

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



Realização



TÍTULO DO TRABALHO:

LINEARIZAÇÃO DA PARCELA DE ARRASTO DA FORMULAÇÃO DE MORISON SEGUNDO
LEIRA PARA ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

AUTORES:

MORGANA LIMA FRANÇA
HELENO PONTES BEZERRA NETO
EDUARDO NOBRE LAGES

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

LINEARIZAÇÃO DA PARCELA DE ARRASTO DA FORMULAÇÃO DE MORISON SEGUNDO LEIRA PARA ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Abstract

In the current scenario, the main challenges for engineers and designers are the exploration and production of oil in increasingly deep water depths, as well as the demands of enhancing existing technologies. This is because some structural components of the platforms require special attention. These include drilling, completion and production risers, which are structures that connect the floating unit to subsea equipment, as well as anchor lines. During the design phase, computer systems are used to study these structures. These performance analysis tools are critical to their design, installation and operation steps as they enable the designer to predict the behavior of the designed structure under various loading conditions in advance. These include dynamic simulations of anchor lines and risers, which are performed in the time domain or the frequency domain. The time domain dynamic analysis methodology is usually employed because it allows the representation of nonlinearities of both structural behavior and incident loading. As it demands a very high computational cost, the dynamic analysis in the frequency domain presents itself as an alternative in determining the structural response of risers, as it is based on a viable analysis methodology from the point of view of the results obtained by it. However, it assumes that both structural behavior and incident loading are linear. Thus, this paper aims to study the Leira linearization technique for the Morison formulation drag plot, followed by its implementation in the MATLAB® software for frequency domain study. Thereby, comparisons were made with the time domain analysis, as well as simulated examples and verified the intervals of use of the method, as a way of verifying the implemented implementation. Therefore, even in some simulations of oscillation behavior was similar and reliable for a dynamic analysis in the frequency domain, others did not represent the wave behavior satisfactorily, being necessary to review the implementation developed, so that the existence of any error is verified.

Introdução

Na atualidade, os principais desafios de engenheiros e projetistas são a exploração e a produção de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas. Isso acontece porque alguns componentes estruturais das plataformas exigem uma atenção especial. Entre esses componentes, destacam-se os *risers* de perfuração, completação e produção, que são estruturas que conectam a unidade flutuante ao equipamento submarino, e as linhas de ancoragem.

Os *risers*, que são elementos críticos para a produção em águas profundas e ultraprofundas, passaram a apresentar um comportamento dinâmico mais acentuado, que é extremamente influenciado pelos movimentos do corpo ao qual eles se encontram conectados, impondo em sua extremidade superior movimentos de translação e de rotação. Além desses movimentos, atuam nos *risers* cargas que incidem diretamente em sua própria estrutura, como: peso próprio, pressão externa e interna, variações de temperatura, efeitos hidrodinâmicos das ondas e correntes e cargas que agem concentradas (VAILLANT, FRANCISS, FREITAS, 2009). Durante a fase de projeto, sistemas computacionais são utilizados para realizar o estudo dessas estruturas, sendo necessárias análises estática e dinâmica (DNVGL-ST-F201, 2018). A análise dinâmica pode ser realizada no domínio do tempo, que pode ser dividida em aleatória e determinística, e no domínio da frequência, em que as solicitações são dadas como espectros de frequência.

A metodologia de análise dinâmica no domínio do tempo é usualmente empregada no projeto de *risers* por permitir a representação das não linearidades tanto do comportamento estrutural como do carregamento incidente. Em situações de projeto, ela é realizada simulando os efeitos hidrodinâmicos sobre a estrutura, que por serem de natureza aleatória necessitam de longos intervalos de tempo para que o processo de caracterização das variáveis aleatórias de resposta seja observado. Este fato associado ao grande número de casos de carregamentos incidentes que devem ser verificados, faz com que o custo computacional envolvido durante o projeto destas estruturas seja bastante elevado.

Dessa forma, segundo DANTAS (2004), a análise dinâmica no domínio da frequência se apresenta como uma alternativa na determinação da resposta estrutural de *risers*, pois se baseia numa metodologia de análise viável do ponto de vista dos resultados por ela obtidos comparados ao custo computacional envolvido na sua aplicação em projetos de verificação de fadiga. Uma análise no domínio da frequência pressupõe que tanto o comportamento estrutural quanto o carregamento incidente sejam lineares. Esse pensamento é considerado razoável pelos baixos níveis de carregamento geralmente observados nas análises de fadiga.

Em relação à linearidade exigida no carregamento incidente, representa-se o termo de arrasto da força hidrodinâmica dada pela equação de Morison por meio de uma forma linear. A formulação de um modelo hidrodinâmico linear equivalente permite representar o modelo originalmente quadrático da força de arrasto nas análises de *risers* no domínio da frequência (DANTAS, 2004).

A equação de Morison é largamente utilizada na determinação da força hidrodinâmica induzida pelas velocidades e acelerações do fluido sobre os membros estruturais esbeltos nos quais os efeitos de difração e reflexão se fazem desprezíveis (VAILLANT, 2007). Em sua forma originalmente proposta, tem-se que

$$f = C_M \frac{\pi}{4} \rho_w D^2 \dot{v} + C_D \frac{1}{2} \rho_w D |\dot{v} + U| (\dot{v} + U) \quad (1)$$

sendo:

f : Força de arrasto por unidade de comprimento do *riser*;

ρ_w : Massa específica da água do mar;

C_D : Coeficiente de arrasto;

D : Diâmetro hidrodinâmico do *riser*;

$\dot{v}$: Velocidade da partícula fluida devida à onda;

$\ddot{v}$: Aceleração da partícula fluida devida à onda;

U : Velocidade da corrente marinha.

Métodos de linearização equivalentes e estocásticos têm sido usados e propostos por diferentes autores para simplificar o cálculo da força de arrasto na equação de Morison. Assim, este artigo tem como objetivo o estudo da técnica de linearização de Leira (1987) para a parcela de arrasto.

Metodologia

A linearização proposta por Leira (1987) propôs uma matriz simétrica de coeficientes dinâmicos de linearização, e isolou a parcela não linear do termo de arrasto da expressão 1, e a aproximou por meio de uma forma linear dada por

$$F_n^D = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |\dot{v}_n + U_n| (\dot{v}_n + U_n) \cong \frac{1}{2} \rho_w C_D D [\mathbf{L1} \dot{v}_n + \mathbf{L2} U_n] = F_{L_n}^D \quad (2)$$

sendo:

$$|\dot{v}_n + U_n| = \sqrt{(\dot{v}_x + U_x)^2 + (\dot{v}_y + U_y)^2};$$

$$(\dot{v}_n + U_n) = (\dot{v}_x + U_x) + (\dot{v}_y + U_y);$$

F_n^D : parcela da força de arrasto;

$F_{L_n}^D$: parcela linearizada da força de arrasto.

As matrizes L1 e L2 citadas acima têm a forma $L1 = \begin{bmatrix} L_{1,1} & L_{1,2} \\ L_{2,1} & L_{2,2} \end{bmatrix}$ e $L2 = \begin{bmatrix} C_x & 0 \\ 0 & C_y \end{bmatrix}$. A avaliação do valor esperado de cada elemento das matrizes que definem os coeficientes de linearização se faz com o uso da função Gaussiana binormal de probabilidades definida anteriormente no trabalho de Leira (1987). Dessa forma, têm-se os coeficientes dados por:

$$L_{1,1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2(\dot{v}_x + U_x)^2 + (\dot{v}_y + U_y)^2}{|\dot{v}_n + U_n|} P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (3)$$

$$L_{1,2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\dot{v}_x + U_x) + (\dot{v}_y + U_y)}{|\dot{v}_n + U_n|} P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (4)$$

$$L_{2,1} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\dot{v}_x + U_x) + (\dot{v}_y + U_y)}{|\dot{v}_n + U_n|} P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (5)$$

$$L_{2,2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(\dot{v}_x + U_x)^2 + 2(\dot{v}_y + U_y)^2}{|\dot{v}_n + U_n|} P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (6)$$

$$C_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{U_x} |\dot{v}_n + U_n| (\dot{v}_x + U_x) P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (7)$$

$$C_y = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{U_y} |\dot{v}_n + U_n| (\dot{v}_y + U_y) P(\dot{v}_x, \dot{v}_y) d\dot{v}_x d\dot{v}_y \quad (8)$$

Dessa forma, calcula-se a força de arrasto local, e a multiplica por $\mathbf{N}$ (matriz composta pelos vetores $N^{<1>}$ e $N^{<2>}$):

$$F_G^D = \mathbf{N} \cdot F_n^D \quad (9)$$

Com isso, implementa-se essa linearização no software MATLAB®.

Resultados e Discussão

Inicialmente, constrói-se o código para a criação dos parâmetros de onda que serão utilizados no cálculo da parcela de arrasto e que serão necessários para a linearização. Nesses dados, têm-se a lâmina d'água de 500 metros, período de 9,6 segundos, altura significativa de 7,6 metros, densidade da água de 1,025 g/cm³, gravidade de 9,80665 m/s², número de ondas sendo 100, parâmetro de forma para Jonswap de 1,0, posição de interesse da superfície de elevação representada por [0, 0, -10], limite inicial para discretização do espectro de 0,01 Hz, limite final de 2,0 Hz, e a profundidade utilizada para obter os espectros de velocidade de 10 metros. Ele é mostrado na Figura 1.

Figura 1: Código para os parâmetros de onda:

```
function [vxt,vyt,axt,ayt,H, T, W, phase, Ampw] = onda(t)

[H, T, W, phase, Ampw] = CreateComponentsOfWaves(Tp, NumberOfWaves, Wdi, Wdf, Hs,
gama);
[lambda, k] = ComputeLengthOfWave(d, T, NumberOfWaves, Grav);

%Considerando pw = 1.025 g/cm3, Cd = 0.7, D = 0.5 metros, vc = 2 m/s
vc = 2.0;
Cd = 1.2;
Di = 0.3048;
x = 0;
i=0;
for tt=1:1:t
    [Vx,Vy] = ComputeVelocityAndAcelerations(H, k, d, Zd, NumberOfWaves, Ampw, W,
phase, tt, pos);
    vxt(tt) = Vx;
    vyt(tt) = Vy;
end
```

Fonte: Autor.

O código principal, mostrado na Figura 2, contém a massa específica da água, velocidades da corrente, diâmetro e coeficiente de arrasto, e chamará o código mostrado na Figura 1.

Figura 2: Código Principal:

```
t = 100.0;
[vxt,vyt,axt,ayt,H, T, W, phase, Ampw] = onda(t);

ux = 2*ones([1,size(vxt,2)]);
uy = 2*ones([1,size(vxt,2)]);

ro = 1025;
Cd = 1.2;
D = 0.3048;

F = forca (ux, uy, vxt, vyt, axt, ayt, ro, Cd, D);
[FdNL,FdL,Vxt] = naolinear&KG(H, T, W, phase, Ampw);
```

Fonte: Autor.

Dentro do código principal também está inserido o código “forca” que é o responsável por calcular a matriz de covariância e a distribuição gaussiana de probabilidades. Além disso, outra função calcula os elementos das matrizes L1 e L2, para no final calcular a força de arrasto local. Os códigos com essas funções podem ser vistos nas Figuras 3 e 4.

Figura 3: Código com o cálculo da matriz de covariância e das matrizes L1 e L2:

```
function [L,C] = MatricesLC(vx, vy, ux, uy)
L11=0;
L12=0;
L21=0;
L22=0;
Cx=0;
Cy=0;

S = cov(vx,vy);

%Cálculo dos elementos das matrizes L e C
for i=2:size(vx,2)
deltavx = vx(i)-vx(i-1);
for j=2:size(vy,2)
deltavy = vy(j)-vy(j-1);
%Matriz L
L11=L11+2*(( (vx(i)+ux(i))^2)+(vy(j)+uy(i))^2)/sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
L12=L12+(((vx(i)+ux(i))*(vy(j)+uy(i)))/sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
L21=L21+(((vx(i)+ux(i))*(vy(j)+uy(i)))/sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
L22=L22+(((vx(i)+ux(i))^2)+2*(vy(j)+uy(i))^2)/sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
%Matriz C
Cx=Cx+((1/ux(i))*(sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*(vx(i)+ux(i)))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
Cy=Cy+((1/uy(j))*(sqrt(((ux(i)+vx(i))^2)+(uy(j)+vy(j))^2))*(vy(j)+uy(j)))*VP(vx(i),vy(j),S)*deltavx*deltavy;
end
end

L = [L11 L12;L21 L22];
C = [Cx 0;0 Cy];
```

Fonte: Autor.

Figura 4: Código com o cálculo da parcela da força de arrasto:

```
function F = forca (ux, uy, vxt, vyt, axt, ayt, ro, Cd, D)
[L,C] = MatricesLC(vxt, vyt, ux, uy);

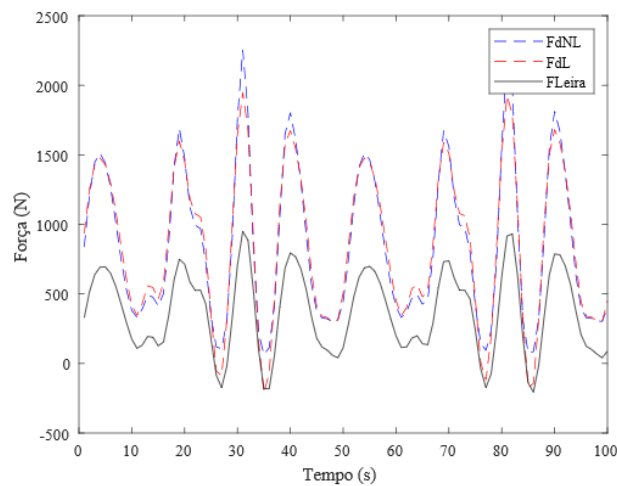
i=0;
for tt=1:1:100
i=i+1;
FD1(i) = 1/2*ro*Cd*D*((L(1,1)*vxt(i)+L(1,2)*vyt(i))+C(1,1)*ux(i));
FD2(i) = 1/2*ro*Cd*D*((L(2,1)*vxt(i)+L(2,2)*vyt(i))+C(2,2)*uy(i));
end
F = [FD1;FD2];
```

Fonte: Autor.

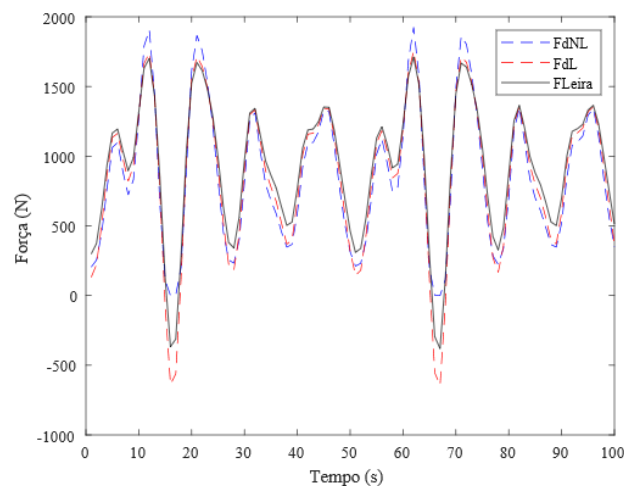
Salienta-se que a linearização foi implementada, mas os cálculos foram feitos no domínio do tempo, para poder comparar com o resultado da parcela não linearizada. Com isso, ao rodar o código principal, plota-se o gráfico mostrado na Figura 5, onde a legenda “FLeira” corresponde à linearização implementada, “FdNL” corresponde à parcela da força não linearizada e “FdL” à parcela linearizada por Krolikowski-Gay (1980).

Figura 5: Gráfico comparativo das forças:

(a)



(b)



Fonte: Autor.

Ao observar a Figura 5 (a), nota-se que a força linearizada por Leira apresenta o comportamento de oscilações bastante similar ao da força não linearizada. Apesar disso, o gráfico ficou deslocado verticalmente para baixo, em que, por exemplo, é possível ver que a parcela não linear inicia em uma força de aproximadamente 1000 N, e a linearizada por meio de Leira inicia em torno de 400 N. Porém, na Figura 5 (b), percebe-se que o comportamento da força linearizada por Leira representou de forma aceitável a força não linear, e que esse resultado poderia ser utilizado para a análise dinâmica no domínio da frequência com uma pequena margem de erro. Por meio das revisões e pesquisas, acredita-se que

esse deslocamento mostrado em na Figura 5 (a) tenha sido causado por algum problema no cálculo dos componentes das matrizes L1 e L2, pois eles que possuem os parâmetros capazes de deslocar o gráfico verticalmente, ou algum intervalo que está sendo utilizado não é valido para os cálculos dessa linearização.

Conclusões

Realiza-se a implementação da linearização da parcela de arrasto da força de Morison segundo Leira, de forma a reduzir o custo computacional da análise dinâmica no domínio do tempo. Essa linearização permite que essa análise seja feita no domínio da frequência, sendo uma metodologia viável para estudos e pesquisas. Para isso, a formulação desenvolvida por Leira foi implementada para verificar a possibilidade dessa alternativa.

Assim, os resultados obtidos mostram que, mesmo que em algumas simulações o comportamento de oscilações é similar e confiável para uma análise dinâmica no domínio da frequência, outras não representam de forma satisfatória o comportamento da onda. O deslocamento da curva na vertical não permite que essa implementação seja uma opção útil para a análise dinâmica, pois nem todas as simulações exprimem de forma confiável o real comportamento que a força não linearizada entrega.

Dessa forma, faz-se necessária a revisão da implementação desenvolvida, para que a existência de algum erro seja verificada.

Agradecimentos

Ao CNPq e à Petrobras pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

DANTAS, C. M. S. **Metodologia de análise de fadiga de risers rígidos no domínio da frequência com utilização de modelos hidrodinâmicos tridimensionais linearizados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

DET NORSKE VERITAS. DNVGL-ST-F201: **Dynamic Risers**. Norway, 2018.

KROLIKOWSKY, L. P., GAY T. A., 1980. **An Improved Linearization Technique for Frequency Domain Risers Analysis**, OTC 3777, Houston, Texas.

LEIRA, B. J. **Multidimensional stochastic linearisation of drag forces**. *Applied Ocean Research*, v. 9, n. 3, p. 150-162, 1987.

VAILLANT, A. G. **Estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em risers flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

VAILLANT, A. G.; FRANCISS, R.; FREITAS, M. S. R. Estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em risers flexíveis. **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 385-392, 2009.