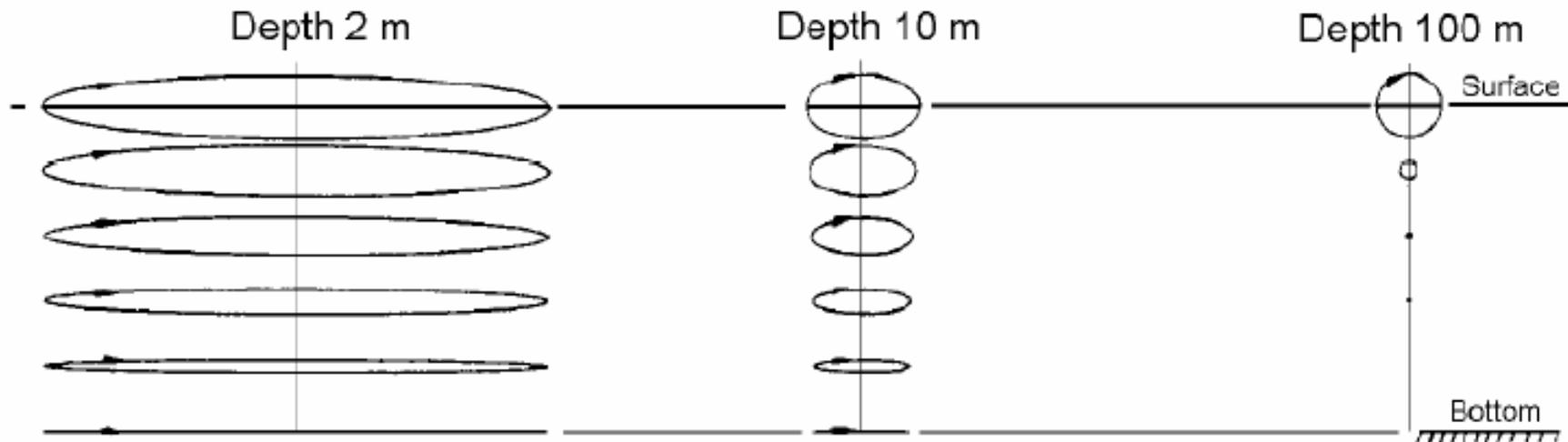


ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

- Nota: as partículas de água se movimentam circularmente; apenas a energia se propaga por grandes extensões.

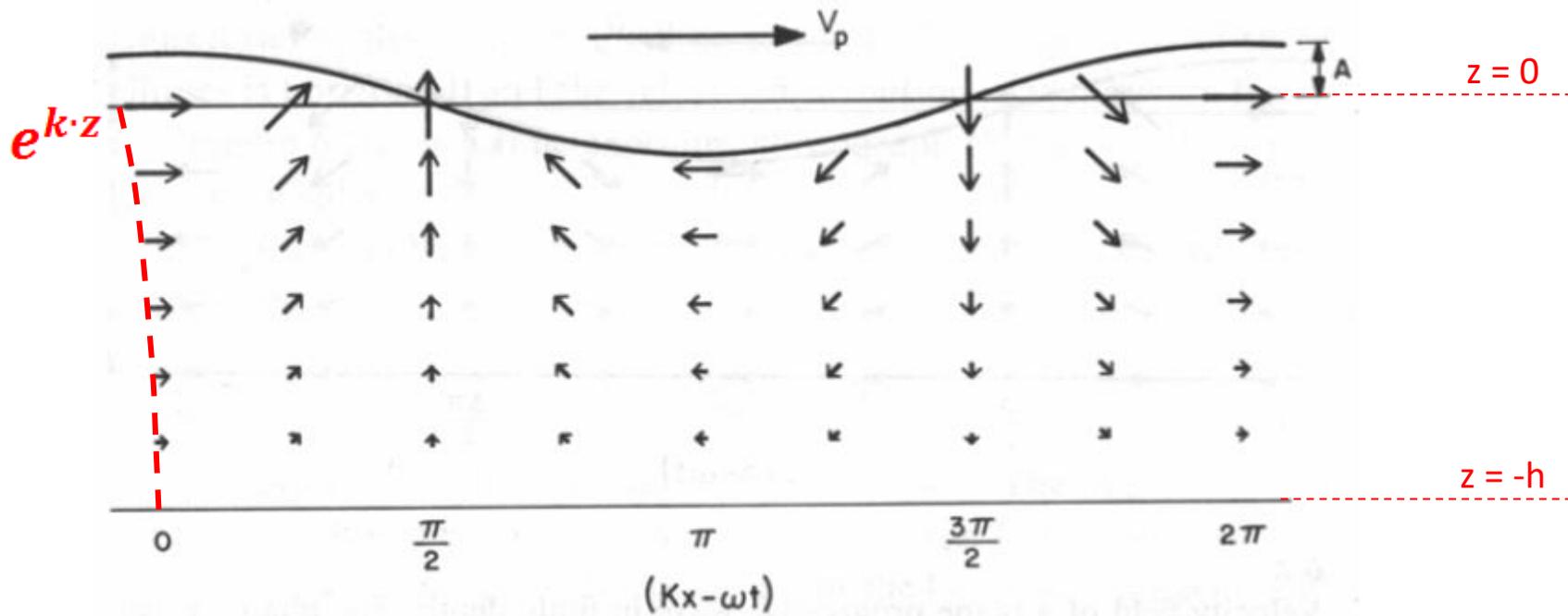


©1999, Daniel A. Russell



EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

- Campo de velocidades (profundidade infinita):



VELOCIDADE DE GRUPO

- A velocidade de grupo corresponde à velocidade com que um “pacote” de ondas se propaga;

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

- Limites assintóticos:
 - Em profundidade infinita ($h \rightarrow \infty$), a velocidade de grupo é metade da velocidade de fase;
 - Em águas rasas ($h \rightarrow 0$), a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase.

FENÔMENOS: INTERFERÊNCIA DE ONDAS (batimento)

- Construtiva ou destrutiva;
- Ex.: Duas componentes de onda de mesma amplitude e frequências próximas:

$$\zeta(x,t) = A \cos[(k + \delta k)x - (\omega + \delta \omega)t] + A \cos[(k - \delta k)x - (\omega - \delta \omega)t]$$

que pode ser reescrita como:

$$\zeta(x,t) = 2A \cos(\delta k \cdot x - \delta \omega \cdot t) \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

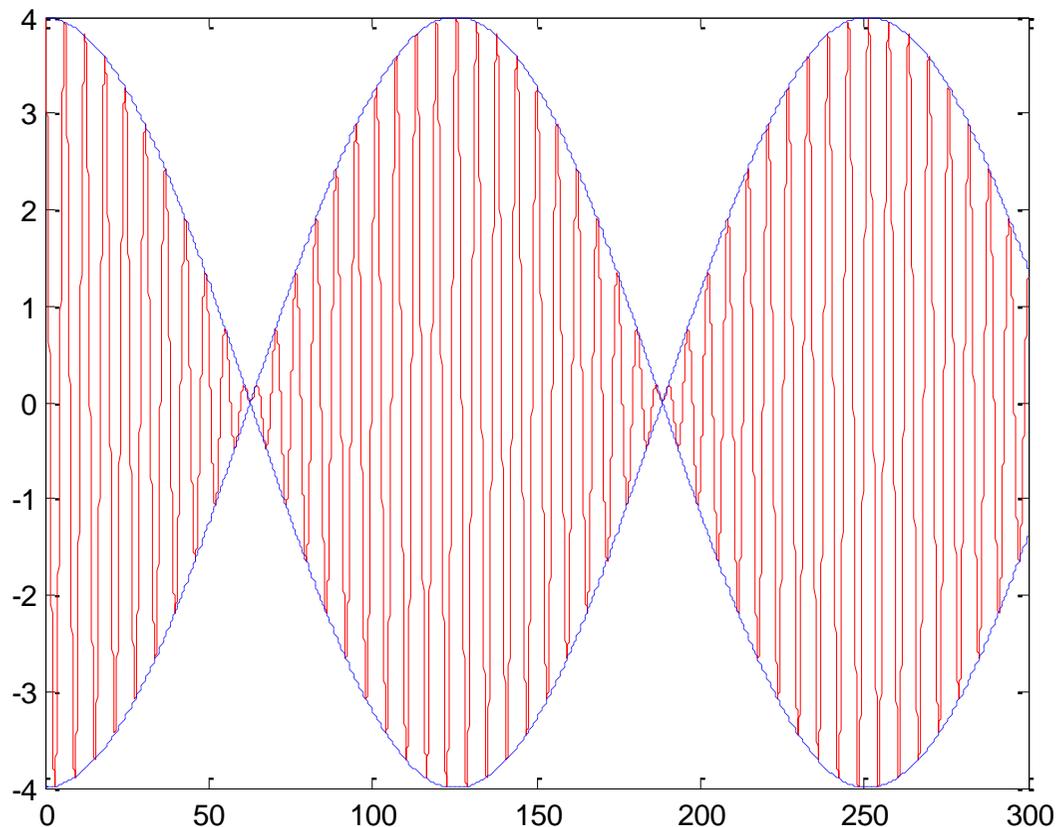
“envoltória”

A envoltória tem comprimento $2\pi/\delta k$ e período $2\pi/\delta \omega$

Como resultado vemos um sinal “modulado”, ou “batimento”

FENÔMENOS: INTERFERÊNCIA DE ONDAS (batimento)

- As forças de deriva-lenta estão associadas à modulação entre as diferentes componentes de ondas do mar e oscilam com os períodos das envoltórias $2\pi/d\omega$ (“problema de segunda ordem”)



$$A = 2; \omega = 1; d\omega = 0,05$$

VOLTAR?

Exemplo muito bacana da composição de sinais harmônicos (mas muito lento 16 minutos) – ver minuto 12

<https://www.youtube.com/watch?v=r18Gi8ISkfM>

Maquina de transformada de fourrier

<https://www.youtube.com/watch?v=CjFR4p1Mwpg>

<https://www.youtube.com/watch?v=cUD1gMAI6W4>

<https://www.youtube.com/watch?v=Y9pYHDSxc7g>

<https://www.youtube.com/watch?v=YUBe-ro89I4>

Ressonancia

<https://www.youtube.com/watch?v=HvfatlqXtlc>

Taipei 101

<https://www.youtube.com/watch?v=C4-eVSzBlzA>

https://www.youtube.com/watch?v=Rrv8JMOLB_c

<https://youtu.be/ft3vTaYbkdE>

Quem quer criar a intuição mecânica par toda vida assista a serie:

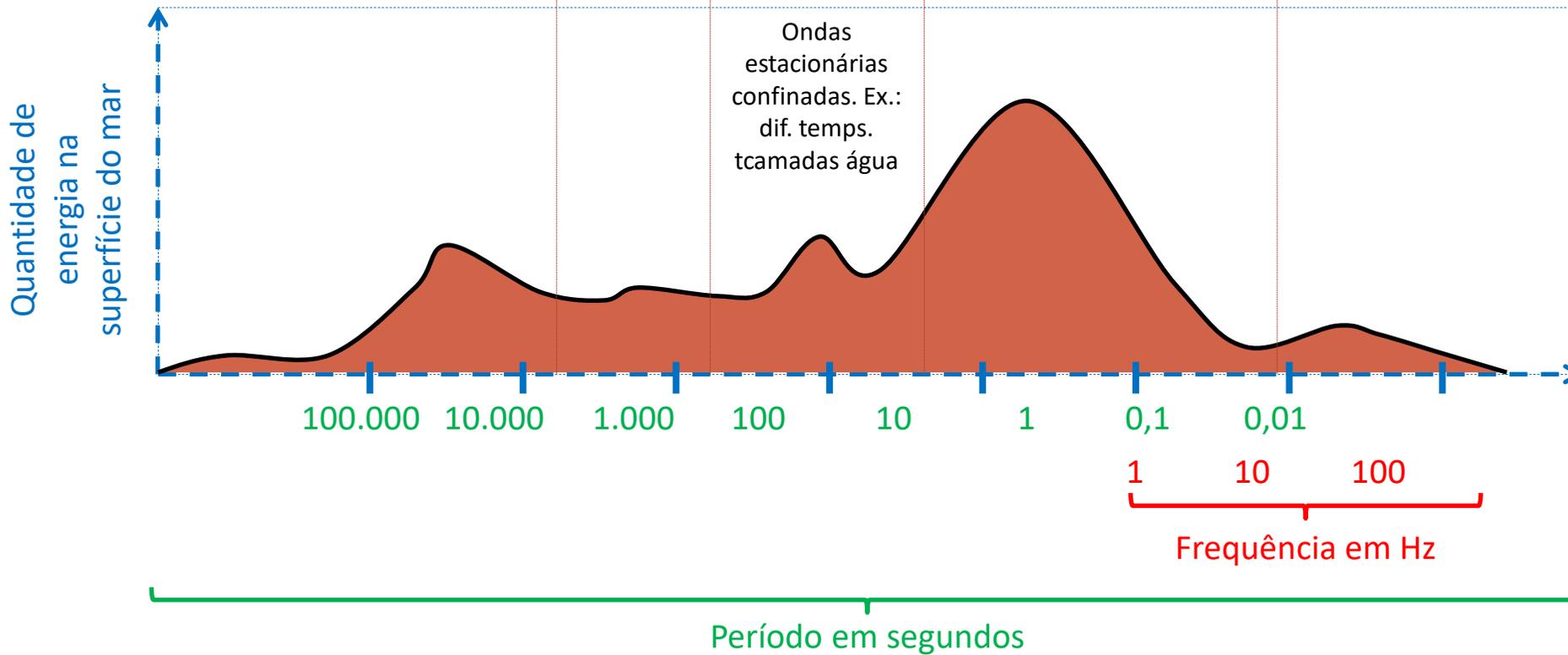
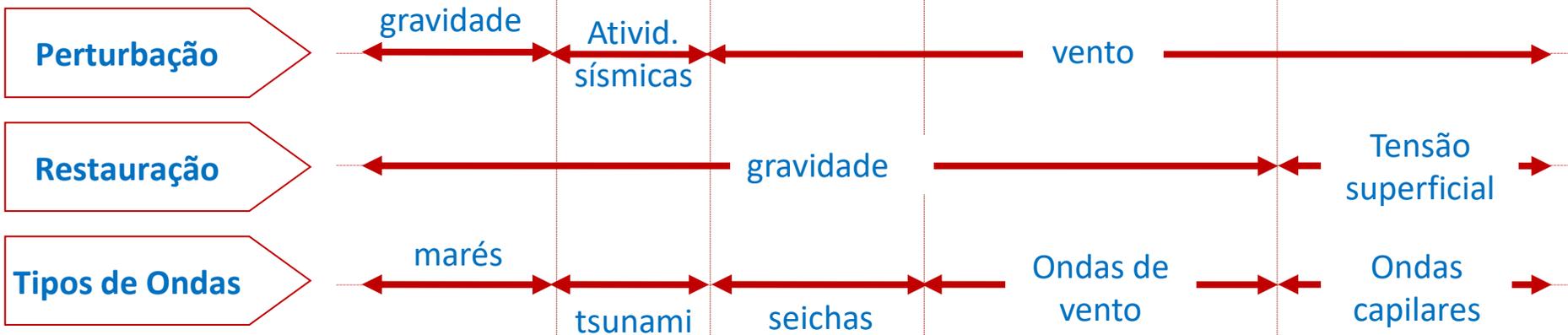
<https://www.youtube.com/watch?v=NAsM30MAHLg>

Sistema oescilatorio em laboratório

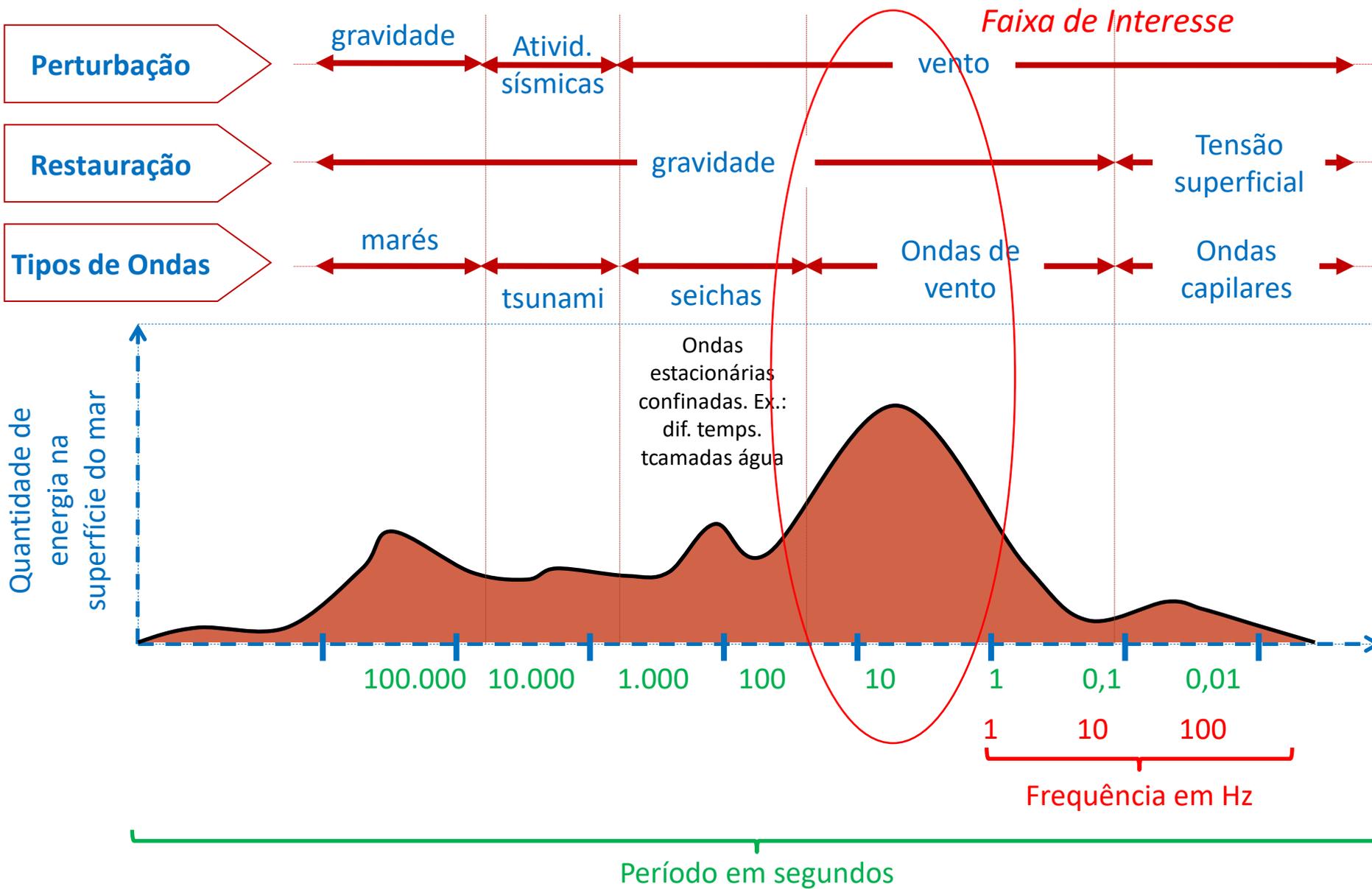
https://www.youtube.com/watch?v=7f0h_1z0iBE

<https://www.youtube.com/watch?v=ynzk04wVn6k>

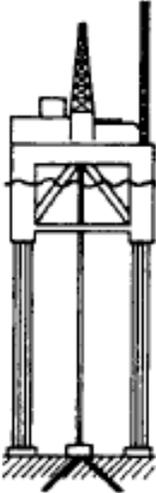
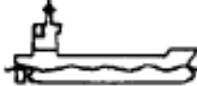
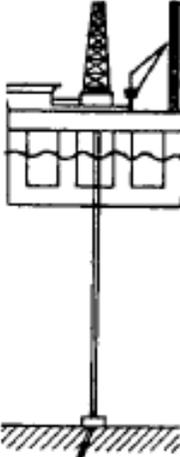
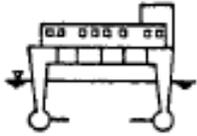
ESPECTRO DE ENERGIA DAS ONDAS NO OCEANO



ESPECTRO DE ENERGIA DAS ONDAS NO OCEANO

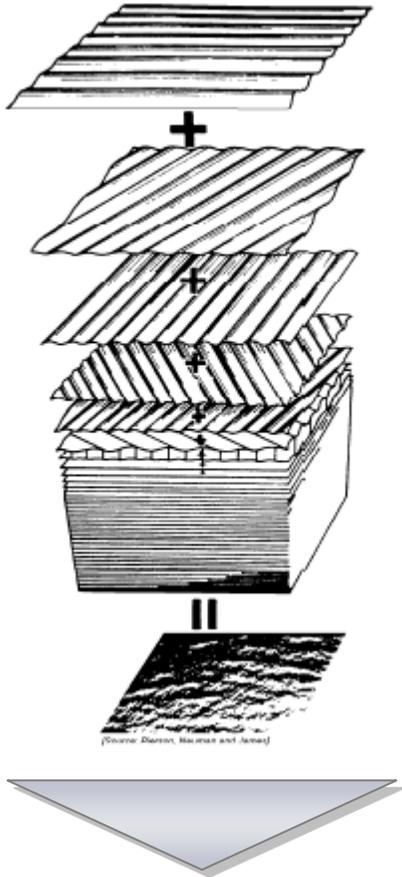


Períodos Naturais de alguns Sistemas Oceânicos

Vessel:					
<i>Natural heave period:</i>	<1 s	2–4 s	4–16 s ^a	>20 s	>20 s
<i>Restoring force:</i>	Air compressibility	Elasticity of tethers	Waterplane area	Waterplane area	Waterplane area
<i>Dominating excitation mechanism around the natural heave period:</i>	Linear wave forces due to high encounter frequency between ship and waves	Non-linear sum frequency wave forces	Linear wave forces	Swell (long waves)	Linear wave forces due to low encounter frequency between ship and waves
<i>Important damping:</i>	'Ride Control'	Viscous effects	Wave radiation	Viscous effects	Foil control

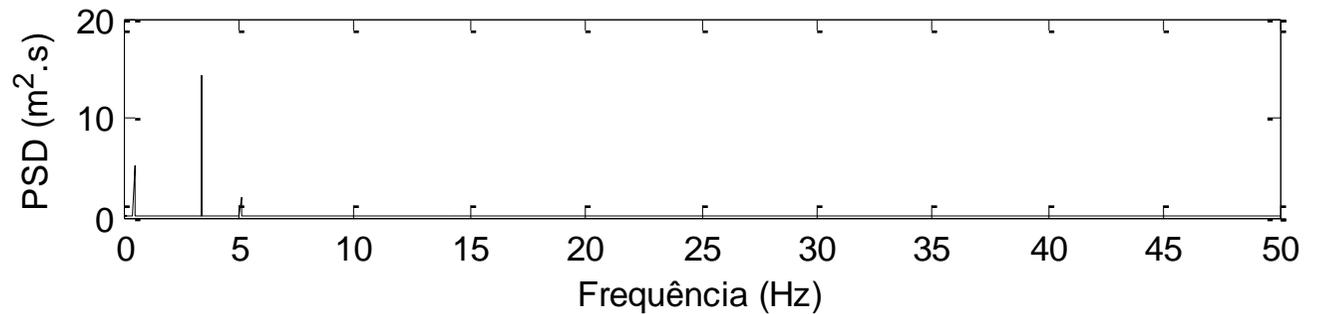
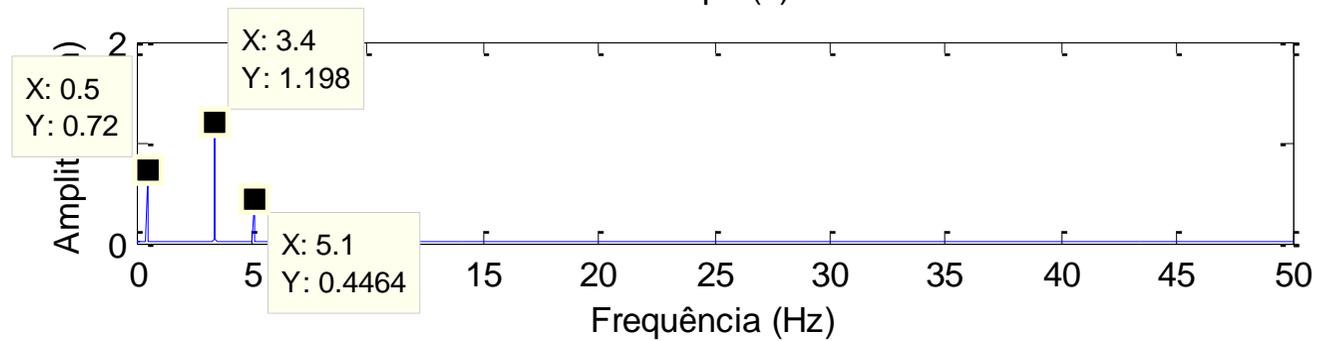
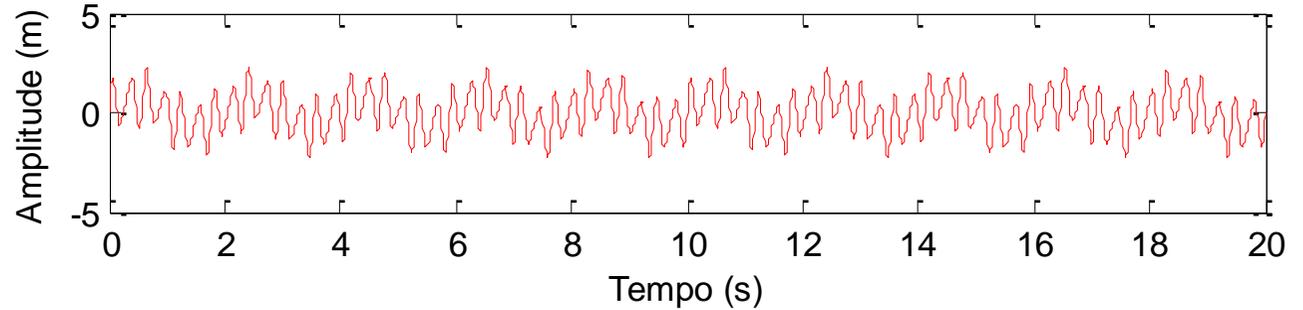
^a Rough estimate: $\sqrt[3]{(L/1.5)}$, where L is ship length in metres.

O MAR COMO UMA COMPOSIÇÃO DE ONDAS

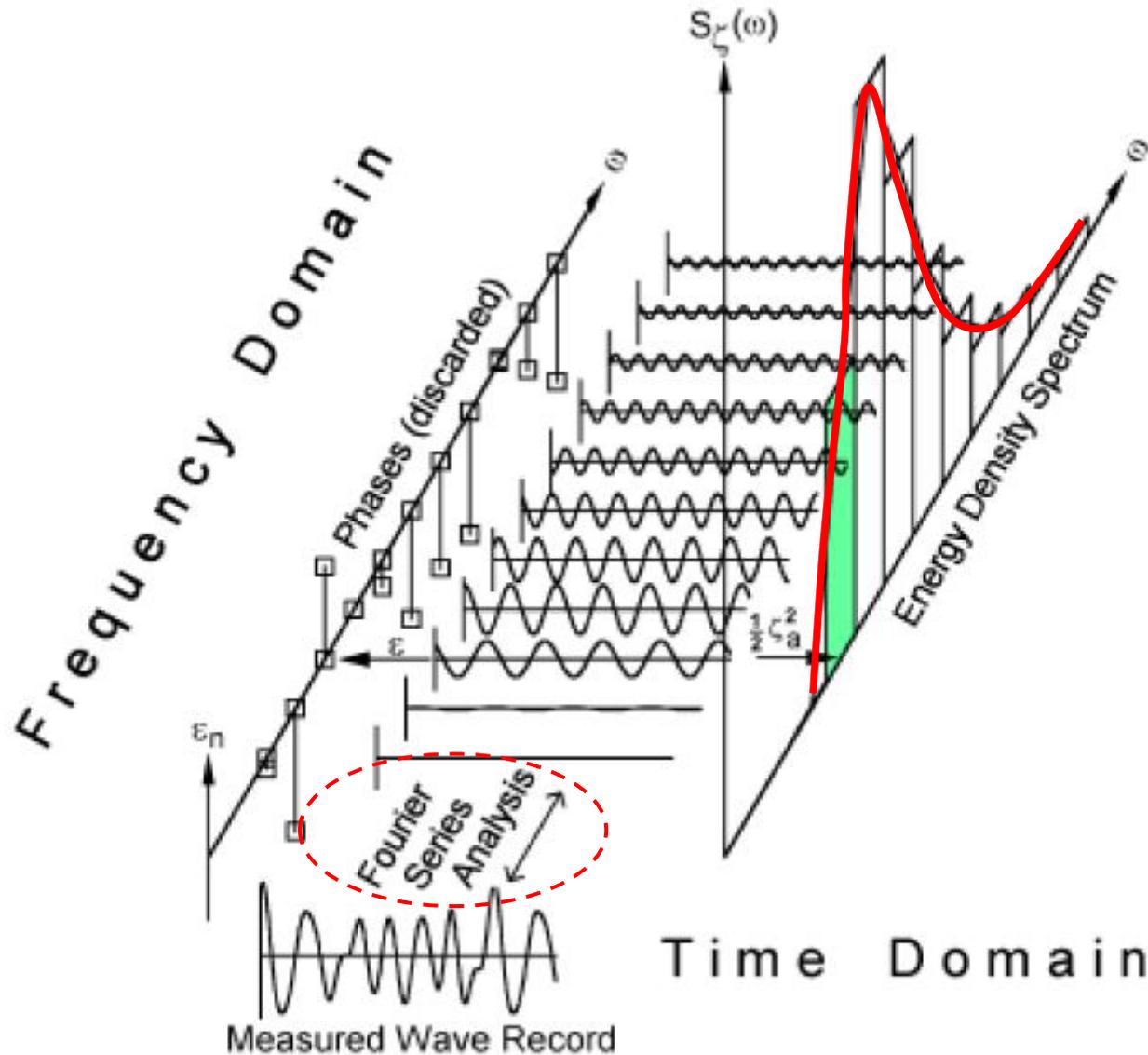


$$\zeta(t) = \sum_{r=0}^N \zeta_r \cos(k_r x - \omega_r t + \varepsilon_r)$$

Composição de ondas regulares de frequência 0,5Hz, 3,4Hz e 5,1Hz, e amplitudes 0,72m, 1,20m e 0,45m, respectivamente.



O MAR COMO UMA COMPOSIÇÃO DE ONDAS





Por que estudar comportamento no mar?

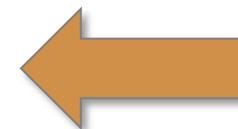
Ondas, correntezas e marés

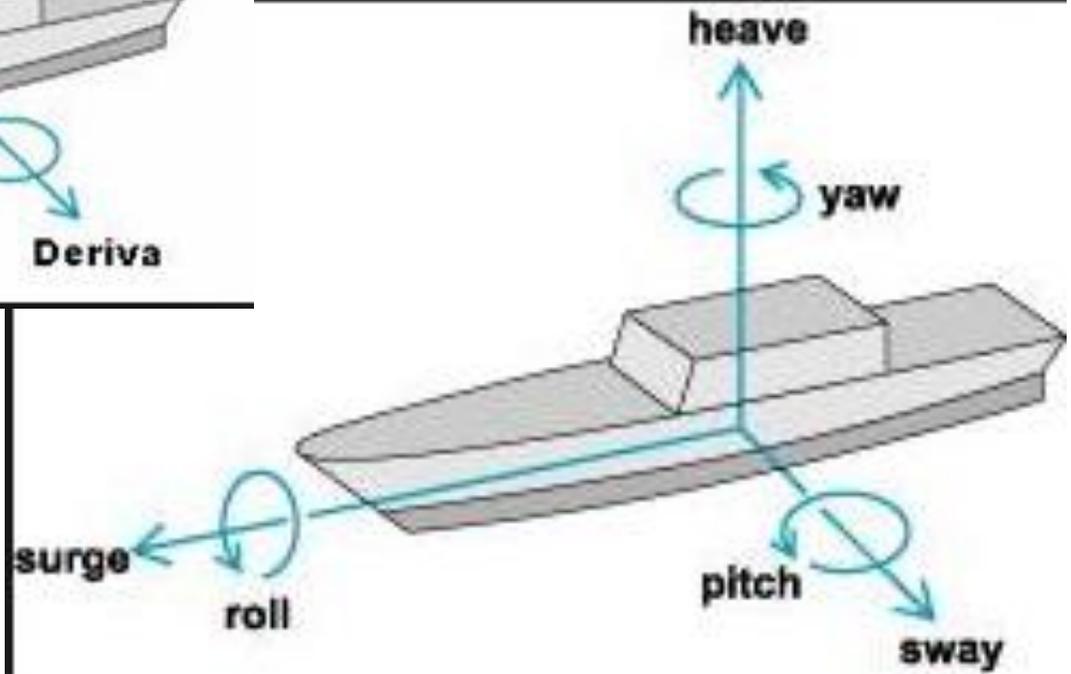
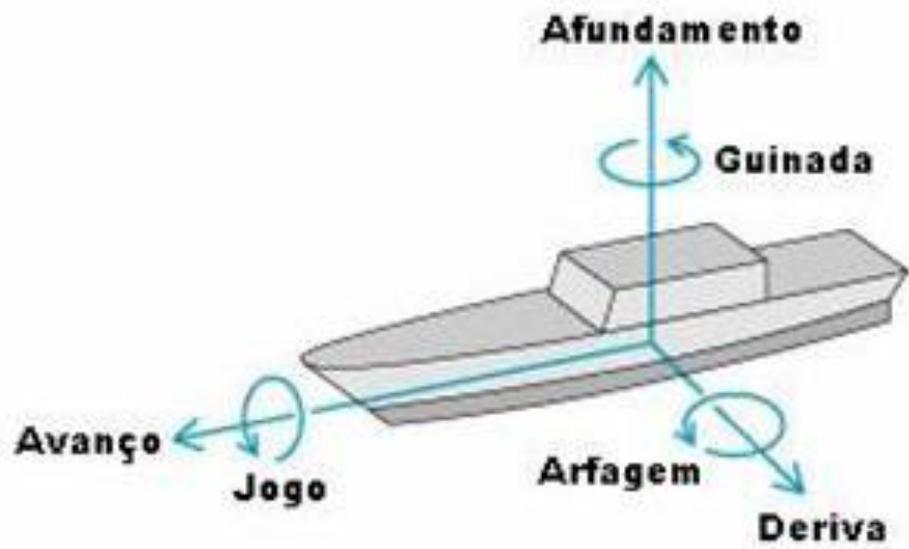
Modelos para o sistema oceânico

Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

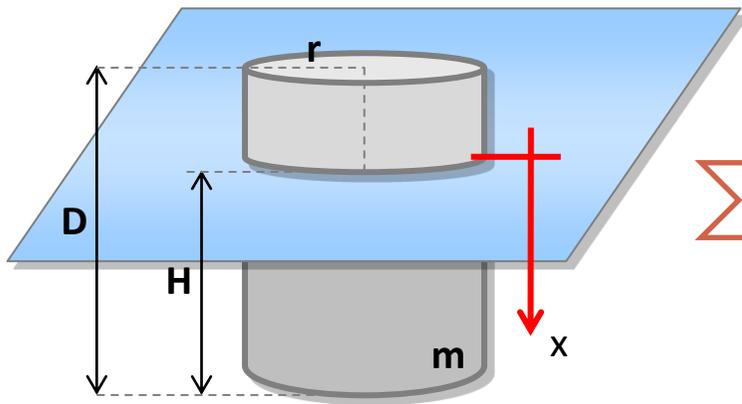
Visita ao TPN



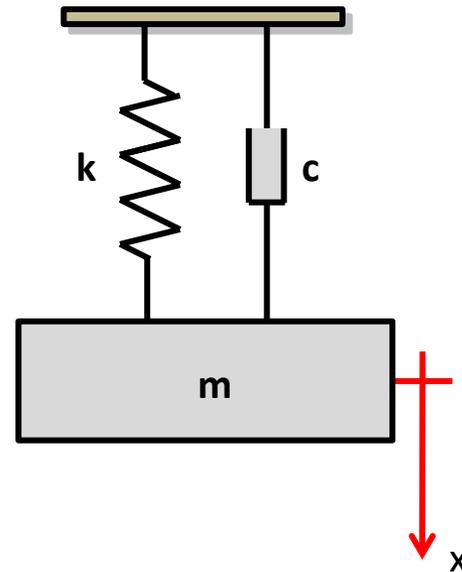


MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Heave em um cilindro



Sistema Massa Mola Amortecedor

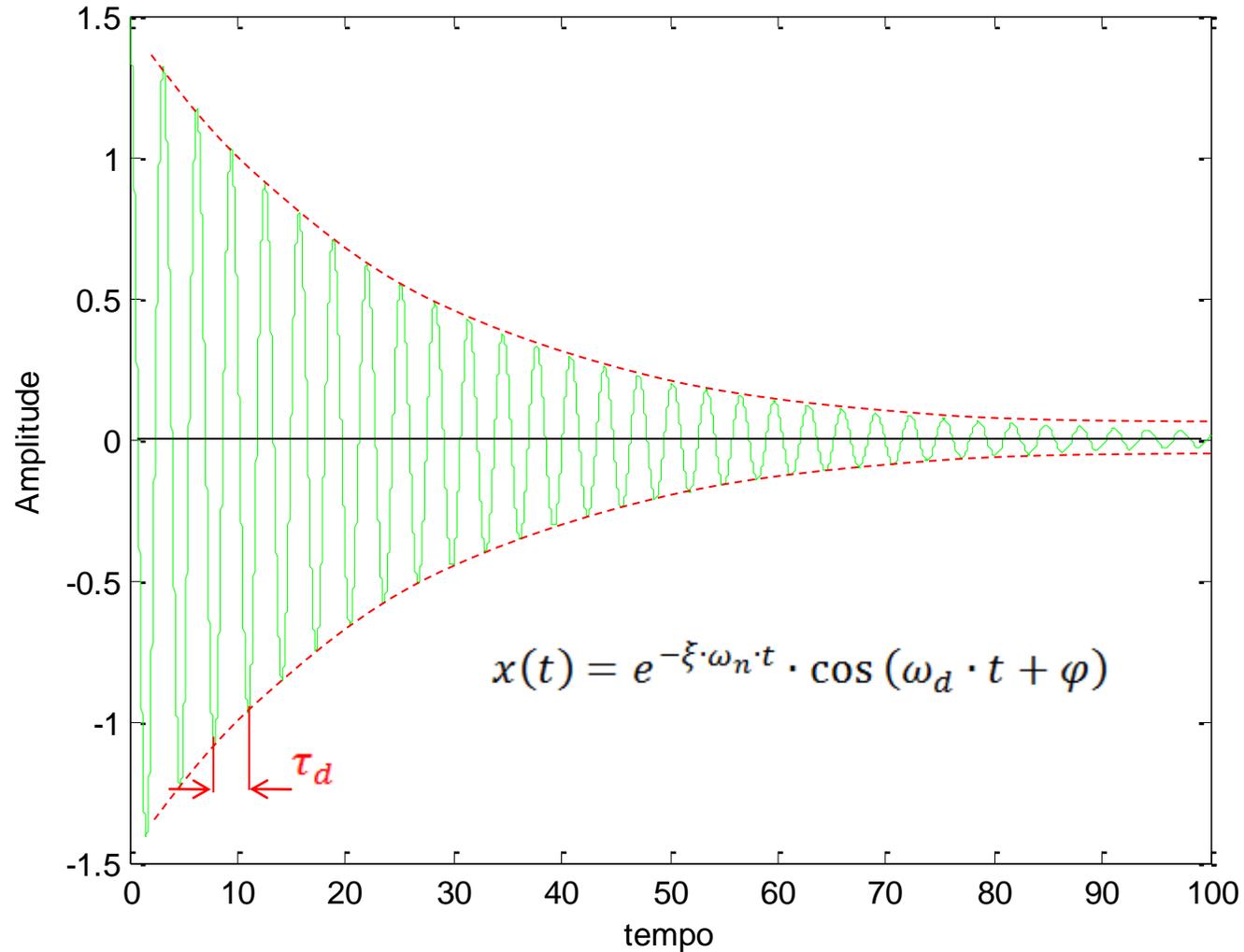


Qual a origem da restauração? E do amortecimento?

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0$$

MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

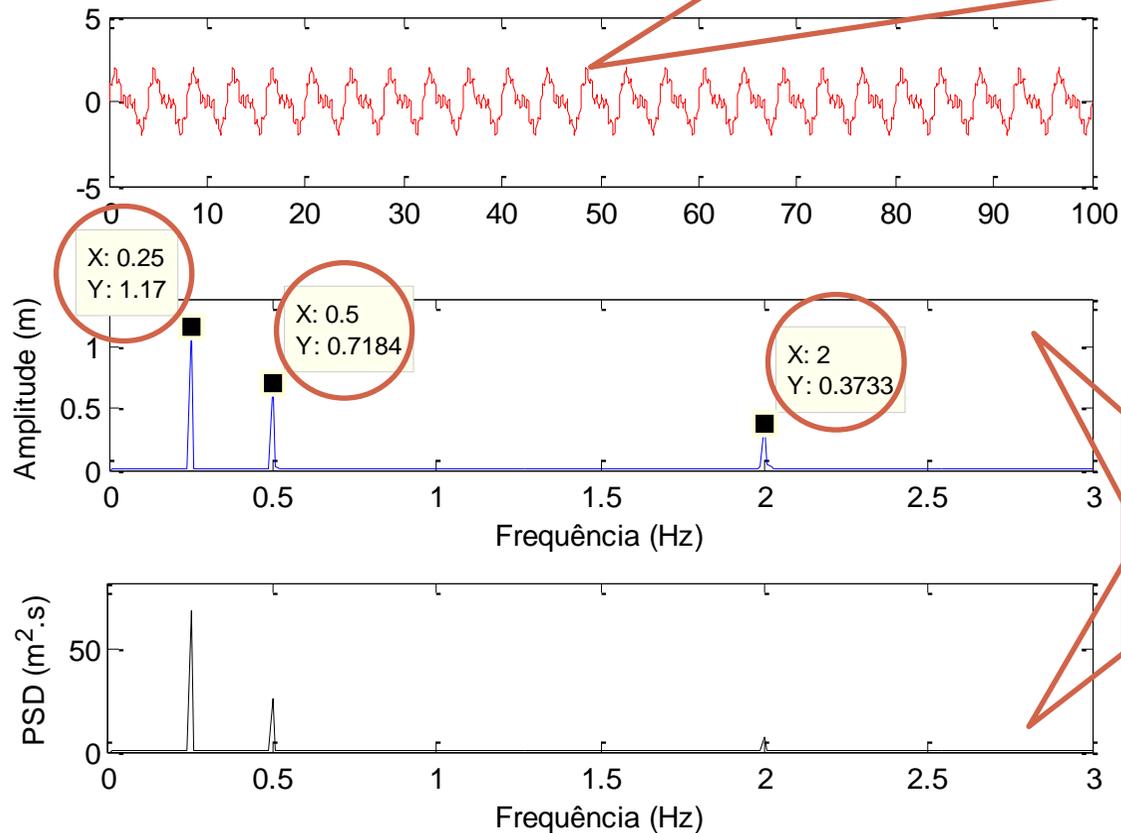
Resposta de um sistema livre de 1GLno domínio do tempo



MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Transformada de Fourier: decomposição de um sinal em componentes de frequências e amplitudes.

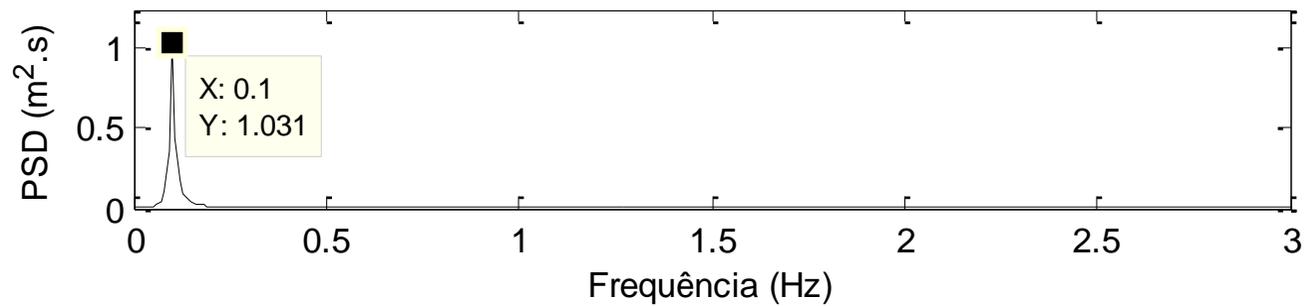
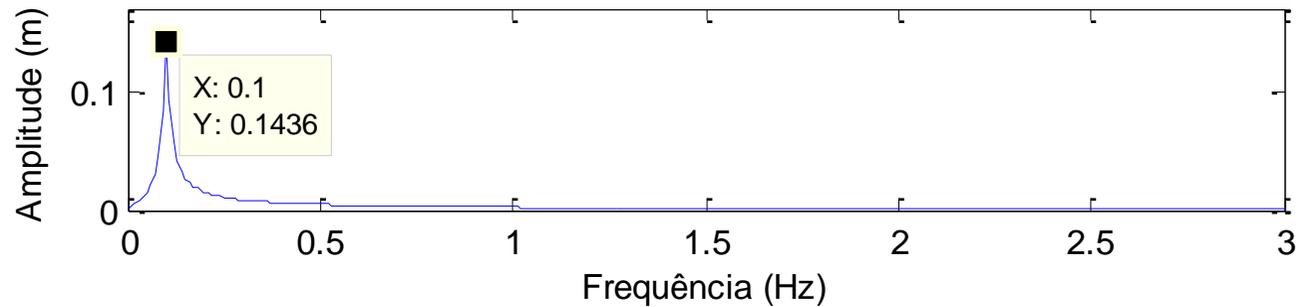
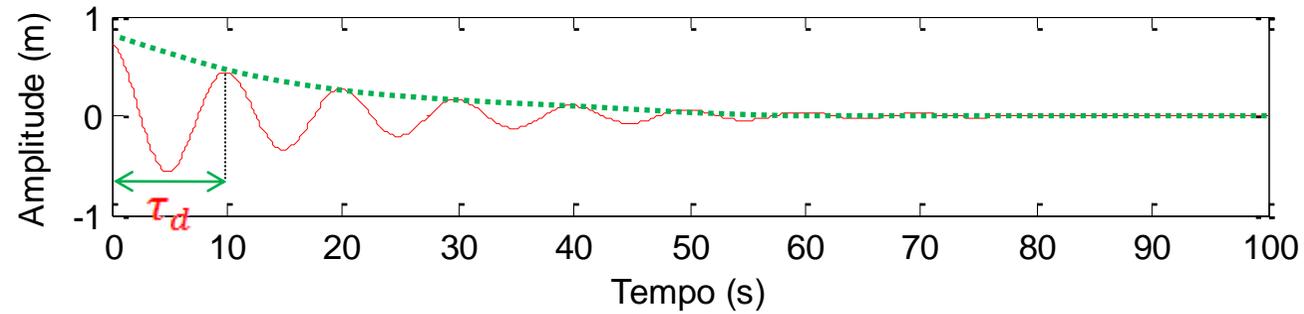
$$y = .72 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (1/T) \cdot t) + .38 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (4/T) \cdot t) + 1.17 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (.5/T) \cdot t)$$



A energia associada a cada componente é proporcional ao quadrado da amplitude.

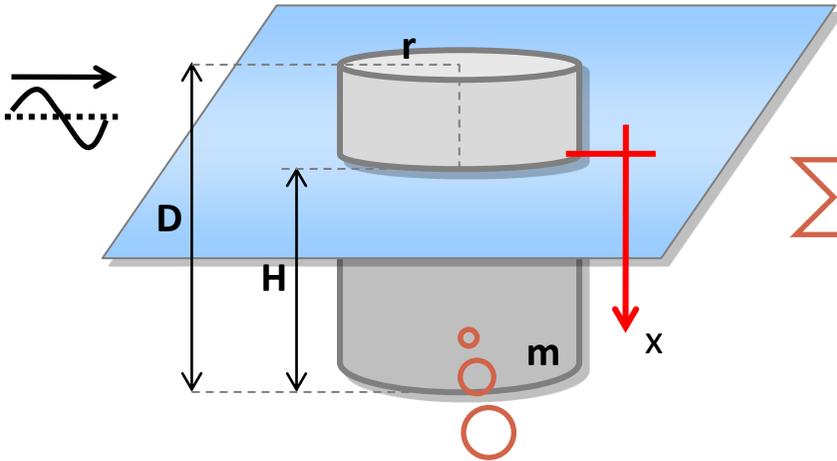
MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Transformada de Fourier de um “decaimento artificial”



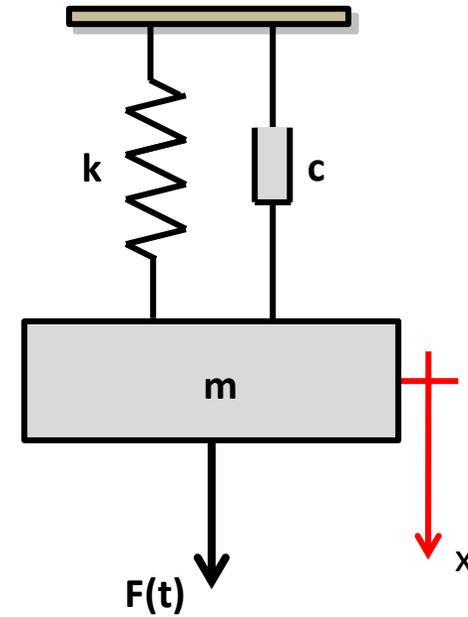
MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Heave em um cilindro
sujeito a ondas

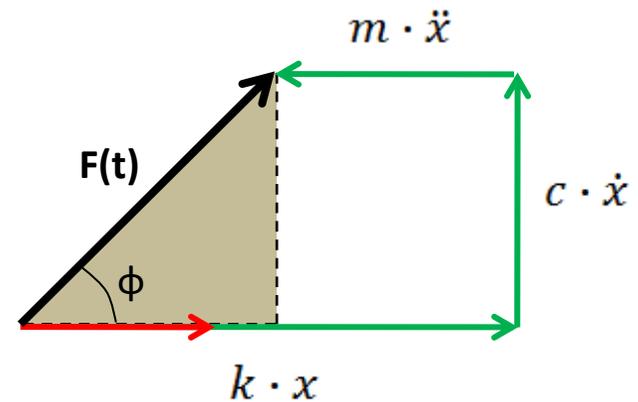


Modelo

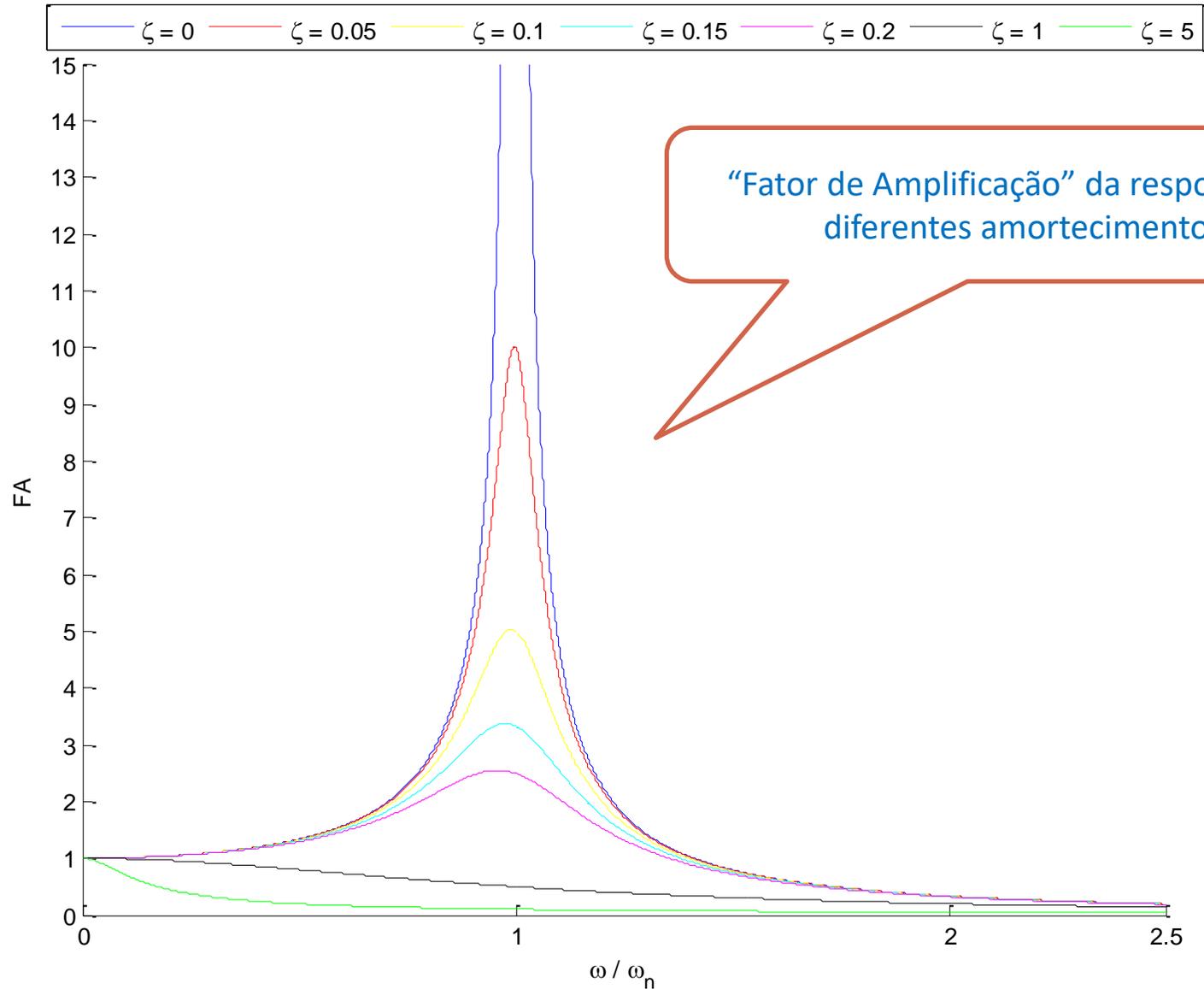
Sistema Massa Mola Amortecedor
Oscilações forçadas



Qual a origem da
excitação forçante?



MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO



O COMPORTAMENTO NO MAR DE UMA EMBARCAÇÃO

Wamit

UNIDADE FLUTUANTE (RAO)

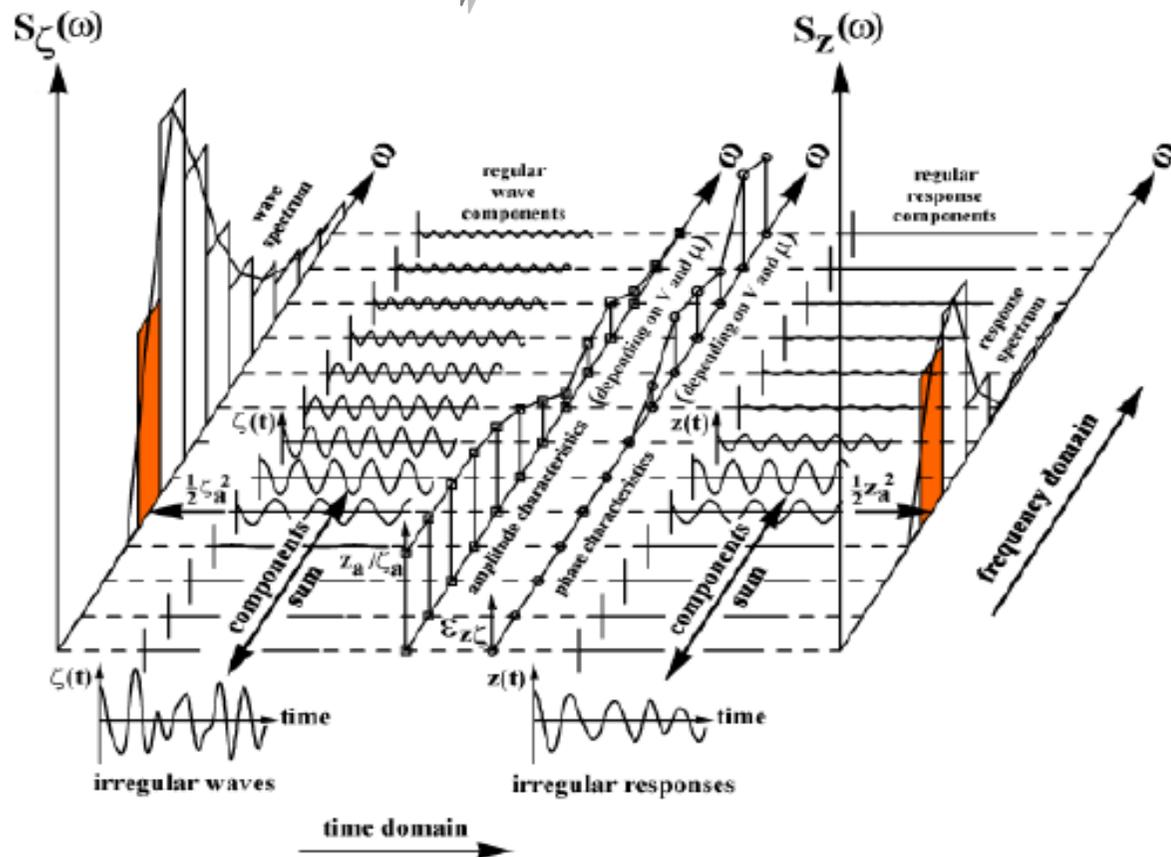
Estatísticas

MAR
(espectros S_{ζ})

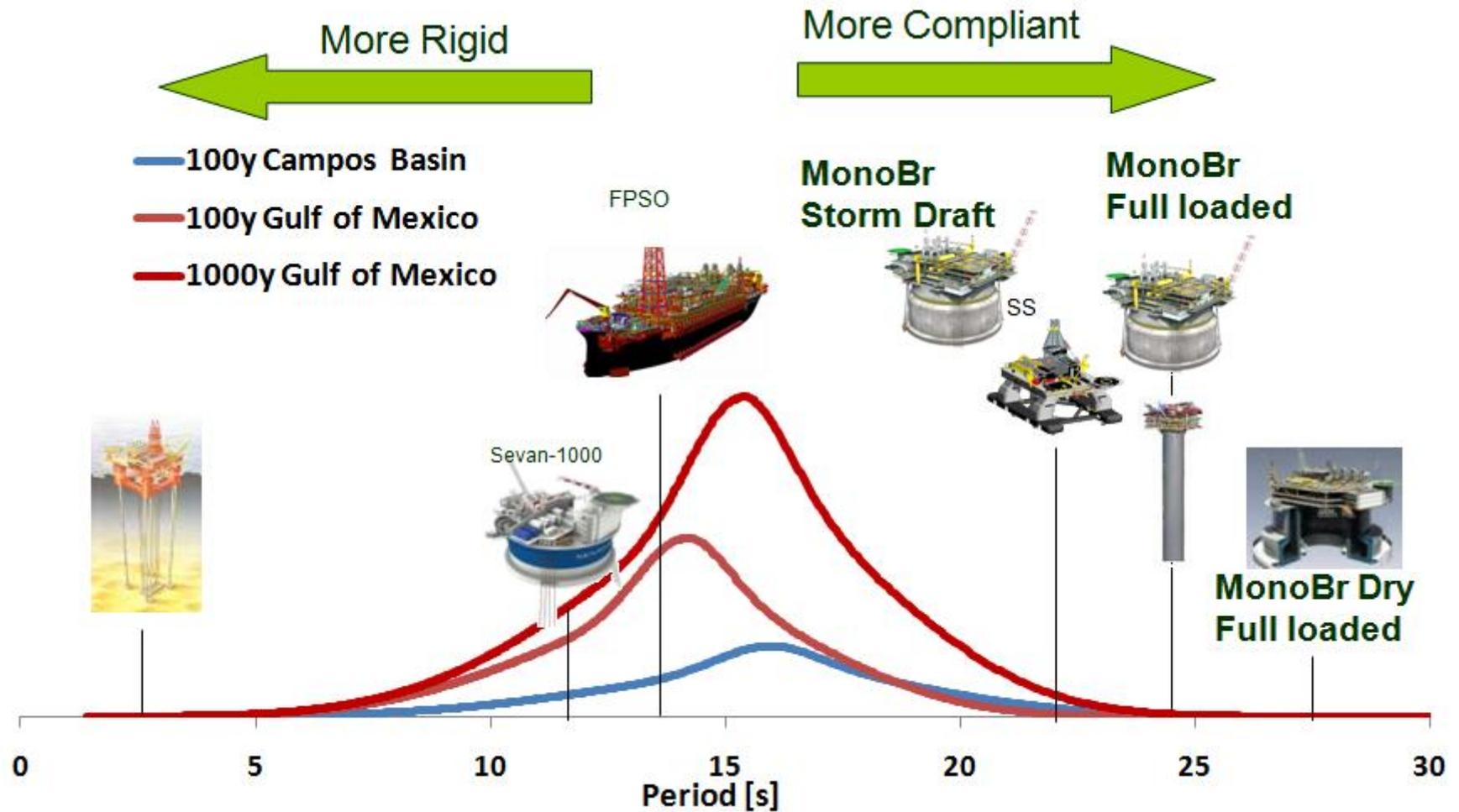
Cruzamento

RESPOSTA DINÂMICA (espectros de
resposta S_z)

$$S_z(\omega) = |RAO(\omega)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega)$$



PERÍODOS NATURAIS DE UNIDADES FLUTUANTES





Por que estudar comportamento no mar?

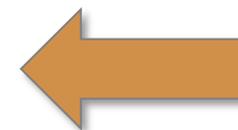
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

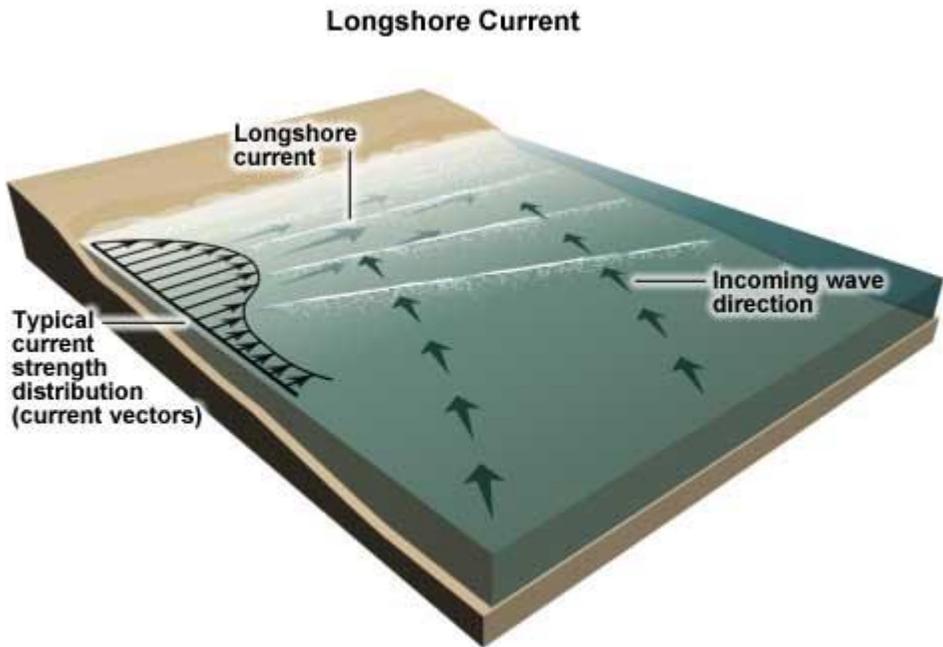
Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

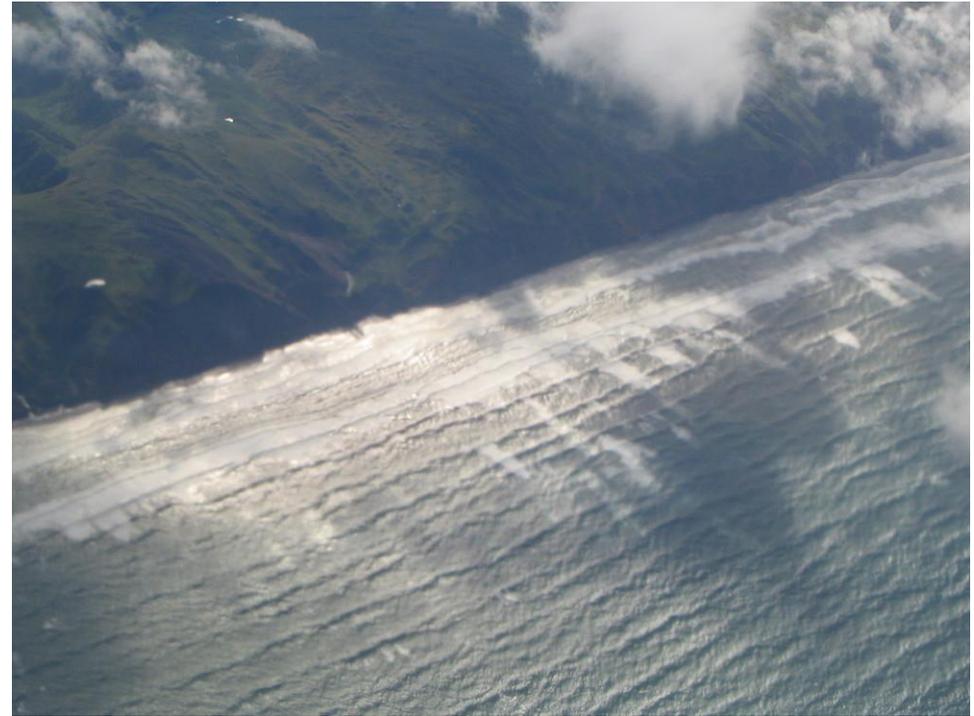
Visita ao TPN



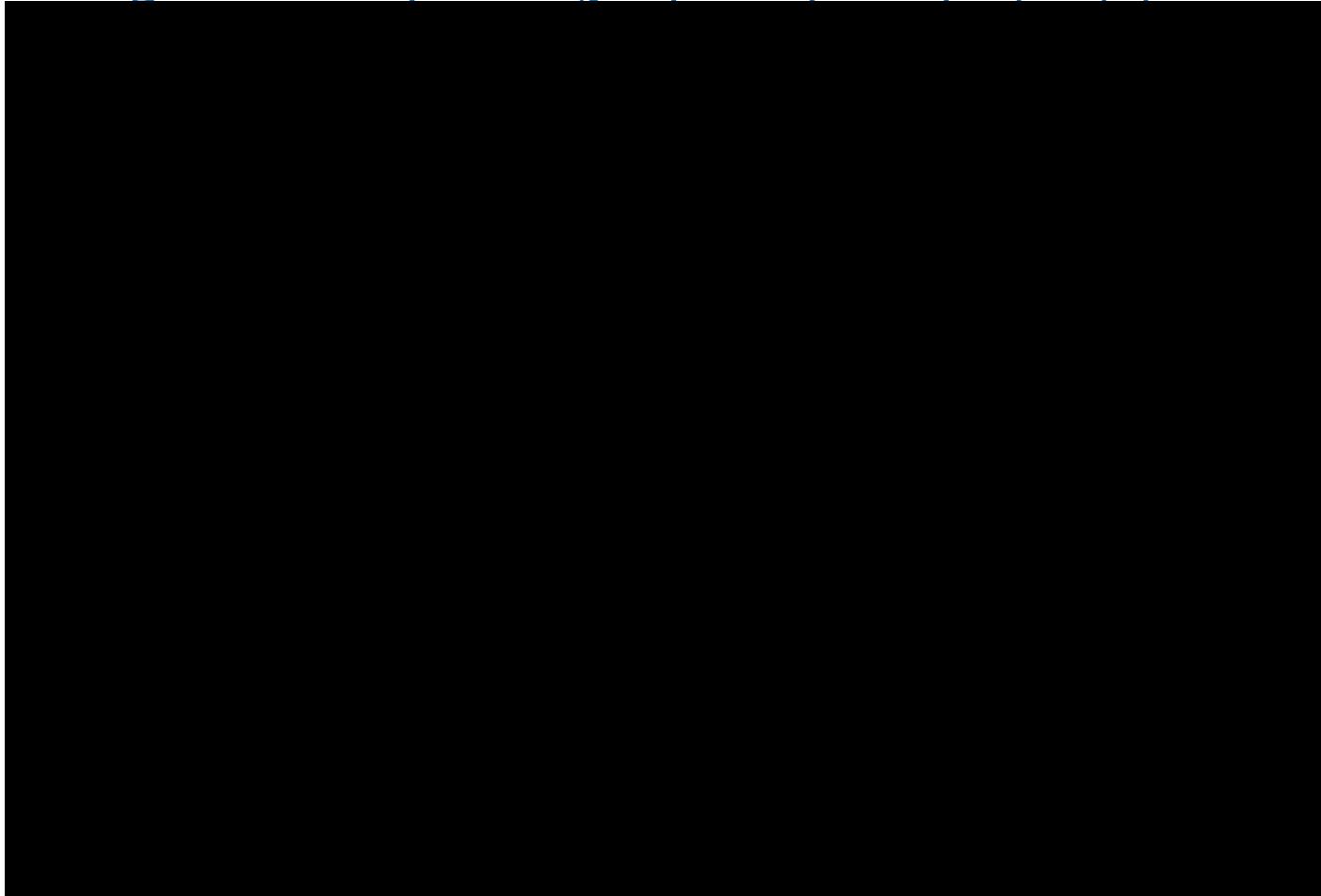
FENÔMENOS: REFRAÇÃO DE ONDAS



©The COMET Program



FENÔMENOS: REFLEXÃO DE ONDAS



Ex.: fenômeno de “*sloshing*” em tanques parcialmente cheios

FENÔMENOS: DIFRAÇÃO DE ONDAS



ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

- Número de onda: $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$

- Declividade de onda: $\frac{H}{\lambda}$

- É possível relacionar o comprimento de uma onda com o seu período, através da chamada relação de dispersão:

$$k = \frac{\omega^2}{g \cdot \tanh(k \cdot h)}$$

- Para profundidades infinitas ($\frac{h}{\lambda} \geq 0,5$ $k \cdot h \rightarrow \infty$ e $\tanh(kh) \rightarrow 1$

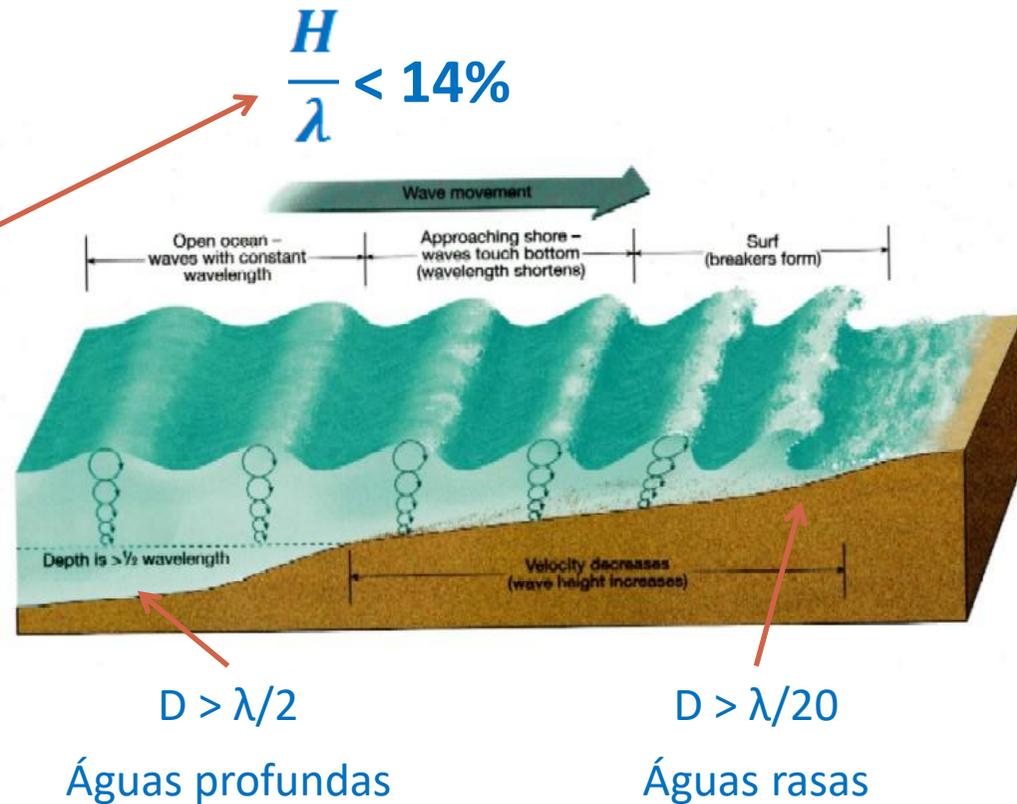
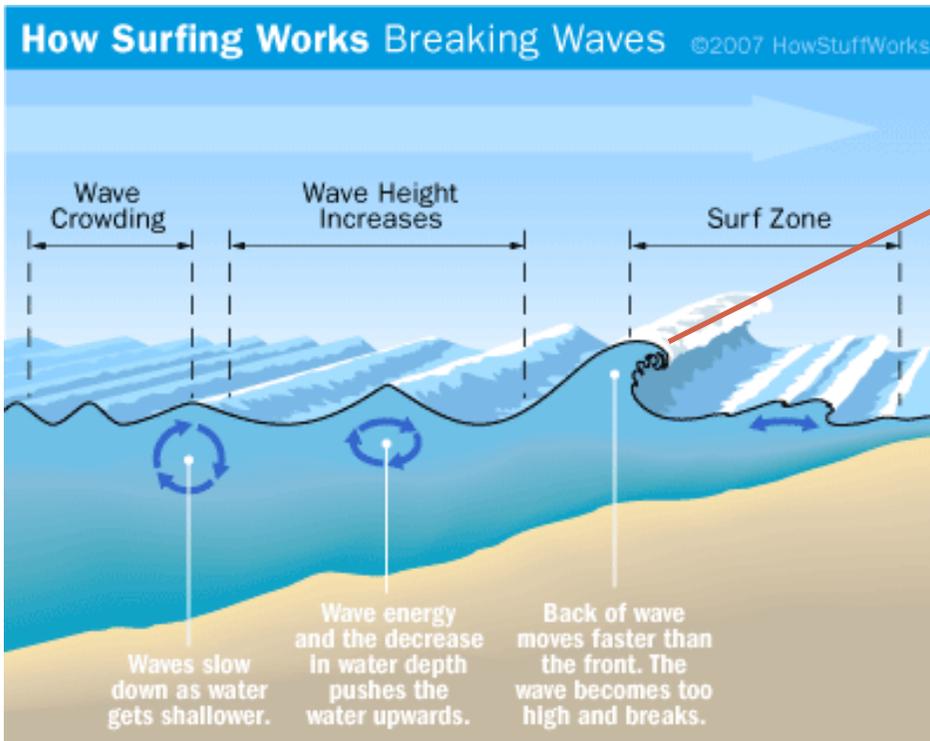
$$k = \frac{\omega^2}{g}$$

EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

$$k = \frac{\omega^2}{g \cdot \tanh(k \cdot h)}$$

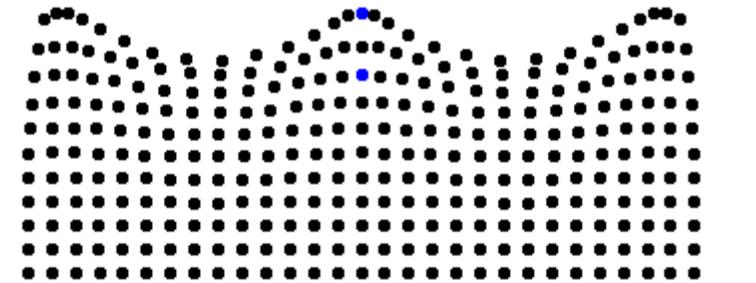
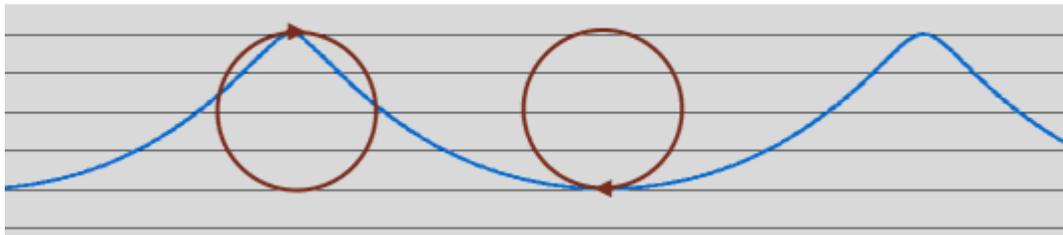
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \rightarrow \quad c = \frac{\lambda}{T}$$

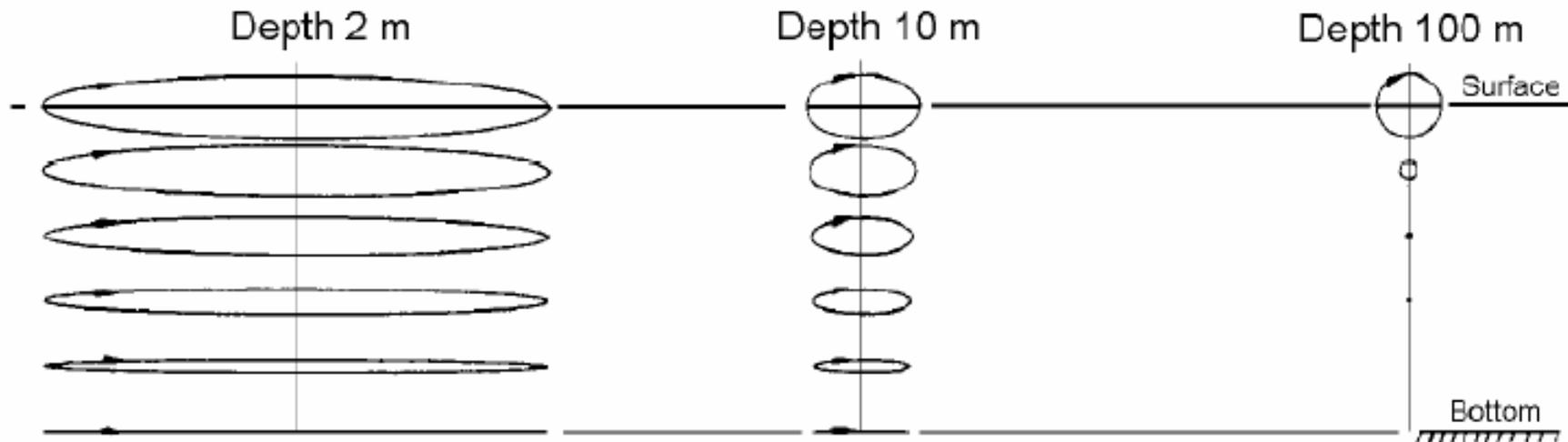


ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

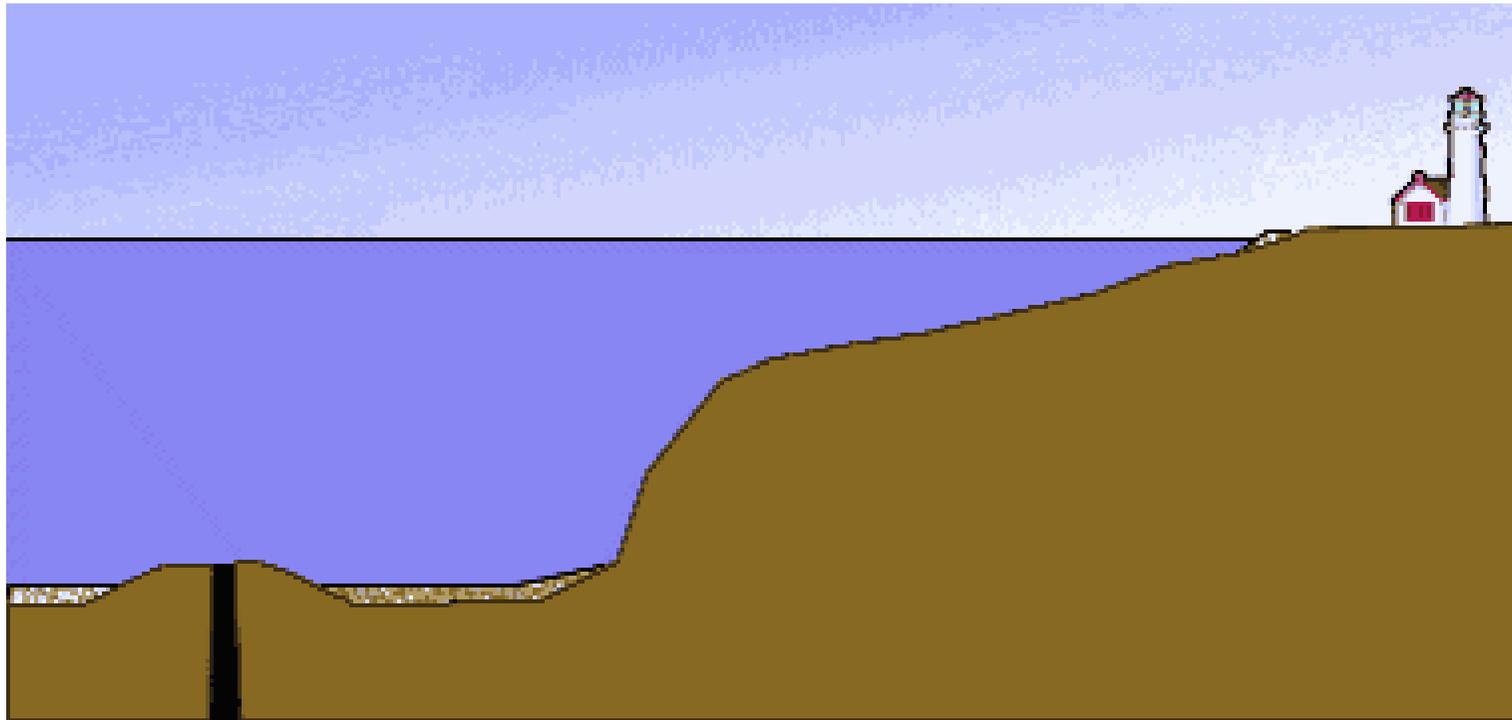
- Nota: as partículas de água se movimentam circularmente; apenas a energia se propaga por grandes extensões.



©1999, Daniel A. Russell



Tsunamis



EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

• Equação de Bernoulli:

- Fluido invíscido;
- Regime estacionário;
- Escoamento incompressível;
- **↑↓ Pressão ⇔ ↓↑ Velocidade;**

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \textit{constante}$$

• Campo de pressões (profundidade infinita):

Pressão hidrostática

(responsável pelo empuxo)

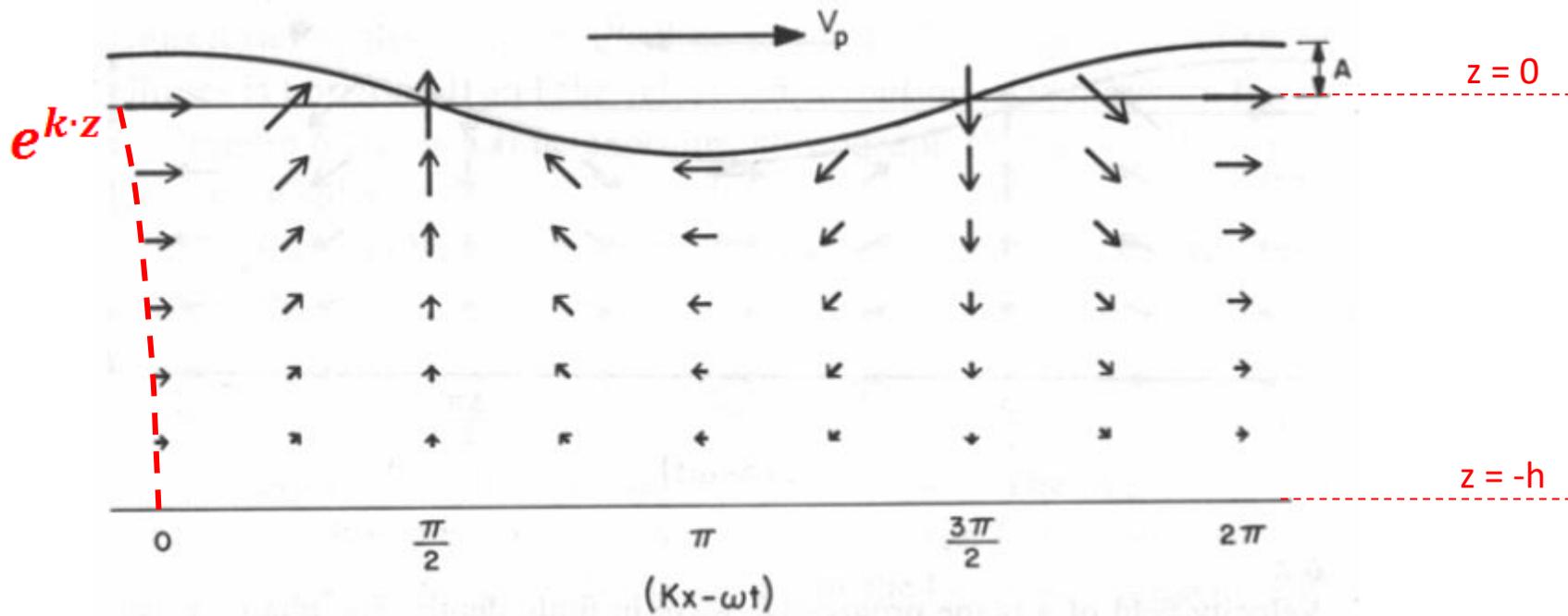
$$p = \underbrace{(p_{atm} - \rho \cdot g \cdot z)}_{\text{Pressão hidrostática}} + \underbrace{\rho \cdot g \cdot \zeta \cdot e^{k \cdot z}}_{\text{Pressão dinâmica}}$$

Pressão dinâmica

(oscilatória com a mesma frequência que as ondas,
responsável pelas forças sobre a embarcação – z
positivo para cima)

EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

- Campo de velocidades (profundidade infinita):



VELOCIDADE DE GRUPO

- A velocidade de grupo corresponde à velocidade com que um “pacote” de ondas se propaga;

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

- Limites assintóticos:
 - Em profundidade infinita ($h \rightarrow \infty$), a velocidade de grupo é metade da velocidade de fase;
 - Em águas rasas ($h \rightarrow 0$), a velocidade de grupo é igual à velocidade de fase.

UM TREM DE ONDAS

- Velocidade de fase x velocidade de grupo;

