

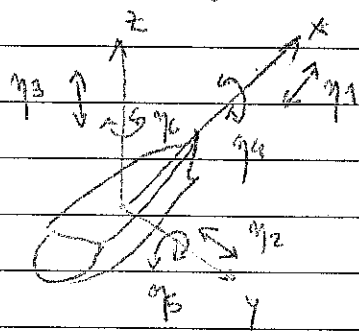


Engenharia Naval
e Oceânica



Questão 3:

Para explicar a origem e o significado físico dos coeficientes de massa adicional e amortecimento, primeiramente é preciso contextualizar sobre o comportamento em ondas de uma estrutura offshore sob a ação de ondas. Esta estrutura possui seis graus de liberdade (6DOF), sendo três de translação ao redor dos eixos x , y e z (surge, sway e heave) e três de rotação ao redor dos mesmos eixos (roll, pitch, yaw). Esses graus de liberdade são identificados na figura abaixo.



onde: $\eta_1 = \text{surge}$; $\eta_2 = \text{sway}$; $\eta_3 = \text{heave}$

$\eta_4 = \text{roll}$; $\eta_5 = \text{pitch}$; $\eta_6 = \text{yaw}$.

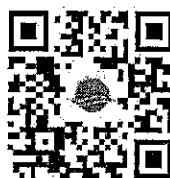
$$\phi = \phi(x, y, z, t)$$

O comportamento em ondas de uma estrutura offshore em ondas é descrito a partir de uma função $\phi(x, y, z, t)$ que representa o campo de velocidade no escoamento sob a hipótese deste escoamento ser incompressível (massa específica constante no espaço e no tempo), invíscido (viscosidade desprezível), irrotacional (rotacional do vetor velocidade é nulo, ou seja, partículas fluidas não giram ao redor de si mesmas), bem como contínuo e homogêneo.

Sob as hipóteses mencionadas, é possível aplicar o princípio da superposição, que consistirá na soma dos potenciais de velocidade que afetam o sistema flutuante offshore. Para uma estrutura flutuante sob o efeito de ondas, o potencial de velocidade é obtido como a soma dos potenciais de onda incidente (ϕ_i), de difração de ondas (ϕ_d) e de radiação de ondas (ϕ_r), como mostrado na expressão a seguir:

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_i(x, y, z, t) + \phi_d(x, y, z, t) + \phi_r(x, y, z, t)$$

DCQ



(R3) Note que o potencial de velocidade está sujeito às condições de contorno aplicadas às ondas e ao sistema flutuante, sendo estas: 1. Equação de Laplace ($\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$); a condição de contorno cinemática no fundo ($\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0$), que consiste na condição de impenetrabilidade

no fundo e as condições de contorno cinemática e dinâmica na superfície livre. A condição cinemática impõe que a velocidade da partícula na superfície livre na direção vertical deve ser igual a velocidade de elevação de própria superfície livre ($\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t}$), enquanto que

a condição dinâmica diz que a pressão na superfície livre deve ser igual à pressão atmosférica, sendo representada por: $p \frac{\partial \phi}{\partial t} + \rho g \eta = 0$

Sob a hipótese de pequenos inclinações.

Para o corpo flutuante, respeita-se a condição de impenetrabilidade no casco, onde a velocidade normal da partícula no escoamento e na parede devem ser iguais ($\nabla \phi \cdot \vec{N} = \vec{V} \cdot \vec{N}$). Além disso, outra condição é que o potencial de radiação deve tender a zero no infinito ($\lim_{r \rightarrow \infty} \phi_r = 0$).

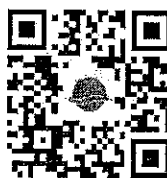
Finalmente, tem-se uma condição de simetria que permite concluir que surge, heave e pitch são movimentos simétricos e sway, roll e yaw antisimétricos.

Retornando à superposição dos potenciais de velocidade, os potenciais de ondas incidente e de difração de ondas estão relacionadas com o problema da excitação de ondas, enquanto que o potencial de radiação consiste no problema de radiação de ondas.

PCP



Engenharia Naval
e Oceânica



Q3) A separação em problema de excitação de ondas e radiação de ondas é uma alternativa para isolar o fenômeno de radiação, sendo o foco desta análise. A excitação de ondas ocorre devido a forças de difração de ondas, gerada devido a presença do corpo flutuante no volume de controle. Enquanto isso, a ~~força de reação~~ a força de Fraude-Krylov é obtida a partir da integração do potencial de onda incidente (e, consequentemente, de pressão de onda incidente) sobre a superfície molhada do casco. Estes são expressos matematicamente como:

$$F^I + F^D = F^{*K} = \iint p \cdot \vec{n} \, dS = -\rho \iint \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{\partial \phi_d}{\partial t} \right) \vec{n} \, dS.$$

Esta separação entre problemas de excitação e radiação considera que no problema de excitação, o corpo flutuante está fixo sob a ação de onda incidente. Para o problema de radiação de ondas, adota-se a hipótese de que o corpo está oscilando livremente em águas calmas.

Com isso, o corpo oscilante é responsável por criar/gerar ondas que se propagam do corpo para o volume de controle, sendo esta uma forma de dissipar energia. Com isso, o amortecimento potencial é função/proportional a energia dissipada pelo corpo na forma de onda e que depende da rebaixada do movimento. A massa adicional, por sua vez, surge devido à forças de reação que o fluido faz sobre o corpo devido a aceleração do mesmo, sendo a massa adicional o coeficiente que relaciona a força de reação com a aceleração. Logo, a força de radiação pode ser representada como:

$$\vec{F}^r = [A] \ddot{\eta} + [B] \dot{\eta}$$

onde $[A]$ e $[B]$ são os

termos das matrizes 6x6 da massa adicional e amortecimento potencial

JCP



Engenharia Naval
e Oceânica



Q3/

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{61} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & \vdots \\ A_{13} & A_{23} & \dots & \vdots \\ A_{14} & A_{24} & \dots & \vdots \\ A_{15} & A_{25} & \dots & \vdots \\ A_{16} & A_{26} & \dots & A_{66} \end{bmatrix}$$

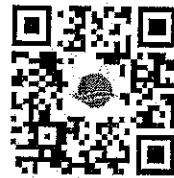
$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{21} & \dots & B_{61} \\ B_{12} & B_{22} & \dots & \vdots \\ B_{13} & B_{23} & \dots & \vdots \\ B_{14} & B_{24} & \dots & \vdots \\ B_{15} & B_{25} & \dots & \vdots \\ B_{16} & B_{26} & \dots & B_{66} \end{bmatrix}$$

Note que a condição de simetria permite impor que $A_{ij} = A_{ji}$ e $B_{ij} = B_{ji}$, de modo que ambas as matrizes são simétricas em relação à diagonal principal. Além disso, para uma dada estrutura flutuante, estes coeficientes são fortemente dependentes da frequência de incidência de ondas, sendo uma justificativa para sua obtenção o uso de análises no domínio da frequência.

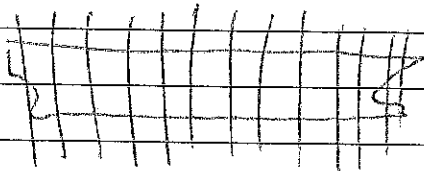
É possível estimar estes coeficientes a partir do método dos painéis, da teoria dos feixes e ainda via análises de decaimento com o sistema flutuante. O método dos painéis é o método amplamente empregado na caracterização de $[A]$ e $[B]$. Esta abordagem é base de programas de análise de escoamento potencial e scattering, como por exemplo o WARIT (Wave analysis RIT).

Este método consiste na discretização da superfície molhada da estrutura flutuante em painéis que irão formar a malha na qual o problema potencial será analisado. Dessa forma, uma malha / painéis bem discretizados são requeridos para que o escoamento potencial seja resolvido em cada painel e posterior integrado decida mente ao longo do casco para estimar as pressões e demais propriedades que permitam obter a malha adicional e o amortecimento potencial em função da frequência de onda.

POA



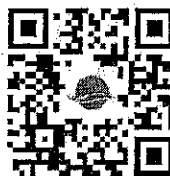
03) Por outro lado, a teoria das faixas em uma abordagem bidimensional na qual o casco é dividido em faixas de modo que seja possível estimar a força de excitação, a massa adicionada e o amortecimento potencial para cada uma destas faixas. Posteriormente, os coeficientes são determinados por integração ao longo do comprimento do casco. A divisão do casco é exemplificada abaixo.



Uma desvantagem desta abordagem consiste em na má discretização do casco na proa e na popa devido ao aumento da complexidade das formas. Uma alternativa seria melhorar a discretização, porém isso também aumentaria o custo computacional. Este problema justifica a ampla implementação do método dos prismas para estimar A e B .

Por fim, testes de decaimento também podem ser usados para estimar tais parâmetros para a frequência natural do navio. A partir de uma curva de decaimento é possível estimar o fator de amortecimento e a massa adicionada relacionados com a frequência natural. Note que esta abordagem não será válida somente para análises de FPSOs (Floating, Production, Storage, and Off loading) com a presença de bolinas uma vez que estas geometrias também possuem influência de amortecimento viscoso devido aos fenômenos de geração de vórtices nos apêndices.

JCP



QUESTÃO 1:

No que se refere a formação de ondas por uma embarcação deslocando-se em um corpo d'água com profundidade h , podemos assumir que estas ondas podem possuir duas origens distintas: 1. Ondas geradas pelo deslocamento da embarcação com uma velocidade V , responsável por aumentar a resistência ao avanço do casco; 2. Ondas geradas pelo movimento em ondas do casco durante esta navegação com uma velocidade V .

Antes de discorrer sobre tais hipóteses, é preciso estabelecer que a embarcação está navegando em ondas assumindo pelas amplitudes de onda. Sendo assim, o tratamento matemático das ondas pode ser feito aplicando a teoria linear de ondas. Desta forma, é possível considerar que o fluido é incompressível, irrotacional, invíscido, homogêneo e contínuo. Com estas hipóteses, há uma significativa simplificação das equações da mecânica dos fluidos que regem esta análise.

Primariamente, a equação de conservação da massa torna-se a equação de Laplace após considerar fluido incompressível ($\rho = \text{constante}$) e irrotacional, de modo que:

Conservação da
massa

Conservação da
massa + incompressibilidade

inclusões de hipótese de
fluido irrotacional

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

$\rightarrow$

$$(\nabla \cdot \vec{V}) = 0$$

$\rightarrow$

$$\nabla^2 \phi = 0$$

;

$$\vec{V} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \hat{i} +$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \hat{j} +$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \hat{k}$$

PCP



Engenharia Naval
e Oceânica



Q1) A equação de conservação do momentum, por sua vez, é ~~transformada~~ transformada em Equação de Euler devido a hipótese de fluido ~~incompressível~~ invíscido e posteriormente na equação de Bernoulli para fluidos irrotacionais:

Conservação de Momentum $\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g}$

Equação de Euler $\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla p + \rho \vec{g}$
($\mu=0$)

Equação de Bernoulli para fluidos irrotacionais $\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 + \rho g z = cte$

Constante na linha de corrente

Para ~~fluido~~ a teoria linear de ondas $|\nabla \phi|^2$ é desprezado, do modo que a Equação de Bernoulli torna-se:

$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p + \rho g z = \text{Constante na mesma linha de corrente.}$

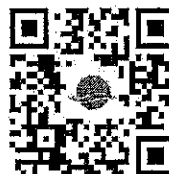
Como mencionado na QUESTÃO 3, o potencial de velocidade de onda deve satisfazer as seguintes condições de contorno:

1) Equação de Laplace ($\nabla^2 \phi = 0$): Respeita-se a conservação de massa no volume de controle.

[Handwritten signature]



Engenharia Naval
e Oceânica



Q1) 2) Condição de Contorno na fundo $\left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{z=-h} = 0$: partícula fluída no fundo
Cinemática

possui velocidade vertical nula, sendo a condição de impermeabilidade

3. C.C. cinemática na Superfície Livre $\left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t}$: Velocidade

vertical da partícula na superfície livre igual a velocidade da superfície
livre na direção vertical.

4. C.C. dinâmicas na superfície livre $\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} = -g\eta$: Pressão na superfície

livre igual a pressão atmosférica. Esta condição de contorno é obtida
considerando a equação de Bernoulli para a primeira ordem.

Com estas hipóteses, é possível estimar o potencial de velocidade (ϕ),
a elevação de onda (η) e a relação de dispersão como:

• Potencial de Velocidade : $\phi(x, z, t) = \frac{g a \omega}{\omega \cosh(kh)} \cosh k(h+z) \cdot \sin(kx - \omega t)$

• Elevação de Onda : $\eta(x, t) = g a \cos(kx - \omega t)$

• Relação de Dispersão : $\omega^2 = k g \tanh(kh)$

Onde g é a amplitude de onda, ω é a frequência de onda, k é
número de onda relacionado com o comprimento de onda ($k = 2\pi/\lambda$), h é
a profundidade, g a aceleração gravitacional; x e t o deslocamento
longitudinal e o tempo, respectivamente. Note que $T = 2\pi/\omega$ é o período de
onda e $H = 2g a$ a altura de onda, sendo a distância de crista ao cavado.

Além disso, a pressão é dada por: $p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$ → partícula dinâmica

→ partícula cinética

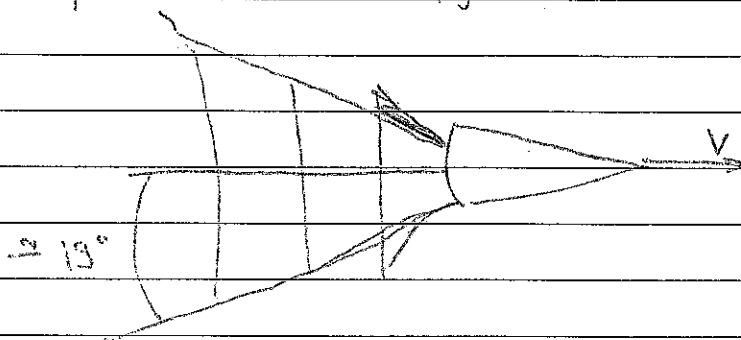
PCP



Engenharia Naval
e Oceânica



Para a primeira hipótese feita a formação de ondas é ocasionada pelo rastio gerado pela embarcação durante sua navegação. Na literatura, estas ondas são conhecidas como Rastro/Estreia de Kelvin. As ondas geradas neste rastio possuem um comportamento característico no qual as ondas formam um ângulo de cerca de 19° com a direção longitudinal, como mostrado na figura abaixo:



Esta formação de ondas é a principal responsável pela componente de resistência de ondas da embarcação na estimativa da resistência ao avanço da embarcação. Uma alternativa comumente utilizada para minimizar esta componente é o projeto de uma proa bulbosa para minimizar o efeito da resistência de ondas. No entanto, vale ressaltar que o projeto de uma proa bulbosa tende a aumentar as componentes de ~~força~~ resistência friccional e de pressão viscosa na proa, sendo um fator a ser levado em consideração na minimização da resistência de ondas.

Dessa forma, do ponto de vista da equação de Navier-Stokes, uma proa bulbosa tende a aumentar a influência da parcela viscosa sobre a resistência total do casco e diminuir o efeito das forças de corpo (relacionadas à aceleração gravitacional).

JCP

Engenharia Naval
e Oceânica

81) No que se refere à segunda hipótese (ondas geradas pelo movimento do casco em ondas com uma velocidade V), estas ondas podem estar relacionadas com o problema da radiação de ondas e, consequentemente, com a análise de seakeeping desta embarcação.

Neste

Neste contexto a embarcação pode estar navegando em ondas regulares ou irregulares. No caso de ondas irregulares, a elevação de onda pode ser expressa a partir do somatório de todas ondas que compõem o mar irregular, como mostrado abaixo:

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(K_i x - \omega_i t + \epsilon_i)$$

Onde ϵ_i é a fase aleatória da onda i

Vale ressaltar que, como a embarcação está navegando com uma velocidade V , a frequência de encontro (ω_e) passa a ser relevante na análise. A frequência de encontro expressa a frequência de onda ~~analisada~~ analisada quando a embarcação está navegando em ondas:

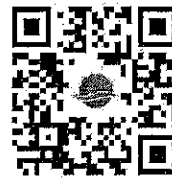
$$\omega_e = \omega - KV \cos \beta, \text{ onde } \beta \text{ é o ângulo de incidência da onda}$$

Este efeito de navegação em ondas pode intensificar as respostas da embarcação em ondas, sendo um fator relevante para a garantia de conforto e da integridade do casco. O conforto dos passageiros é analisado através do MSI (Motion Sickness Index) que consiste em um índice para quantificar quanto tempo uma pessoa consegue ficar em uma determinada região (passadizo, por exemplo) do navio.

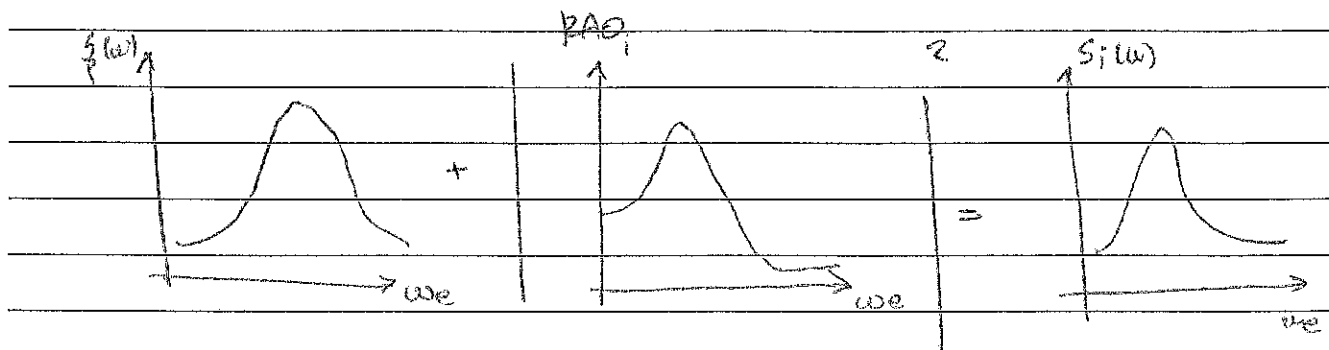
1002



Engenharia Naval
e Oceânica



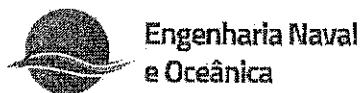
Q1) A integridade estrutural está relacionada com o aumento da probabilidade de fenômenos como slamming (batida de proa na onda) e green water, por exemplo. Para ondas ~~regulares~~ irregulares, esses critérios de conforto e integridade estrutural dependem dos momentos de ordem "n" obtidos através do espectro de resposta de embarcação.



O espectro de resposta é dado por $S_i(\omega) = |RAO(\omega)|^2 \cdot S_g(\omega)$. Onde $S_g(\omega)$ é o espectro do mar (densidade de energia espectral para cada frequência de onda) e RAO é o Response Amplitude Operator, que representa a resposta da embarcação no domínio da frequência (estando fortemente relacionada com as ondas geradas por radiação de ondas).

Como o fenômeno de radiação depende da frequência de encontro, o ~~seu~~ comportamento das ondas geradas, ou sua magnitude, variará em função de ω_e uma vez que a massa adcional e o amortecimento potencial também irão se alterar.

PCP



QUESTÃO 2:

As forças de deriva média e deriva lenta estão intimamente ligadas aos fenômenos de ondas de segunda ordem e ao projeto do sistema de ancoragem de estruturas flutuantes. Note que, a teoria linear de ondas não prevê a ocorrência destes efeitos uma vez que as hipóteses de pequenas ~~em~~ amplitudes faz com que os termos de ordem superior sejam desprezados.

Dessa forma, a teoria de segunda ordem prevê que o potencial de velocidade possa ser representado através do método da perturbação, onde o potencial de velocidade é expresso pela soma de potenciais de ordem "n" que dependem do parâmetro de perturbação ϵ :

~~$$\phi = \epsilon \phi^{(1)} + \epsilon^2 \phi^{(2)} + \dots$$~~

$$\phi = \epsilon \phi^{(1)} + \epsilon^2 \phi^{(2)} + \dots$$

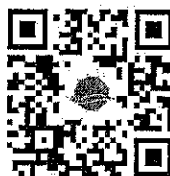
Como o sistema oceânico está flutuando sob a ação de ondas, o potencial de velocidade é dado pela soma dos potenciais de onda incidente, de difração e de radiação de ondas:

$$\phi = \phi_i + \phi_d + \phi_r = \epsilon^{(1)} (\phi_i^{(1)} + \phi_d^{(1)} + \phi_r^{(1)}) + \epsilon^{(2)} (\phi_i^{(2)} + \phi_d^{(2)} + \phi_r^{(2)})$$

Considerando a teoria da perturbação, as condições de contorno são modificadas para que existam condições de contorno de 1ª ordem e de segunda ordem. Além disso, a equação de Bernoulli passa a ser expressa com o termo de segunda ordem, como mostrado a seguir:

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + p + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 + \rho g z = \text{constante na linha de corrente.}$$

PCOR

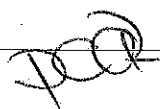
Engenharia Naval
e Oceânica

Q2 | A principal característica da força de deriva média consiste na criação de uma força, paralela ao sentido de propagação da onda, responsável por deslocamento no plano do sistema offshore. A força de deriva média ~~para~~ é fortemente dependente dos parâmetros da onda, como período e amplitude, por exemplo, sendo a QTF (Quadratic Transfer Function) a função de transferência usada para obter a força em função desses parâmetros.

A ocorrência da deriva média levanta a necessidade do uso de ^{parâ-}metros sistemas / dispositivos para a garantir do station keeping, sendo o projeto do sistema de ancoragem uma alternativa economicamente viável em comparação com a implementação de um sistema de ~~para~~ posicionamento dinâmico (DP) para operar a todo o momento.

Vale ressaltar que a garantia do stationkeeping é de fundamental importância para a operação de plataformas de óleo e gás uma vez que a deriva média poderia causar esforços excessivos sobre os risers e demais dutos submarinos que ligam a plataforma aos poços de produção offshore. Com isso, uma das principais implicações da deriva média poderia ser comprometer a integridade estrutural ~~de~~ na produção de óleo e gás offshore.

O projeto de sistemas de ancoragem depende fortemente dos carregamentos ambientais os quais a estrutura flutuante offshore é submetida. No que se refere à distribuição das linhas de ancoragem, estas podem ser do tipo turret ou spread mooring (linhas repalhadas). O tipo turret pode ser interno ou externo, sendo que o tipo interno compromete a área de armazenamento da plataforma visto que o sistema é instalado no interior do casco, como mostrado na figura a seguir. Esta solução é particularmente interessante ~~na~~ quando é requerido que a plataforma gire



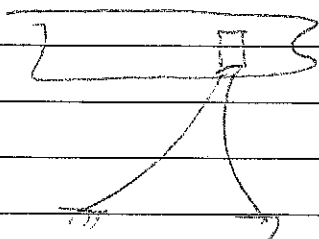


Engenharia Naval
e Oceânica

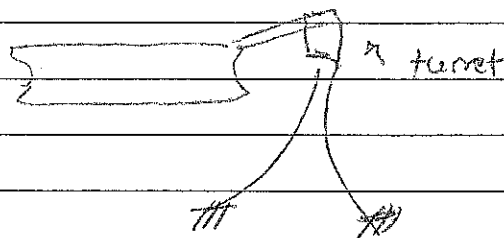


22) Os reolos do eixo do turret para que seja mais complacente aos carregamentos ambientais. Em regiões com estado de mar severo, a plataforma pode inclusive se desconectar do turret para evitar acidentes.

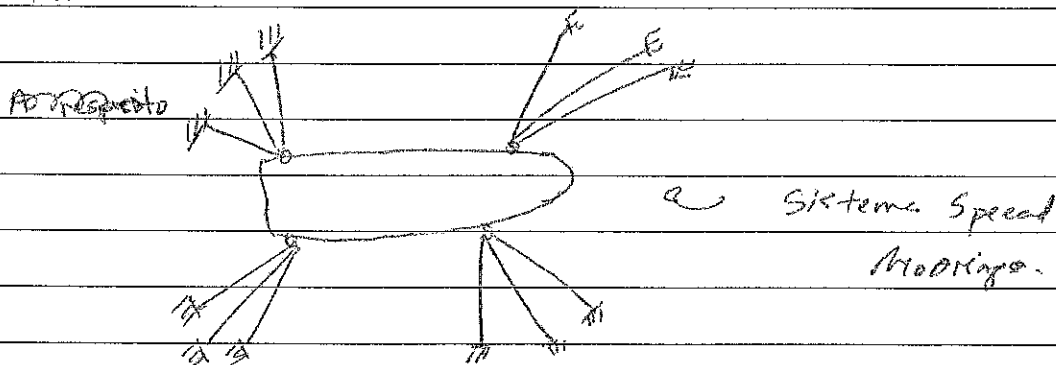
TURRET INTERNO



TURRET EXTERNO



A solução do tipo spread mooring consiste em conectar as linhas de ancoragem no casco através de fairleads e "spalder" de forma estratégica as linhas de ancoragem dentro de um raio de ancoragem para garantir o stationkeeping. O sistema spread mooring é, inclusive, uma alternativa eficaz para minimizar a deriva média uma vez que os movimentos são restringidos do forma ~~constante~~ ^{considerável} em comparação com o tipo turret.



A respeito da configuração, as linhas de ancoragem podem ser do tipo catenária taut e TLP. O sistema tipo catenária consiste em linhas de ancoragem em forma de catenária, onde a restauração tende a ser ~~propor~~ resultado da sua forma, do peso da linha e do material.

PCQ



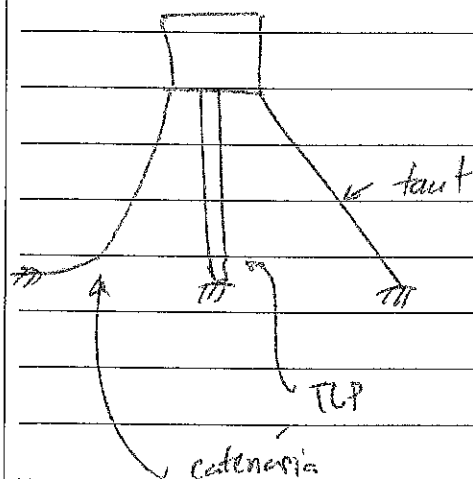
Engenharia Naval
e Oceânica



02) Para águas ~~profundas~~ ultra-profundas é comum que as linhas de ancoragem tipo catenária sejam feitas de três segmentos (~~corrente~~ + fibra sintética + corrente) para diminuir o peso e corrente.

o custo do sistema de ancoragem, que possui peso decisivo no CAPEX para plataformas offshore em águas ultra-profundas.

O sistema taut é feito por linhas sintéticas instalados em um raio de ancoragem. Esta configuração é capaz de resistir a esforços verticais e horizontais de forma mais efetiva do que o sistema tipo TLP. Neste último, as linhas são posicionadas verticalmente, com característica de boa restauração vertical. No entanto, a restauração horizontal irá depender do componente horizontal do sistema de ancoragem, que no caso de TLP não pode ser tão efetivo quanto nos demais casos.



Com isto, o fenômeno de deriva lenta está fortemente ligado aos sistemas de ancoragem. Devido ao fenômeno de segunda ordem, frequências pequenas (ou então períodos da onda longas) passam a ser relevantes no comportamento do sistema flutuante ancorado.

Isto se deve principalmente ao fato do período natural do sistema de ancoragem ocorrer em períodos mais altos. Sendo assim, a deriva lenta está relacionada com a ocorrência de ressonância das ondas de 2ª ordem e do sistema de ancoragem.

TCR

Engenharia Naval
e Oceânica

Q2) Como consequência de deriva lenta, pode ocorrer o problema de fadiga nas linhas de ancoragem, levando ao rompimento de linhas que é um evento problemático para sistemas flutuantes offshore como vez que não somente altera a rigidez do sistema como também aumenta o passeio do sistema flutuante.

Para sistema de produção de óleo e gás, esse fenômeno pode comprometer as operações de exploração de petróleo sob a hipótese de danos aos equipamentos submarinos. Para plataformas eólicas offshore, por exemplo,

o rompimento de linhas poderia comprometer a configuração do parque eólico, gerando alterações na configuração ótima, levando a diminuição da energia produzida.

