



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



PNV-2300: Introdução à Engenharia Naval Comportamento em 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



Por que estudar comportamento no mar?

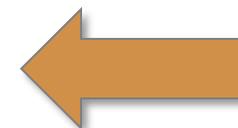
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

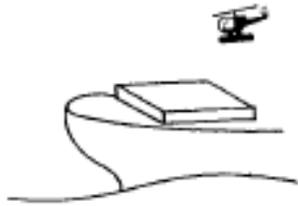
Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN



Por que estudar Comportamento no Mar?



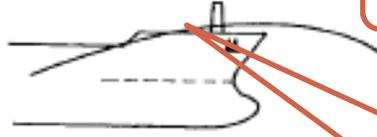
Local motions



Accelerations



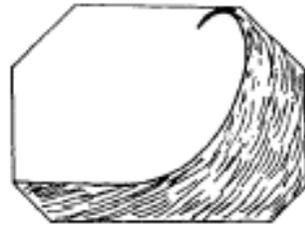
Slamming



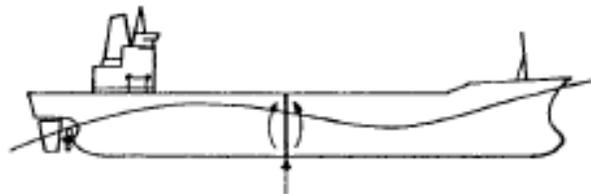
Water on deck



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

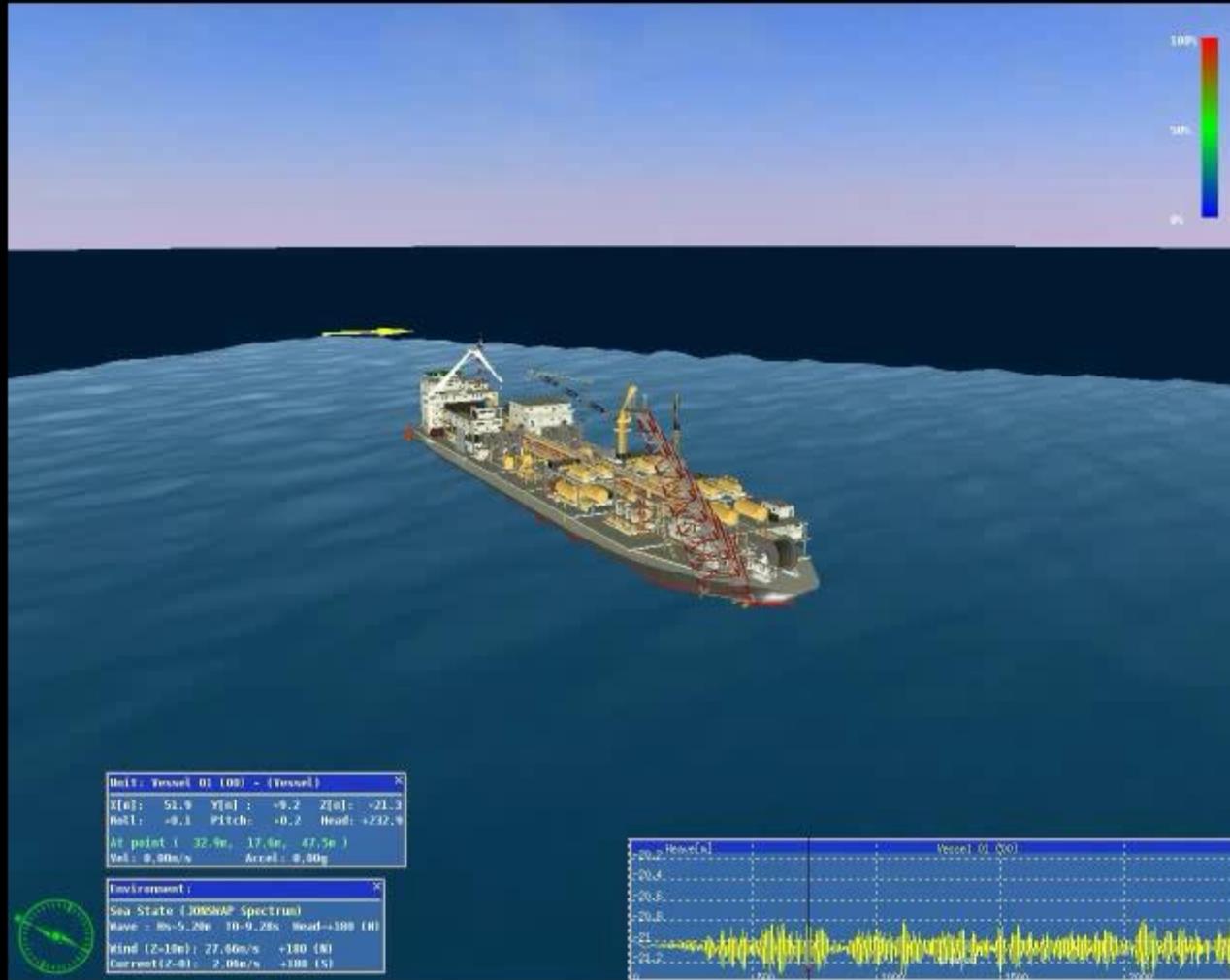
Por que estudar Comportamento no Mar?



Por que estudar Comportamento no Mar?



Por que estudar Comportamento no Mar?





Por que estudar comportamento no mar?

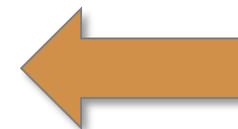
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

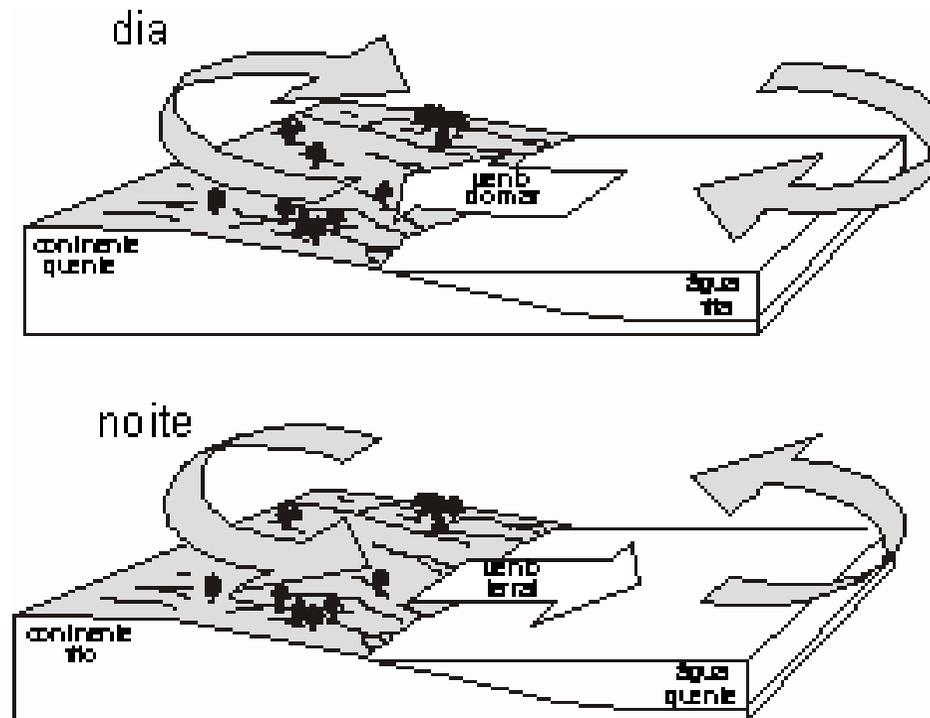
Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN



INTRODUÇÃO: brisas marinhas

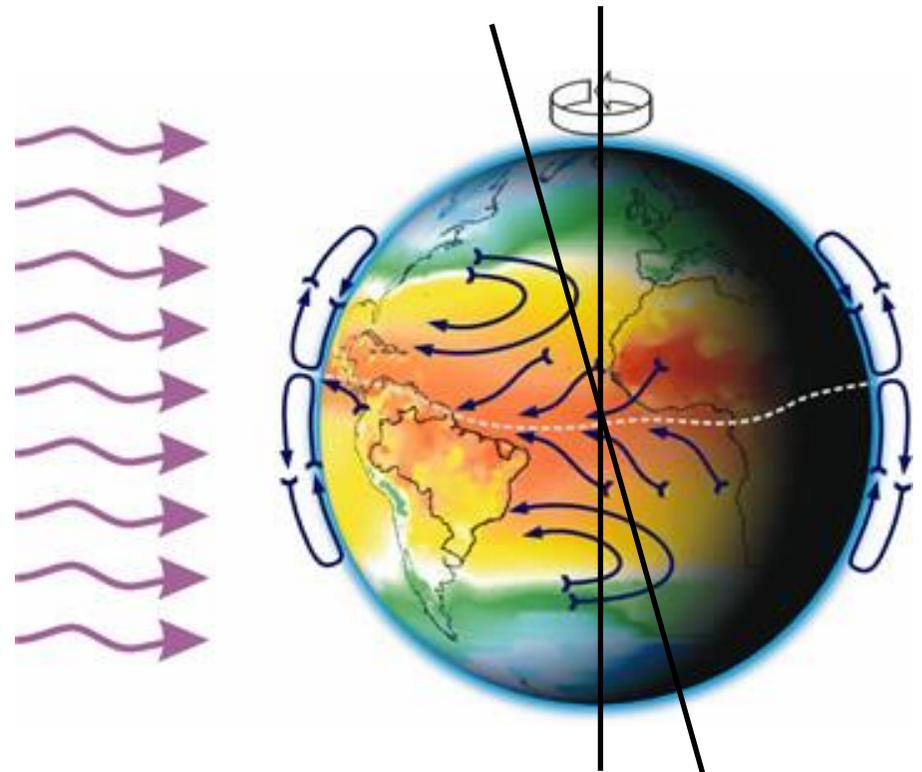
- Os raios solares aquecem a atmosfera de maneira diferenciada;
- O ar mais quente torna-se menos denso, gerando um espaço a ser preenchido por ar menos quente (convecção);
- Esses deslocamentos de massas de ar determinam a formação das brisas marinhas;



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;

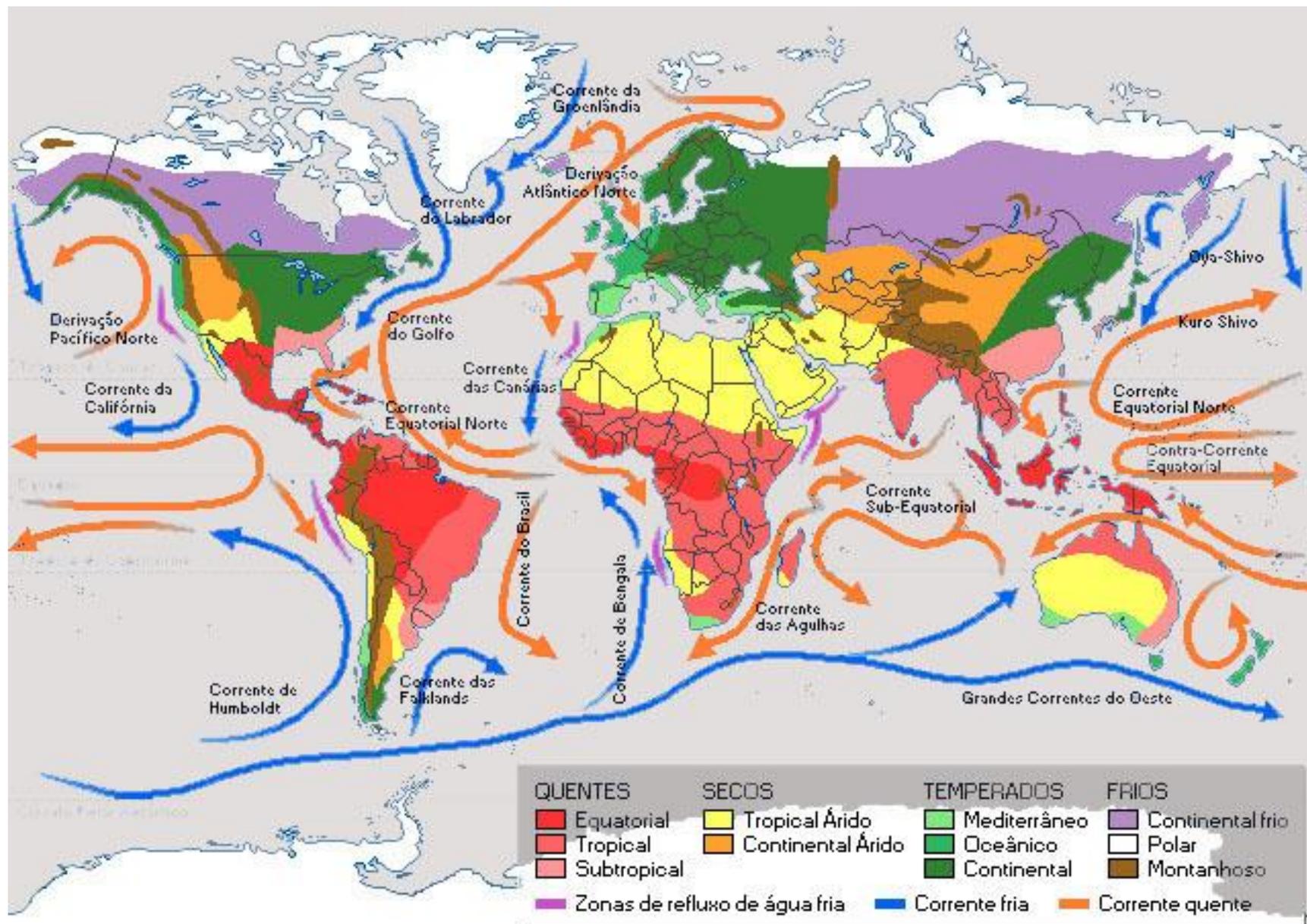
- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o equador, em baixas altitudes;
- Contra-alísios: ventos que sopram do equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.



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 marinhas



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

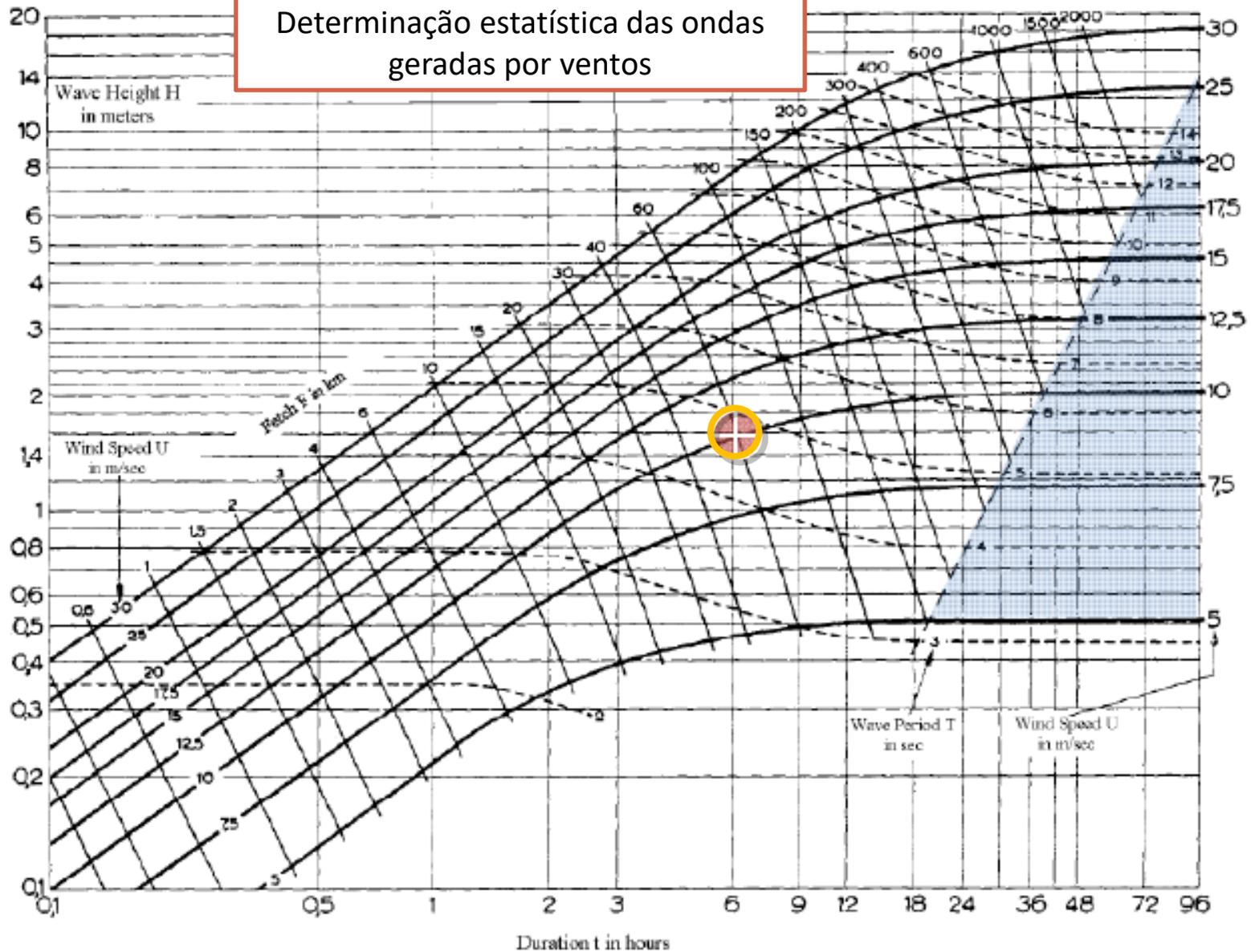
- Os ventos atuando (atrito) sobre a superfície do mar geram uma perturbação (energia sob a forma de ondas) que é capaz de se deslocar por grandes distâncias;



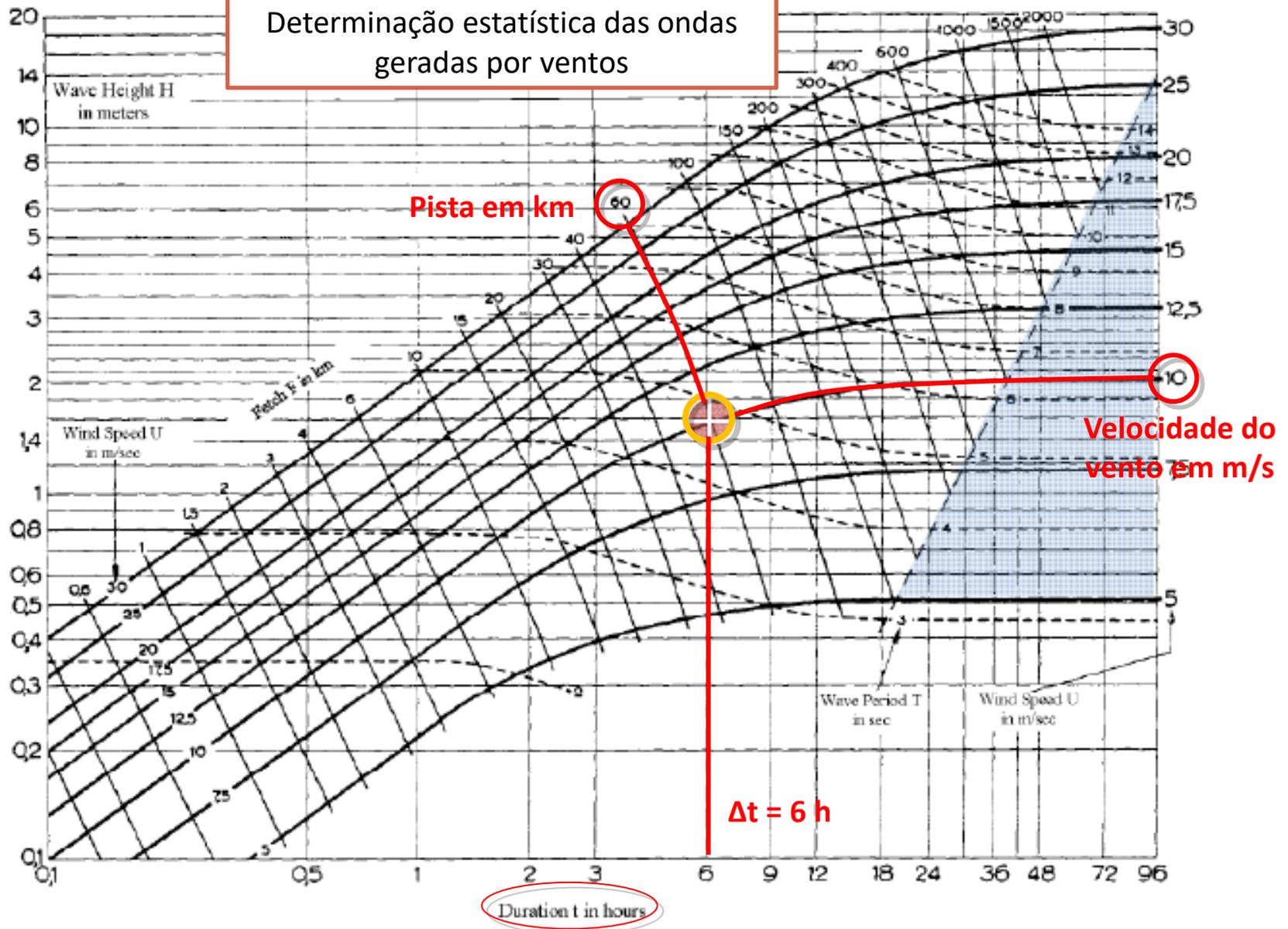
- A intensidade das ondas geradas depende: (1) da velocidade do vento; (2) do tempo de atuação do vento sobre a água; (3) da pista disponível (alcance do vento);

ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

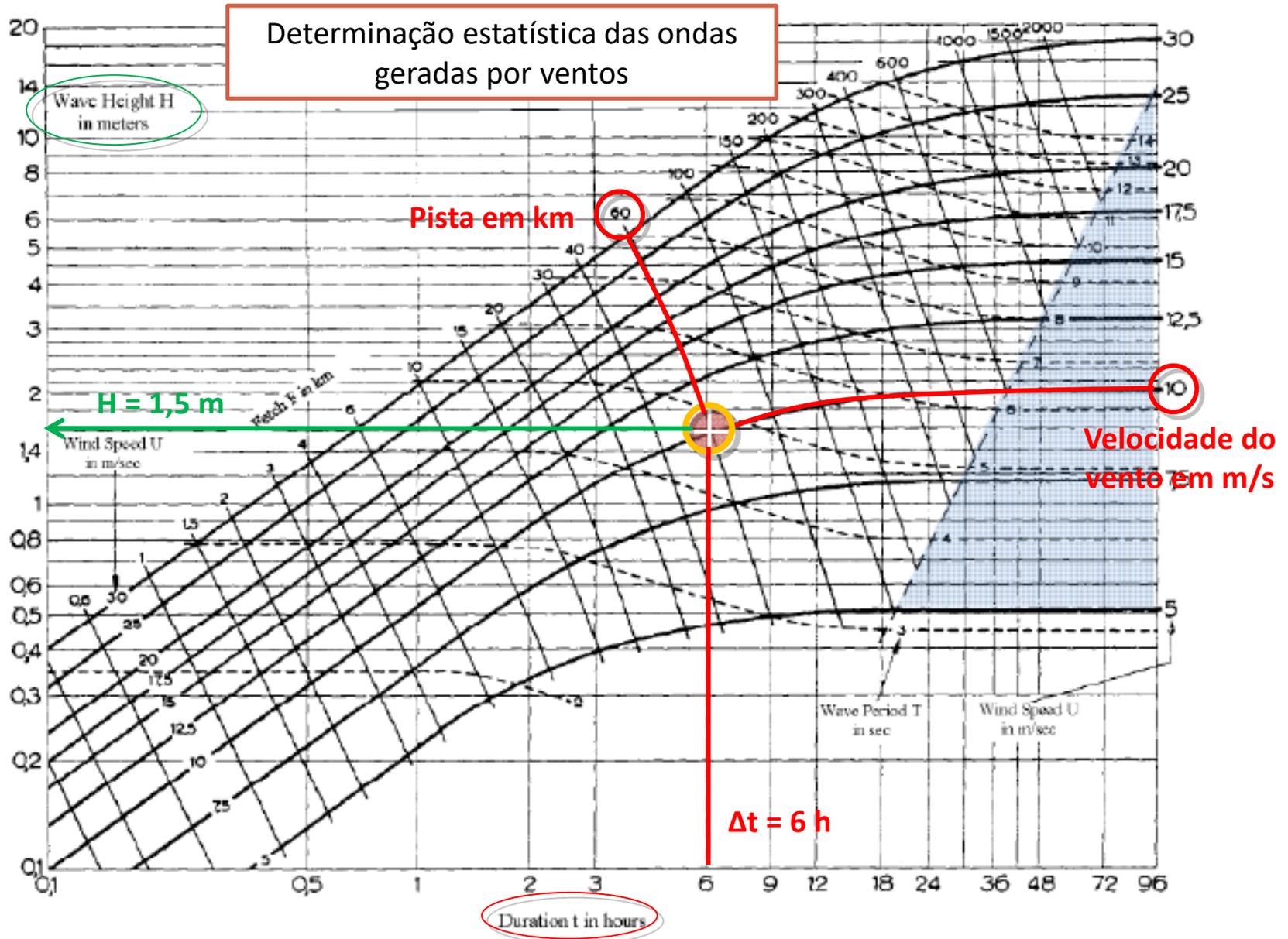
Determinação estatística das ondas geradas por ventos



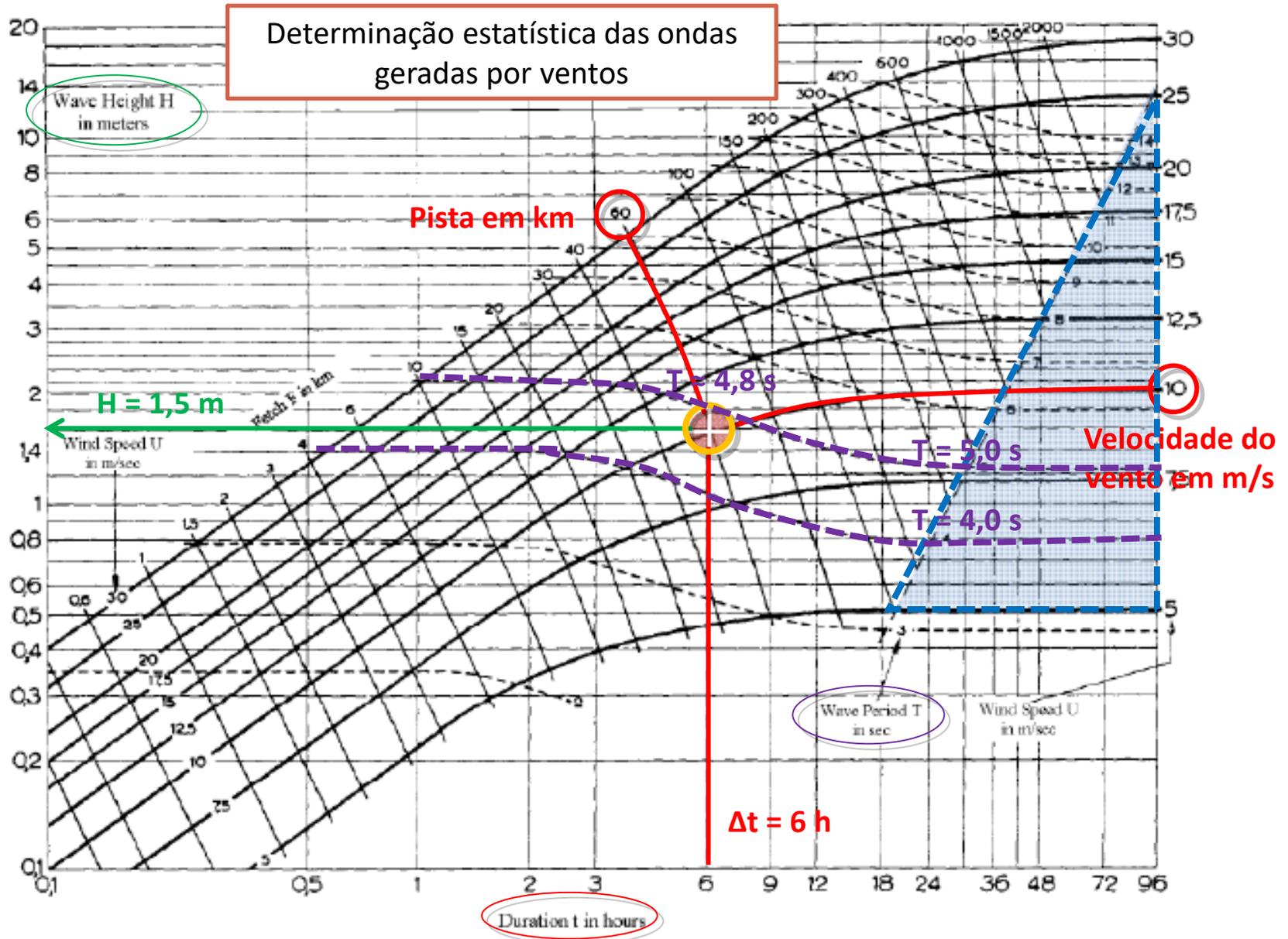
ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE



ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

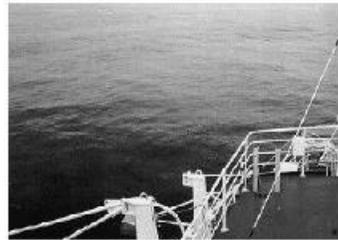


ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE



ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

- Estados de mar:



Beaufort 1



Beaufort 2



Beaufort 3



Beaufort 4



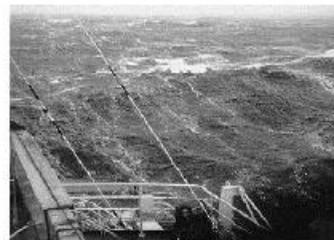
Beaufort 5



Beaufort 6



Beaufort 7



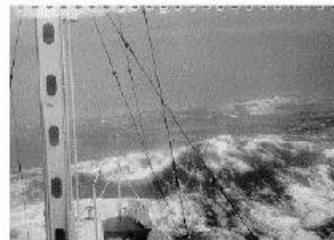
Beaufort 8



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

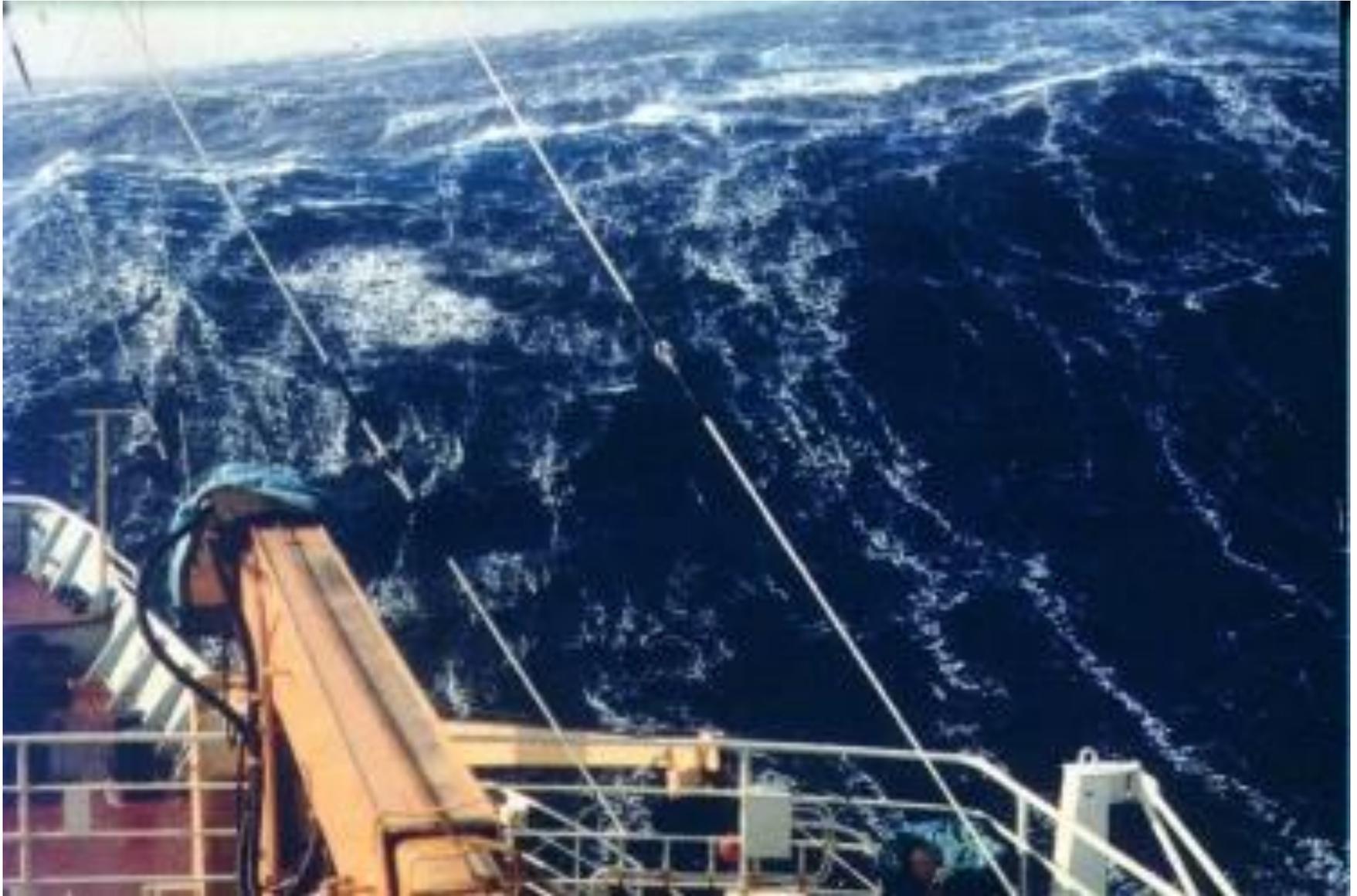
Tempestade

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



Beaufort 11

Ciclone/Tufão

Altura das ondas:37-52 pés



Furacão

Beaufort 12

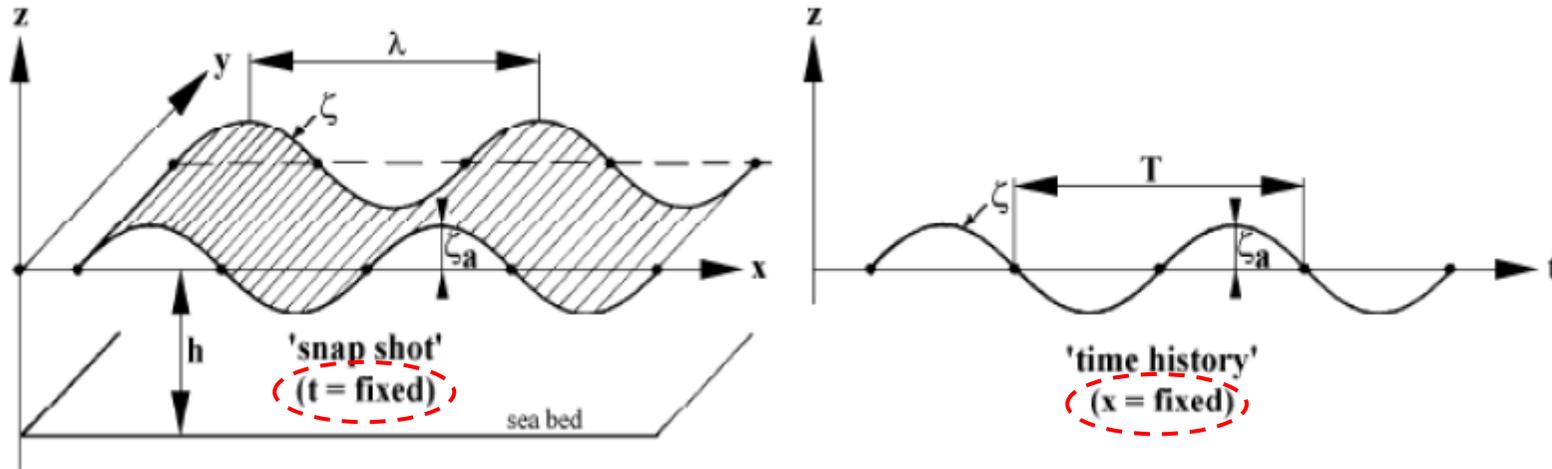
Altura das ondas: 45 ou mais pés



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.

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

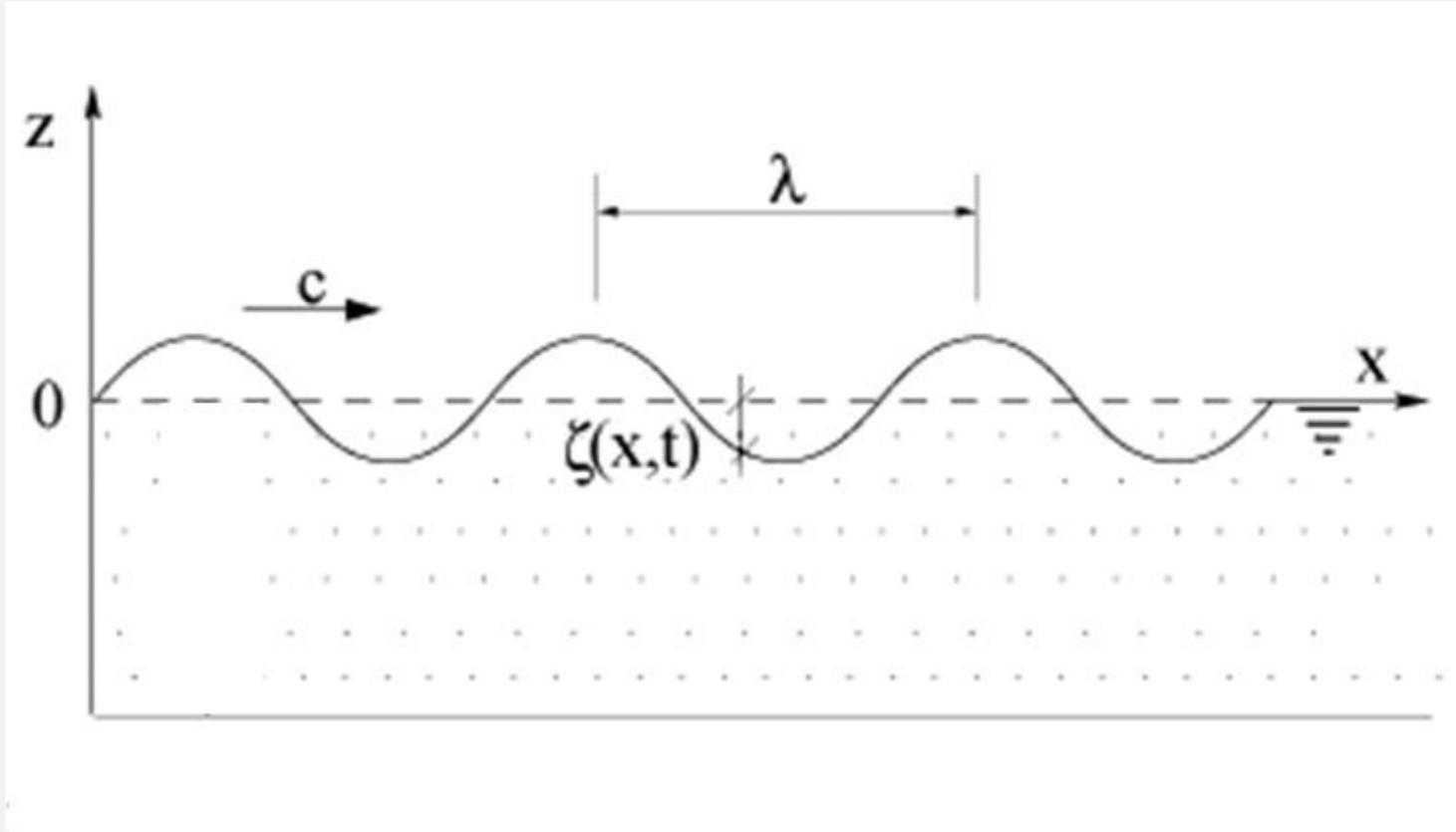


- Nota: a altura de onda H é igual ao DOBRO da amplitude $A = \zeta_a$.
- Velocidade (ou celeridade) de fase (ou de propagação) c :

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

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 $z = \zeta(x,t)$

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

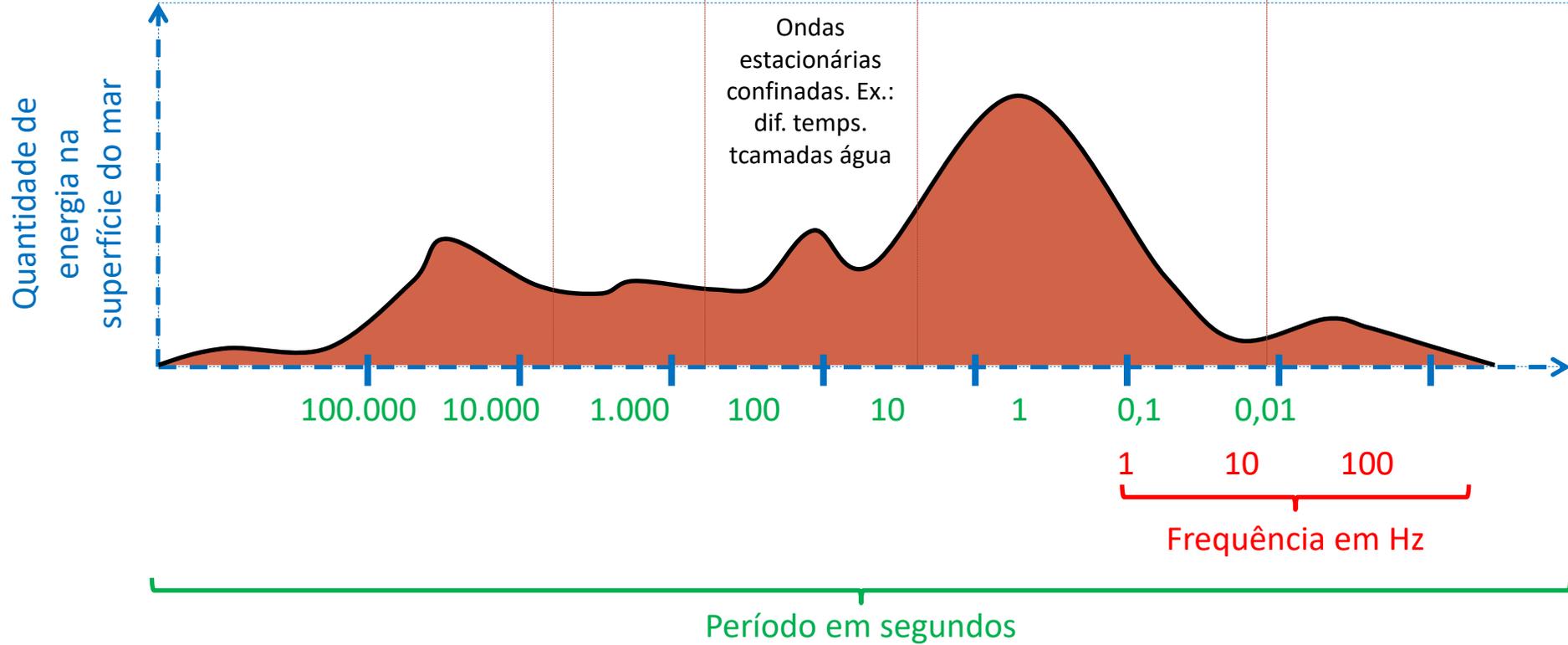
$$\zeta(x,t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

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

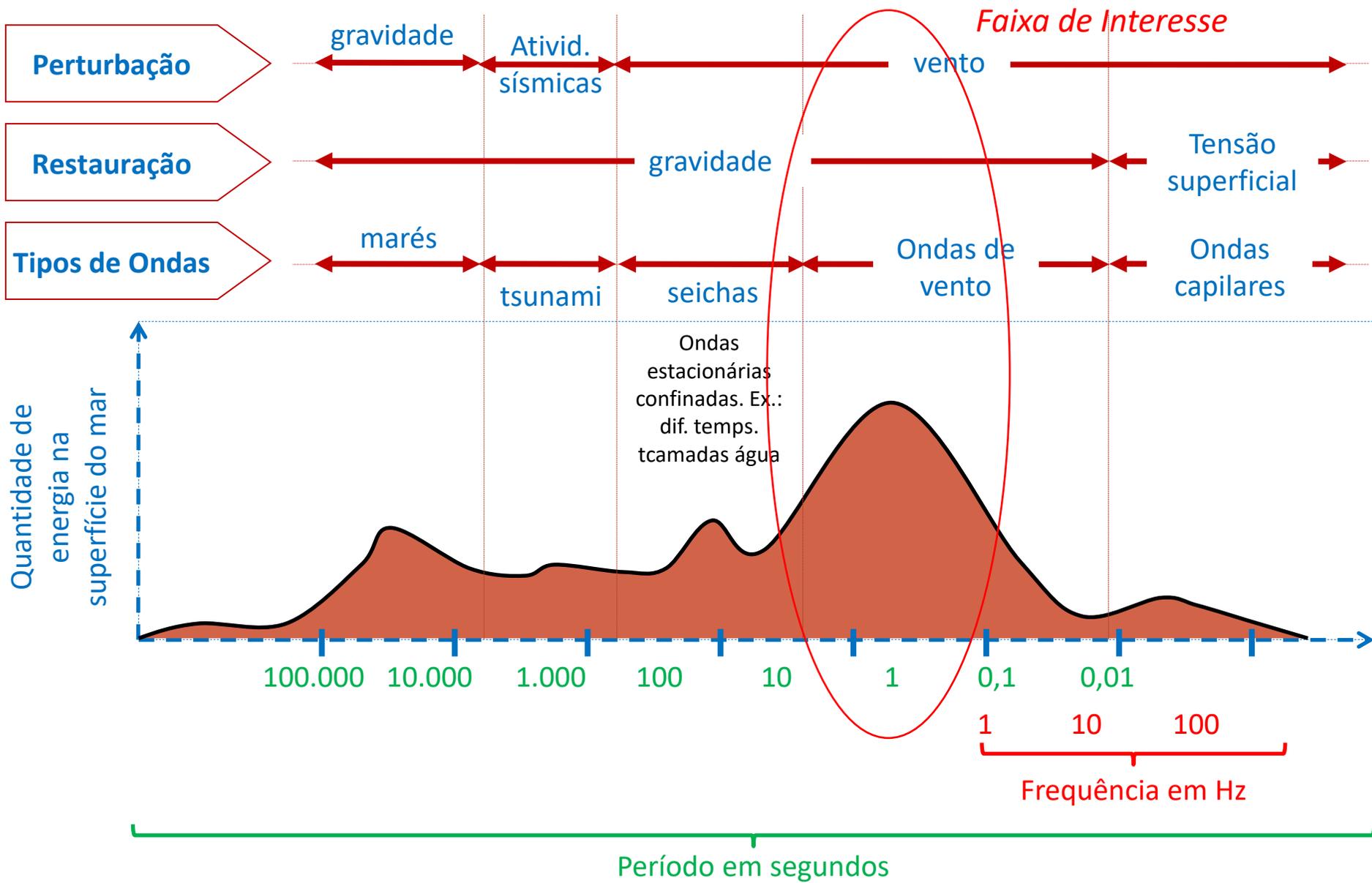
$$\phi(x, z, t) = \frac{gA}{\omega} e^{kz} \text{sen}(kx - \omega t)$$

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

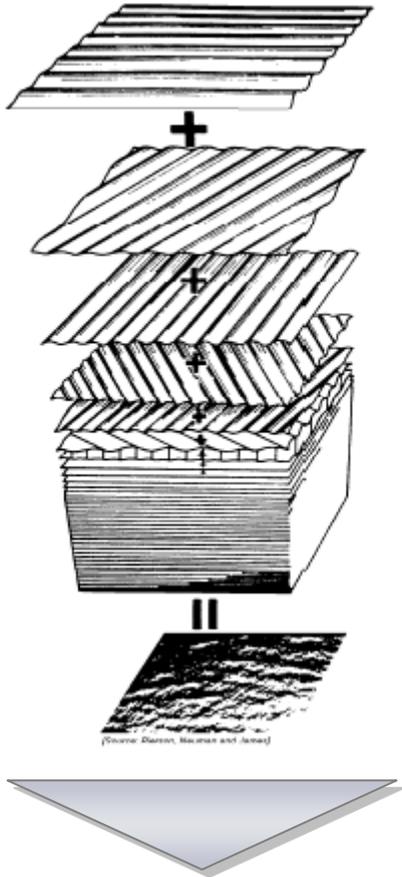
ESPECTRO DE ENERGIA DAS ONDAS NO OCEANO



ESPECTRO DE ENERGIA DAS ONDAS NO OCEANO

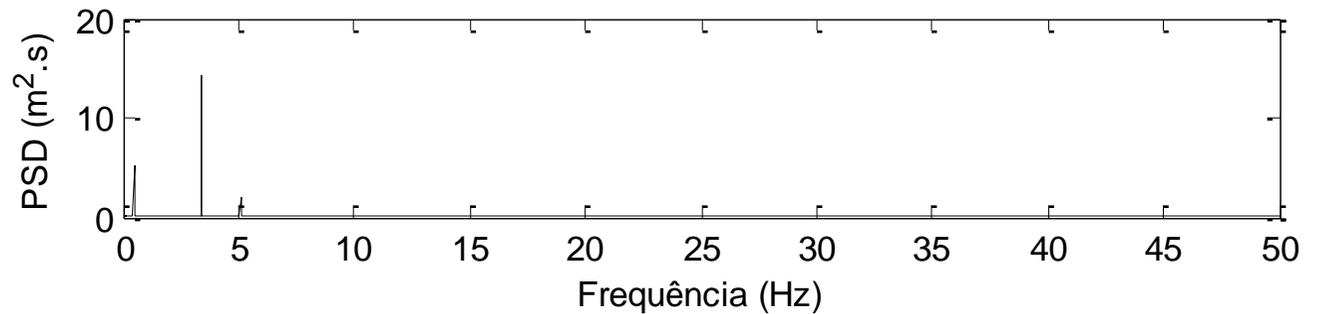
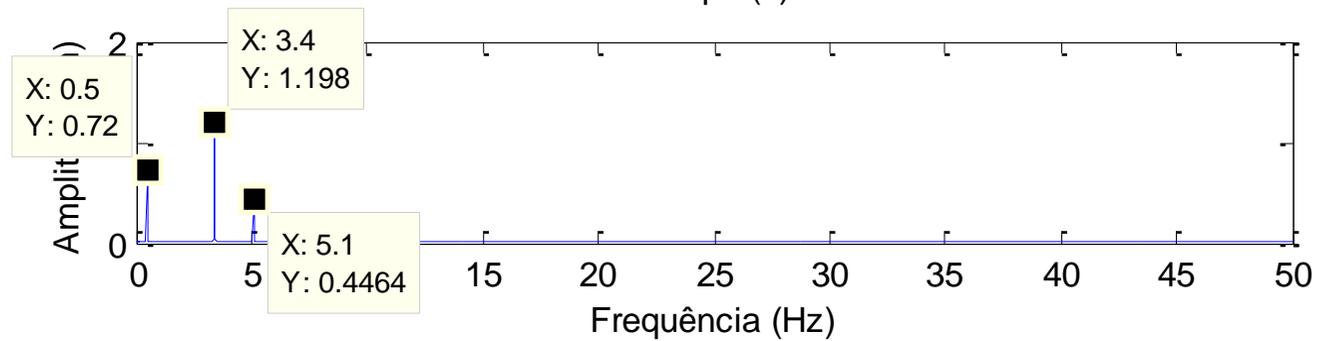
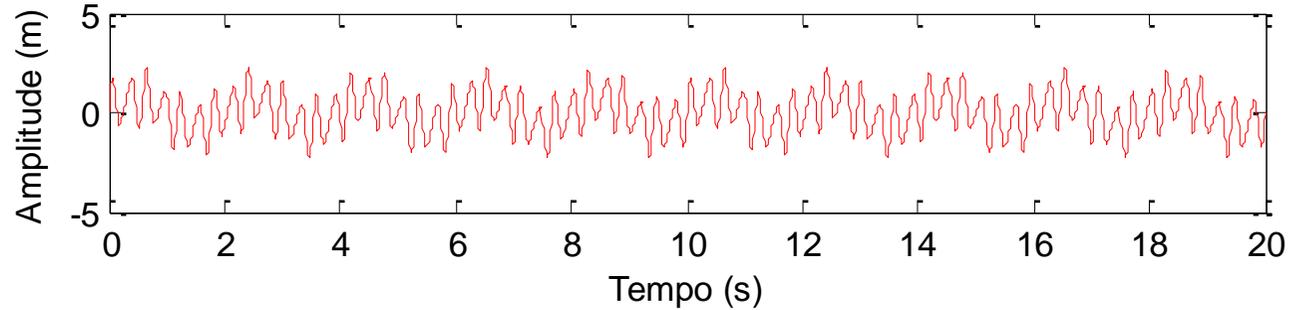


O MAR COMO UMA COMPOSIÇÃO DE ONDAS

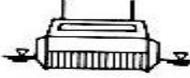
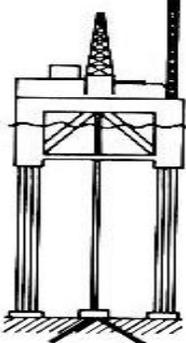
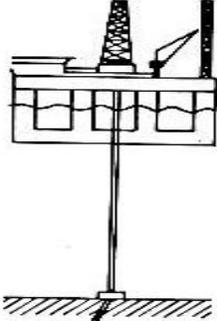
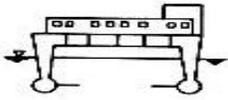


$$\zeta(t) = \sum_{r=0}^N \zeta_r \cos(k_r x - \omega_r t + \varepsilon_r)$$

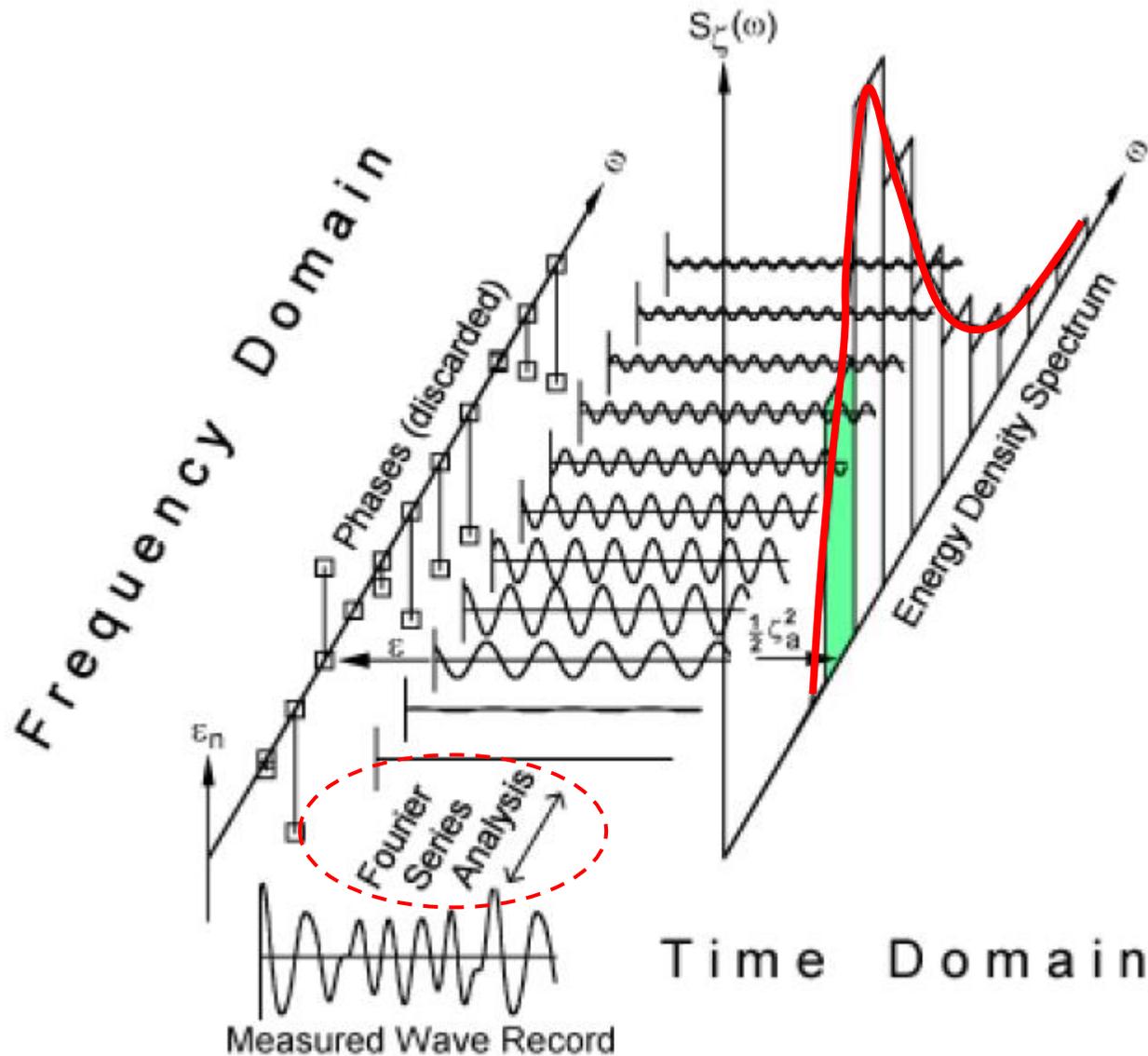
Composição de ondas regulares de frequência 0,5Hz, 3,4Hz e 5,1Hz, e amplitudes 0,72m, 1,20m e 0,45m, respectivamente.



Oscilação de ressonância de *heave* de navios, estruturas *offshore* e embarcações de planeio

Embarcação					
	SES (<i>surface effect ship</i>)	TLP (<i>tension leg plataforma</i>)	Navio de casco simples e Catamaran	Plataforma Semi-submersível	SWATH (<i>small waterplane area twin hull ship</i>)
Período natural de <i>heave</i> :	< 1s	2-4s	4-16s	> 20s	>20s
Força de restauração principal:	Compressibilidade do ar	Elasticidade das amarras	Flutuação	Flutuação	Flutuação
Mecanismo de excitação dominante em torno do período natural de <i>heave</i> :	Forças de onda lineares devido as altas frequências de encontro entre a embarcação e as ondas do mar	Soma não linear de frequências de força de onda	Forças de onda lineares	<i>Swell</i> (ondas de grande comprimento de onda)	Forças de onda lineares devido as baixas frequências de encontro entre a embarcação e as ondas do mar
Amortecimento:	“Efeito de cavalgada (<i>Ride Control</i>)”	Efeito viscoso	Radiação de onda	Efeito viscoso	Controle do fólio

O MAR COMO UMA COMPOSIÇÃO DE ONDAS



O COMPORTAMENTO NO MAR DE UMA EMBARCAÇÃO

Wamit

UNIDADE FLUTUANTE (RAO)

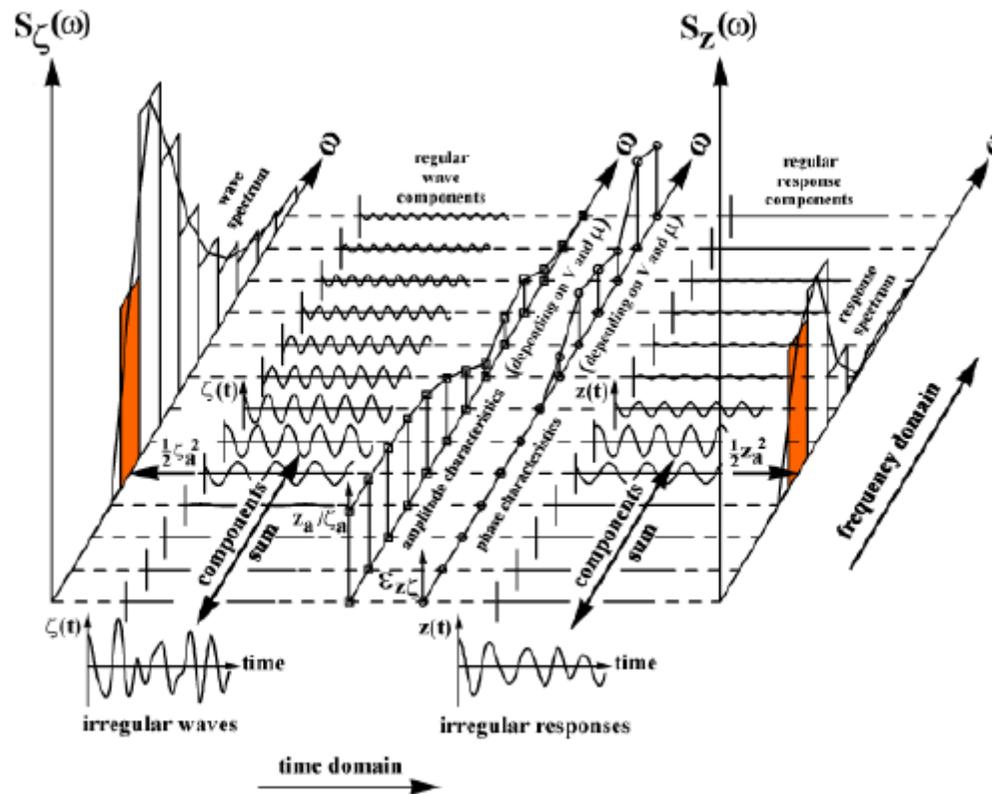
Estatísticas

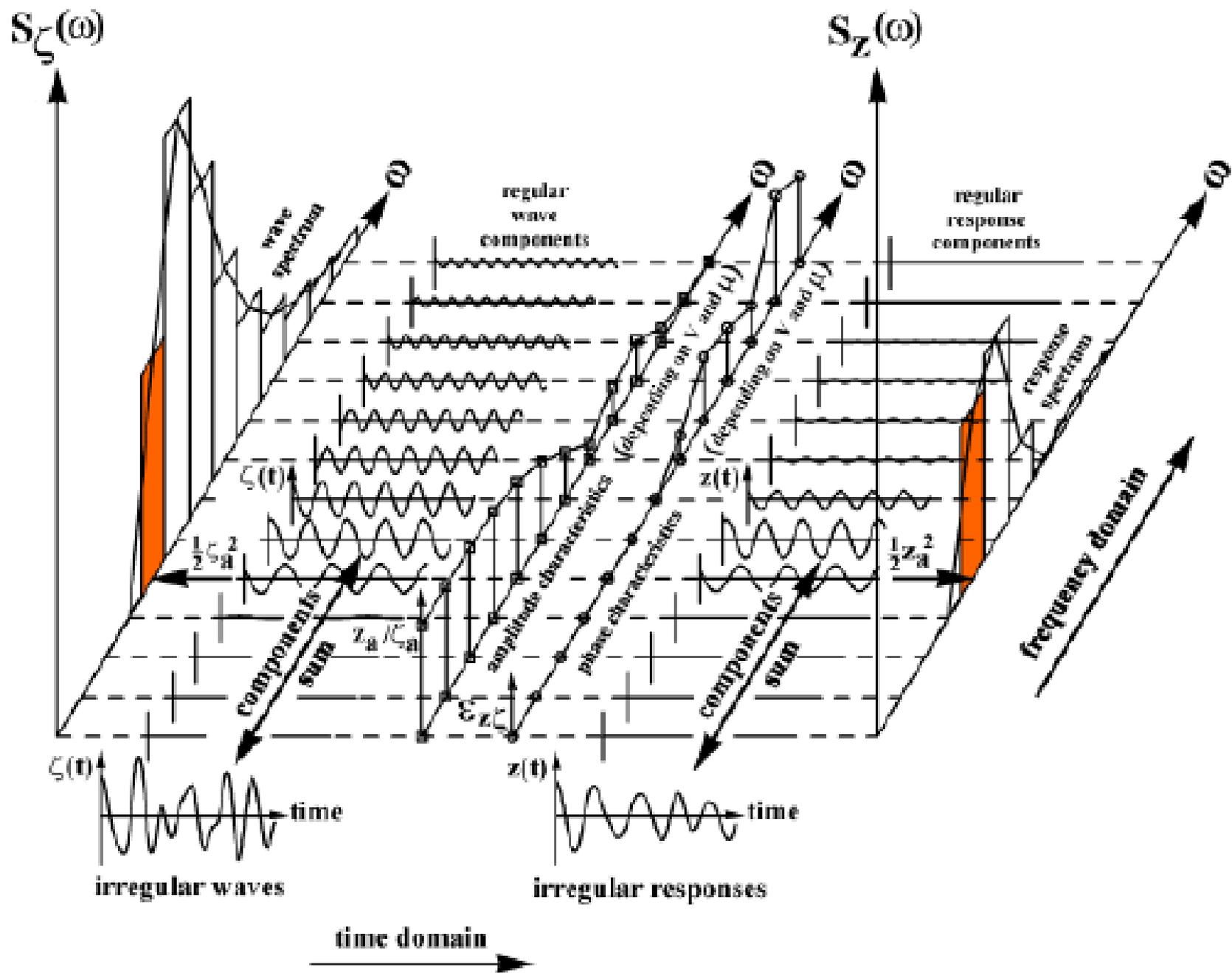
MAR
(espectros S_{ξ})

Cruzamento

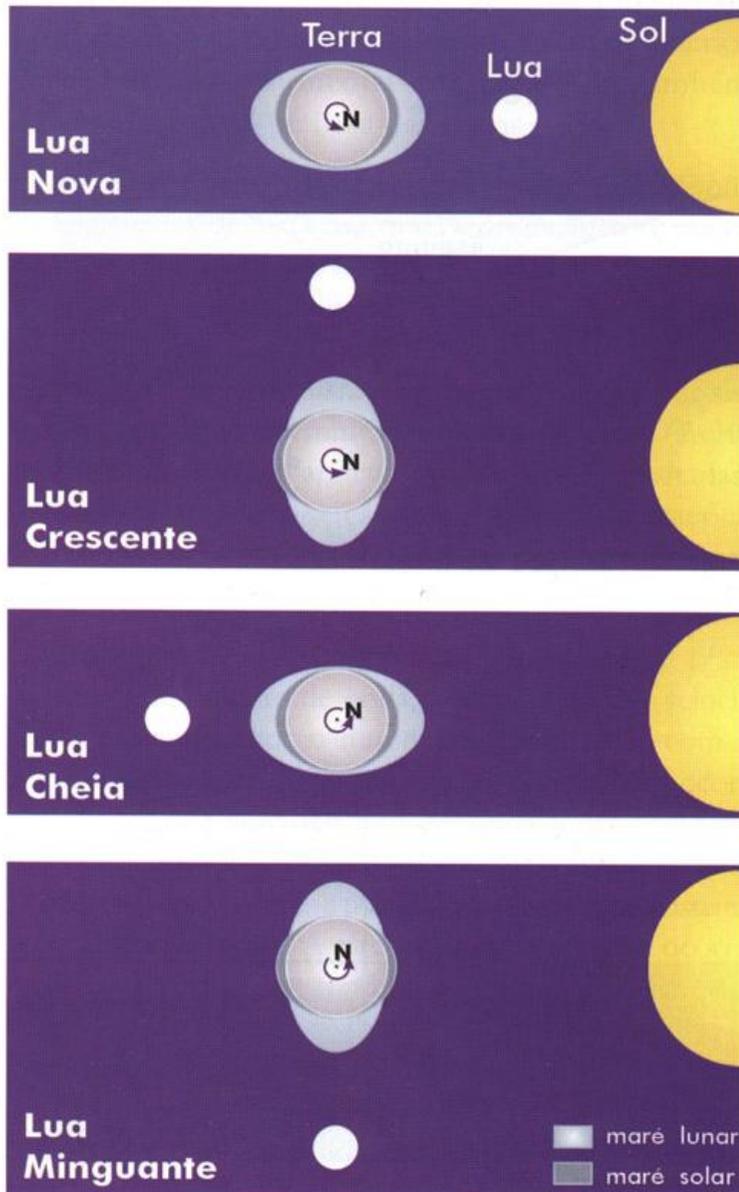
RESPOSTA DINÂMICA (espectros de
resposta S_z)

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





MARÉS



- Preamar e baixa-mar
- Período de ~12h 24min
- 12h (rotação) + 24min (Lua)
- Dia lunar: 24h 48min
- Importância no lançamento de navios e TLPs



Por que estudar comportamento no mar?

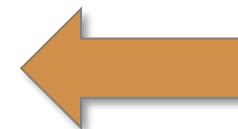
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

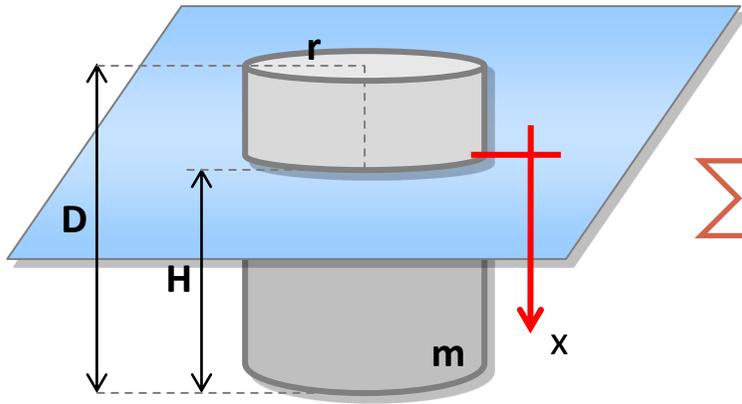
Interação entre o sistema oceânico e o mar

Visita ao TPN

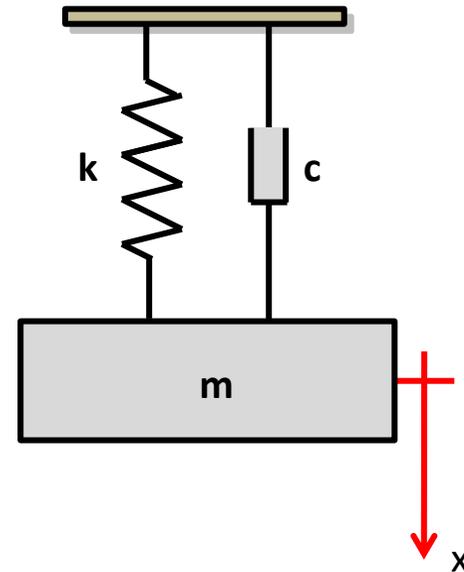


MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Heave em um cilindro



Sistema Massa Mola Amortecedor

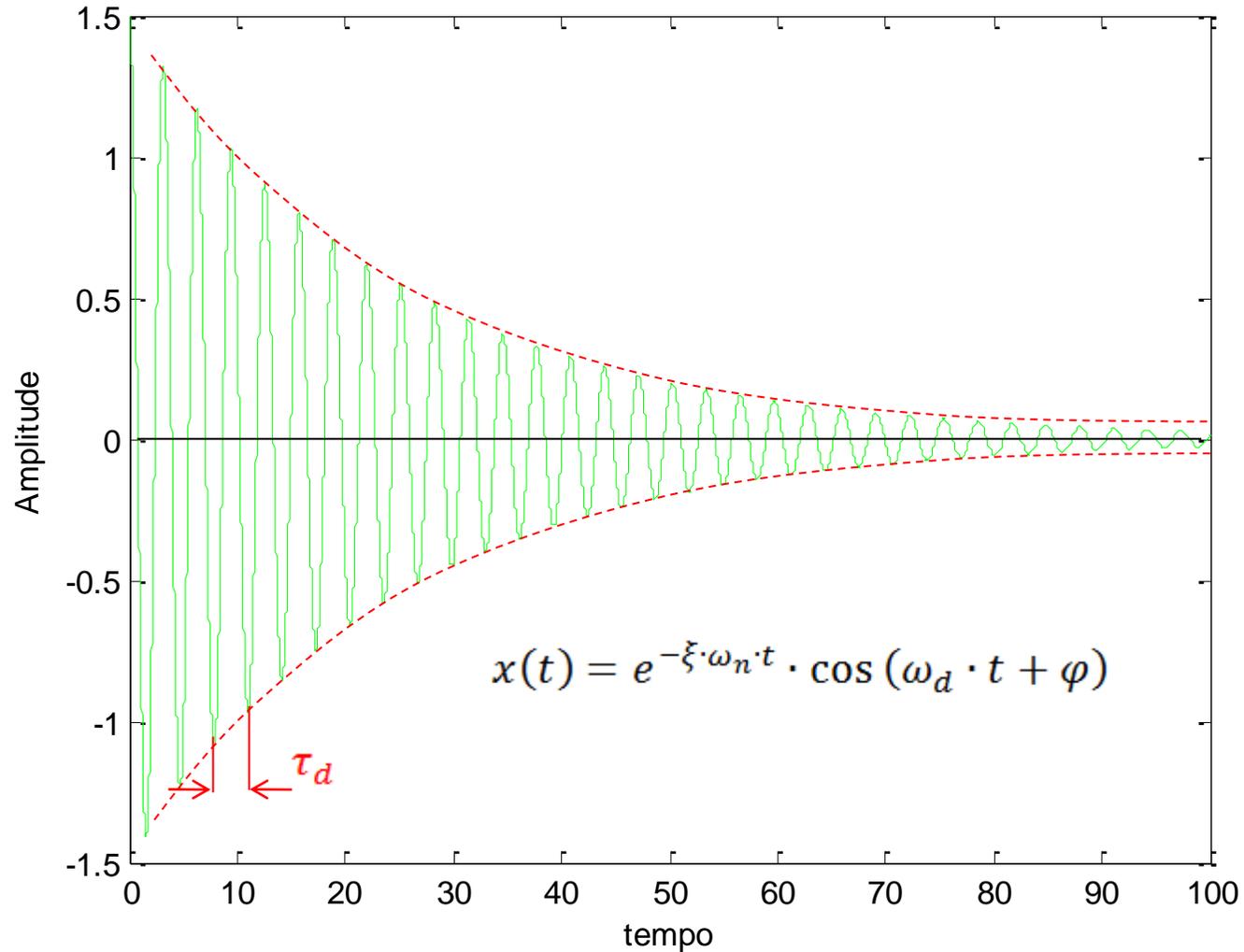


Qual a origem da restauração? E do amortecimento?

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

MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

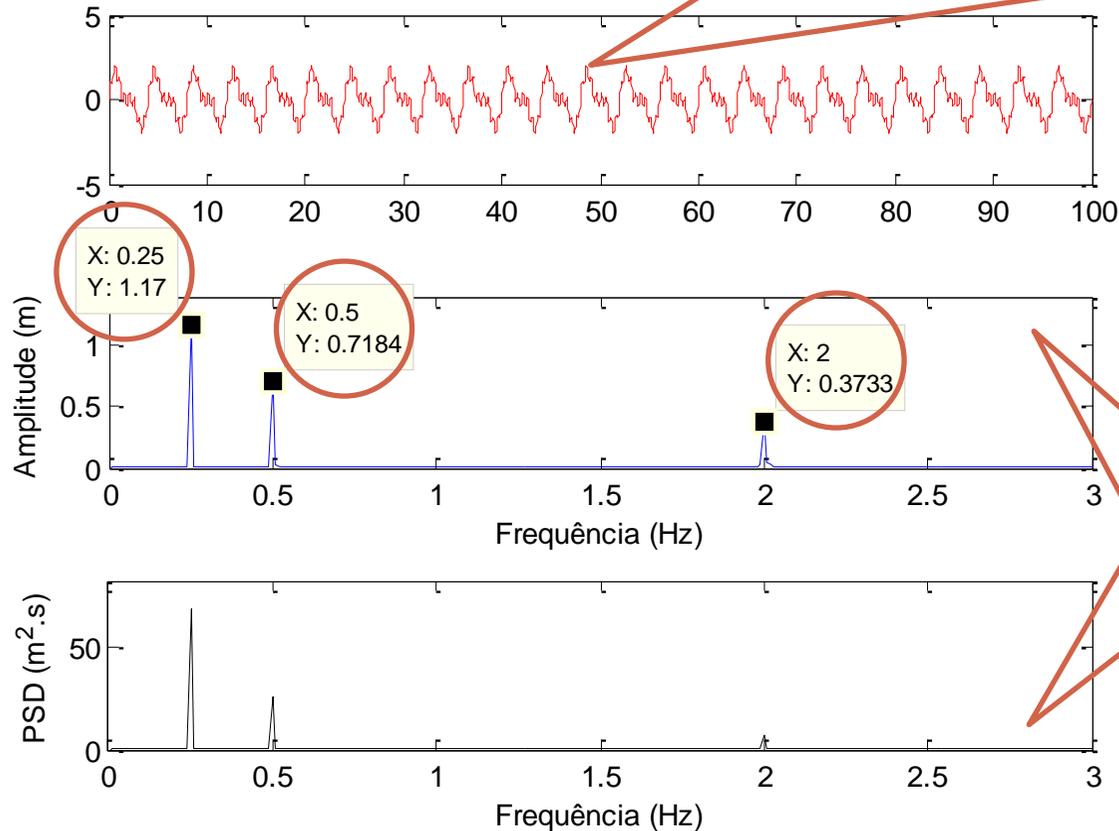
Resposta de um sistema livre de 1GLno domínio do tempo



MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

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

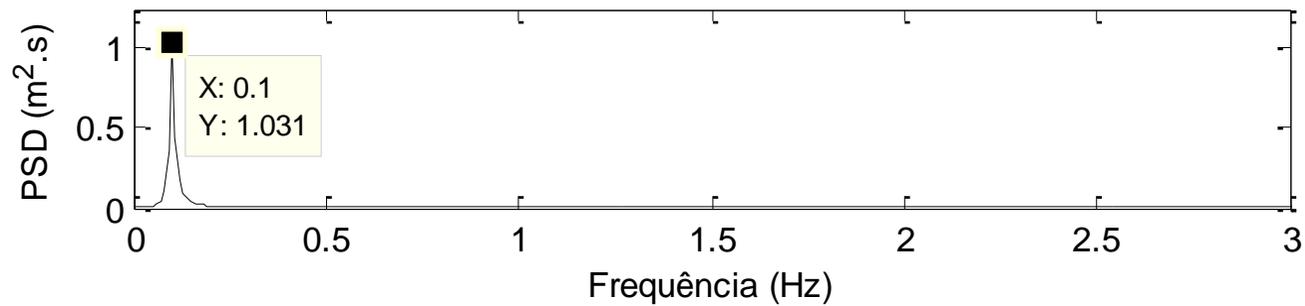
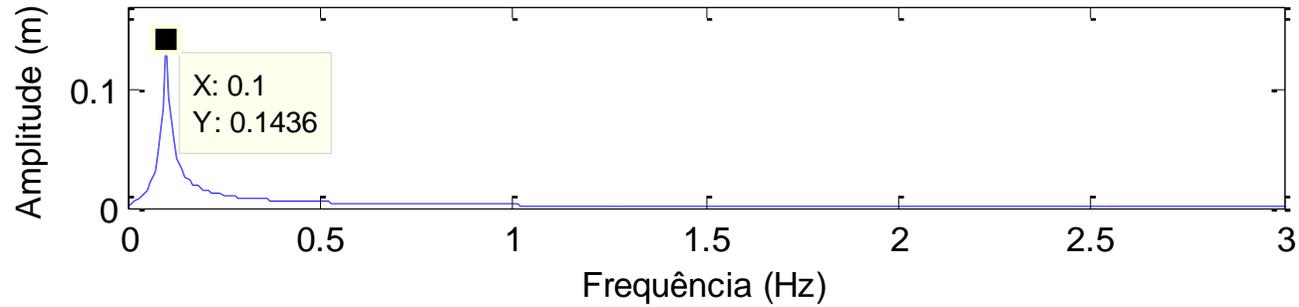
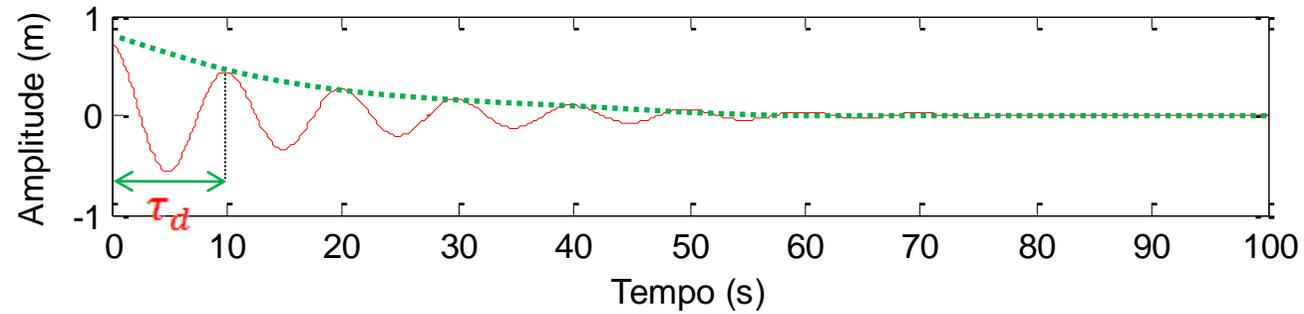
$$y = .72 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (1/T) \cdot t) + .38 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (4/T) \cdot t) + 1.17 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (.5/T) \cdot t)$$



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

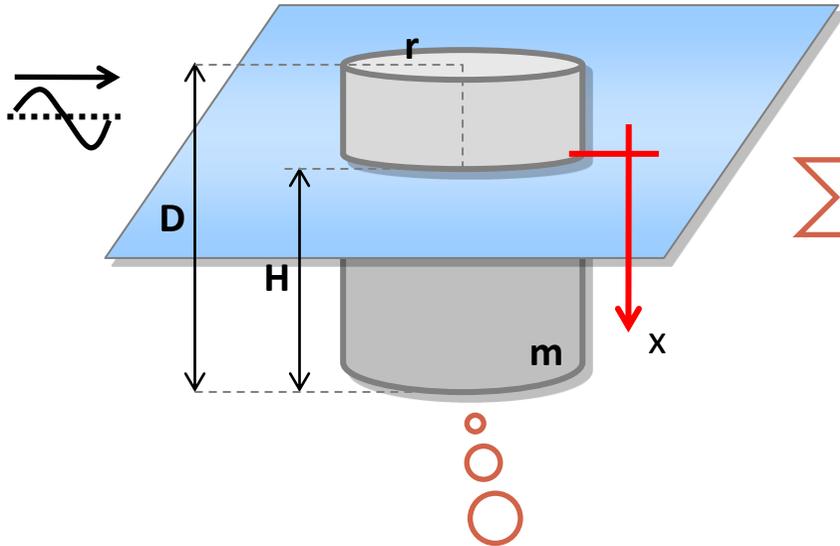
MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Transformada de Fourier de um “decaimento artificial”



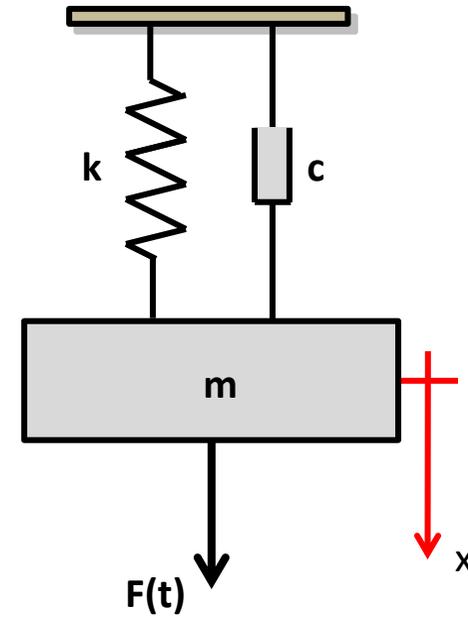
MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO

Heave em um cilindro
sujeito a ondas

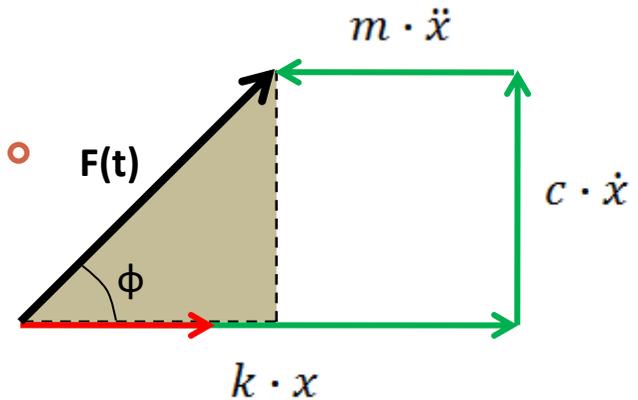


Modelo

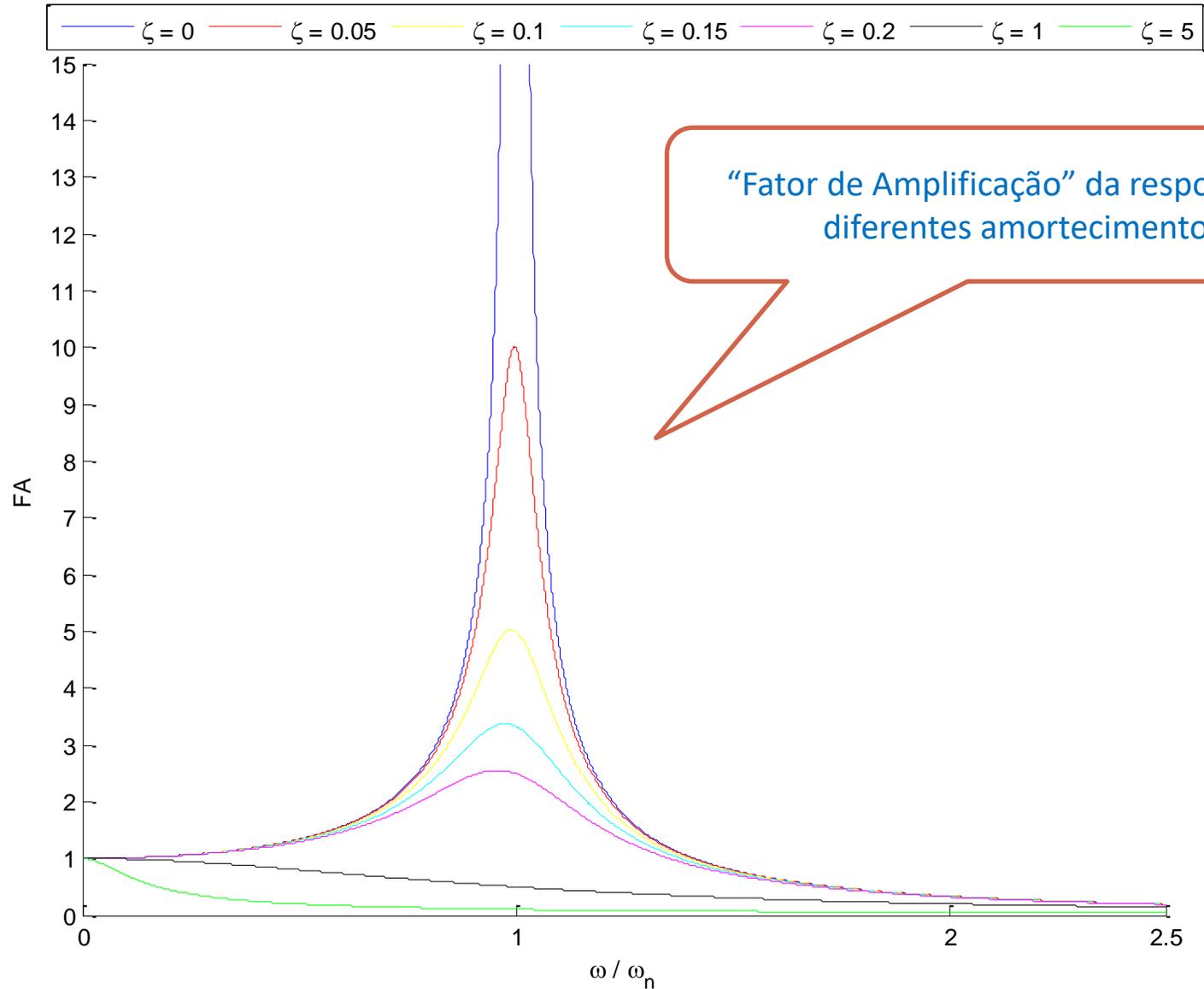
Sistema Massa Mola Amortecedor
Oscilações forçadas



Qual a origem da
excitação forçante?



MODELAGEM DO SISTEMA OCEÂNICO



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

<https://www.youtube.com/watch?v=r18Gi8lSkfM>

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>

Ressonancia

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

Taipei 101

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

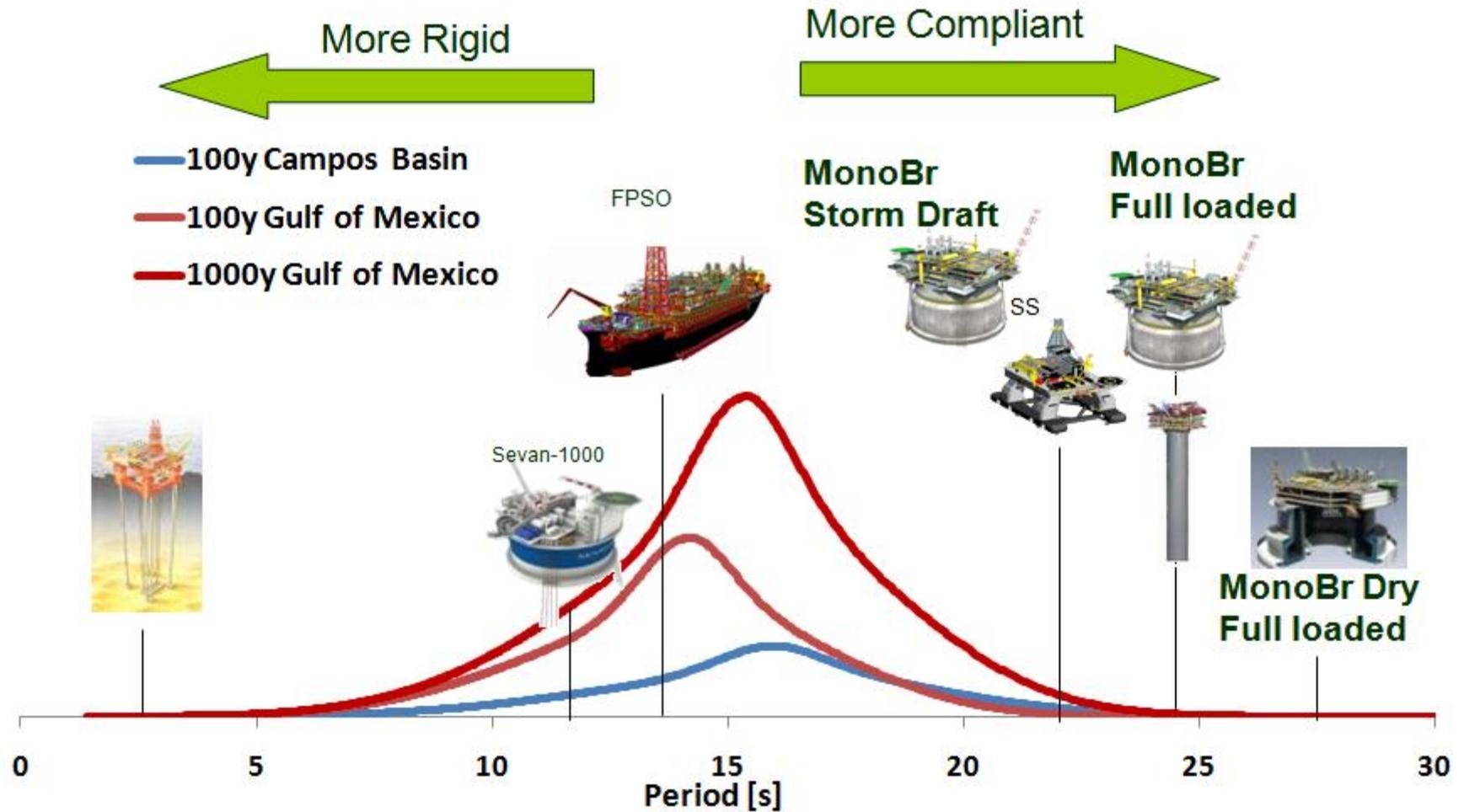
https://www.youtube.com/watch?v=Rrv8JMOLB_c

<https://youtu.be/ft3vTaYbkdE>

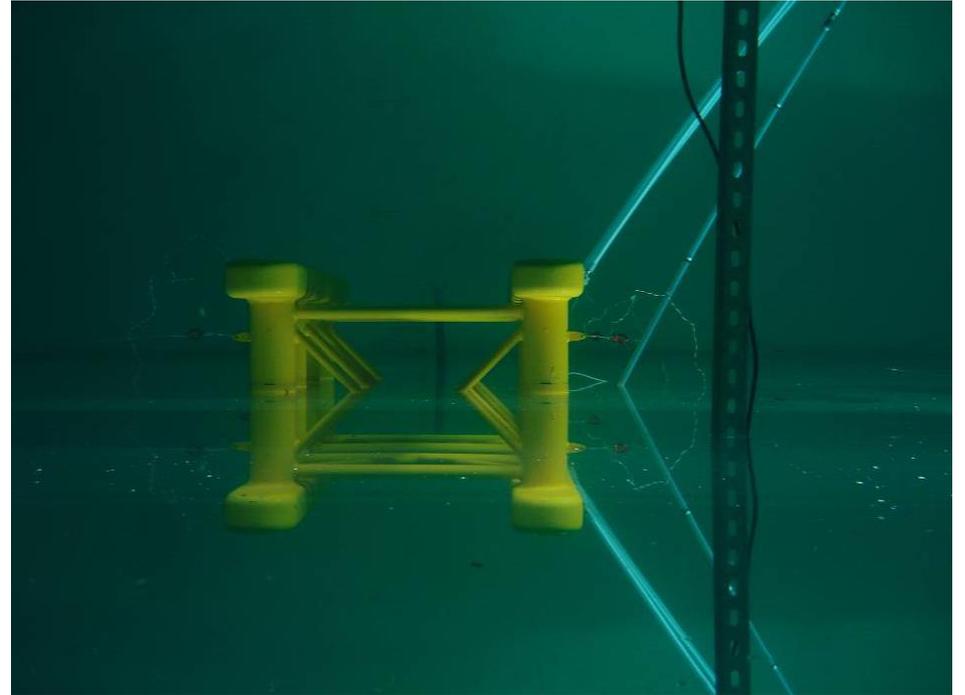
Quem quer criar a intuição mecânica par toda vida assista a serie:

<https://www.youtube.com/watch?v=NA5M30MAHLg>

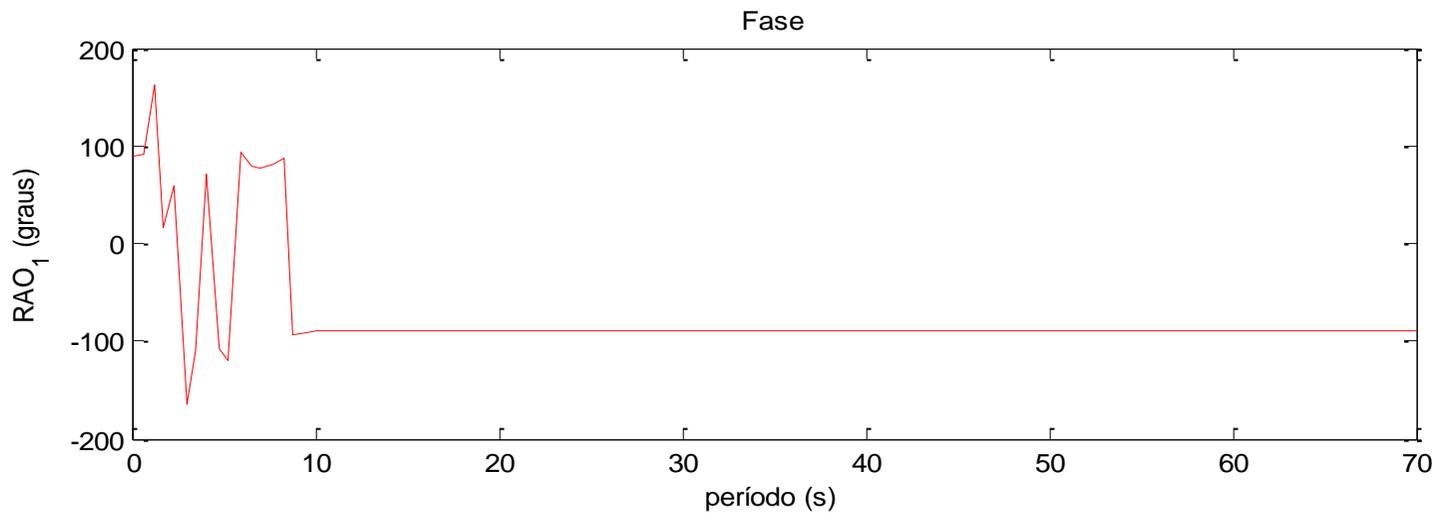
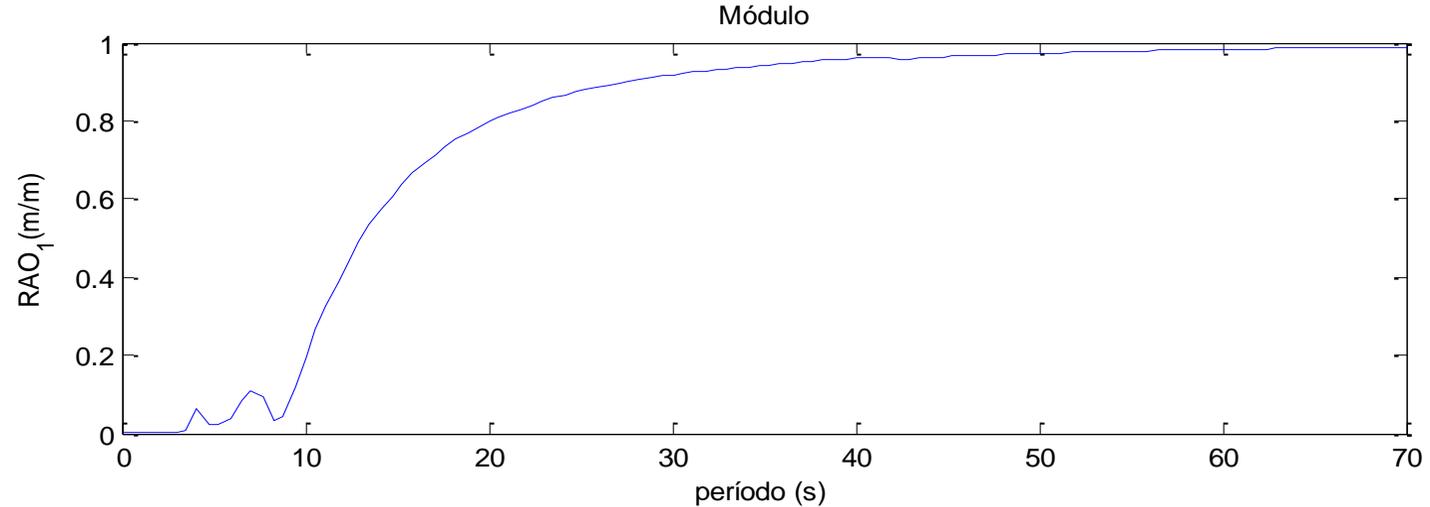
PERÍODOS NATURAIS DE UNIDADES FLUTUANTES



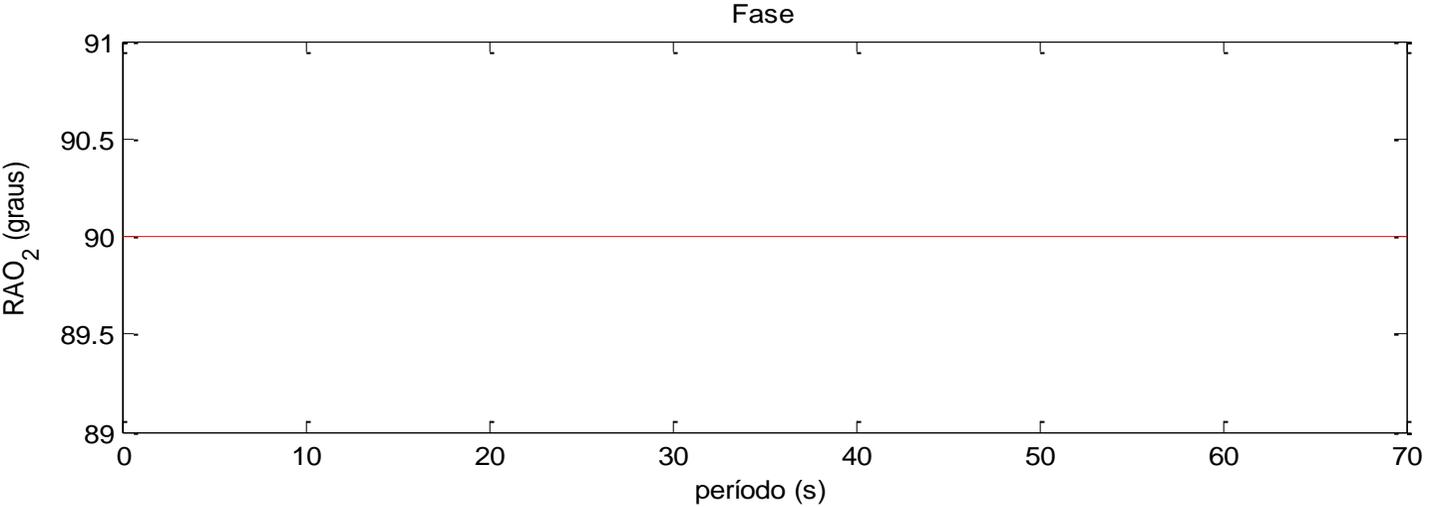
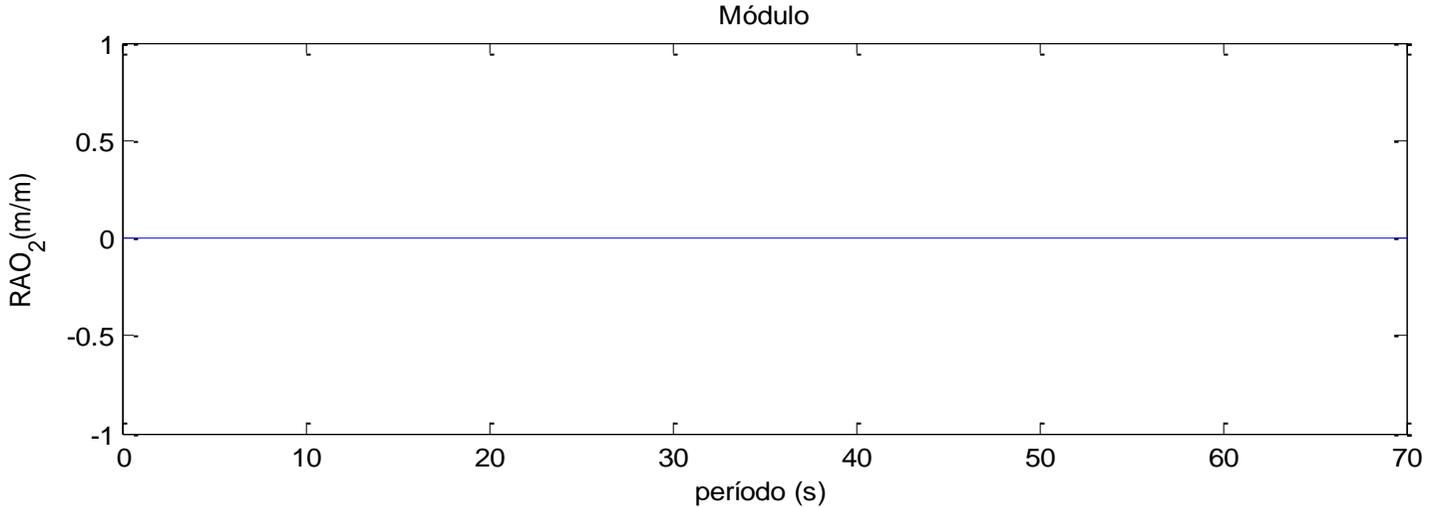
Plataforma ITTC



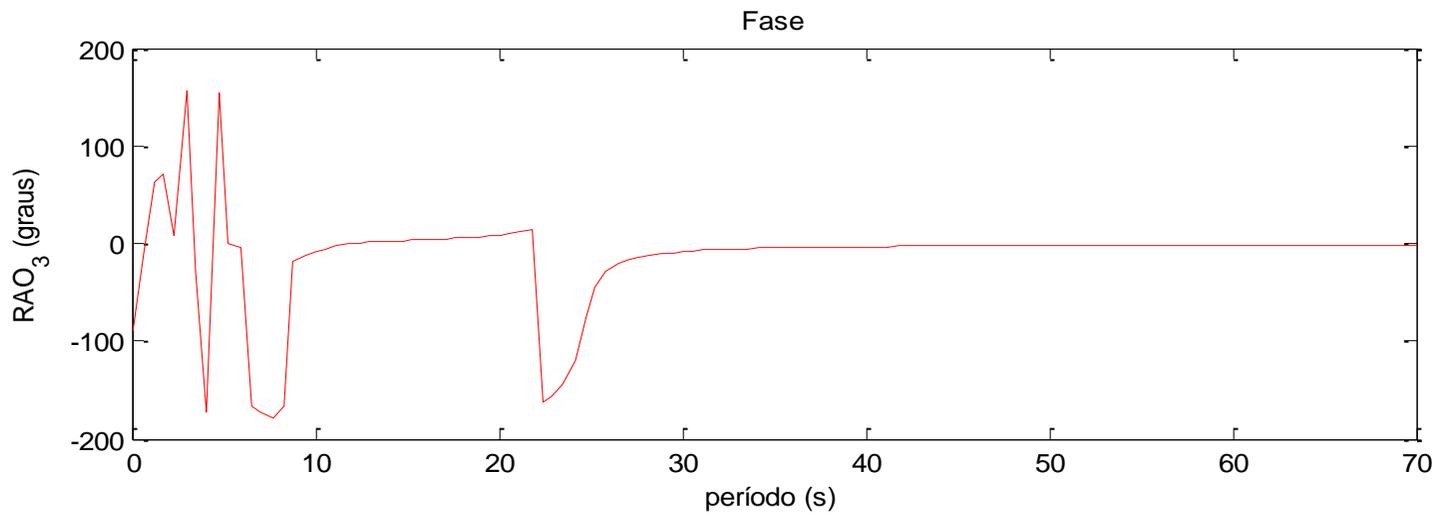
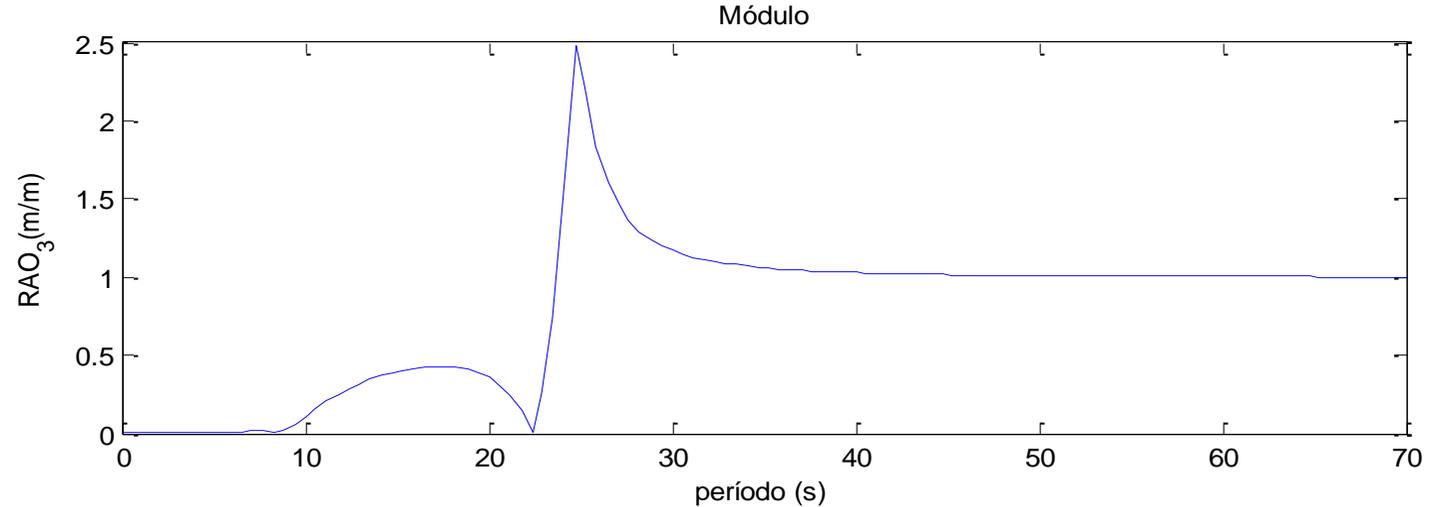
Exemplo de uso: RAOs de Surge da ITTC – módulo e fase



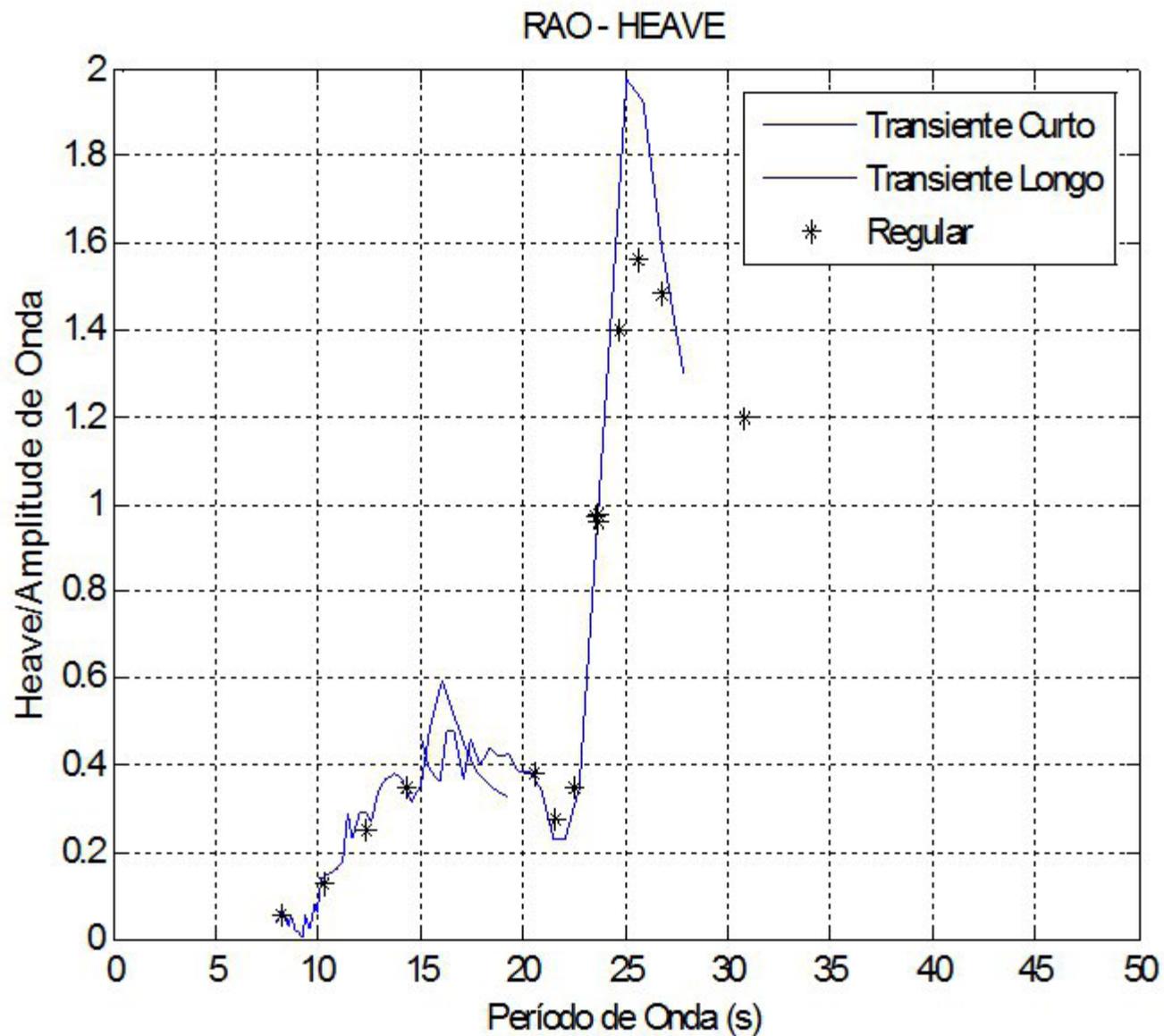
Exemplo de uso: RAOs de Sway da ITTC – módulo e fase



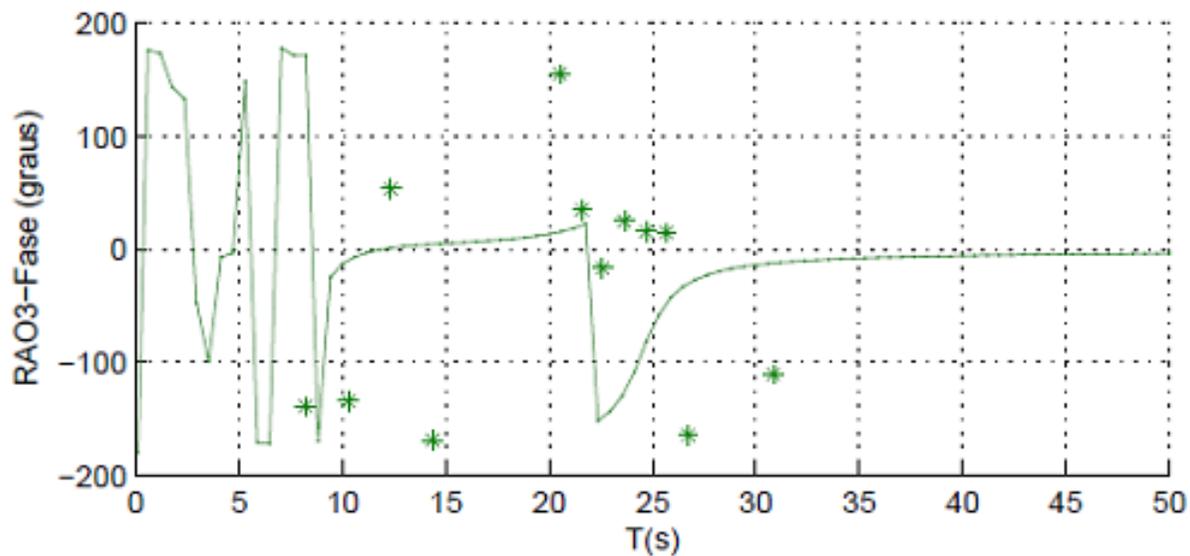
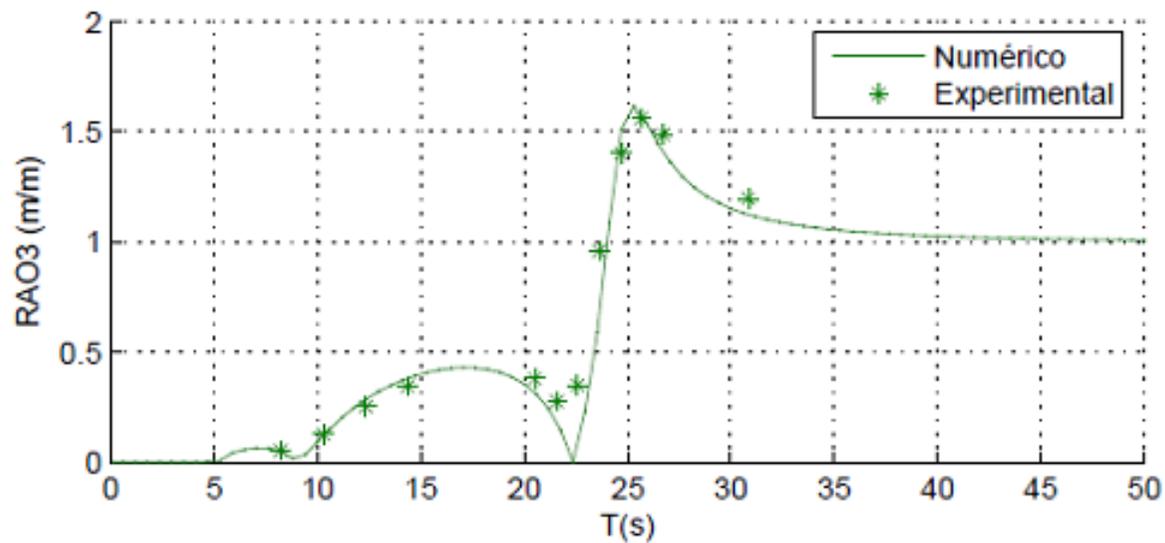
Exemplo de uso: RAOs de Heave da ITTC – módulo e fase



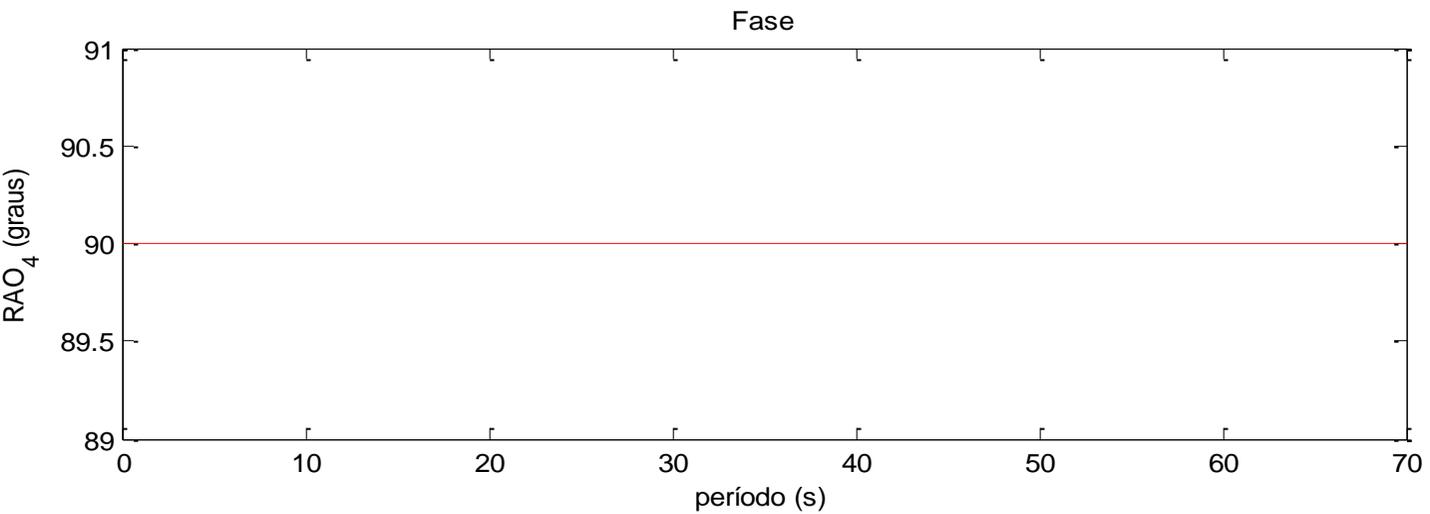
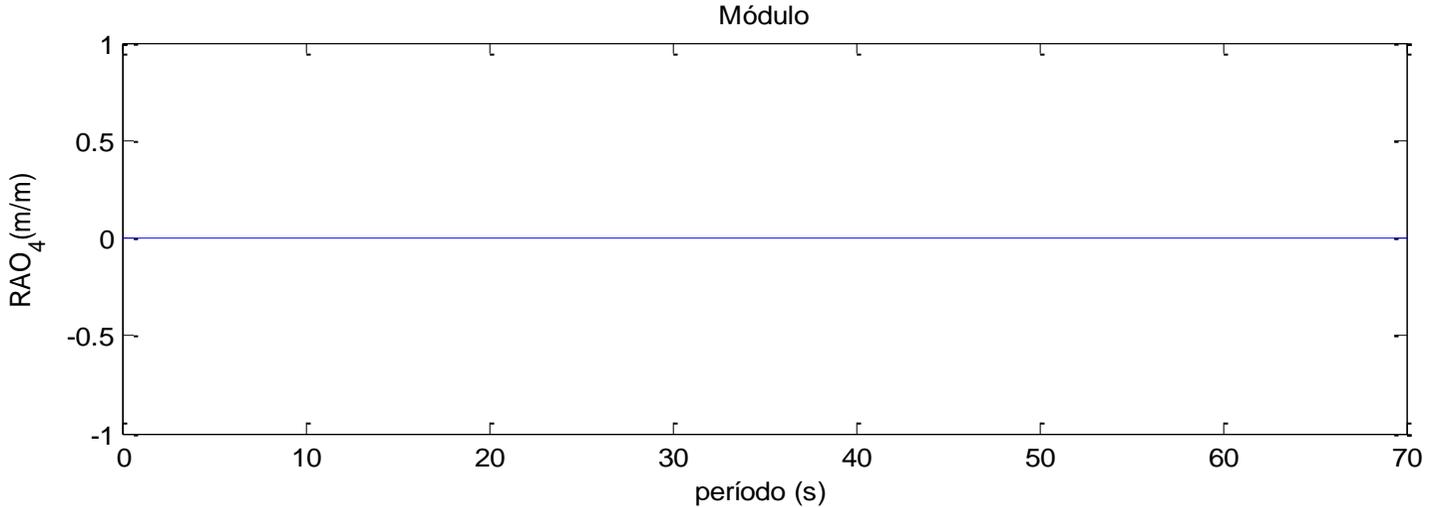
Exemplo de uso: RAOs de Heave da ITTC – módulo e fase **EXPERIMENTAL**



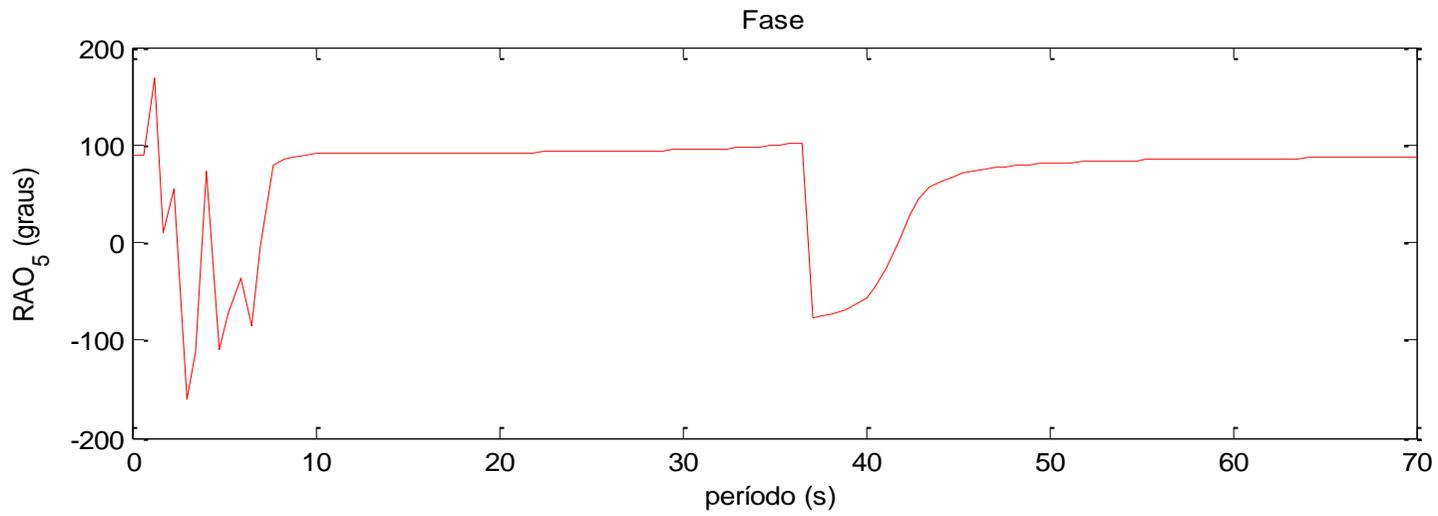
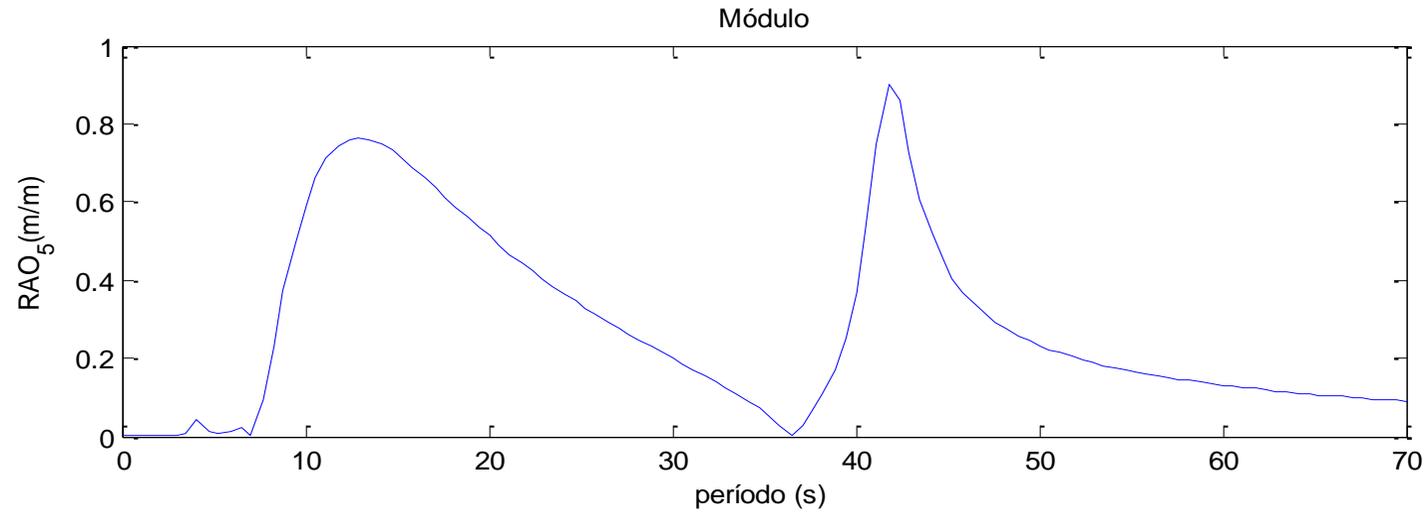
Exemplo de uso: RAOs de Heave da ITTC – módulo e fase – **COMPARAÇÃO**



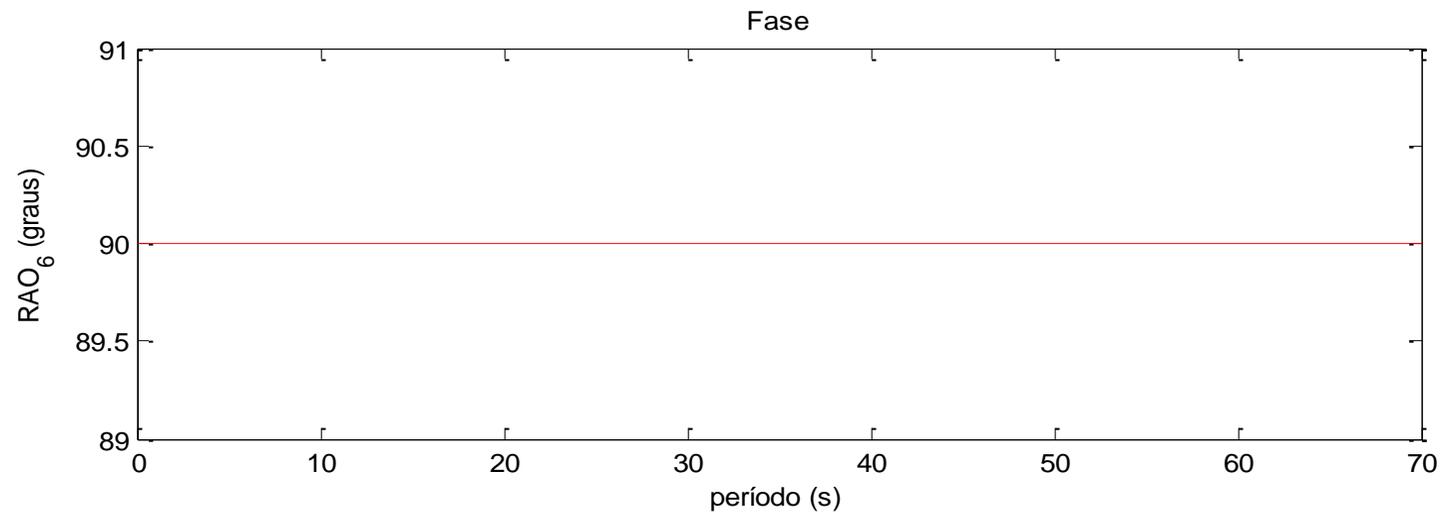
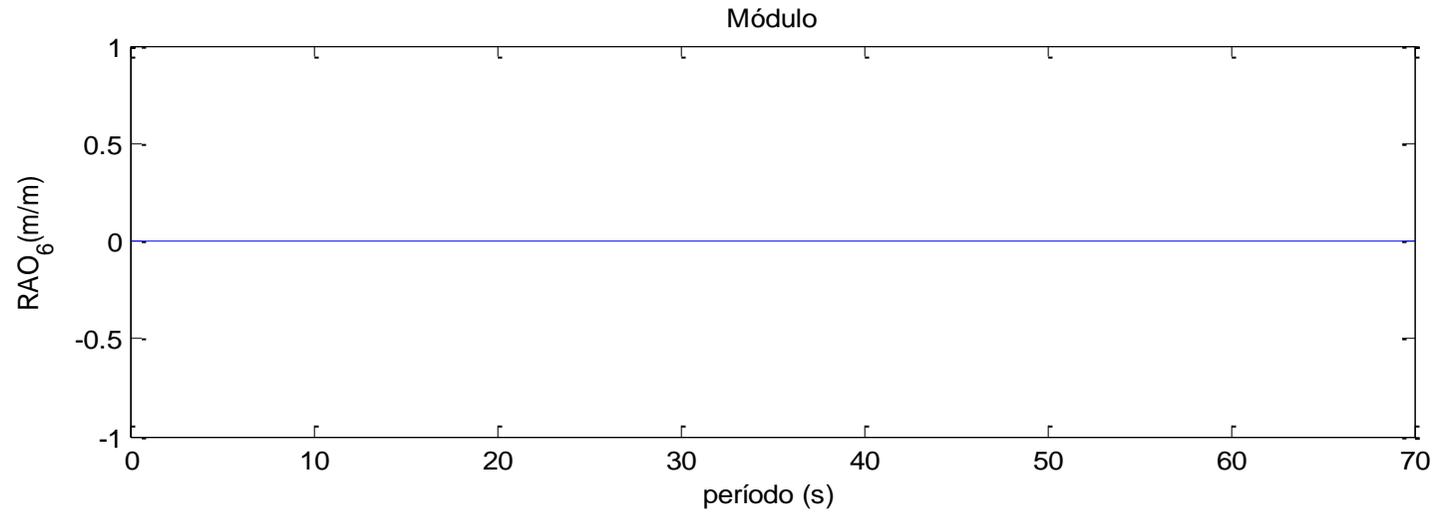
Exemplo de uso: RAOs de Roll da ITTC – módulo e fase



Exemplo de uso: RAOs de Pitch da ITTC – módulo e fase

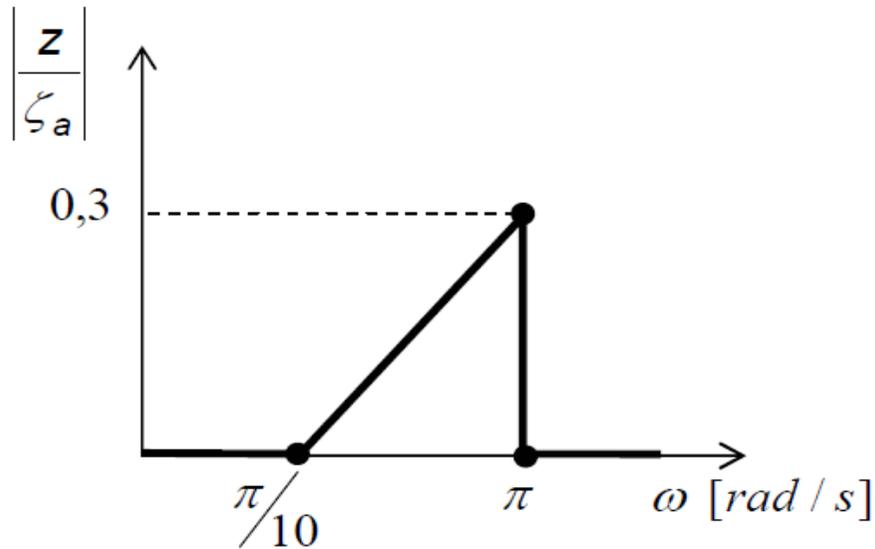


Exemplo de uso: RAOs de Yaw da ITTC – módulo e fase

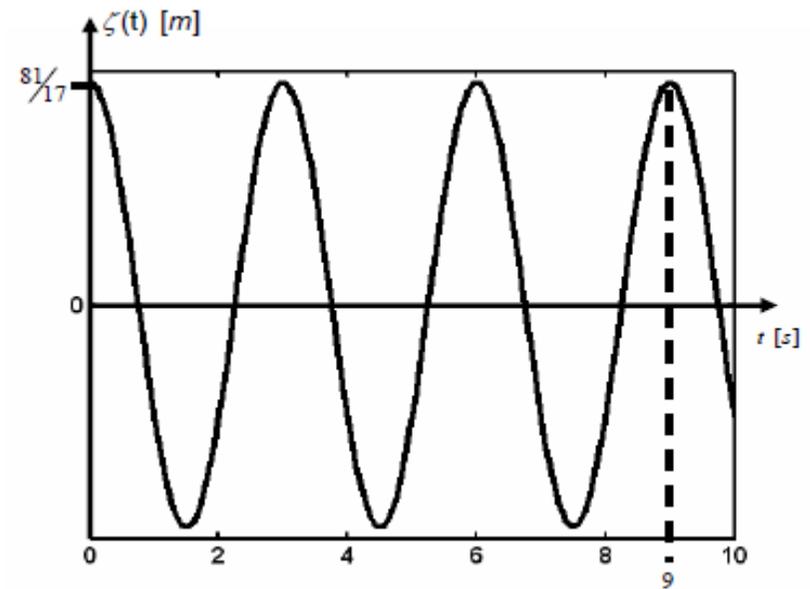


Exemplo de Aplicação (Cruzamento Espectral): Seja um navio hipotético com RAO de *heave* dado a seguir. Determinar sua resposta dinâmica em *heave* quando excitado pela onda regular dada abaixo.

RAO:



Excitação regular:

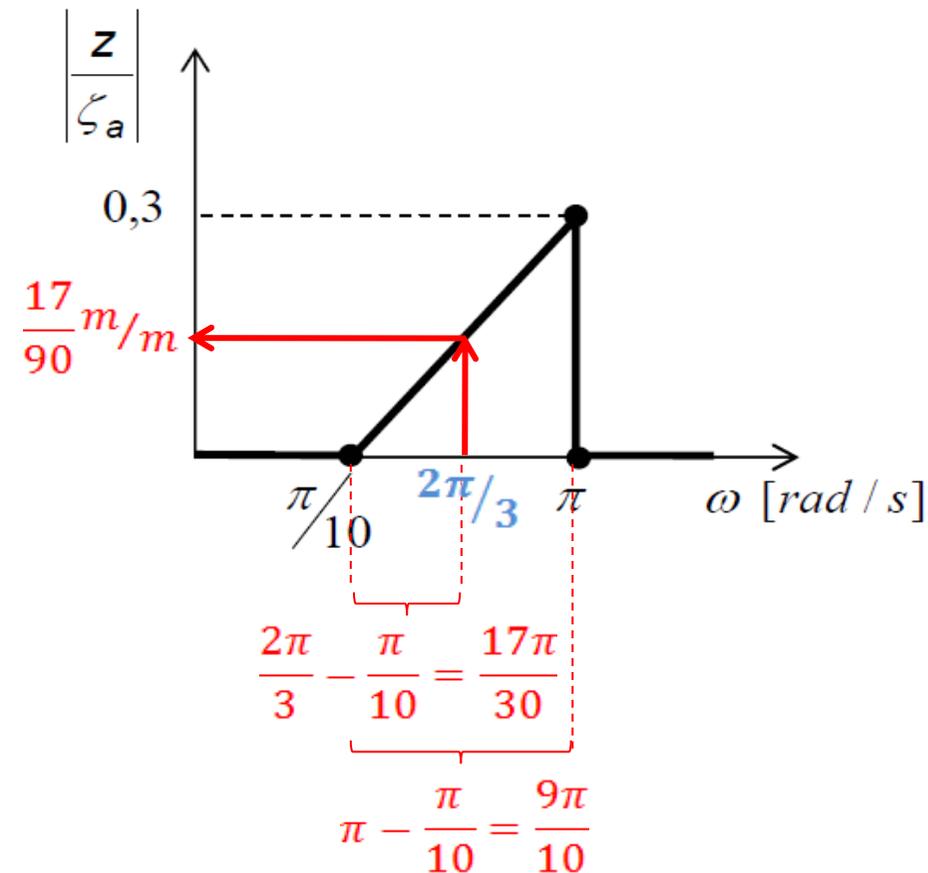


RESOLUÇÃO 1: A excitação corresponde a uma onda regular de amplitude 81/17 m e período 3s (3 oscilações em 9s)

• Como $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T}$, então $\omega = 2\pi/3$ rad/s (excitação)

• Pelo RAO, quando a excitação for $\omega = 2\pi/3$ rad/s, a resposta será:

RAO:



$$\frac{\frac{9\pi}{10}}{0,3} = \frac{\frac{17\pi}{30}}{\frac{z}{\zeta_A}}$$

$$\frac{z}{\zeta_A} = \frac{17}{90} \text{ m/m}$$

Como $\zeta_A = 81/17$ m, logo:

$$z_3 = 0,9 \text{ m}$$



Por que estudar comportamento no mar?

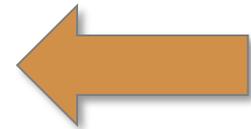
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

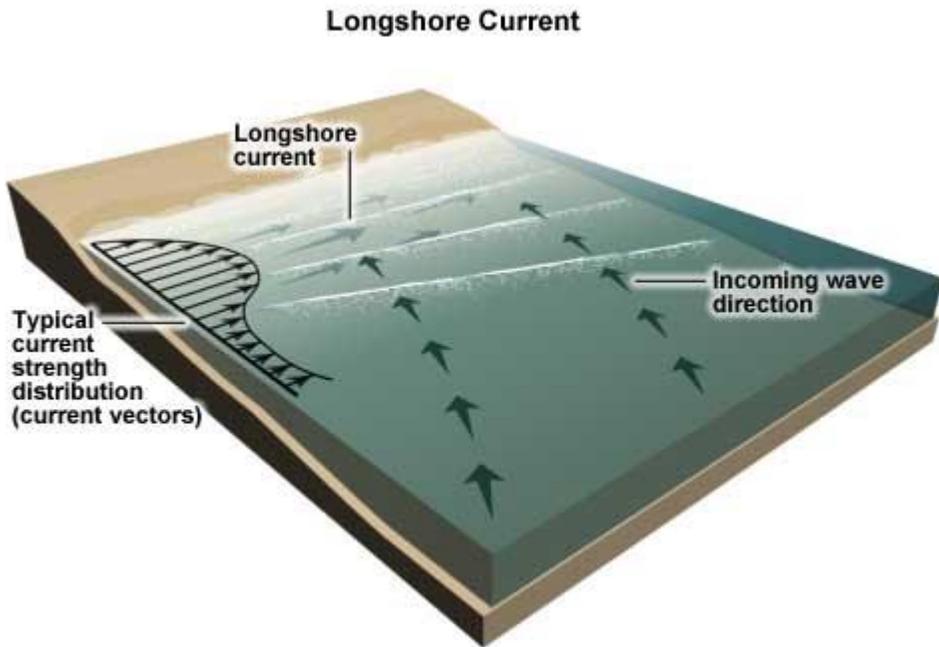
Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

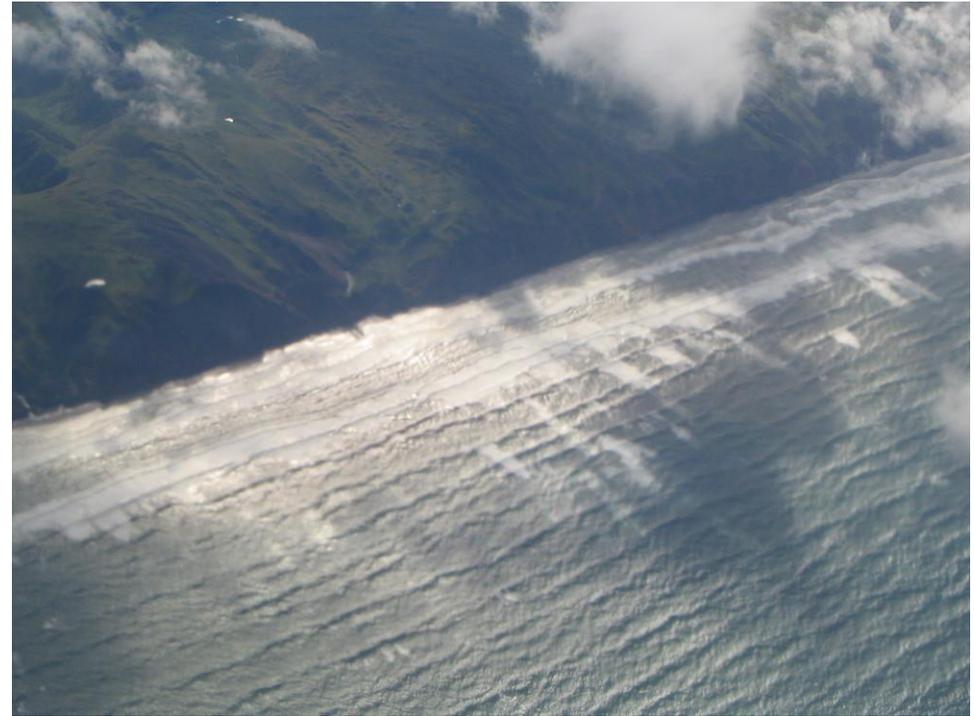
Visita ao TPN



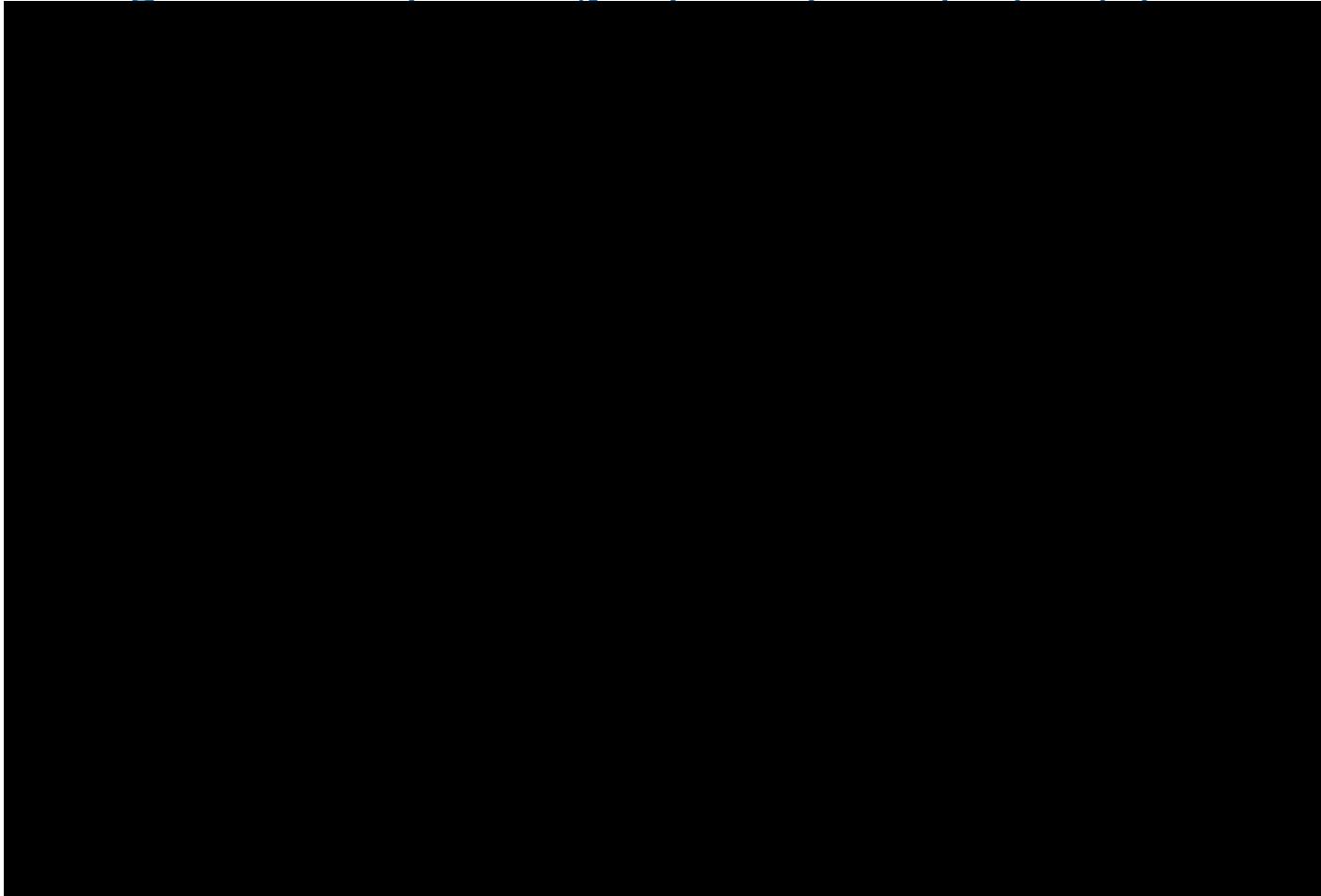
FENÔMENOS: REFRAÇÃO DE ONDAS



©The COMET Program



FENÔMENOS: REFLEXÃO DE ONDAS



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

FENÔMENOS: DIFRAÇÃO DE ONDAS



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:

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

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:

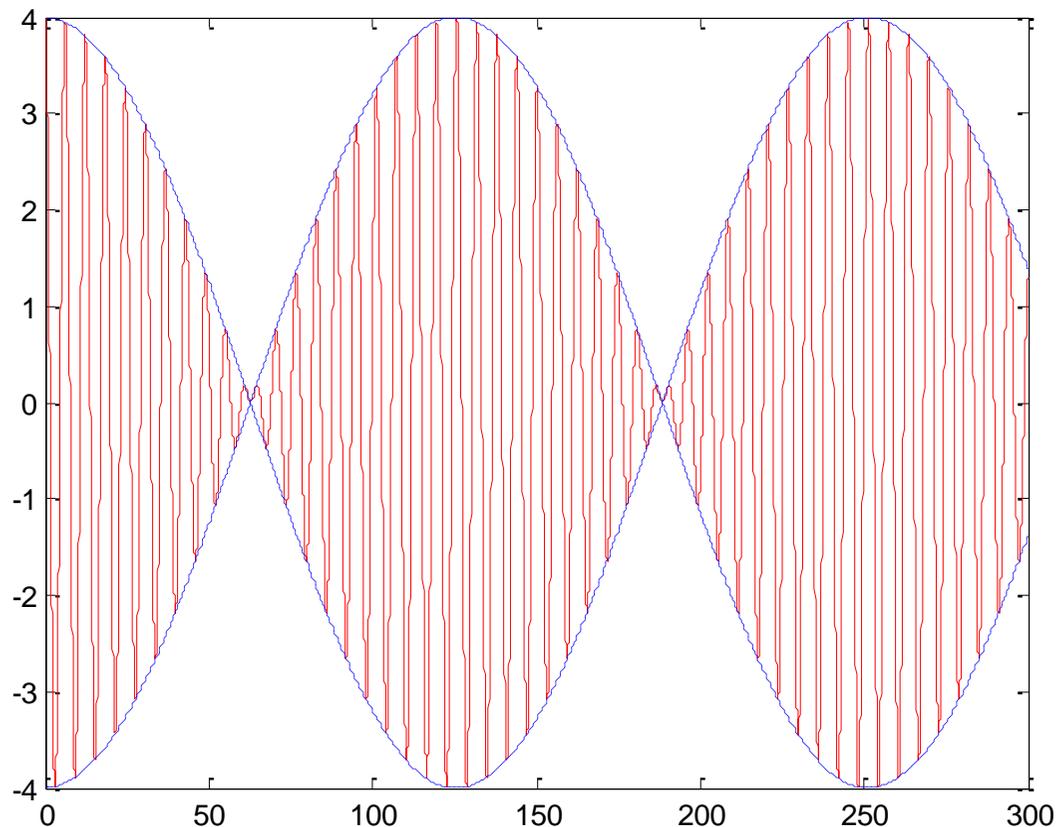
$$\zeta(x,t) = \underbrace{2A\cos(\delta k \cdot x - \delta\omega \cdot t)}_{\text{“envoltória”}} \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

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?

MODELAGEM MATEMÁTICA

$$\text{div}T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

PNV-2340: Memecon
Equação local do movimento



Hipóteses constitutivas

MecFlu 1 e 2

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{13}}{\partial x_3} + b_1 = \rho \cdot a_1 \\ \frac{\partial T_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{23}}{\partial x_3} + b_2 = \rho \cdot a_2 \\ \frac{\partial T_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{33}}{\partial x_3} + b_3 = \rho \cdot a_3 \end{cases}$$

(INDETERMINADO!!!)

- **Movimentos que o corpo pode realizar:** Rigidez e incompressibilidade (isocóricos);
- **Tensor de Cauchy:** Fluido newtoniano, invíscido, ideal...

Não relevante para 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO NEWTONIANO

$$\operatorname{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

- **Incompressível:** movimentos isocóricos, ou seja, que preservam o volume. Equivale a:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

- **Homogêneo:** ρ_0 não depende da posição
→ incompressível + homogêneo:

$$\rho = \rho_0 = \text{constante}$$

- **Tensor de Cauchy:**

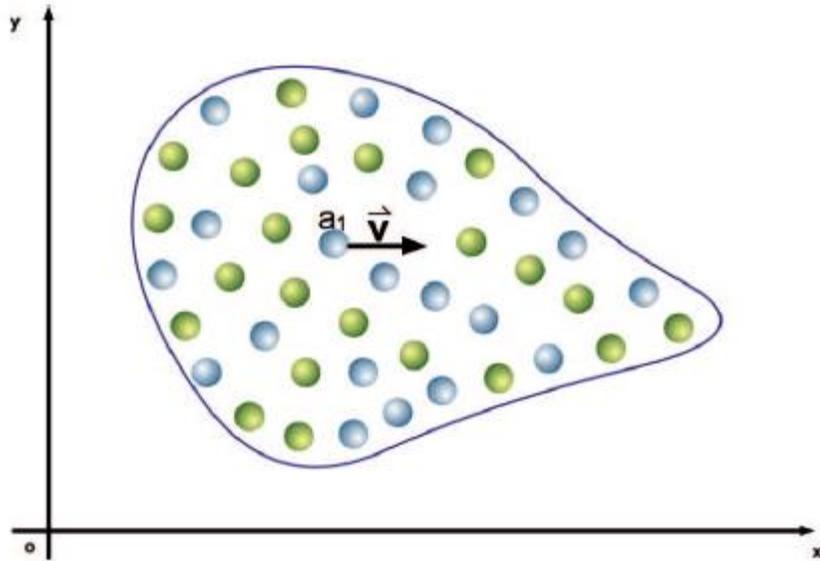
$$T = -p \cdot I + 2 \cdot \mu \cdot D$$

- A tensão de cisalhamento só ocorre quando o fluido está em movimento
- A tensão de cisalhamento depende das diferenças de velocidades entre as várias partículas

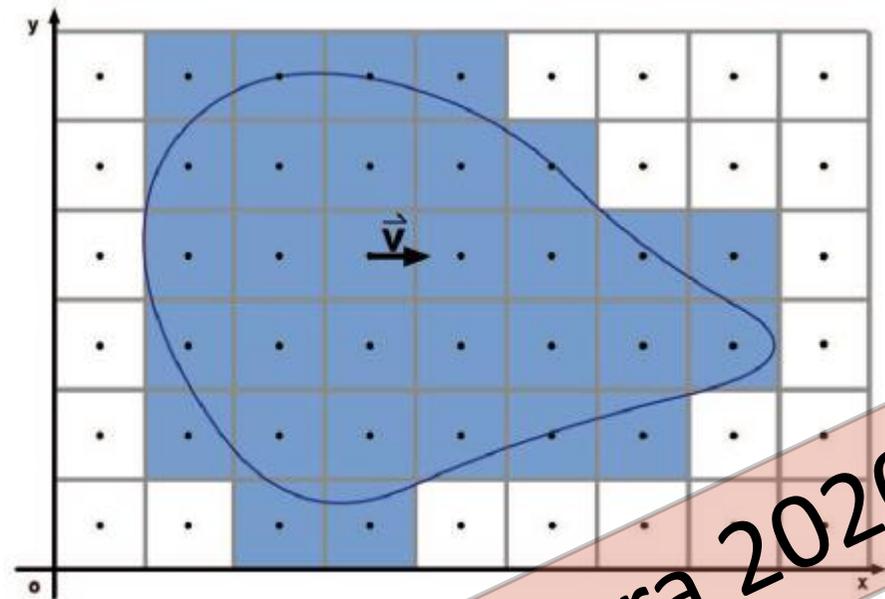
Não relevante para 2020

ABORDAGENS DE EULER E LAGRANGE

Visão de Lagrange



Visão de Euler



$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u$$

Não relevante para 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO NEWTONIANO

$$\operatorname{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{grad} \|\vec{v}\|^2 + \operatorname{rot} \vec{v} \times \vec{v} \right) = -\operatorname{grad} p + \mu \cdot \Delta \vec{v} + \vec{b} \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right.$$

(Equação de Navier-Stokes)

Não relevante para 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO IDEAL

$$\operatorname{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

- **Incompressível:** movimentos isocóricos, ou seja, que preservam o volume. Equivale a:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

- **Homogêneo:** ρ_0 não depende da posição
→ incompressível + homogêneo:

$$\rho = \rho_0 = \text{constante}$$

- **Tensor de Cauchy:**

$$T = -p \cdot I$$

(fluido invíscido: incapaz de exercer cisalhamento $\mu = 0$)

$$\begin{cases} -\operatorname{grad} p + \vec{b} = \rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{grad} \|\vec{v}\|^2 + \operatorname{rot} \vec{v} \times \vec{v} \right) \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{cases}$$

(Equação de Euler)

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO IDEAL



$$\vec{v} = \text{grad} \varphi$$

Escoamento potencial



$$\text{rot } \vec{v}(x, t) = \vec{0}$$

Escoamento irrotacional

Além disso, se:

$$\frac{\vec{b}}{\rho} = -\text{grad } \beta$$

~~Não relevante para 2020~~

$$\text{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

$$\frac{\|\vec{v}\|^2}{\rho} + \frac{p}{\rho} + \beta = \text{constante com a posição}$$

(Equação de Bernoulli)

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO IDEAL em repouso
sujeito ao seu peso
próprio

$$\operatorname{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

- **Incompressível:** movimentos isocóricos, ou seja, que preservam o volume. Equivale a:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

- **Homogêneo:** ρ_0 não depende da posição
→ incompressível + homogêneo:

$$\rho = \rho_0 = \text{constante}$$

- **Tensor de Cauchy:**

$$T = -p \cdot I$$

- **Repouso:**

$$\vec{a} = \vec{0}$$

- **Peso próprio:**

$$\vec{b} = \rho g \vec{e}_3$$

não relevante para 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA

FLUIDO IDEAL em repouso
sujeito ao seu peso
próprio

$$\text{div}T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x_3} = \rho g \end{cases}$$

$$p = \rho g x_3 + p_a$$

(Pressão hidrostática)

$$x_3 = \frac{p_0 - p_a}{\rho g}$$

(superfície de pressão plana)

Não relevante para 2020

Em particular, quando a pressão é igual à atmosférica o plano $x_3 = 0$ é a superfície livre do líquido.

MODELAGEM MATEMÁTICA: enunciado do problema de contorno

Suposição:

$$\vec{v} = \text{grad}\varphi$$

Escoamento potencial

O problema é então encontrar o potencial de velocidades $\phi(x,y,z,t)$ que satisfaça essa hipótese.

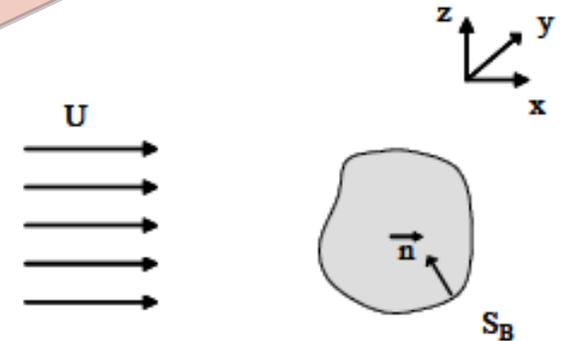
$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_3^2} = 0$$

$$\frac{\|\vec{v}\|^2}{\rho} + \frac{p}{\rho} + \beta = \text{constante com a posição}$$

Sujeito às condições de contorno:

$$\nabla\varphi \cdot \vec{n}|_{S_B} = \frac{\partial\varphi}{\partial n}|_{S_B} = 0 \quad (\text{impermeabilidade})$$

$$\lim_{|\vec{x}| \rightarrow \infty} \nabla\varphi = U \vec{i} \quad (\text{evanescência})$$



Não relevante para 2020

MODELAGEM MATEMÁTICA: solução do problema de contorno

Equação de Bernoulli para escoamentos não-permanentes sobre a superfície livre

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \cdot \nabla^2 \varphi + g \cdot \zeta = -\frac{p - p_0}{\rho} = 0$$

Linearização:

(hipótese: pequenas declividades implicam na possibilidade de se desprezar o termo quadrático na velocidade)

$$\zeta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

Procura-se uma solução plana e harmônica para a superfície livre. Assim:

$$\varphi(x, z, t) = \frac{g \cdot A}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z + h)]}{\cosh(kh)} \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

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 $\tanh(kh) \rightarrow 1$

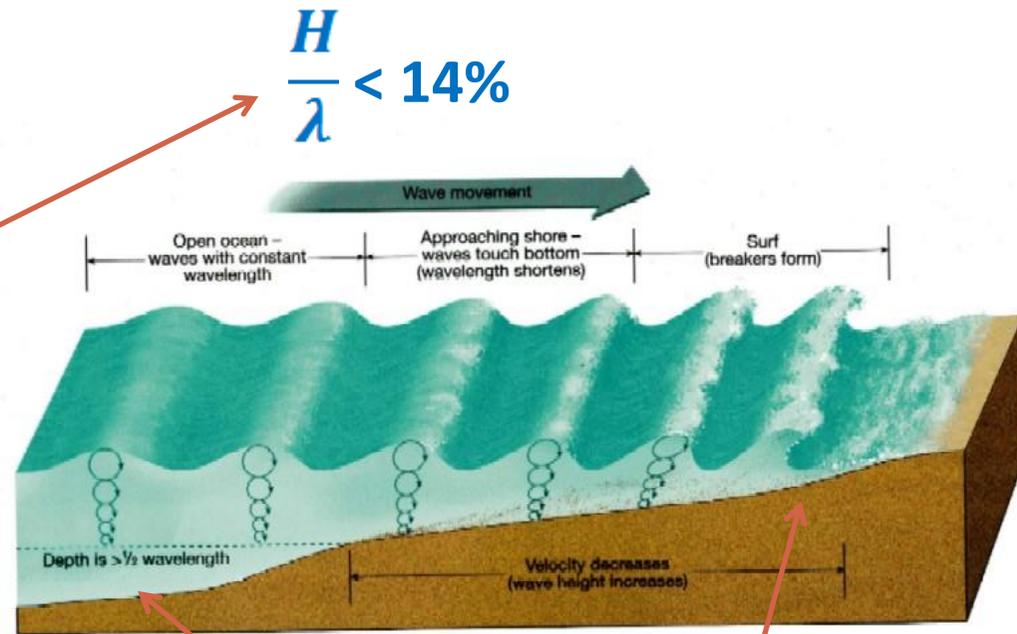
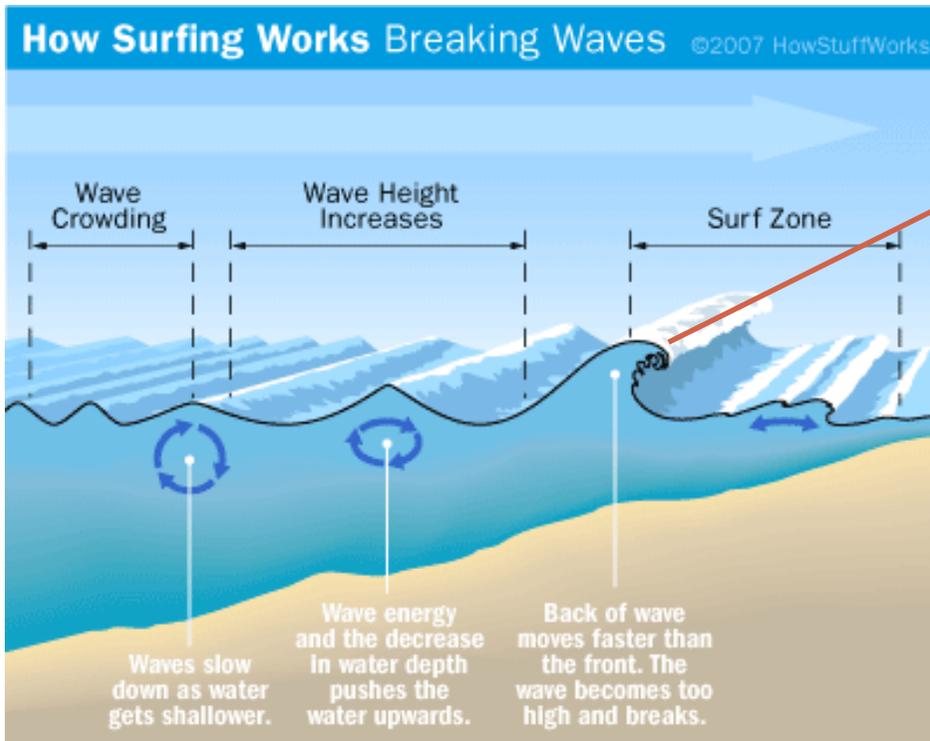
$$k = \frac{\omega^2}{g}$$

EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

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

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

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



$$D > \lambda/2$$

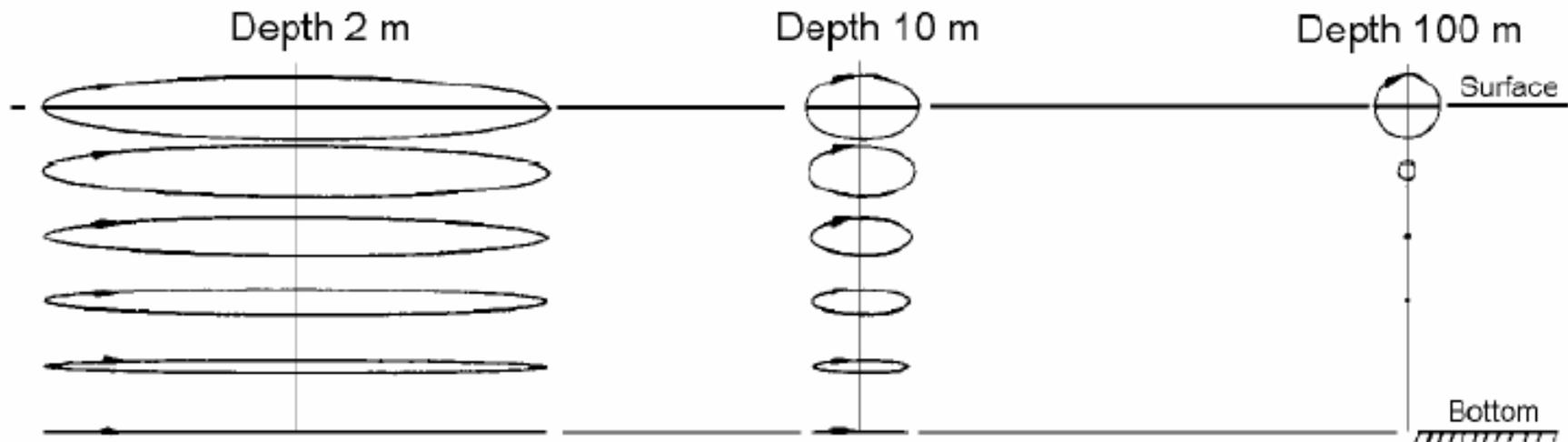
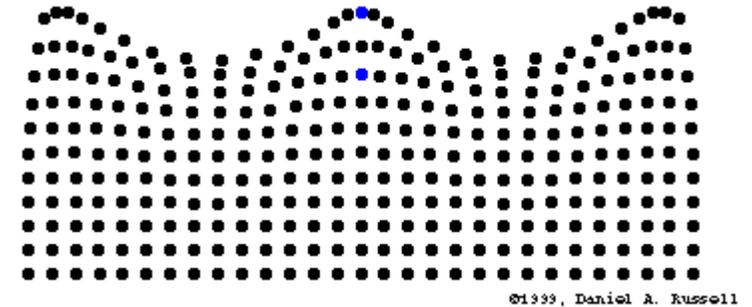
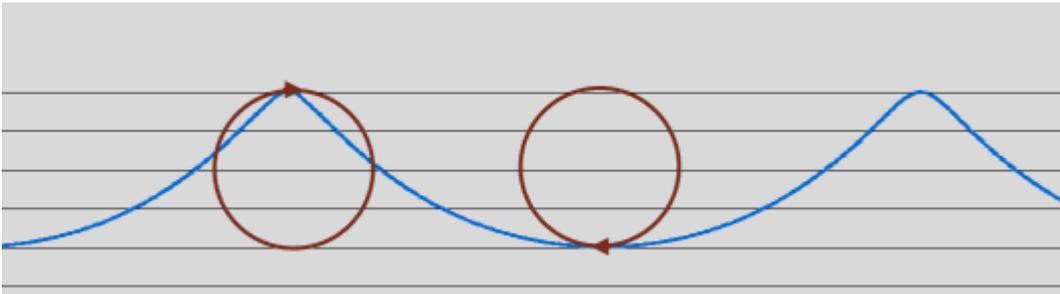
Águas profundas

$$D > \lambda/20$$

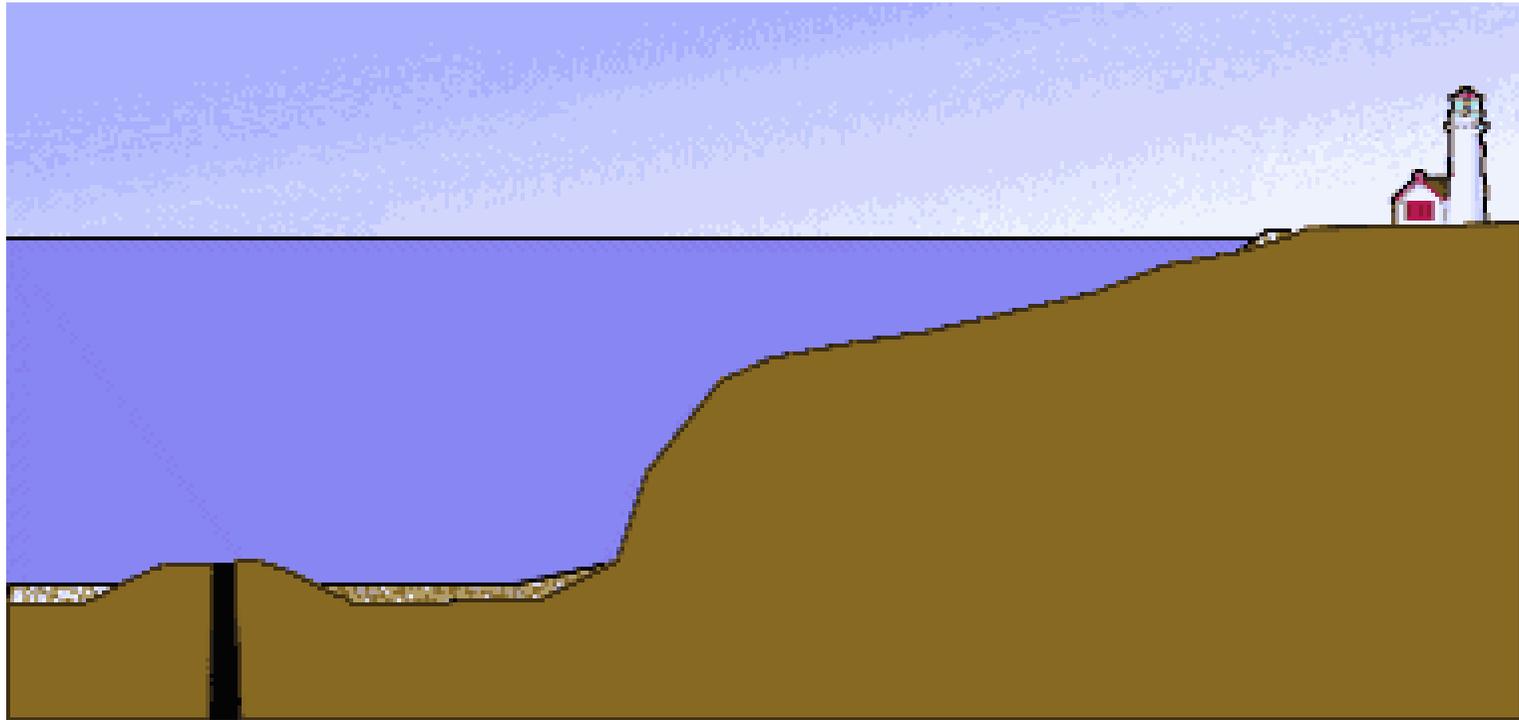
Águas rasas

ONDAS OCEÂNICAS DE SUPERFÍCIE

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



Tsunamis



EFEITO DA PROFUNDIDADE SOBRE AS ONDAS

- Equação de Bernoulli:

- Fluido invíscido;
- Regime estacionário;
- Escoamento incompressível;
- $\uparrow\downarrow$ Pressão \Leftrightarrow $\downarrow\uparrow$ Velocidade;

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

- Campo de pressões (profundidade infinita):

Pressão hidrostática

(responsável pelo empuxo)

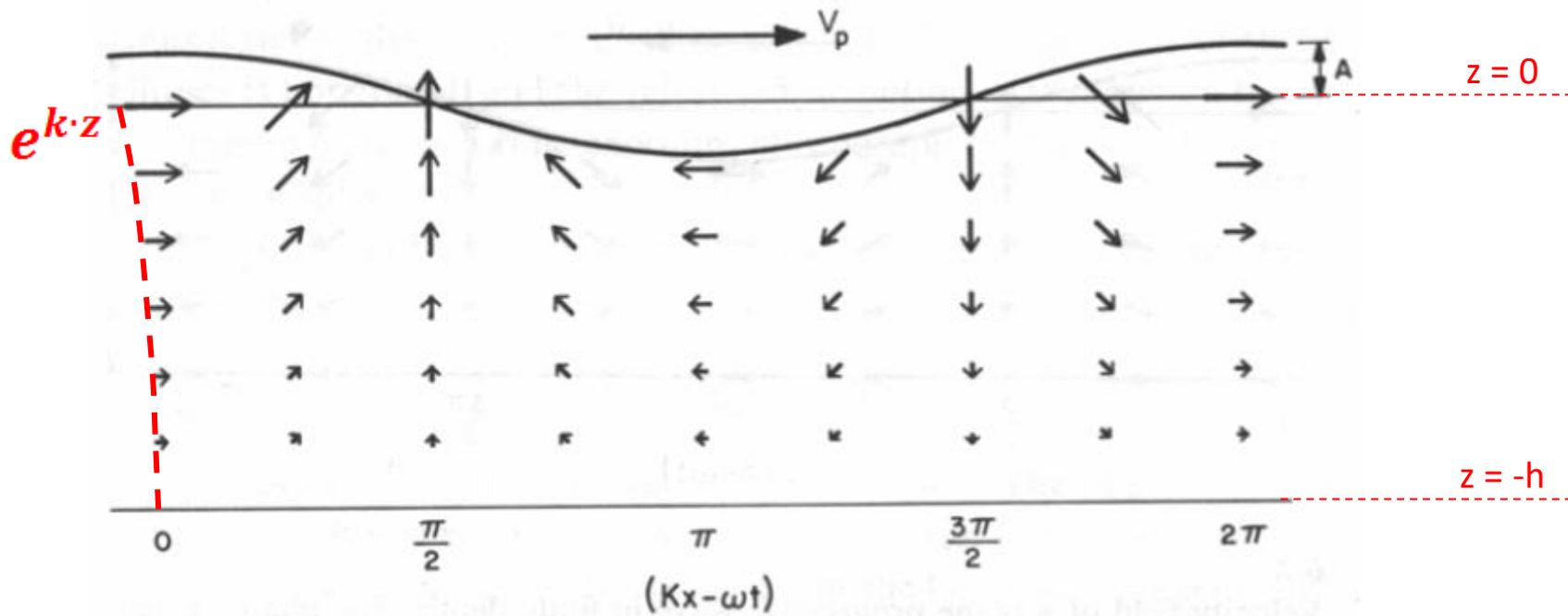
$$p = \underbrace{(p_{atm} - \rho \cdot g \cdot z)}_{\text{Pressão hidrostática}} + \underbrace{\rho \cdot g \cdot \zeta \cdot e^{k \cdot z}}_{\text{Pressão dinâmica}}$$

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;



EFEITOS NÃO-LINEARES

FLUIDO NEWTONIANO

$$\operatorname{div} T + \vec{b} = \rho \cdot \vec{a}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{grad} \|\vec{v}\|^2 + \operatorname{rot} \vec{v} \times \vec{v} \right) = -\operatorname{grad} p + \mu \cdot \Delta \vec{v} + \vec{b} \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right.$$

(Equação de Navier-Stokes)

Não relevante para 2020

EFEITOS NÃO-LINEARES

- Linearização do Problema de Contorno → Despreza termos quadráticos nas velocidades:

$$\nabla \phi \cdot \nabla \phi \ll \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

- Com isso o campo de pressão hidrodinâmico é aproximado:

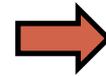
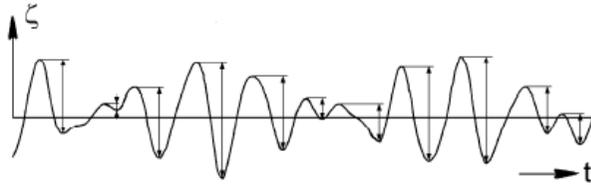
$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \nabla \phi \cdot \nabla \phi$$

- Qual a contribuição do termo desprezado?

Não relevante para 2020

EFEITOS NÃO-LINEARES

- Mar irregular → Superposição de ondas de diferentes frequências:



$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^{\infty} [c_j \cos \omega_j t + s_j \sin \omega_j t]$$

- As forças de deriva-lenta são forças que oscilam nas chamadas frequências-diferença de ondas:

$$F_{dl} = \sum_i \sum_j C_{ij} A_i A_j \text{sen}((\omega_i - \omega_j)t + \varepsilon_{ij})$$

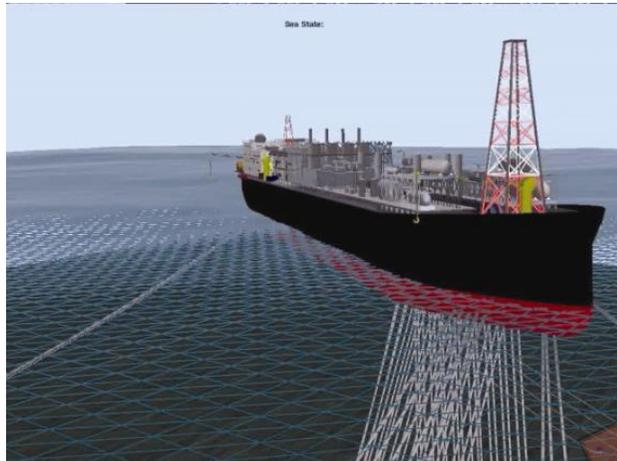
- Embora sua magnitude seja muito menor do que a das forças de primeira ordem (lineares), pode causar problemas se excitar ressonâncias do sistema dinâmico.

Não relevante para 2020

EFEITOS NÃO-LINEARES

- Consequências:

- ❑ Podem ter consequências importantes na dinâmica do sistema sempre que ele apresentar períodos naturais de movimento altos;
- ❑ Exemplo: períodos de oscilação horizontal de plataformas ancoradas



$T_n \sim 100s \text{ a } 200s$

Não relevante para 2020

Ressonâncias com as forças de deriva-lenta

EFEITOS NÃO-LINEARES



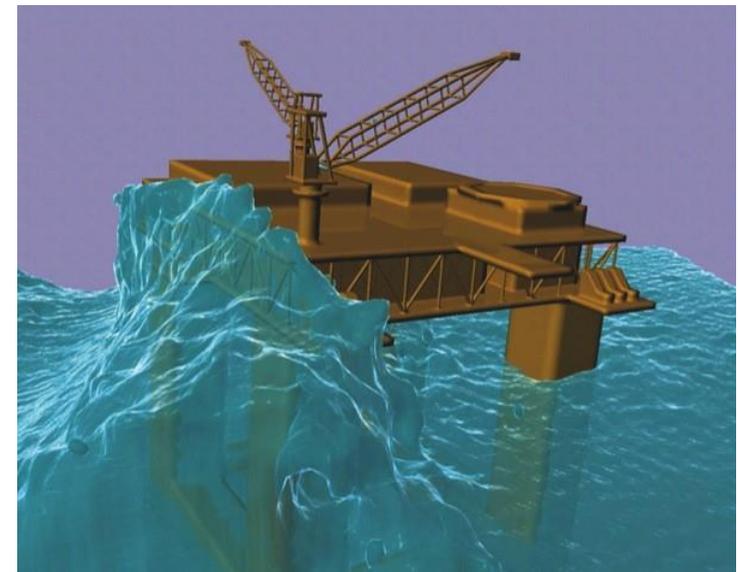
EFEITOS NÃO-LINEARES

- Outras Aplicações:

- Modelos hidrodinâmicos não-lineares também são necessários quando precisamos modelar com mais precisão a forma da onda em eventos extremos;

- Exemplos:

- ✓ *Airgap* de plataformas SS;
- ✓ *Green-water*;
- ✓ Impacto hidrodinâmico (*slamming*).

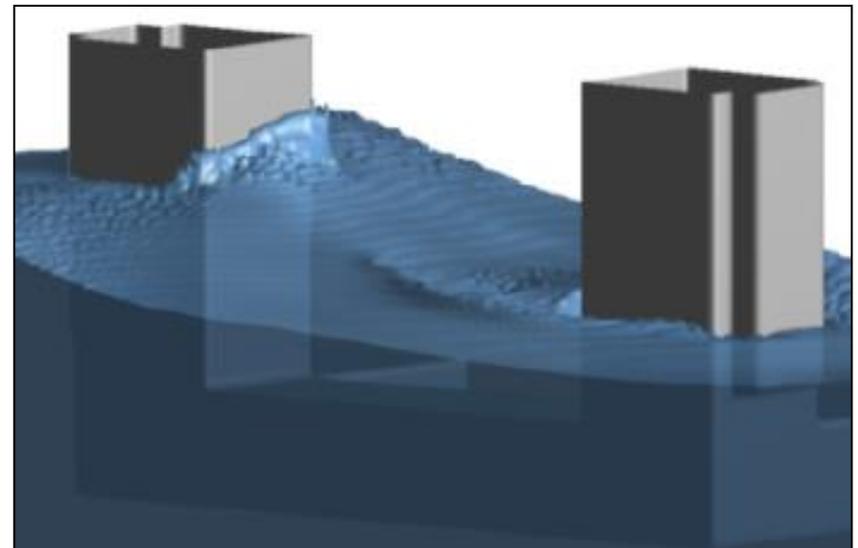
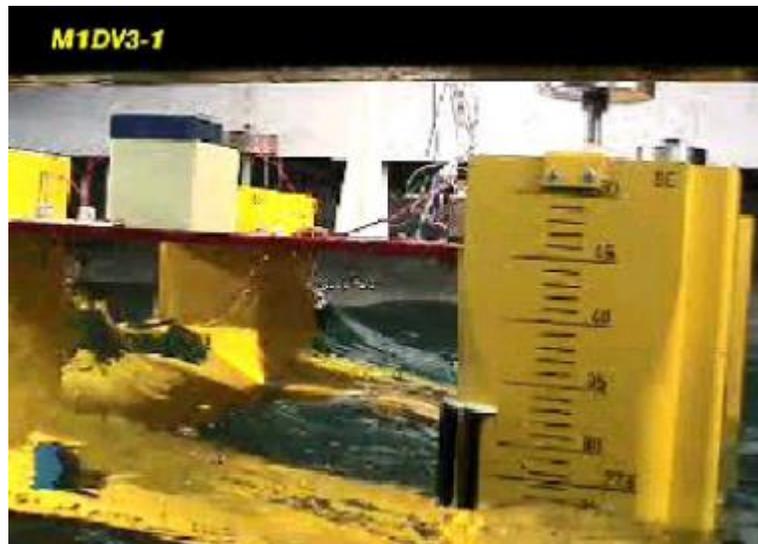
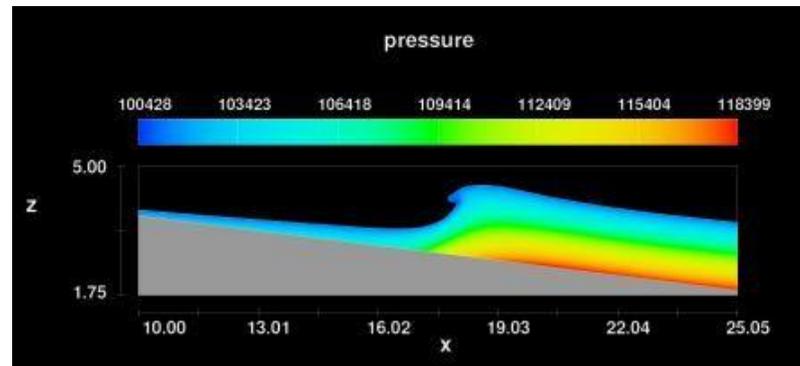


EFEITOS NÃO-LINEARES



EFEITOS NÃO-LINEARES

- Para o tratamento deste tipo de problema é cada vez mais corriqueiro o uso de códigos de CFD adaptados para ondas não lineares (Ex.: Comflow[®], Star-CCM[®], etc.):





Por que estudar comportamento no mar?

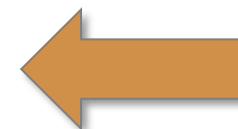
Ondas, correntezas e marés

Modelos para o sistema oceânico

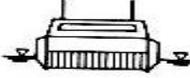
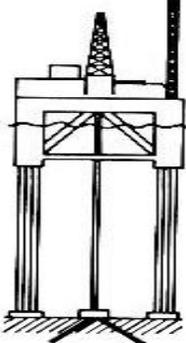
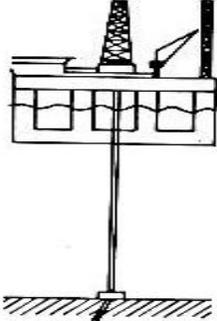
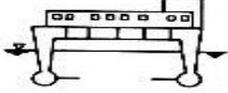
Ondas: modelo teórico, simplificações, escoamento

Interação entre o sistema oceânico e o mar

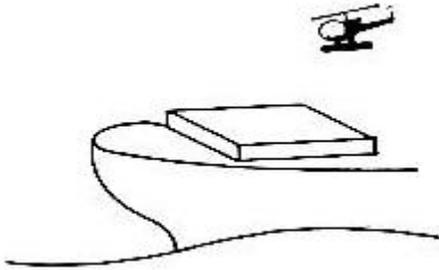
Visita ao TPN



Oscilação de ressonância de *heave* de navios, estruturas *offshore* e embarcações de planeio

Embarcação					
	SES (<i>surface effect ship</i>)	TLP (<i>tension leg plataforma</i>)	Navio de casco simples e Catamaran	Plataforma Semi-submersível	SWATH (<i>small waterplane area twin hull ship</i>)
Período natural de <i>heave</i> :	< 1s	2-4s	4-16s	> 20s	>20s
Força de restauração principal:	Compressibilidade do ar	Elasticidade das amarras	Flutuação	Flutuação	Flutuação
Mecanismo de excitação dominante em torno do período natural de <i>heave</i> :	Forças de onda lineares devido as altas frequências de encontro entre a embarcação e as ondas do mar	Soma não linear de frequências de força de onda	Forças de onda lineares	<i>Swell</i> (ondas de grande comprimento de onda)	Forças de onda lineares devido as baixas frequências de encontro entre a embarcação e as ondas do mar
Amortecimento:	“Efeito de cavalgada (<i>Ride Control</i>)”	Efeito viscoso	Radiação de onda	Efeito viscoso	Controle do fólio

Problemas de interação fluido estrutura

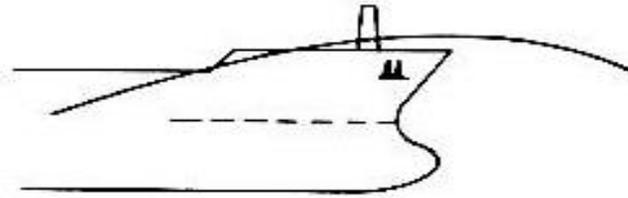


Movimentos Locais:

São movimentos inesperados da embarcação devido ao mar, podendo dificultar algumas operações (ex. pouso de aeronaves ou operação de alívio em plataformas). Pode ser resolvido com a utilização de sistema dinâmico de posicionamento

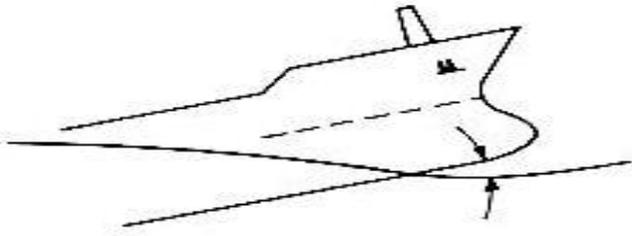
Água no deque:

Pode ser responsável por causar avarias locais na estrutura



Slamming:

Efeito do impacto do navio com a água (navio quica na onda) podendo causar danos locais à estrutura

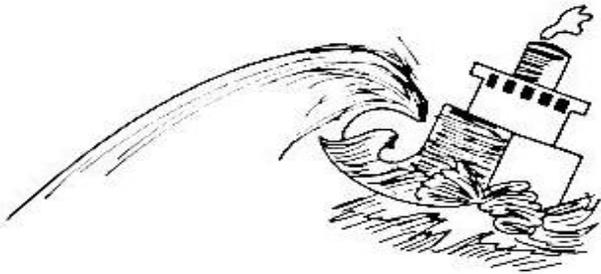


Efeito de ondas quebrando:

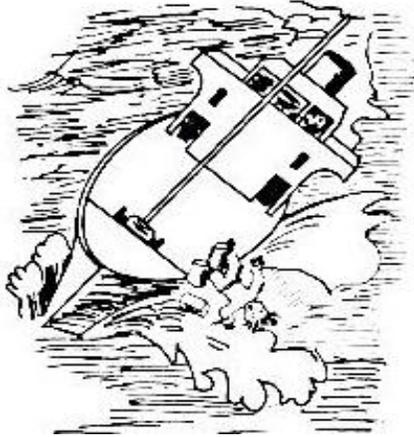
Pode ser responsável por emborcar pequenas embarcações e causar danos locais à estrutura

http://www.youtube.com/watch?v=Cf_uDUj_CBo&feature=related

<http://www.youtube.com/watch?v=VxCVrtCjra4&feature=fvwrel>

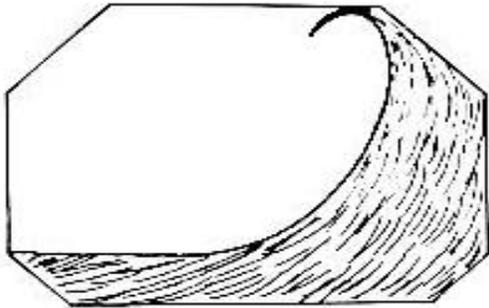


Problemas de interação fluido estrutura



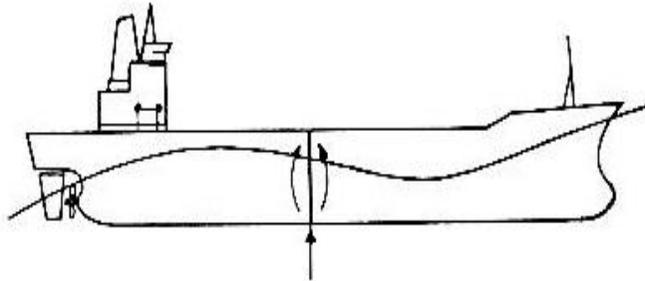
Acelerações:

Sua ação pode causar problemas no funcionamento de equipamentos, na integridade da carga transportada, e no conforto de tripulantes e passageiros



Movimento de líquidos nos tanques:

Problema típico em navios *bulk*ers, *tank*ers e LNG. Também conhecido como **efeito de superfície livre** pode causar instabilidade hidrostática à embarcação bem como pressões locais e forças concentradas na estrutura



Momento fletor e forças cisalhantes por ação de ondas:

Efeito causado principalmente em navios de grande porte devido a presença de mar com ondas com $\lambda \sim L$ (comprimento típico do navio). As ondas podem ser de **Alquebramento** e **Tosamento** e ambas causam flexão na “viga navio”

Acelerações e movimentos

Critério limite para operabilidade geral de embarcações	Navios Mercantes	Embarcações militares	Pequenas embarcações de alta velocidade
Aceleração vertical perpendicular a vante (valor de RMS)	0.275g ($L \leq 100$ m) 0,05g ($L \geq 330$ m) ¹	0.275g	0.65g
Aceleração vertical ponte de comando (valor de RMS)	0.15g	0.2g	0.275g
Aceleração lateral ponte de comando (valor e RMS)	0.12g	0.1g	0.1g
<i>Roll</i> (valor de RMS)	6.0°	4.0°	4.0°
Critério de <i>Slamming</i> (Probabilidade)	0.03 ($L \leq 100$ m) 0.01 ($L \geq 300$ m) ²	0.03	0.03
Crítério de água no convés de proa (Probabilidade)	0.05	0.05	0.05

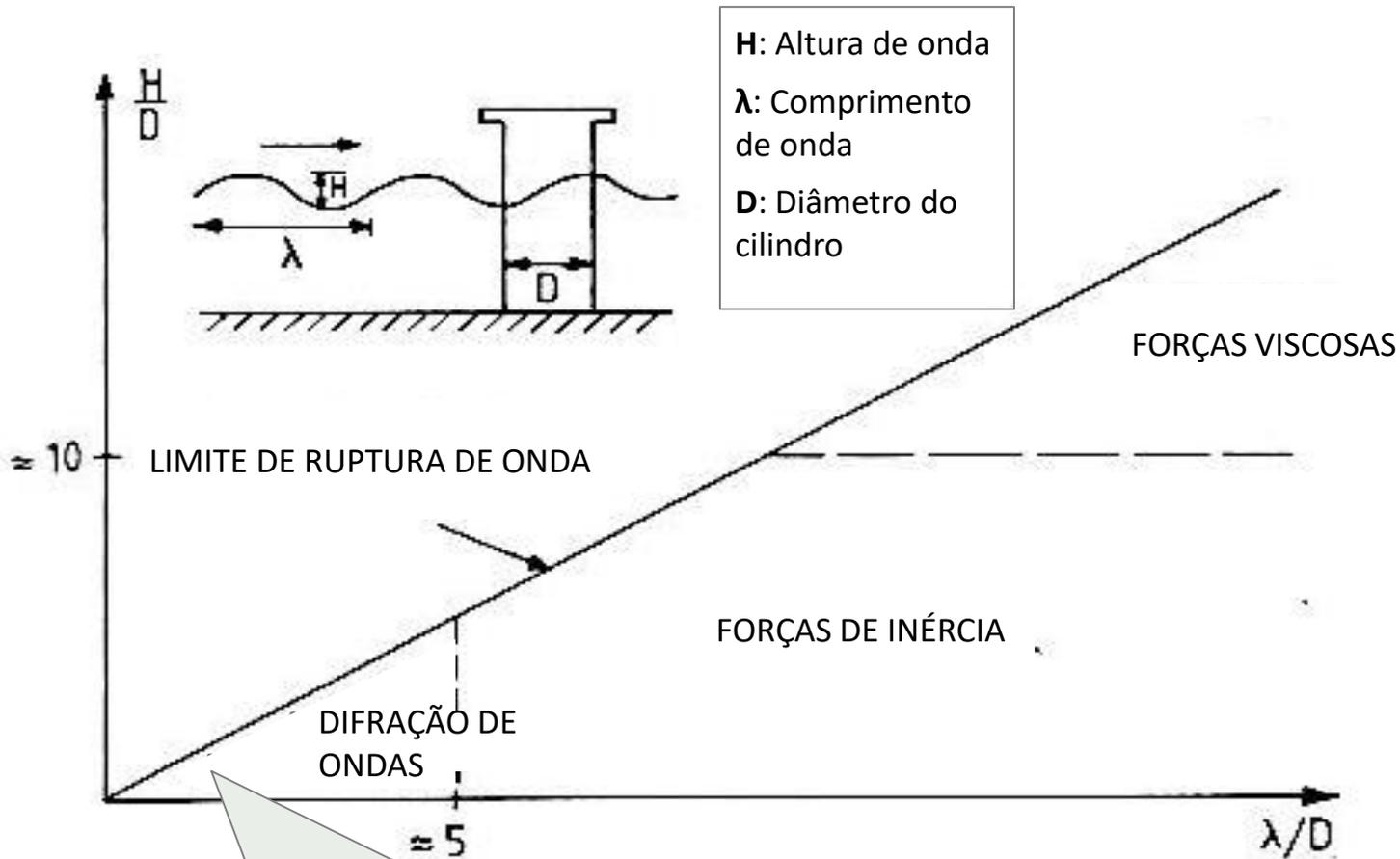
1: O critério limite para comprimentos entre 100 e 330m varia praticamente de modo linear entre os valores de L=100m e 330m, onde L é o comprimento da embarcação

2: O critério limite para comprimentos entre 100 e 300m varia praticamente de modo linear entre os valores de L=100m e 300m, onde L é o comprimento da embarcação

Critério para a execução de alguns tipos de trabalho

Aceleração vertical	Aceleração lateral	<i>Roll</i>	Descrição
0.20g	0.10g	6.0°	Trabalhos manuais leves
0.15g	0.07g	4.0°	Trabalhos manuais pesados
0.10g	0.05g	3.0°	Trabalhos intelectuais
0.05g	0.04g	2.5°	Passageiros em trânsito
0.02g	0.03g	2.0°	Cruzeiro

Classificação hidrodinâmica das estruturas

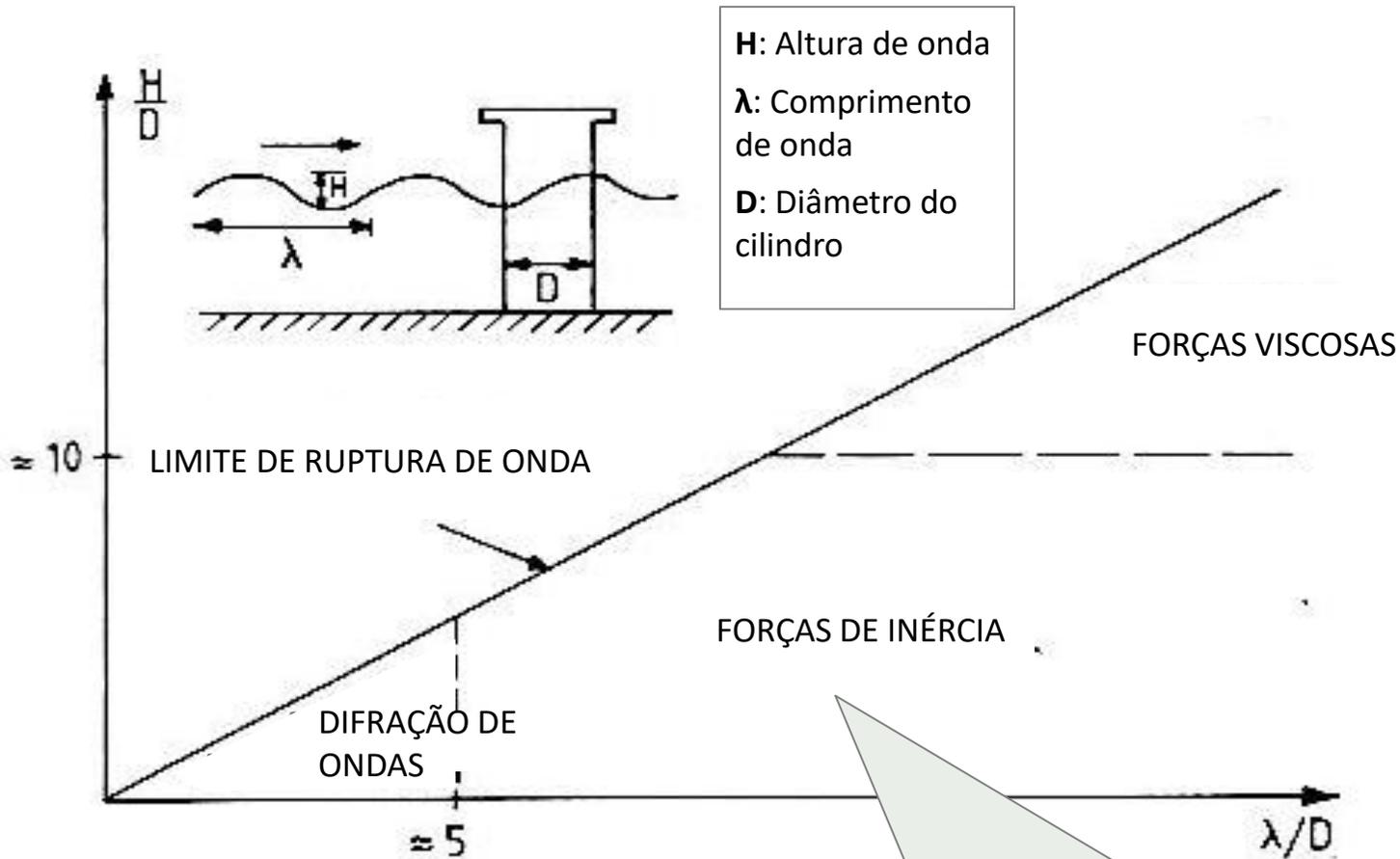


- No estudo de movimentos e carregamentos causados por ondas os efeitos viscosos bem como o fluxo potencial são os efeitos mais importantes
- Esses efeitos causam esforços na interação do fluido com a estrutura, sendo os principais devido a: **Difração de ondas, Forças de Inércia e Forças Viscosas**

Atuando em uma Plataforma de Gravidade com diâmetro característico $D=100\text{m}$ em um mar com onda regular de $H=30\text{m}$ e $\lambda=300\text{m}$, teríamos $H/D=0.3$ e $\lambda/D=3$

Assim o efeito predominante nesse tipo de estrutura será o de **Difração de onda**

Classificação hidrodinâmica das estruturas

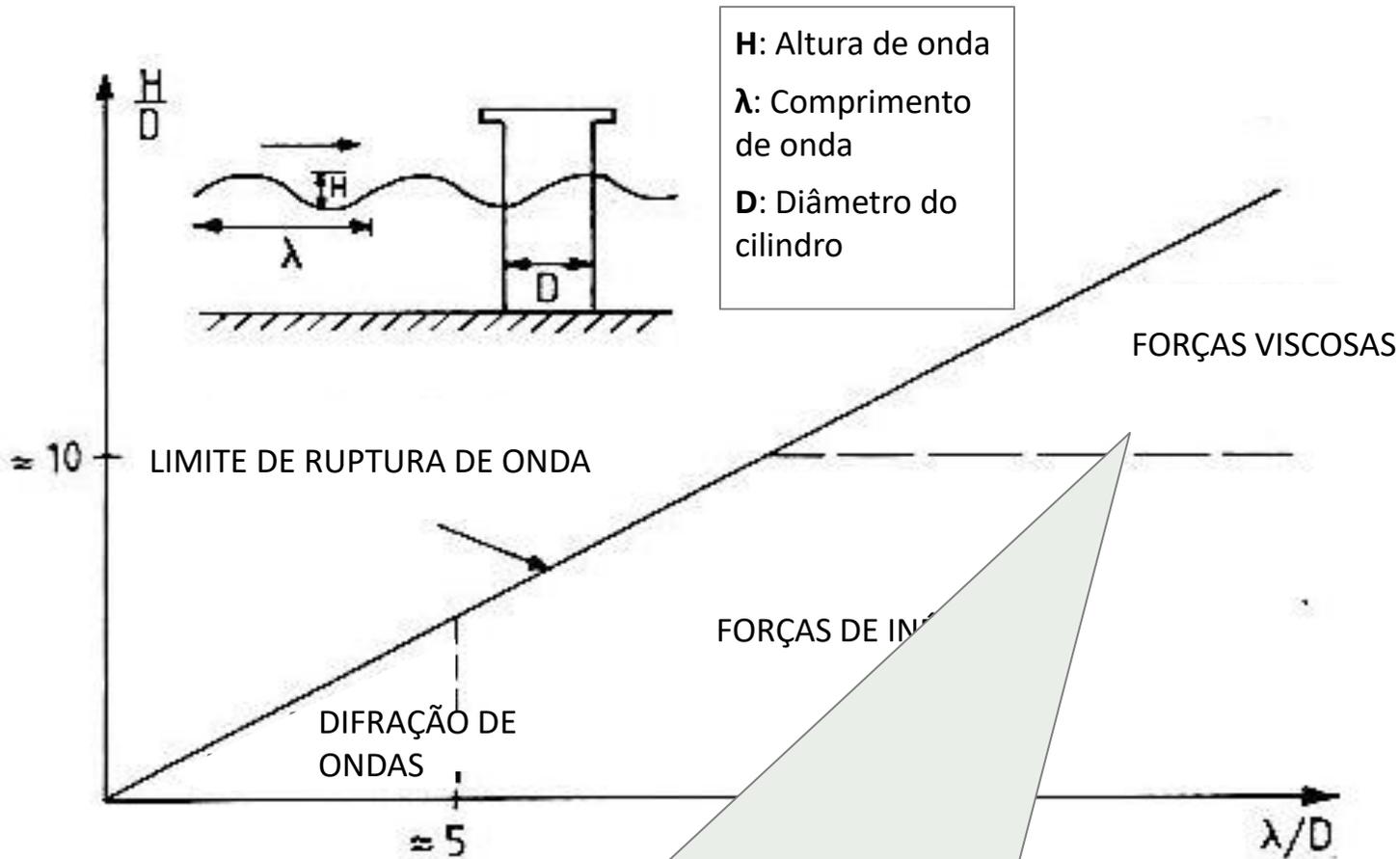


- No estudo de movimentos e carregamentos causados por ondas os efeitos viscosos bem como o fluxo potencial são os efeitos mais importantes
- Esses efeitos causam esforços na interação do fluido com a estrutura, sendo os principais devido a: **Difração de ondas, Forças de Inércia e Forças Viscosas**

Atuando em uma Plataforma Semi-Sub com diâmetro característico $D=10\text{m}$ em um mar com onda regular de $H=30\text{m}$ e $\lambda=300\text{m}$, teríamos $H/D=3$ e $\lambda/D=30$

Assim o efeito predominante nesse tipo de estrutura será o de **Força de Inércia**

Classificação hidrodinâmica das estruturas



- No estudo de movimentos e carregamentos causados por ondas os efeitos viscosos bem como o fluxo potencial são os efeitos mais importantes
- Esses efeitos causam esforços na interação do fluido com a estrutura, sendo os principais devido a: **Difração de ondas, Forças de Inércia e Forças Viscosas**

Atuando em nas pernas de uma Plataforma do tipo Jaqueta com diâmetro característico $D=1\text{m}$ em um mar com onda regular de $H=30\text{m}$ e $\lambda=300\text{m}$, teríamos $H/D=30$ e $\lambda/D=300$
Assim o efeito predominante nesse tipo de estrutura será o de **Força Viscosa**

INTERAÇÃO ENTRE O SISTEMA OCEÂNICO E O MAR



Não relevante para 2020

Ações ambientais mais relevantes para o projeto de sistemas offshore



Não relevante para 2020

DADOS DO METOCEAN: EXEMPLO – CORRENTEZA

Profile of Extreme Currents (m/s) With Surface SW Direction

Level	RETURN PERIOD (YEARS)						DIRECTION
	1	10	20	30	50	100	
-50.00	1.11	1.43	1.51	1.56	1.63	1.71	SW
-100.00	1.11	1.43	1.51	1.56	1.63	1.71	SW
-250.00	0.40	0.53	0.57	0.59	0.62	0.65	S
-350.00	0.34	0.47	0.51	0.53	0.56	0.59	S
-450.00	0.29	0.41	0.44	0.46	0.49	0.52	S
-550.00	0.14	0.20	0.22	0.23	0.24	0.26	E
-650.00	0.23	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	E
-750.00	0.18	0.22	0.24	0.24	0.25	0.26	NE
-950.00	0.31	0.41	0.44	0.45	0.47	0.50	NE
-1050.00	0.35	0.47	0.50	0.52	0.55	0.58	NE
-1200.00	0.26	0.31	0.33	0.33	0.34	0.36	NE

Não relevante para 2020

DADOS DO METOCEAN: EXEMPLO – ONDAS

Period → Height ↓	0 – 2	2 – 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	Total	%	Tmed
0.0-0.5	85171	166779	50632	10991	2167	425	110	25	13	7	5	0	316325	17.27	3.31
0.5-1.0	11867	208032	229458	111698	40289	11835	2862	547	132	49	17	0	616786	33.70	5.38
1.0-1.5	322	47777	164356	145537	73169	27184	7458	1481	271	55	32	0	467642	25.53	6.91
1.5-2.0	6	6545	64094	85930	53460	23925	7570	1592	266	41	25	0	243454	13.30	7.77
2.0-2.5	0	742	19753	38224	27785	14938	5669	1263	190	37	13	2	108616	5.93	8.41
2.5-3.0	0	82	5311	14769	12522	8057	3290	798	149	11	3	0	44992	2.46	8.96
3.0-3.5	0	6	1277	5433	5522	4149	1907	510	90	10	3	0	18907	1.03	9.50
3.5-4.0	0	1	309	2006	2350	1963	987	265	51	3	0	0	7935	.43	9.90
4.0-4.5	0	0	69	733	1117	973	535	168	33	1	0	0	3629	.20	10.32
4.5-5.0	0	0	12	234	513	507	321	60	11	0	0	0	1658	.09	10.68
5.0-5.5	0	0	4	83	230	271	165	52	6	0	0	0	811	.04	11.31
5.5-6.0	0	0	1	30	115	123	86	23	1	0	0	0	379	.02	10.98
6.0-6.5	0	0	0	8	39	69	35	12	0	0	0	0	163	.00	12.14
6.5-7.0	0	0	0	3	21	26	16	2	0	0	0	0	68	.00	11.16
7.0-7.5	0	0	0	0	5	18	15	2	0	0	0	0	40	.00	11.93
7.5-8.0	0	0	0	2	3	3	7	0	0	0	0	0	15	.00	11.60
8.0-8.5	0	0	0	0	2	3	1	0	0	1	0	0	7	.00	10.34
8.5-9.0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4	.00	12.00
9.0-9.5	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	4	.00	11.25
9.5-10.0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4	.00	11.50
10.0-10.5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	.00	13.00
10.5-11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.0-11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.5-12.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	.00	12.00
Total	97366	429964	535276	415681	219311	94475	31041	6800	1213	215	98	2	1831442	100.00	
%	5.32	23.48	29.23	22.70	11.97	5.16	1.69	.37	.07	.01	.00	.00			
Mean Height	.31	.64	1.06	1.39	1.60	1.81	2.01	2.10	2.02	1.62	1.49	2.17			

Não relevante para 2020

DADOS DO METOCEAN: EXEMPLO – ONDAS

DIR.	PARAMETER	RETURN PERIOD (YEARS)						
		1	10	20	30	50	100	1000
N	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.4	4.2	4.5	4.6	4.8	5.0	5.8
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	7.50	9.00	9.00	9.50	9.50	10.00	11.00
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	5.59	6.67	6.67	7.03	7.03	7.39	8.10
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	6.63	8.09	8.55	8.79	9.12	9.54	10.98
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	9.90	10.31	10.43	10.48	10.56	10.65	10.94
NNE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.7	4.7	5.0	5.2	5.3	5.6	6.6
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	8.50	9.50	10.00	10.00	10.00	10.50	11.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	6.31	7.03	7.39	7.39	7.39	7.74	8.45
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.21	8.98	9.47	9.98	10.20	10.74	12.40
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	10.08	10.53	10.64	10.75	10.79	10.90	11.19
NE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	4.0	5.1	5.5	5.7	5.9	6.2	7.3
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	9.00	10.00	10.00	10.50	10.50	10.50	11.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	6.67	7.39	7.39	7.74	7.74	7.74	8.45
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.77	9.79	10.42	10.75	11.21	11.82	13.81
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	10.23	10.71	10.84	10.90	10.99	11.09	11.42
ENE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.9	5.1	5.4	5.7	5.9	6.3	7.4
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	9.50	10.00	10.00	10.00	10.50	10.50	11.00
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	7.03	7.39	7.39	7.39	7.74	7.74	8.10
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.46	9.72	10.39	10.79	11.25	11.91	14.07
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	10.15	10.69	10.83	10.91	10.99	11.11	11.46
E	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.8	5.1	5.4	5.7	5.9	6.3	7.6
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	9.50	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	7.03	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.74
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.20	9.64	10.37	10.80	11.34	12.06	14.46
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	10.07	10.67	10.82	10.91	11.01	11.14	11.51
ESE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	4.1	5.4	5.8	6.1	6.4	6.7	8.1
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	10.50	10.50	11.00	11.00	11.00	11.00	11.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	7.74	7.74	8.10	8.10	8.10	8.10	8.45
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.77	10.33	11.10	11.56	12.11	12.88	15.40
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	11.04	11.99	12.26	12.42	12.60	12.86	13.69
SE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	4.4	5.8	6.3	6.5	6.8	7.3	8.7
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	11.00	11.50	11.50	11.50	12.00	12.00	12.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	8.10	8.45	8.45	8.45	8.81	8.81	9.17
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	8.33	11.03	11.84	12.31	12.88	13.69	16.34
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	12.01	13.31	13.70	13.93	14.20	14.59	15.87
SSE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	4.8	6.4	6.8	7.1	7.5	7.9	9.5
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	11.50	12.50	13.00	13.00	13.00	13.50	14.00
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	8.45	9.17	9.52	9.52	9.52	9.86	10.23
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	9.08	12.03	12.84	13.35	14.03	14.85	17.71
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	12.37	13.79	14.18	14.43	14.75	15.15	16.52

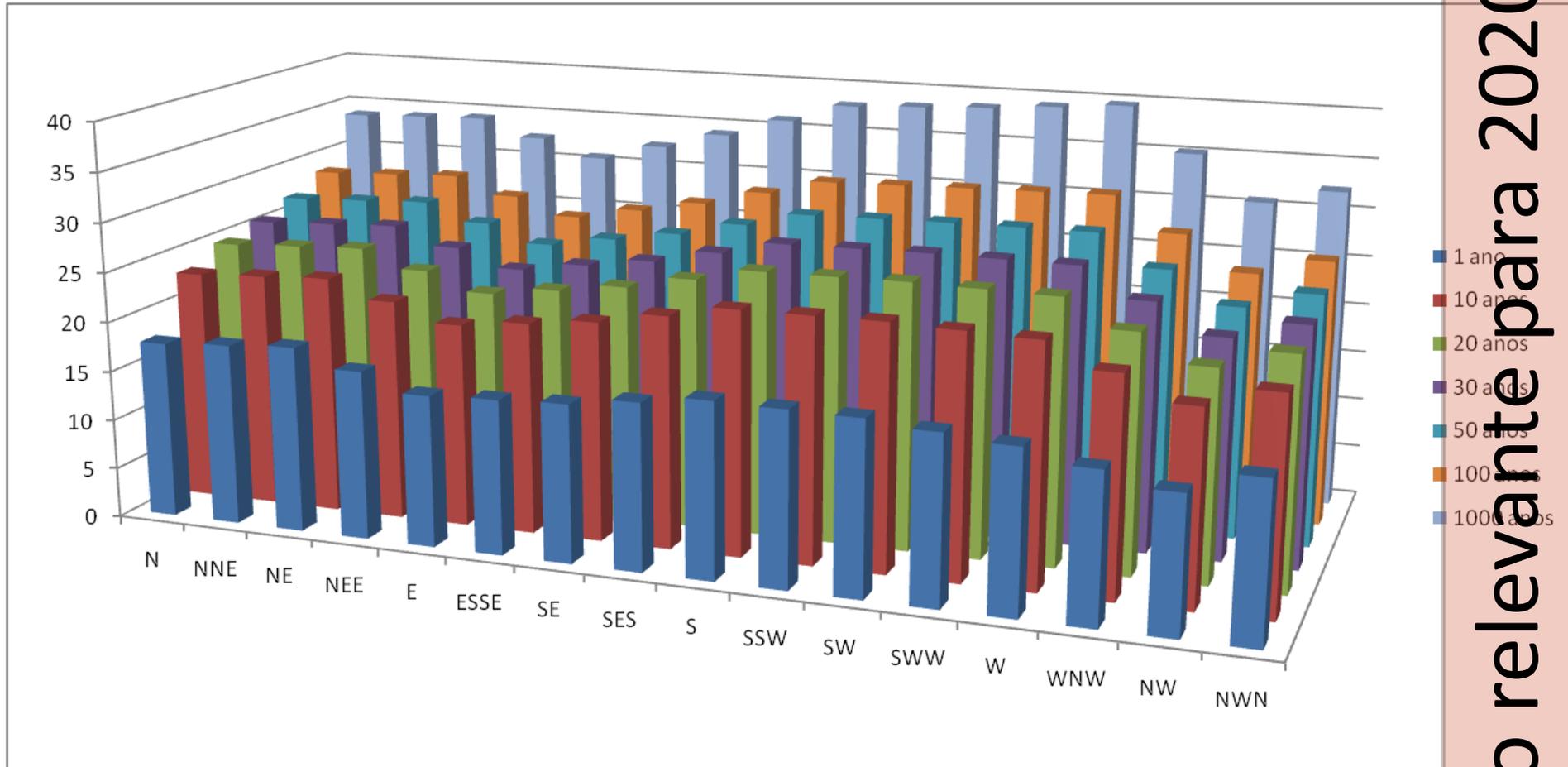
Não relevante para 2020

DADOS DO METOCEAN: EXEMPLO – ONDAS (zoom)

DIR.	PARAMETER	RETURN PERIOD (YEARS)						
		1	10	20	30	50	100	1000
N	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.4	4.2	4.5	4.6	4.8	5.0	5.8
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	7.50	9.00	9.00	9.50	9.50	10.00	11.00
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	5.59	6.67	6.67	7.03	7.03	7.39	8.10
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	6.63	8.09	8.55	8.79	9.12	9.54	10.98
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	9.90	10.31	10.43	10.48	10.56	10.65	10.94
NNE	Hs: SIGNIFICANT WAVE HEIGHT (m)	3.7	4.7	5.0	5.2	5.3	5.6	6.0
	TP: PEAK PERIOD ASSOCIATED TO Hs (s)	8.50	9.50	10.00	10.00	10.00	10.50	11.50
	TZ: ZERO UP-CROSSING PERIOD (s)	6.31	7.03	7.39	7.39	7.39	7.74	8.45
	HMAX: MAXIMUM WAVE HEIGHT (m)	7.21	8.98	9.47	9.98	10.20	10.74	12.40
	THMAX: PERIOD ASSOCIATED TO HMAX (s)	10.08	10.53	10.64	10.75	10.79	10.90	11.39

Não relevante para 2020

DADOS DO METOCEAN: EXEMPLO – VENTOS



Medições feitas para a Bacia de Campos, entre 10/1986 e 05/2003. Padrão: a 10m de altura por 10min.

Não relevante para 2020

Interação entre o sistema oceânico e o mar

Wamit

UNIDADE FLUTUANTE (RAO)

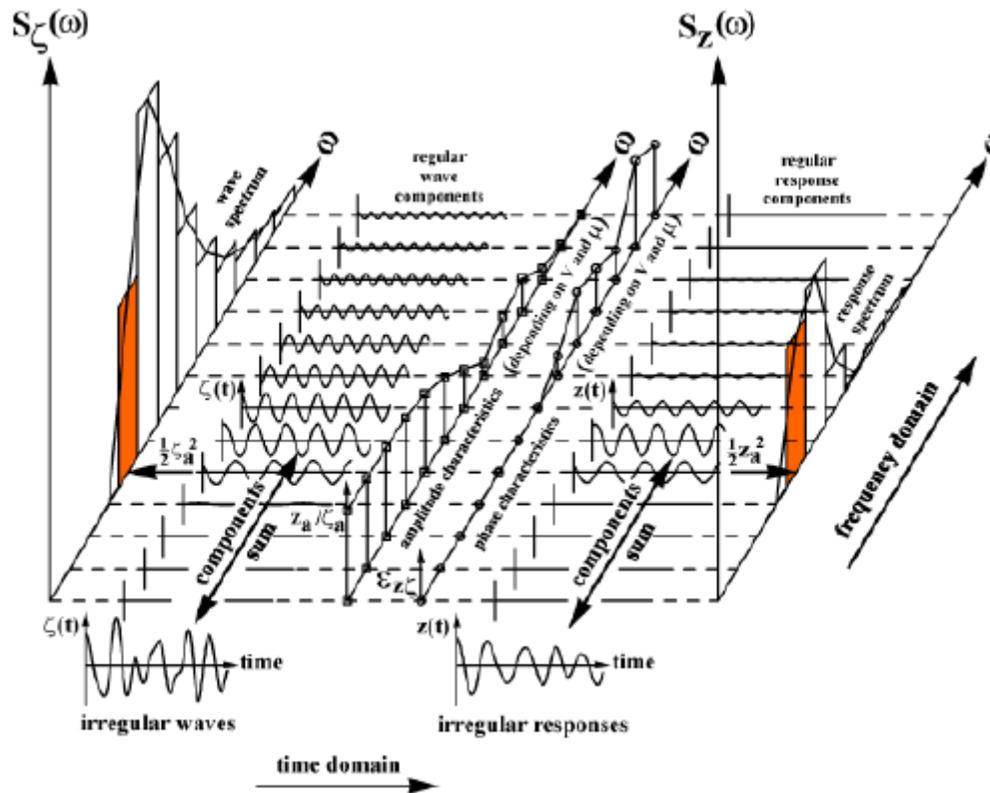
Estadísticas

MAR
(espectros S_{ξ})

Cruzamento

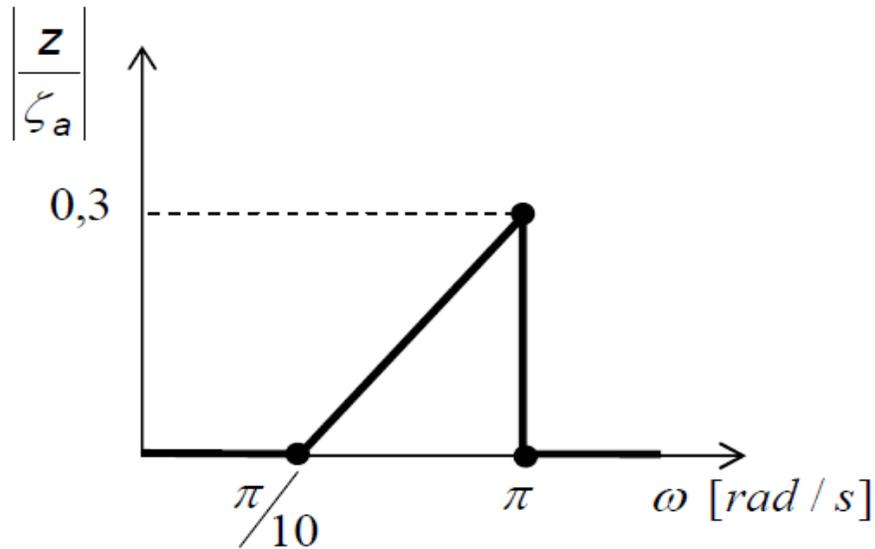
RESPOSTA DINÂMICA (espectros de resposta S_z)

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

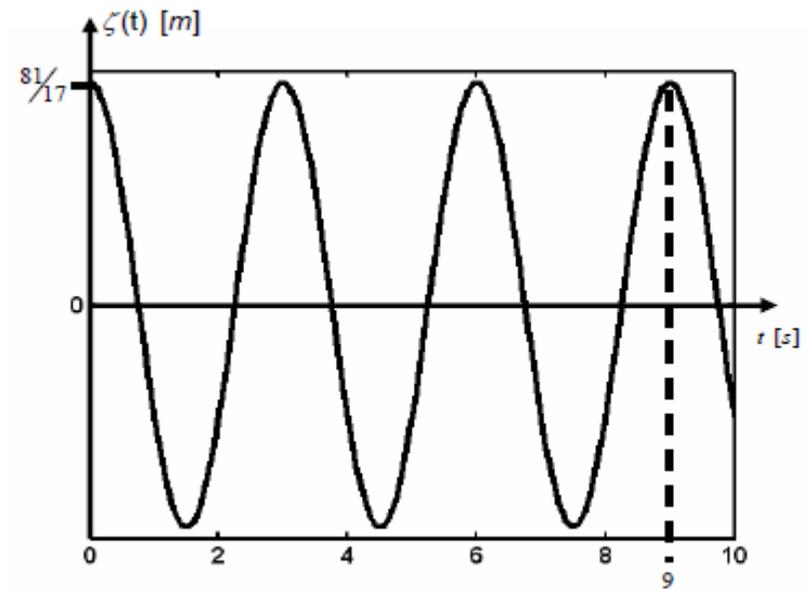


Exemplo de Aplicação (Cruzamento Espectral): Seja um navio hipotético com RAO de *heave* dado a seguir. Determinar sua resposta dinâmica em *heave* quando excitado pela onda regular dada abaixo.

RAO:



Excitação regular:



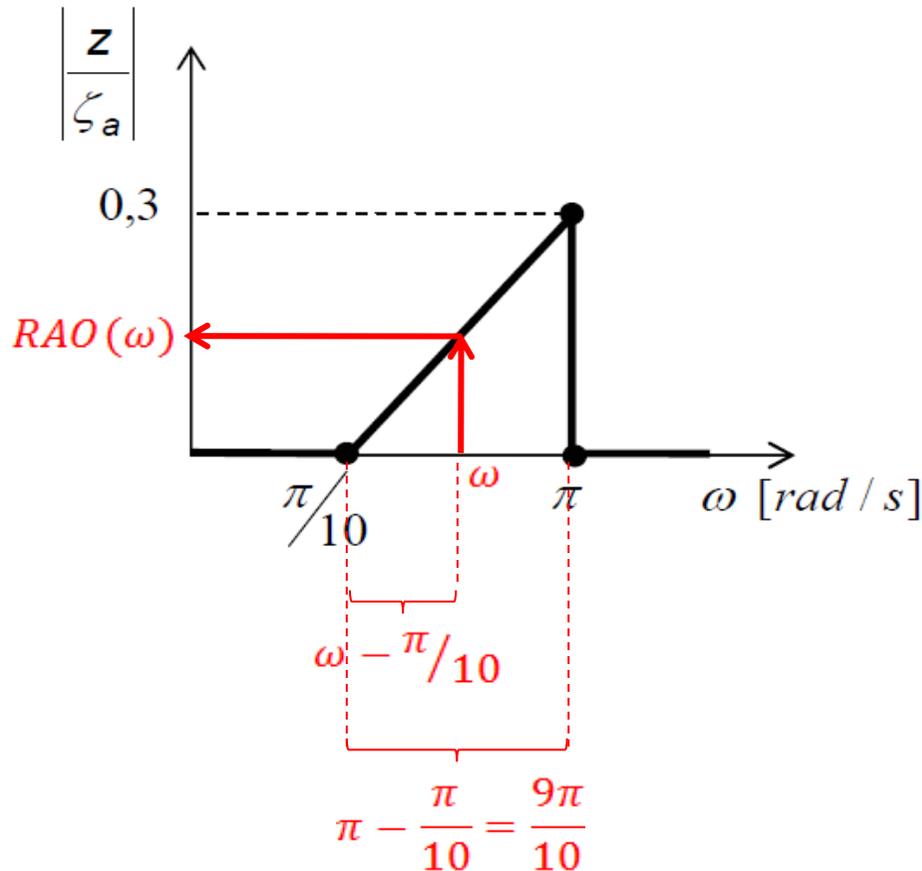
RESOLUÇÃO 2: Usando a equação de cruzamento espectral

• Equação do RAO: $\frac{9\pi}{10} = \frac{\omega - \pi/10}{RAO(\omega)}$

$$RAO(\omega) = \frac{1}{3\pi} \cdot \left(\omega - \pi/10 \right)$$

$$S_\zeta = \frac{1}{2} \cdot (\zeta_A)^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{81}{17} \right)^2$$

RAO:



$$S_j(\omega) = |RAO(\omega)|^2 \cdot S_\zeta(\omega)$$

Como $\omega = 2\pi/3$ rad/s:

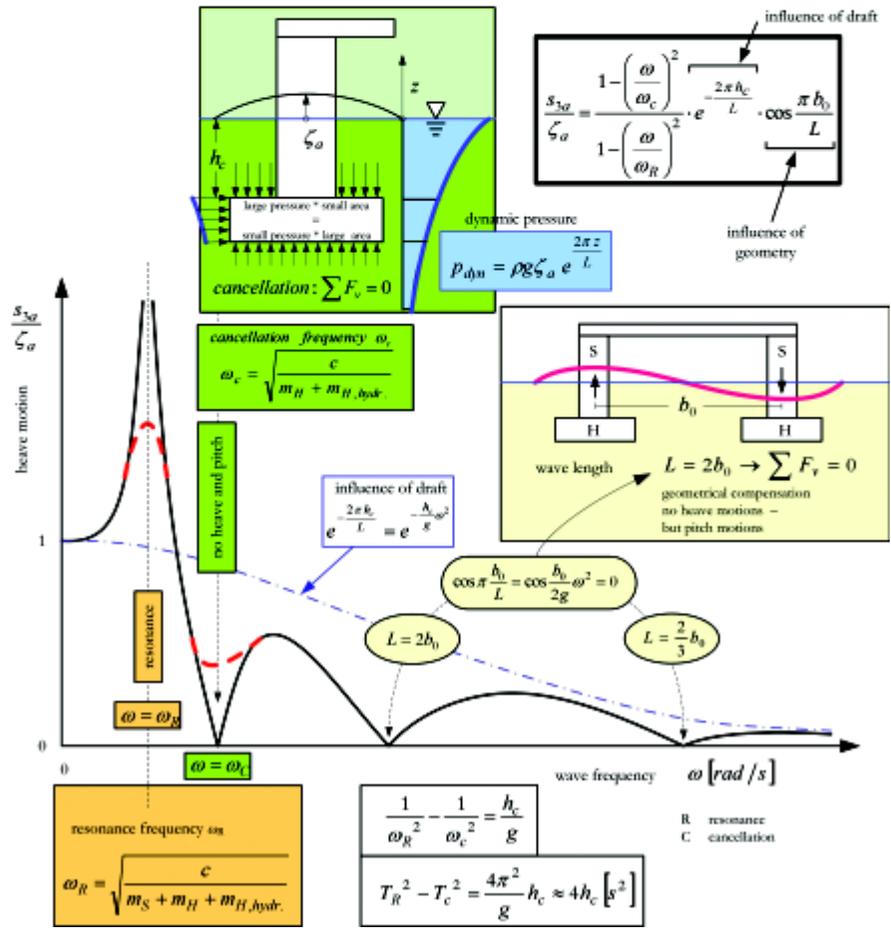
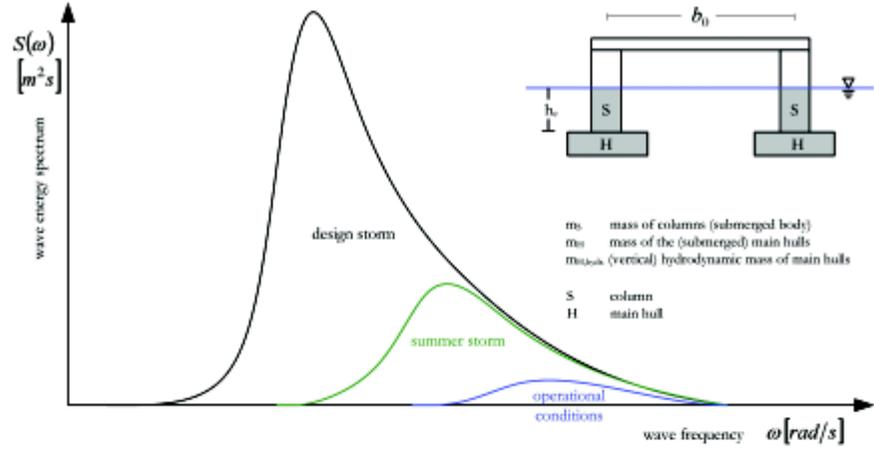
$$S_3 = \left[\frac{1}{3\pi} \cdot \left(2\pi/3 - \pi/10 \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{81}{17} \right)^2$$

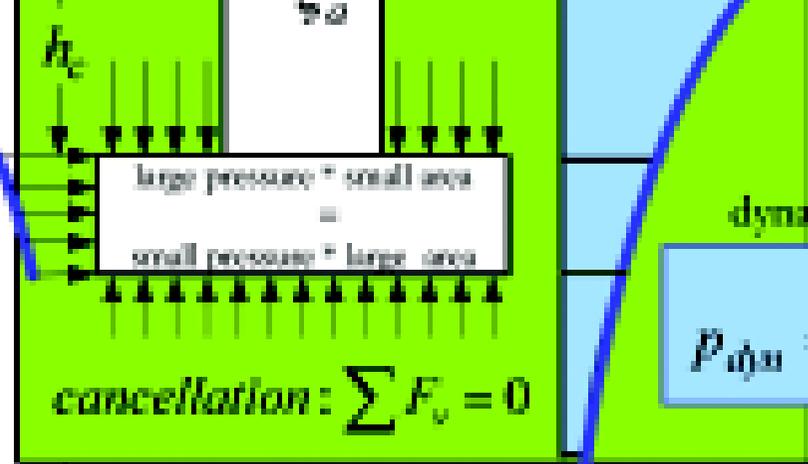
$$S_3 = \frac{1}{2} \cdot (0,9)^2$$

Mas $S_3 = \frac{1}{2} \cdot z_3^2$, então:

$$z_3 = 0,9 \text{ m}$$

- lixo





$$1 - \left(\frac{\omega}{\omega_R} \right)$$

influence of geometry

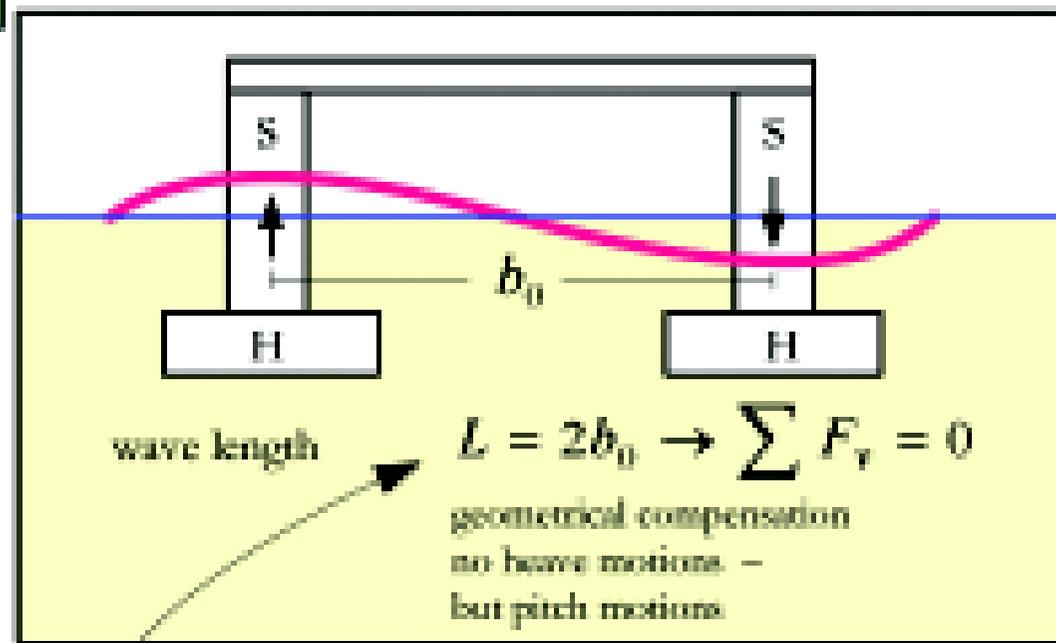
cancellation frequency ω_c

$$\omega_c = \sqrt{\frac{c}{m_H + m_{H,hydr}}}$$

no heave and pitch

influence of draft

$$e^{-\frac{2\pi k}{L}} = e^{-\frac{k}{\pi} \omega^2}$$



$$\cos \pi \frac{b_0}{L} = \cos \frac{b_0}{2g} \omega^2 = 0$$

$$L = 2b_0$$

$$L = \frac{2}{3} b_0$$