

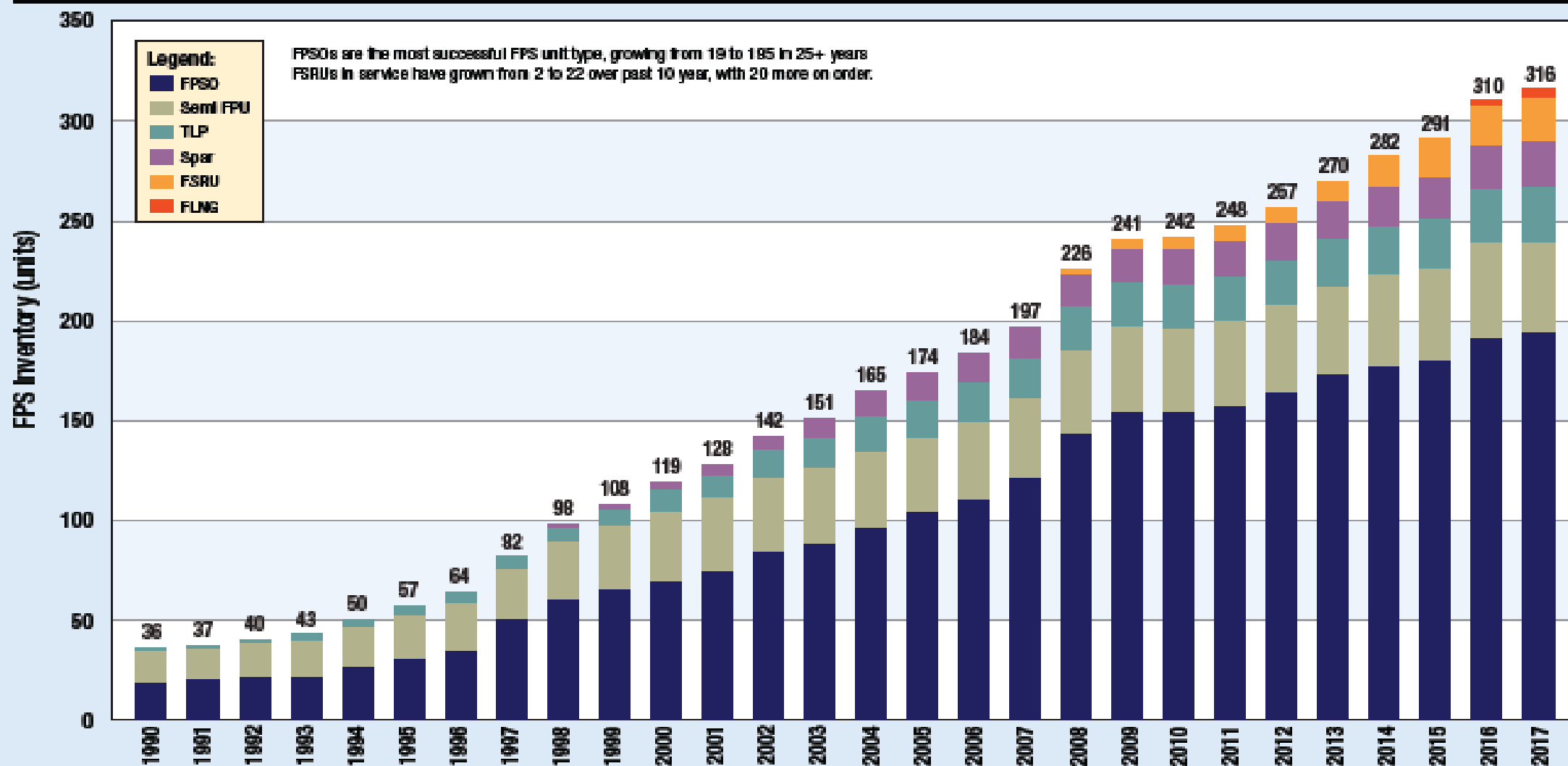
An aerial photograph of a large red and black FPSO (Floating Production Storage and Offloading) vessel, the Al-Ramli FPSO, sailing on the dark blue ocean. The ship's deck is densely packed with industrial equipment, including yellow cranes, storage tanks, and a helipad. A tall, red and white lattice crane extends from the deck towards the upper right. In the background, several smaller support vessels are visible. A blue banner with white text is overlaid across the middle of the image.

FPSO - FLOATING PRODUCTION STORAGE AND OFFLOADING PLATFORM ASPECTOS DO PROJETO

FPSO

Principal Tipo de Plataforma Flutuante

Floating Production Systems Growth (1990-2017) • (Excludes: MOPUs, FS0s, FS0S)

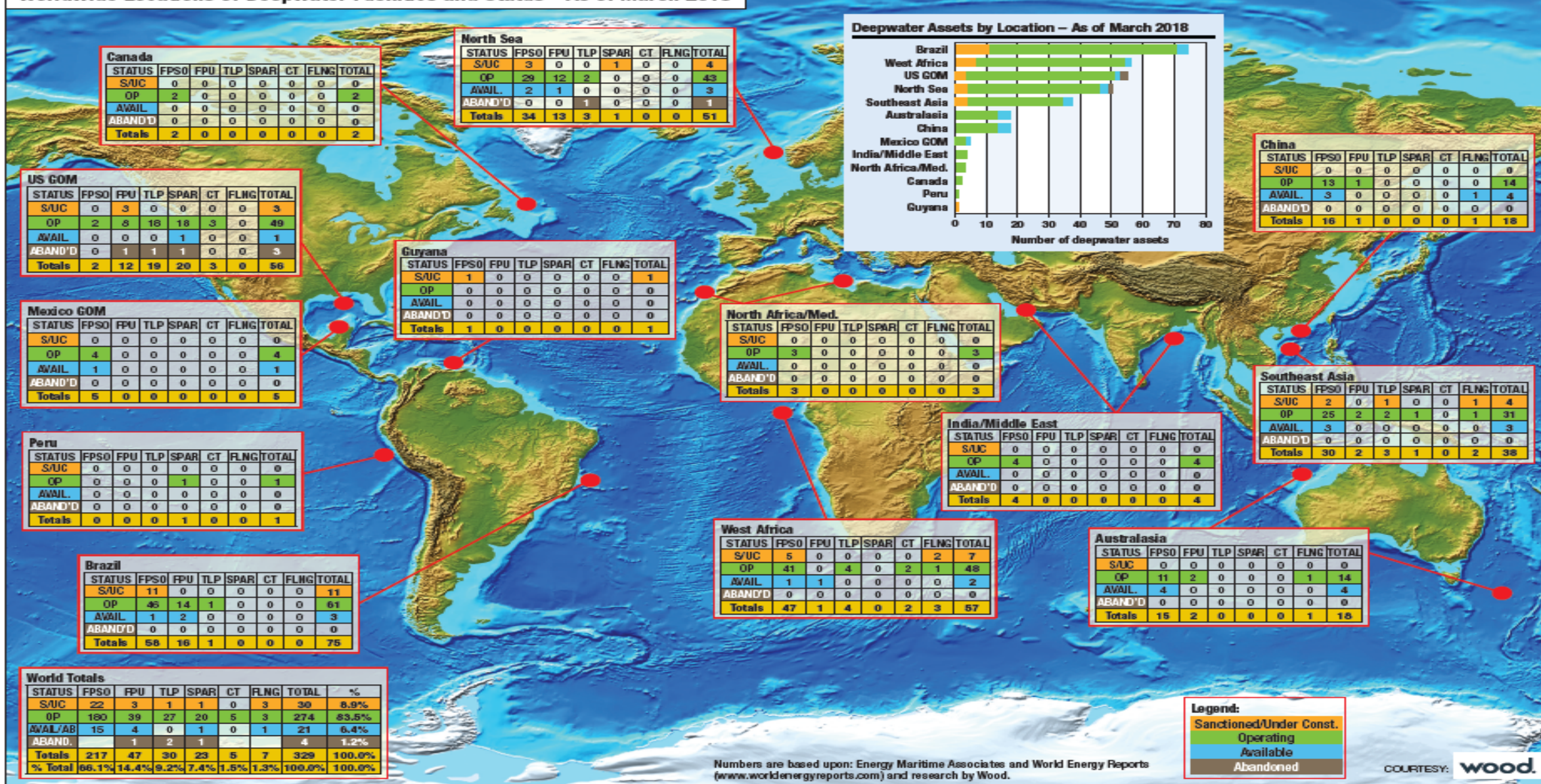


Source: Energy Maritime Associates; www.energy-maritimeassociates.com

FPSO

Principal Tipo de Plataforma Flutuante no Brasil

Worldwide Locations of Deepwater Facilities and Status - As of March 2018



FPSO

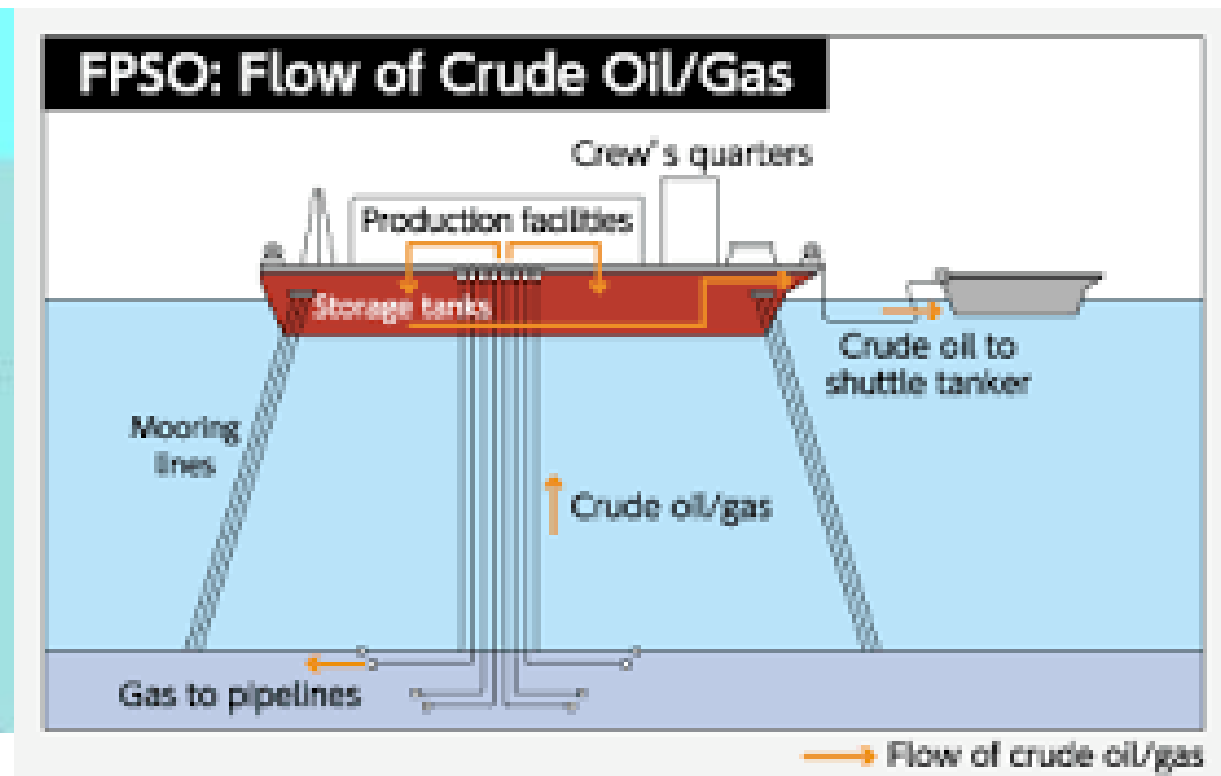
Principal Tipo de Plataforma Flutuante no Brasil

- CONVERSÃO
- PROJETO NOVO



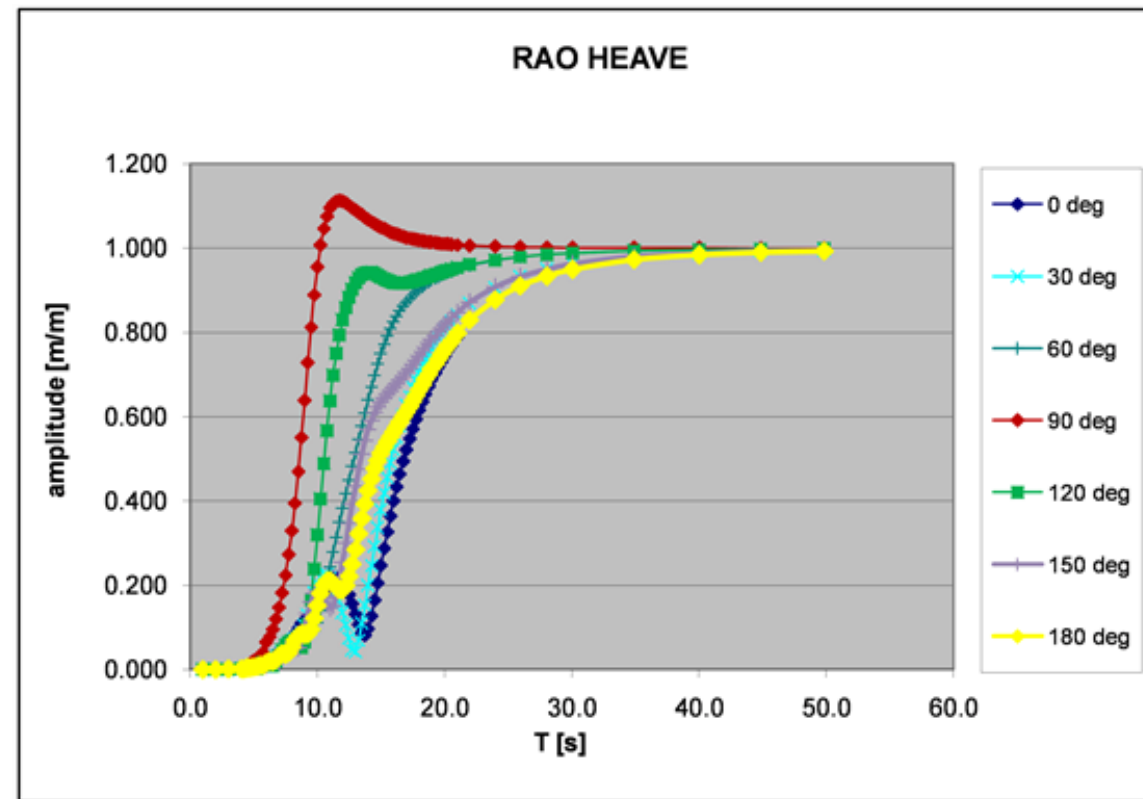
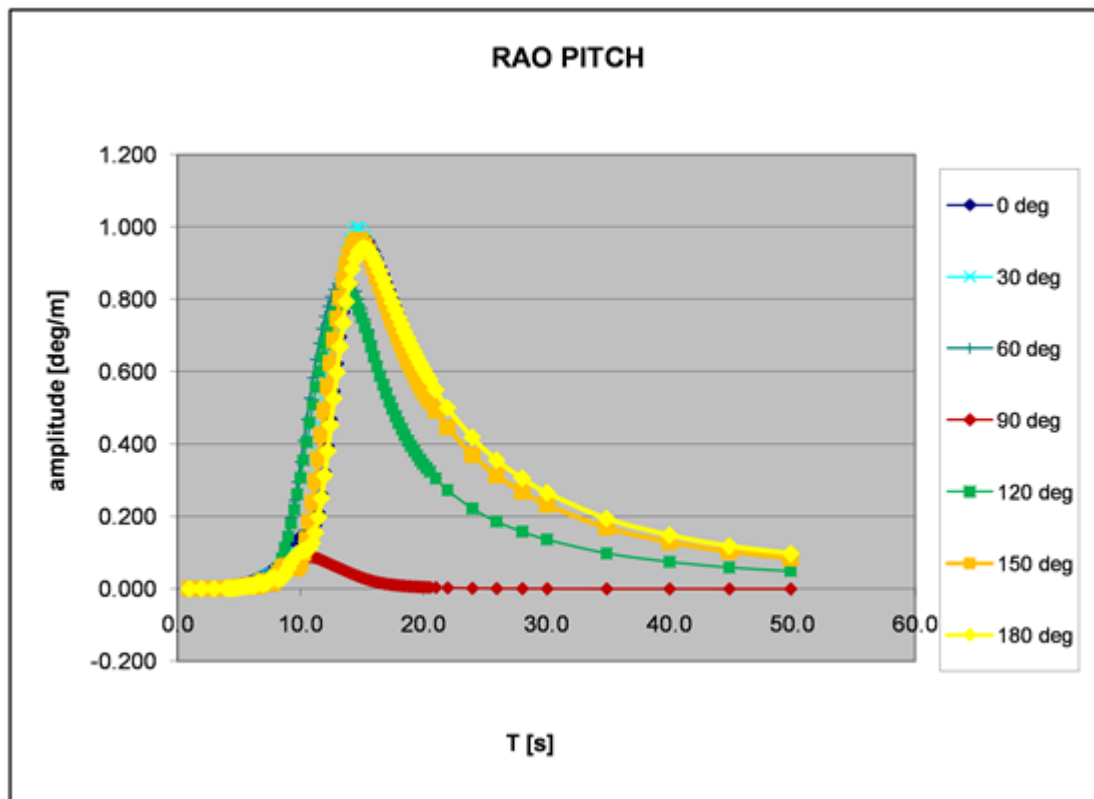
FPSO

- FUNÇÕES PRINCIPAIS
- Suportar a Planta de Produção
- Suportar os Risers
- Armazenar e Exportar o Óleo Produzido
- Exportar o Gás produzido



FPSO

- PRINCIPAIS REQUISITOS DE DESEMPENHO
- Flutuabilidade: Peso = Empuxo
- Estabilidade Inicial: $GM > 0$
- Resistência Estrutural
- Comportamento no Mar (movimentos de 1ª ordem)



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR

- Comportamento no Mar (movimentos de 1ª ordem) – Heave, Roll, Pitch, Surge, Sway e Yaw
- Comportamento Dinâmico equivalente a um sistema massa/mola/amortecedor excitado pela força das ondas – sistema dinâmico de segunda ordem

$$(M + M_a) \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F_H$$

M = massa

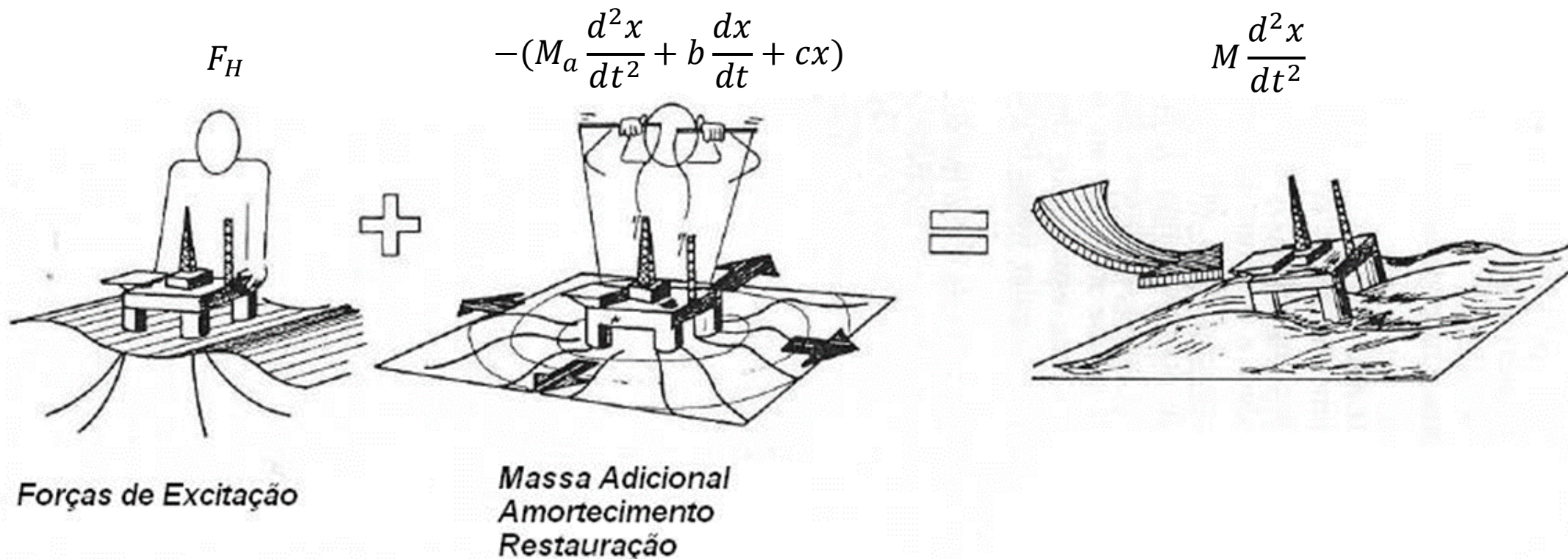
M_a = massa adicional

b = coeficiente de amortecimento

c = coeficiente de restauração

F_H = força

hidrodinâmica



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR

Comportamento no Mar (movimentos de 1ª ordem) – Heave, Roll, Pitch, Surge, Sway e Yaw

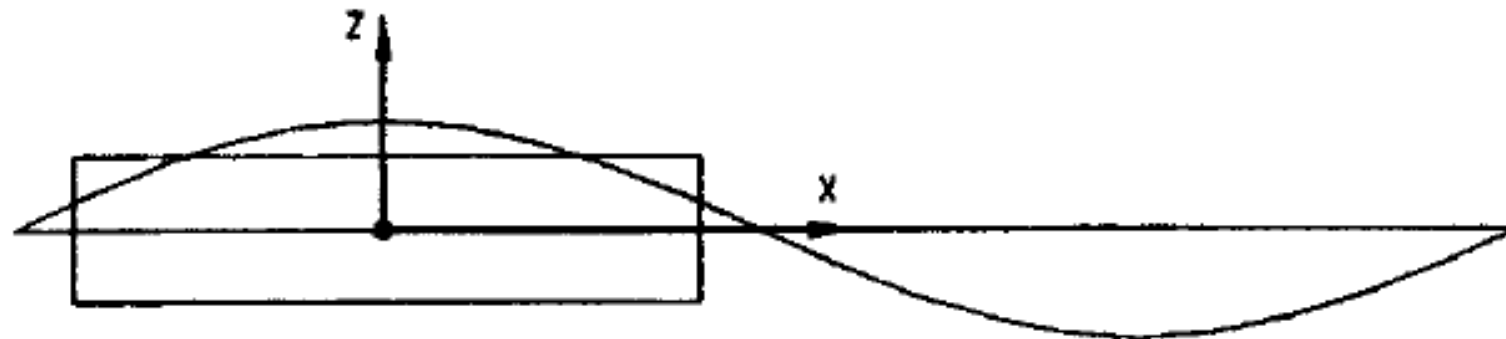
- ▶ Movimentos no plano vertical - resposta à ação das ondas
 - ▶ Os movimentos de *heave, roll e pitch, tanto isolados como combinados*, induzem movimentos verticais em qualquer posição da plataforma!
 - ▶ Esta é a maior preocupação em termos de comportamento no mar, pois podem produzir deslocamentos e acelerações excessivas no convés (planta de produção) e nas conexões com os Risers e Linhas de Ancoragem;
 - ▶ Esses movimentos têm **restauração hidrostática** e, portanto **frequências naturais naturalmente definidas**.
 - ▶ Os movimentos de Surge, Sway e Yaw produzem deslocamentos no plano horizontal, cujas frequências naturais dependem da rigidez do sistema de ancoragem.

FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO - F_H

As Forças de Excitação das ondas são aquelas que resultam da ação das ondas sobre um corpo flutuante estacionário na superfície do mar.

Estas Forças Hidrodinâmicas das ondas podem ser divididas em duas componentes:

- Força da Onda Incidente = Força de Froude-Krylov = força devido ao campo de pressões produzido com a passagem das ondas
- Força de Difração = Força resultante da distorção no escoamento produzida pela presença do corpo no escoamento das ondas



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO – Froude-Krylov

A Força de Froude-Krylov é resultante do campo de pressão produzido pela passagem das ondas

$$p_{FK} = \rho g \eta e^{kz}$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

H = altura da onda

λ = comprimento da onda

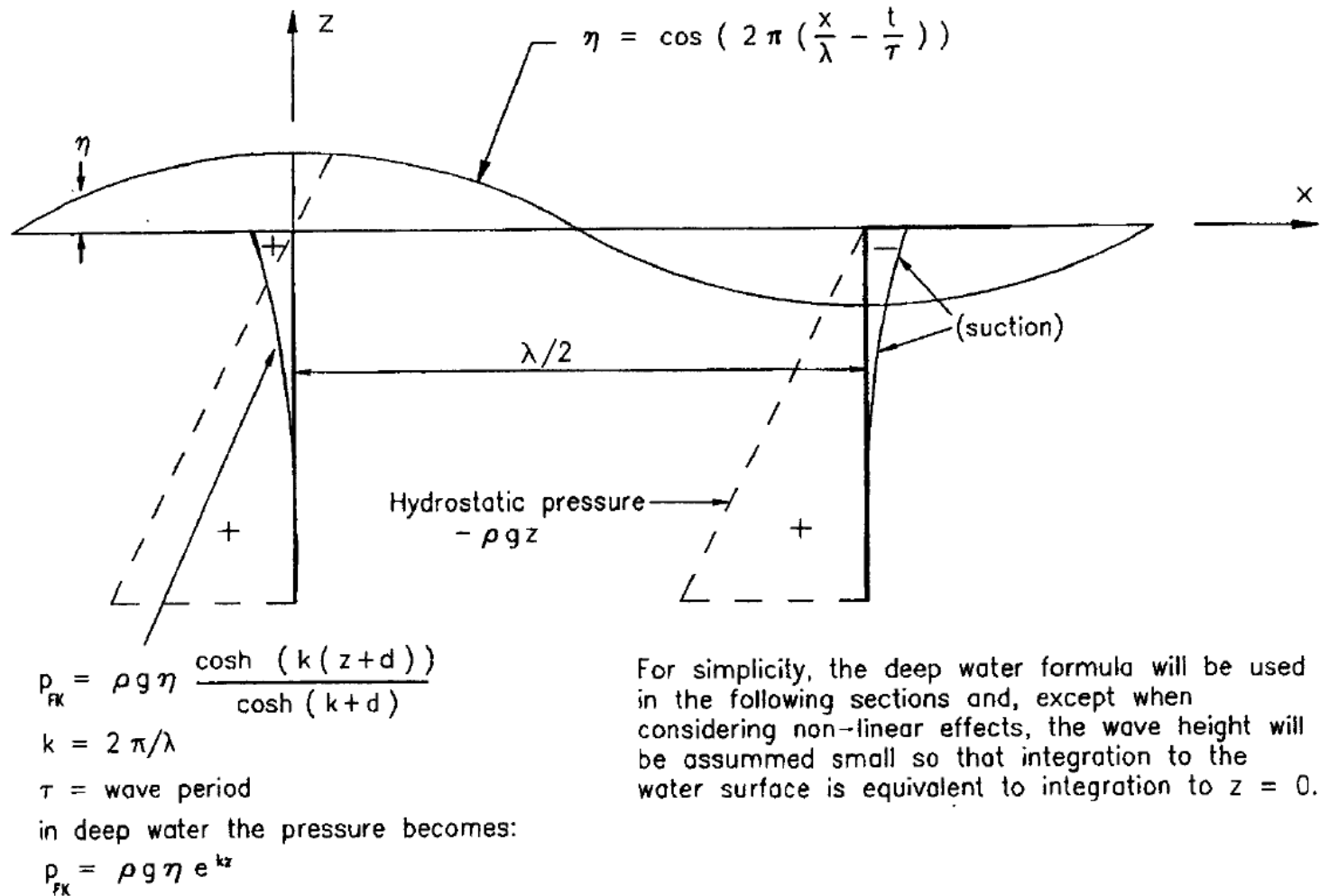


Figure 5A.1 Froude-Krylov pressure generated by a passing wave (linear wave theory)

FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO – DIFRAÇÃO

Se um corpo sólido estiver imerso num escoamento fluido ele vai distorcer o escoamento e alterar a distribuição de pressão. O efeito é complexo e pode ser calculado teoricamente pela Teoria de Difração.

Como primeira aproximação este efeito pode ser tratado como se uma massa adicional de fluido fosse retida pelo corpo, resultando numa força sobre o corpo igual a:

$$F_{MA} = M_A a_{fluido}$$

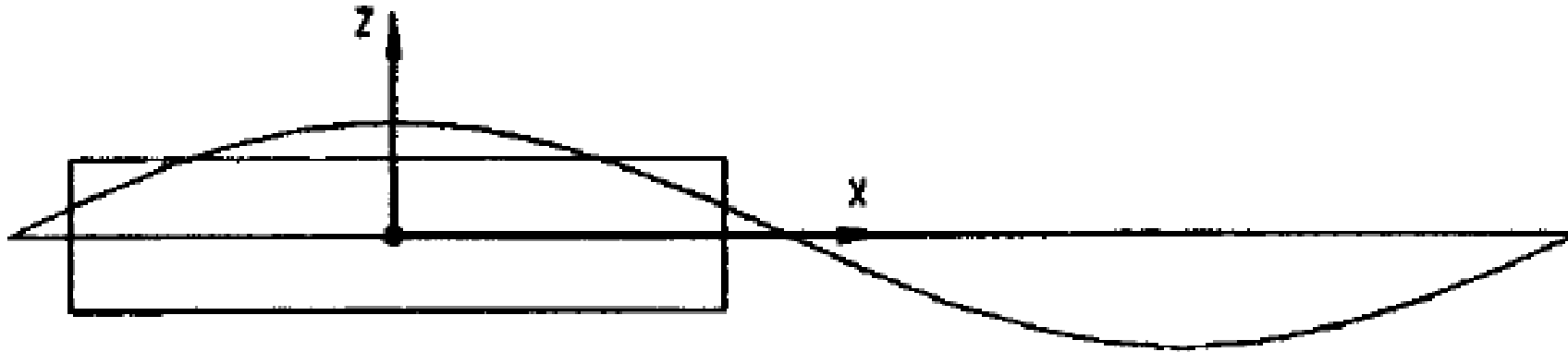
Onde:

F_{MA} = força da massa adicional

M_A = massa adicional

a_{fluido} = aceleração do fluido

FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO – ONDA



Considere uma onda de pequena amplitude se propagando na direção positiva de x. Da Teoria Linear de Ondas tem-se que:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) = \text{perfil da onda}$$

$$\phi = \frac{gH\tau}{4\pi} e^{kz} \sin(kx - \omega t) = \text{potencial de velocidades; onde: } \tau = \textit{período da onda}$$

FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO – ONDA

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) = \text{perfil da onda}$$

$$\phi = \frac{gH\tau}{4\pi} e^{kz} \sin(kx - \omega t) = \text{potencial de velocidades; onde: } \tau = \textit{período da onda}$$

$$\dot{x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{\tau} e^{kz} \cos(kx - \omega t) = \text{velocidade na direção } x$$

$$\ddot{x} = \frac{2\pi^2 H}{\tau^2} e^{kz} \sin(kx - \omega t) = \text{aceleração na direção } x$$

$$\dot{z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\pi H}{\tau} e^{kz} \sin(kx - \omega t) = \text{velocidade na direção } z$$

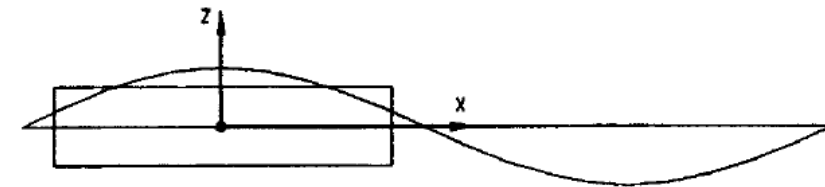
$$\ddot{z} = -\frac{2\pi^2 H}{\tau^2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) = \text{aceleração na direção } z$$

$$p = \rho g \eta e^{kz} = \rho g \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) = \text{pressão}$$

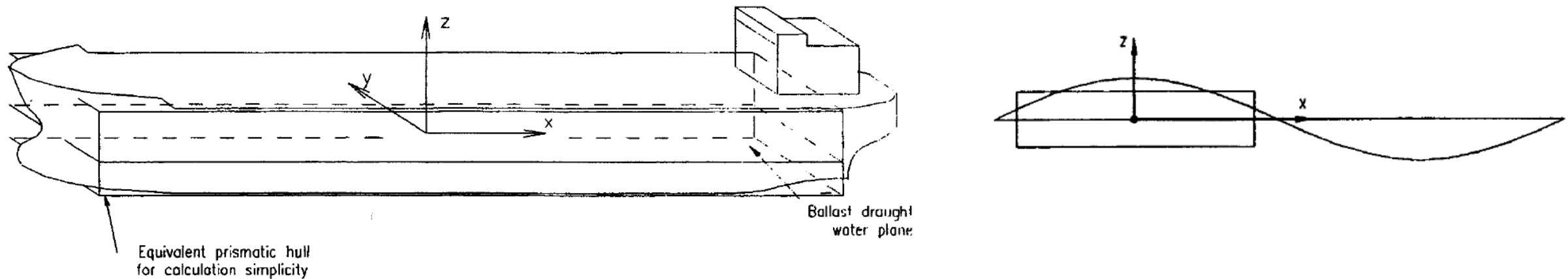
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} = \text{relação de dispersão; onde: } \omega = \text{frequência da onda} = \frac{2\pi}{\tau}$$

$\lambda = \textit{comprimento da onda}$

$H = \text{altura da onda}$



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS HIDRODINÂMICAS DE EXCITAÇÃO – ONDA



Considere o FPSO da figura, representado por um casco prismático, sofrendo a incidência de uma onda de proa que se propaga na direção de x positivo (incidência a 0°).

L = comprimento

B = boca

D = pontal

T = calado

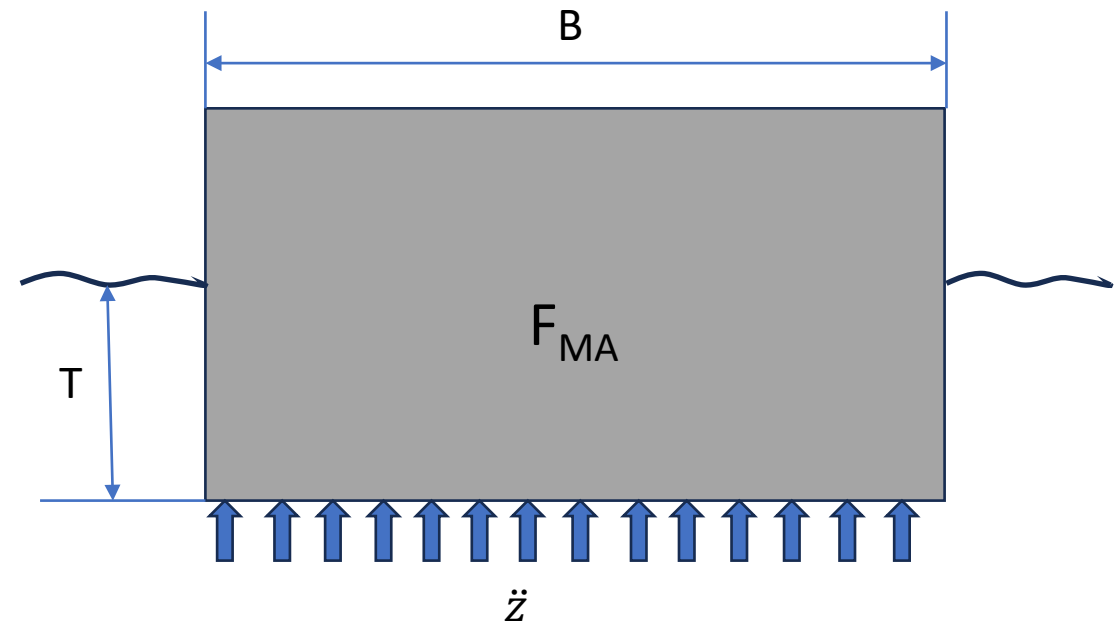
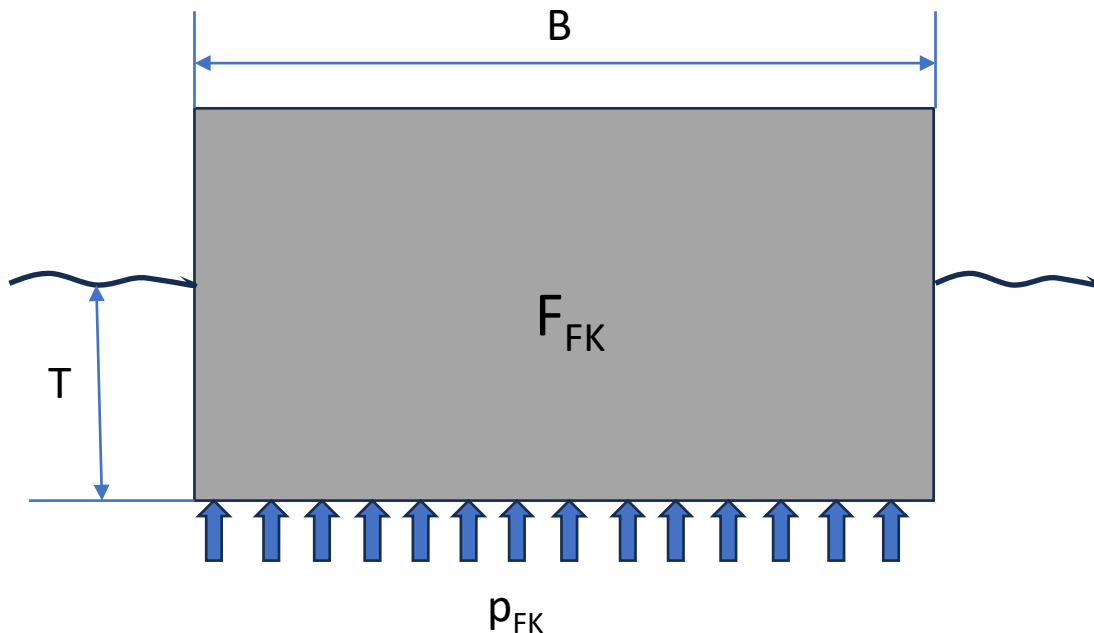
FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

HIPÓTESE: $L \gg B, T$

As forças podem então ser calculadas para uma seção transversal bidimensional e depois integradas ao longo do comprimento

Forças de Froude-Krylov – devidas ao campo de pressão da onda incidente

Forças da Massa Adicional – devidas à aceleração do fluido em torno da seção



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

FORÇA DE FROUDE-KRYLOV

Pressão: $p = \rho g \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$

Força de Heave por unidade de comprimento no fundo da seção:

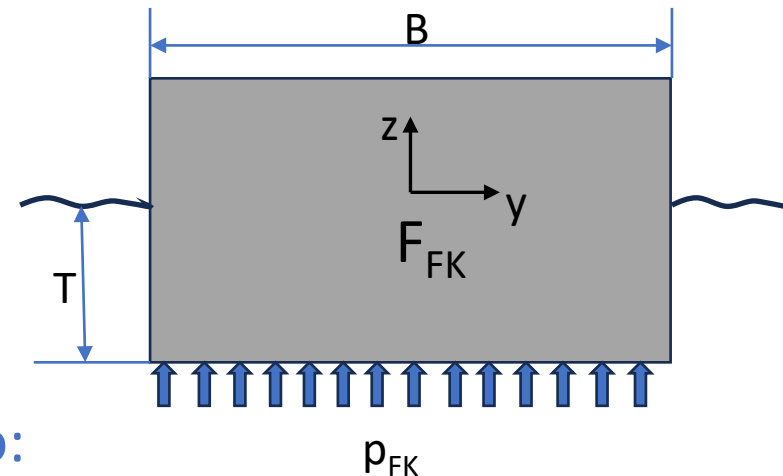
$$F_{FK2D}^h = p \cdot B \cdot dx$$

$$F_{FK2D}^h = \rho g B \frac{H}{2} e^{-kT} \cos(kx - \omega t) dx$$

A Força Total de Froude-Krylov se obtém integrando ao longo do comprimento do casco.

$$F_{FK}^h = \rho g B \frac{H}{2} e^{-kT} \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx - \omega t) dx$$

$$F_{FK}^h = \rho g B \frac{H}{k} e^{-kT} \operatorname{sen}\left(\frac{kL}{2}\right) \cos(\omega t)$$



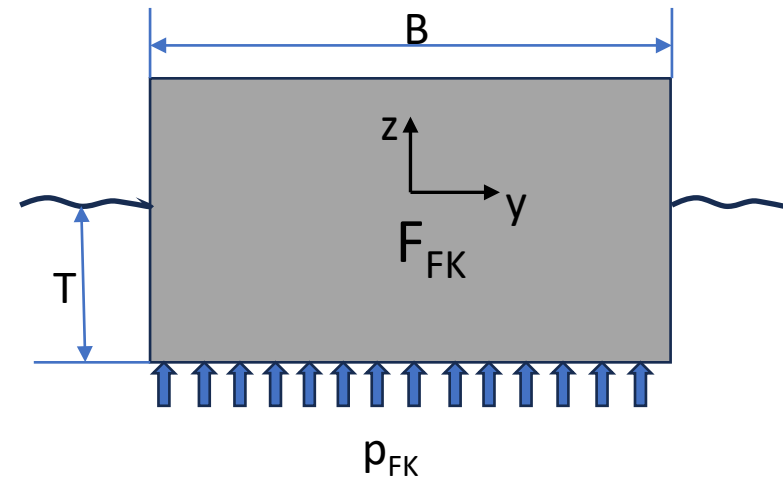
FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

FORÇA DE FROUDE-KRYLOV

Como $k = \frac{\omega^2}{g}$ e $A = \frac{H}{2}$ tem-se:

$$F_{FK}^h = 2\rho g^2 B \frac{A}{\omega^2} e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cos(\omega t)$$

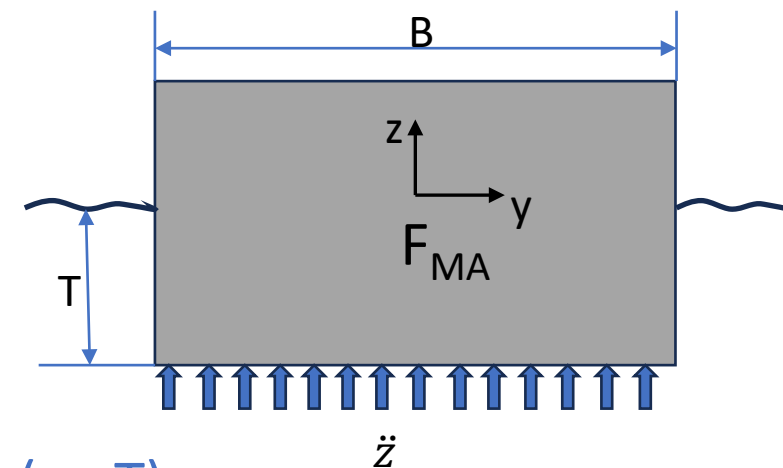
Para $\omega \rightarrow 0 \rightarrow F_{FK}^h = \rho g B L A$



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

FORÇA DA MASSA ADICIONAL

$$\text{aceleração: } \ddot{z} = -\frac{2\pi^2 H}{\tau^2} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$$



Força de Heave por unidade de comprimento no fundo da seção ($z=-T$):

$$F_{MA2D}^h = Ma_{2D} \cdot \ddot{z} \cdot dx$$

$$F_{MA2D}^h = -Ma_{2D} \frac{2\pi^2 H}{\tau^2} e^{-kT} \cos(kx - \omega t) dx$$

Onde Ma_{2D} =
massa adicional
da seção transversal

A Força Total da Massa Adicional se obtém integrando ao longo do comprimento do casco.

$$F_{MA}^h = -Ma_{2D} \frac{2\pi^2 H}{\tau^2} e^{-kT} \int_{-L/2}^{L/2} \cos(kx - \omega t) dx$$

$$F_{MA}^h = -Ma_{2D} \frac{4\pi^2 H}{\tau^2 k} e^{-kT} \sin\left(\frac{kL}{2}\right) \cos(\omega t)$$

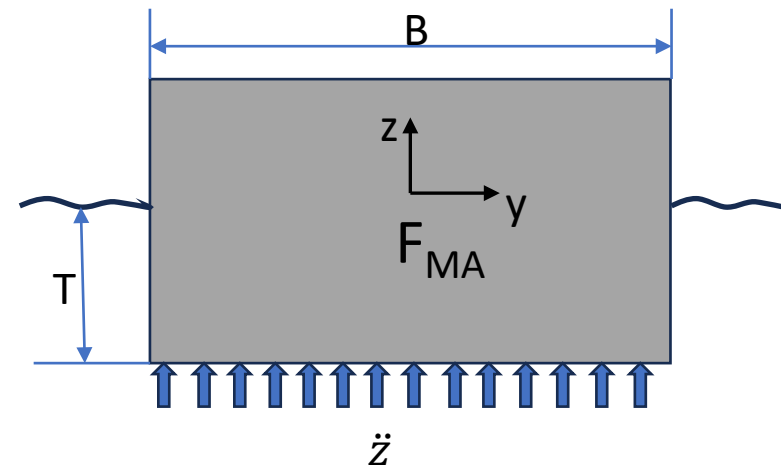
FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

FORÇA DA MASSA ADICIONAL

Como $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$, $k = \frac{\omega^2}{g}$ e $A = \frac{H}{2}$ tem-se:

$$F_{MA}^h = -2 \cdot M a_{2D} \cdot g \cdot A \cdot e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cos(\omega t)$$

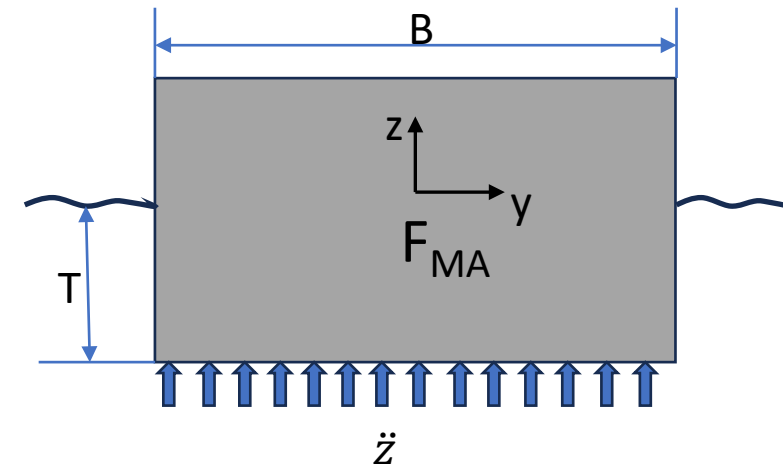
Para $\omega \rightarrow 0 \rightarrow F_{MA}^h = 0$



FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

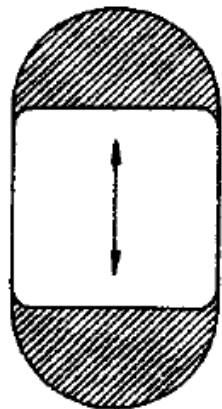
FORÇA DA MASSA ADICIONAL

A Massa Adicional Ma_{2D} da seção transversal pode ser obtida teórica ou experimentalmente.



teórico

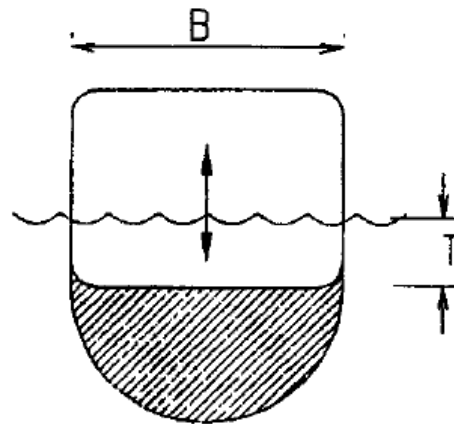
a) Rectangular section



Heave

$$M_z = \rho \pi (B/2)^2$$

aproximação teórica



Heave

$$M_z = 1/2 \rho \pi (B/2)^2$$

$$Ma_{2D} = C_a \frac{\rho \pi}{2} \left(\frac{B}{2}\right)^2$$

$$C_a \cong 1,3$$

(experimental para seção retangular)

FPSO – COMPORTAMENTO NO MAR – FORÇAS DE HEAVE

FORÇA TOTAL DE HEAVE

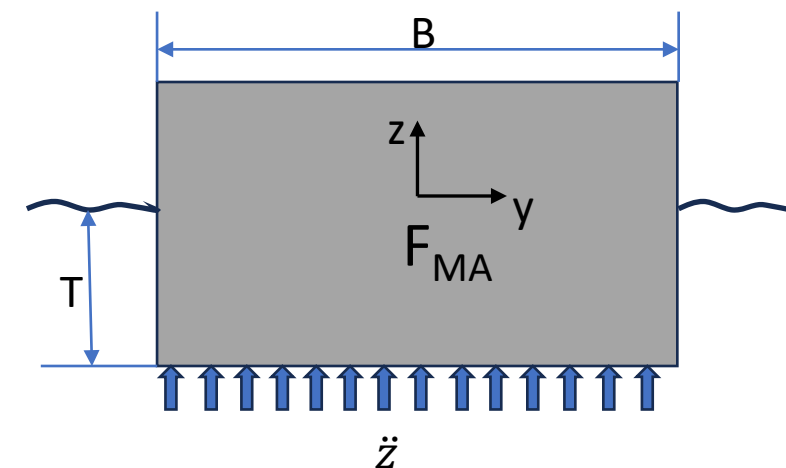
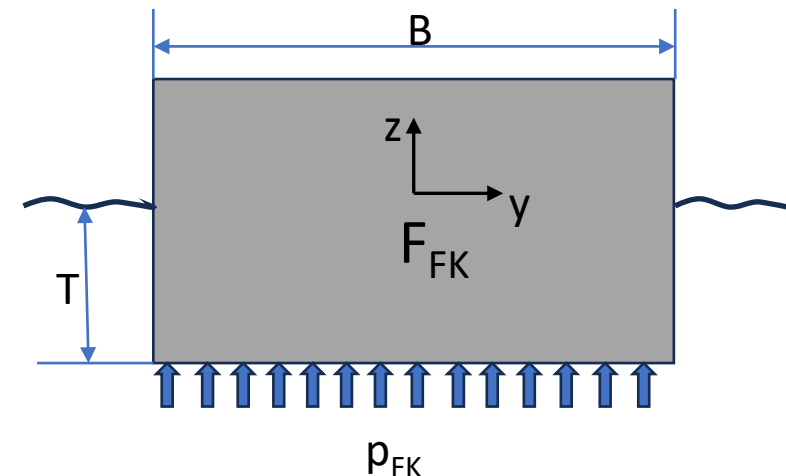
A Força Total de Heave será a soma das Forças de Froude-Krylov e da Massa Adicional:

$$F_{FK}^h = 2\rho g^2 B \frac{A}{\omega^2} e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cos(\omega t) +$$

$$F_{MA}^h = -2 \cdot Ma_{2D} \cdot g \cdot A \cdot e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cos(\omega t) =$$

$$F^h = 2gAe^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \left(\frac{\rho g B}{\omega^2} - Ma_{2D}\right) \cos(\omega t)$$

F^h = força de excitação hidrodinâmica (F_H)



FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

$$(M + M_a) \frac{d^2 z}{dt^2} + b \frac{dz}{dt} + cz = F_H = F^h \quad (1)$$

onde:

b = coeficiente de amortecimento em heave

c = coeficiente de restauração em heave

Define-se: $m = (M + M_a)$ e $\frac{c}{m} = \omega_n^2$, onde $\omega_n = \text{frequência natural em heave}$

Dividindo a equação (1) por m obtem-se:

$$\ddot{z} + \frac{b}{m} \dot{z} + \omega_n^2 z = \frac{F^h}{m}$$

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

$$\ddot{z} + \frac{b}{m}\dot{z} + \omega_n^2 z = \frac{F^h}{m}$$

Definindo: $\varphi = \frac{b}{2m\omega_n}$ = *fator de amortecimento* e $F^h = c \cdot f^h$, onde f é a amplitude de f^h obtem-se:

$$\ddot{z} + 2\varphi\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z = \frac{c}{m}f^h = \omega_n^2 \cdot f \cos(\omega t) \quad (2)$$

A solução da equação (2) em regime permanente tem a seguinte forma:

$$z(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t) \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) na equação (2) obtem-se:

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

$$-\omega^2(C_1 \text{sen}(\omega t) + C_2 \text{cos}(\omega t)) + 2\varphi\omega\omega_n(C_1 \text{cos}(\omega t) - C_2 \text{sen}(\omega t)) + \omega_n^2(C_1 \text{sen}(\omega t) + C_2 \text{cos}(\omega t)) = \omega_n^2 f \text{cos}(\omega t)$$

Igualando os coeficientes de $\text{cos}(\omega t)$ e $\text{sen}(\omega t)$ nos dois lados da equação, obtém-se duas expressões algébricas em C_1 e C_2 .

A solução para C_1 e C_2 é:

$$C_1 = \frac{2\varphi \omega / \omega_n}{\left[1 - \left(\omega / \omega_n\right)^2\right]^2 + \left(2\varphi \omega / \omega_n\right)^2} \cdot f$$
$$C_2 = \frac{1 - \left(\omega / \omega_n\right)^2}{\left[1 - \left(\omega / \omega_n\right)^2\right]^2 + \left(2\varphi \omega / \omega_n\right)^2} \cdot f$$
(4)

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

Introduzindo as equações (4) na equação (3) obtém-se:

$$z(t) = \frac{f}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + (2\varphi\omega/\omega_n)^2} \cdot \left\{ \frac{2\varphi\omega}{\omega_n} \text{sen}(\omega t) + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right] \text{cos}(\omega t) \right\} \quad (5)$$

Podemos transformar esta equação (5) na seguinte forma:

$$z(t) = Z(\omega) \text{cos}(\omega t - \emptyset) \quad (6)$$

Basta para isso expandir esta última equação e fazer a equivalência trigonométrica com a equação (5).

Fazendo estas operações algébricas obtém-se:

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

$$\text{sen}(\emptyset) = \frac{2\varphi^{\omega/\omega_n}}{\left\{ \left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + (2\varphi^{\omega/\omega_n})^2 \right\}^{1/2}} \quad (7)$$

$$\text{cos}(\emptyset) = \frac{1 - (\omega/\omega_n)^2}{\left\{ \left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + (2\varphi^{\omega/\omega_n})^2 \right\}^{1/2}}$$

$$\emptyset = \arctan\left(\frac{2\varphi^{\omega/\omega_n}}{1 - (\omega/\omega_n)^2}\right) \quad (8)$$

$$Z(\omega) = \frac{f}{\left\{ \left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + (2\varphi^{\omega/\omega_n})^2 \right\}^{1/2}} \quad (9)$$

$$z(t) = Z(\omega)\cos(\omega t - \emptyset) \quad (6)$$

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

Lembrando que $f = \text{amplitude de } f^h$ e que c é o coeficiente de restauração hidrostática dado por:

$$c = \rho g A_{WL} = \rho g L B$$

obtem-se das equações de F^h e (9):

$$Z(\omega) = \frac{\frac{2gA}{\rho g L B} \cdot e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cdot \left(\frac{\rho g B}{\omega^2} - M a_{2D}\right)}{\left\{ \left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + (2\varphi \omega/\omega_n)^2 \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

onde:

$$M a_{2D} = C_a \frac{\rho \pi}{2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad \text{e} \quad C_a \cong 1,3$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g L B}{(\rho \nabla + M_a)}} \quad \text{e} \quad M_a = M a_{2D} \cdot L \quad \text{e} \quad \nabla = \text{volume deslocado do FPSO}$$

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE

EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO EM HEAVE

O RAO de Heave será dado por: $RAO_{heave} = \frac{|Z(\omega)|}{A}$

$$RAO_{heave} = \frac{|Z(\omega)|}{A} = \frac{\left| \frac{2g}{\rho g L B} \cdot e^{\frac{-\omega^2 T}{g}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\omega^2 L}{2g}\right) \cdot \left(\frac{\rho g B}{\omega^2} - Ma_{2D}\right) \right|}{\left\{ \left[1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + (2\varphi\omega/\omega_n)^2 \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

onde:

$$Ma_{2D} = C_a \frac{\rho \pi}{2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad \text{e} \quad C_a \cong 1,3$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g L B}{(\rho \nabla + M_a)}} \quad \text{e} \quad M_a = Ma_{2D} \cdot L \quad \text{e} \quad \nabla = \text{volume deslocado do FPSO}$$

Para $\omega \rightarrow 0 \rightarrow RAO_{heave} = 1$

FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE - EXERCÍCIO

Considere o FPSO da figura com as seguintes dimensões e características:

$$L = 250\text{m}$$

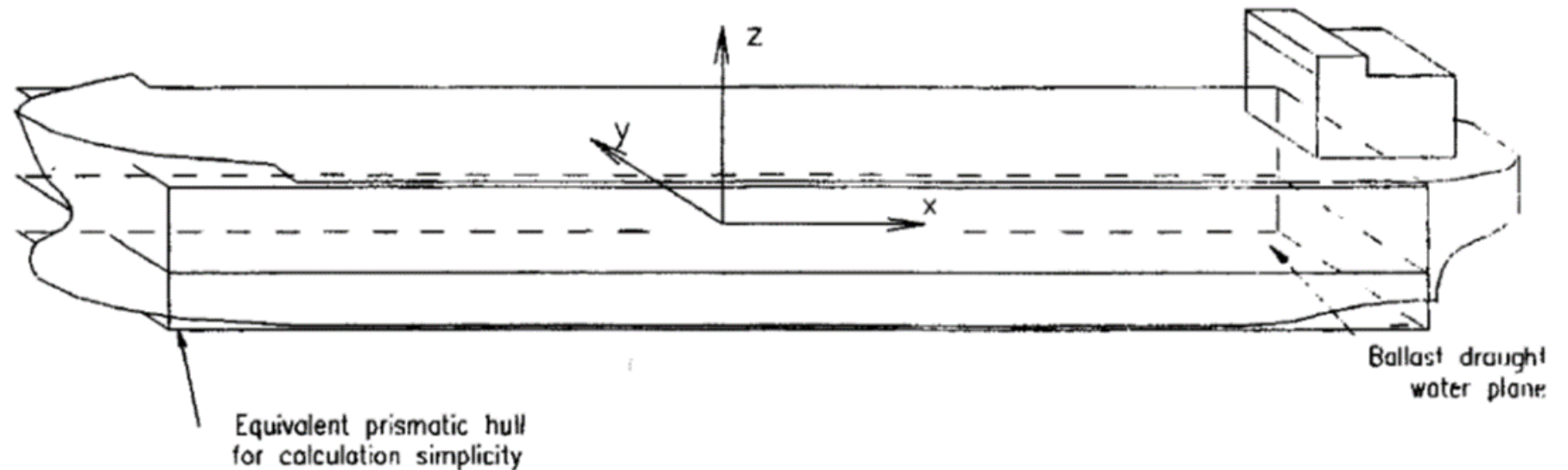
$$B = 40\text{m}$$

$$D = 30\text{m}$$

$$T = 12\text{m}$$

$$\Delta = 123.000\text{ton}$$

$$\rho = 1,025\text{ton}/\text{m}^3$$



FPSO – RESPOSTA DINÂMICA EM HEAVE - EXERCÍCIO

O FPSO sofre a incidência de um mar de proa (incidência a 0°). Nestas condições determine:

- 1) A Força de Heave de Froude-Krylov em função da frequência
- 2) A Força de Heave da Massa Adicional em função da frequência
- 3) A Força Total de Heave em função da frequência
- 4) Plote as curvas das três forças num mesmo gráfico. Considere um faixa de frequência entre 0 e a frequência correspondente a um período de 35 segundos.
- 5) Calcule o RAO de Heave e plote a curva para a mesma faixa de frequências
- 6) Determine a frequência e o período natural de Heave.

Considere um fator de amortecimento de 5% ($\varphi = 0,05$)