

Cálculo de Amortecimento em Linhas de Ancoragem

Julian de Freitas Hallai

Engenheiro Naval, Mestre

PETROBRAS

Engenharia de Dutos e Instalações

**Rua General Canabarro, 500 9º andar,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil**

+55 21 3876 2076

julian@petrobras.com.br

Oscar Brito Augusto

Professor Assistente, Doutor

**Depto de Engenharia Naval e Oceânica
da Escola Politécnica da USP**

**Av. Prof. Mello Moraes, 2231,
São Paulo, SP, Brasil**

+55 11 3091 5340

obaugust@usp.br

RESUMO

As estruturas flutuantes ancoradas, expostas aos agentes ambientais, apresentam movimentos ressonantes de grandes amplitudes em baixas frequências, que são fortemente influenciados pelo amortecimento.

Entre as várias contribuições ao amortecimento das estruturas *offshore*, o amortecimento em linhas de ancoragem foi sistematicamente desprezado até meados da década de 1980, quando resultados experimentais evidenciaram a relevância do cálculo da dissipação de energia devida às forças de arrasto atuantes sobre as linhas de ancoragem durante os movimentos da estrutura.

Este trabalho apresenta um método iterativo no domínio da frequência para o cálculo do amortecimento em linhas de ancoragem. As linhas são discretizadas utilizando-se elementos de treliça. É proposta uma matriz de amortecimento para o elemento e são apresentadas correções para os efeitos de correnteza e dos movimentos em frequência de onda superpostos aos movimentos ressonantes em baixa frequência. O objetivo do trabalho é fornecer um método para as etapas iniciais de projeto, sendo mais rápido do que simulações no domínio do tempo e mais preciso do que as formulações analíticas quase-estáticas.

ABSTRACT

The accurate calculation of the energy dissipation due to the drag forces on mooring lines is essential in order to determine the low frequency motions of moored floating structures. An iterative frequency domain method to calculate the mooring line damping is proposed. Truss elements are used to model the mooring lines. The truss-element damping matrix is obtained as a closed-form expression and correction factors are used to include the current effects as well as wave frequency motions.

INTRODUÇÃO

As estruturas flutuantes ancoradas, expostas aos agentes ambientais (ondas, vento e correnteza), apresentam movimentos ressonantes de grandes amplitudes em baixas frequências, que são fortemente influenciados pelo amortecimento.

Entre as várias contribuições ao amortecimento das estruturas *offshore*, o amortecimento em linhas de ancoragem foi sistematicamente desprezado até meados da década de 1980, quando os resultados experimentais apresentados por Huse (1986) evidenciaram a relevância do cálculo da dissipação de energia devida às forças de arrasto atuantes sobre as linhas de ancoragem durante os movimentos da estrutura.

Huse também propôs um método quase-estático com o objetivo de calcular o amortecimento nas linhas de ancoragem. Este método foi posteriormente aperfeiçoado por Liu; Bergdahl (1998) quando estes concluíram, baseados na não-linearidade geométrica inerente às equações de catenária, que é mais apropriado dividir o ciclo de oscilação em baixa frequência em duas partes. Bauduin; Naciri (2000) propuseram uma forma mais precisa de determinação dos deslocamentos ao longo da linha e melhoraram ainda mais este método quase-estático.

Apesar de serem muito mais rápidos do que as mais precisas simulações no domínio do tempo, os métodos quase-estáticos exigem que as linhas de ancoragem sejam sempre descritas pelas equações de catenária durante o ciclo de oscilação, o que impede a utilização da abordagem quase-estática em situações quando o comportamento dinâmico da linha não pode ser desprezado.

Foi demonstrado por Huse; Matsumoto (1988) que a superposição de movimentos em frequência de onda aos movimentos em baixa frequência incrementa dramaticamente o amortecimento nas linhas de ancoragem.

O presente trabalho apresenta um método simplificado no domínio da frequência que considera os efeitos dos movimentos em frequência de onda e também da correnteza na dissipação de energia durante as oscilações das linhas de ancoragem e não exige o comportamento quase-estático das linhas. Adicionalmente, linhas heterogêneas são facilmente modeladas. O arrasto é linearizado através do cálculo de coeficientes de amortecimento equivalente iterativamente.

MATRIZ DE AMORTECIMENTO DO ELEMENTO DE TRELIÇA

O desenvolvimento da matriz de amortecimento do elemento de treliça é baseado nas seguintes hipóteses:

- A linha de ancoragem é discretizada em elementos de treliça bidimensionais;
- Os nós se movem harmonicamente, no plano vertical da linha, em regime permanente, de acordo com:

$$\begin{aligned}x_1 &= -X_1 \cdot \cos(\omega \cdot t) \\x_2 &= -X_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)\end{aligned}\quad (1)$$

- Os deslocamentos dos nós na direção do elemento são desprezíveis para efeito de cálculo da energia dissipada;

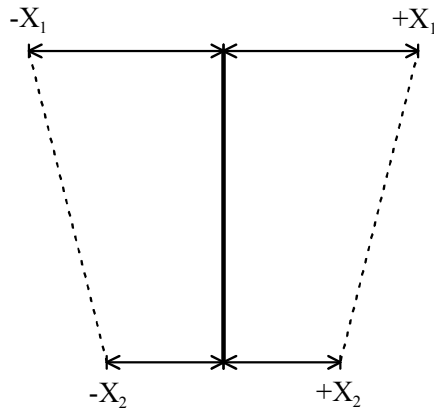


Figura 1: Deslocamento do elemento

- A velocidade varia linearmente ao longo do comprimento do elemento:

$$\dot{x}(l, t) = \dot{x}_2 + \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{l_0} \cdot l \quad (2)$$

- Apenas o amortecimento devido ao arrasto é considerado, sendo desprezados o amortecimento estrutural e a dissipação devida ao atrito da linha com o fundo;
- A força de arrasto é determinada através da equação de Morison. O arrasto tangencial é desprezado:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_D \cdot D \cdot \dot{x}_n \cdot \left| \dot{x}_n \right| \quad (3)$$

onde D é o diâmetro do elemento, C_D é o coeficiente de arrasto (admitido constante) e ρ_w é a massa específica da água. A velocidade perpendicular ao elemento é obtida por:

$$\dot{x}_n = \dot{x} \cdot \sec(\alpha) \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \arctan \left[\frac{(x_1 - x_2)}{l_0} \right] \quad (5)$$

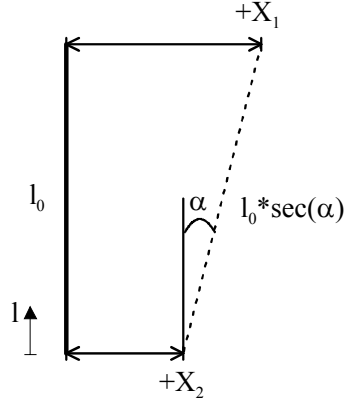


Figura 2: Variação do Comprimento

De acordo com as hipóteses acima, a energia dissipada no elemento durante um ciclo de oscilação é calculada por:

$$\begin{aligned}
 W_D &= \int_0^{l_0} [\oint F_D \cdot dx] \cdot dl = \\
 &= \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_D \cdot D\right) \cdot \omega^2 \cdot (X_1 + X_2) \cdot (X_1^2 + X_2^2)}{48 \cdot l_0^2 \cdot \Delta X^3} \cdot \left\{ 3 \cdot [l_0^2 + 6 \cdot \Delta X^2] \cdot \csc h^{-1} \left[\frac{l_0}{\Delta X} \right] \cdot l_0^4 + \sqrt{l_0^2 + \Delta X^2} \cdot \Delta X \cdot [-3 \cdot l_0^4 + 16 \cdot \Delta X^2 \cdot l_0^2 + 4 \cdot \Delta X^4] \right\}
 \end{aligned} \quad (6)$$

A eq.(6) é válida quando $\Delta X \neq 0$, sendo $\Delta X = X_1 - X_2$. Quando o elemento desloca-se puramente em translação, a energia dissipada é calculada por:

$$W_D = \frac{(\rho_w \cdot C_D \cdot D) \cdot l_0 \cdot \omega^2 \cdot (X_1 + X_2) \cdot (X_1^2 + X_2^2)}{3} \quad (7)$$

A energia dissipada durante um ciclo por um sistema de um grau de liberdade, sujeito ao amortecimento viscoso (linear) é obtida por:

$$W_D = \pi \cdot c \cdot \omega \cdot X^2 \quad (8)$$

O coeficiente de amortecimento equivalente é calculado dividindo-se as equações (6) e (7) pela eq. (8), aplicada aos dois nós do elemento, resultando em:

$$\begin{aligned}
 c_{eq} &= \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_D \cdot D\right) \cdot \omega \cdot (X_1 + X_2)}{48 \cdot l_0^2 \cdot \pi \cdot \Delta X^3} \cdot \left\{ 3 \cdot [l_0^2 + 6 \cdot \Delta X^2] \cdot \csc h^{-1} \left[\frac{l_0}{\Delta X} \right] \cdot l_0^4 + \sqrt{l_0^2 + \Delta X^2} \cdot \Delta X \cdot [-3 \cdot l_0^4 + 16 \cdot \Delta X^2 \cdot l_0^2 + 4 \cdot \Delta X^4] \right\}
 \end{aligned} \quad (9)$$

quando $\Delta X \neq 0$ e

$$c_{eq} = \frac{(\rho_w \cdot C_D \cdot D) \cdot l_0 \cdot \omega \cdot (X_1 + X_2)}{3 \cdot \pi} \quad (10)$$

quando o movimento do elemento é uma translação pura.

Conforme esperado, o coeficiente de amortecimento equivalente depende da amplitude de deslocamentos dos nós. Por isso, é necessário calcular o amortecimento (e os deslocamentos) iterativamente.

A matriz de amortecimento do elemento é definida a partir de:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{eq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{eq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Esta matriz, extremamente simples, dissipa a mesma energia que a eq.(6) (ou eq.(7), dependendo do movimento do elemento). Os graus de liberdade do elemento são definidos a partir da convenção apresentada na Figura 3:



Figura 3: Graus de Liberdade

A incorporação dos efeitos resultantes da superposição dos movimentos em frequência de onda e da correnteza é feita corrigindo as equações (9) e (10) de acordo com as correções apresentadas nas próximas seções.

Hallai (2003) desenvolve tais correções a partir do caso unidimensional e compara o método proposto para o cálculo do amortecimento nas linhas de ancoragem com alguns métodos, no domínio do tempo e da frequência, disponíveis na literatura.

MOVIMENTOS EM FREQUÊNCIA DE ONDA

A adição dos movimentos em frequência de onda aos movimentos em baixa frequência aumenta dramaticamente a dissipação de energia devida ao arrasto nas linhas de ancoragem. Assim, é de suma importância a inclusão destes efeitos nas equações já desenvolvidas. O movimento de um sistema de um grau de liberdade pode ser então definido por:

$$x = -[X_w \cdot \cos(\omega_w \cdot t) + X_L \cdot \cos(\omega_L \cdot t)] \quad (12)$$

onde as parcelas do lado direito da equação representam os movimentos em 1ª ordem (frequência de onda) e em 2ª ordem (baixa frequência), respectivamente.

Definindo ainda os adimensionais:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\omega_w}{\omega_L} \\ \Pi_2 &= \frac{X_w}{X_L} \end{aligned} \quad (13)$$

O aumento da dissipação de energia pode ser calculado por:

$$\Pi_3 = \frac{3 \cdot \Pi_1 \cdot \Pi_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{8 \cdot \Pi_1^2 \cdot \Pi_2^2} \right) \quad (14)$$

A equação (14) é uma expressão aproximada, proposta por Nielsen; BindingbØ (2000). Apesar de aproximada esta equação é bastante precisa, geralmente apresentando, para valores típicos dos adimensionais, erro menor que 1%, conforme verificado por Hallai (2003).

Huse; Matsumoto (1989) já haviam concluído que a dissipação de energia é entre 2 e 4 vezes maior quando os movimentos em frequência de onda são considerados. A partir da eq.(14) percebe-se que o aumento pode ser até maior do que 4, dependendo dos valores dos adimensionais.

A eq.(14) comprova também o aumento do amortecimento oriundo das vibrações induzidas por vórtices. Hallai (2003) obteve dissipação de energia 2 vezes maior para vibrações in-line e até 3,5 vezes maior para vibrações cross-flow.

Ao considerar os movimentos em frequência de onda, o coeficiente de amortecimento equivalente é corrigido de acordo com:

$$(c_{eq})_{LF+WF} = \Pi_3 \cdot c_{eq} \quad (15)$$

Π_3 pode ser calculado ao longo de todo o comprimento da linha iterativamente, pois os movimentos em frequência de onda são admitidos como entrada, constantes, enquanto se determina os movimentos em baixa frequência e o amortecimento, de forma iterativa.

CORRENTEZA

A seguir, a influência da correnteza, admitida constante, é investigada de forma análoga à influência dos movimentos em frequência de onda. Quando a velocidade da correnteza é menor do que a amplitude de velocidade do sistema de um grau de liberdade considerado, o aumento na dissipação de energia é calculado por:

$$\Pi_5 = \frac{3 \cdot \Pi_4}{2} \cdot \text{sen}^{-1}(\Pi_4) + \left(1 + \frac{\Pi_4^2}{2} \right) \cdot \sqrt{1 - \Pi_4^2} \quad (16)$$

sendo:

$$\Pi_4 = \frac{V_c}{X \cdot \omega} \quad (17)$$

Quando $|\Pi_4| \geq 1$, a correção é obtida por:

$$\Pi_5 = \frac{3 \cdot \pi}{4} \cdot |\Pi_4| \quad (18)$$

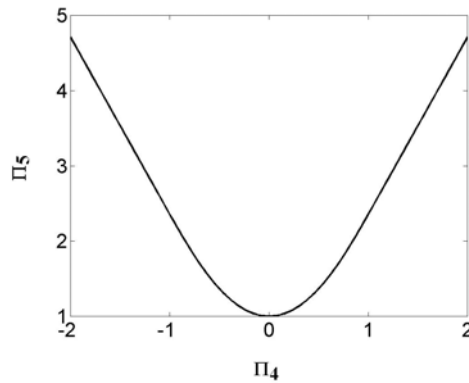


Figura 4: Efeito da Correnteza

A eq. (16) pode ser aproximada pela seguinte parábola:

$$\Pi_5 = \left(\frac{3 \cdot \pi}{4} - 1 \right) \cdot \Pi_4^2 + 1 \quad (19)$$

Aplicando-se a correção adequada, em função da magnitude da correnteza, o coeficiente de amortecimento equivalente é dado por:

$$(c_{eq})_{cor} = \Pi_5 \cdot c_{eq} \quad (20)$$

Observa-se que a correnteza sempre aumenta a dissipação de energia, para quaisquer valores de velocidade. Ressalta-se ainda que a configuração estática de referência da linha de ancoragem já deve considerar os efeitos da correnteza no início da análise.

CORRENTEZA E MOVIMENTOS EM FREQUÊNCIA DE ONDA

Os efeitos da correnteza e dos movimentos em frequência de onda não podem ser simplesmente somados. Conforme já demonstrado, a dissipação de energia é uma função não-linear da velocidade do fluxo.

Assumindo, mais uma vez, que o movimento do sistema seja descrito pela eq.(12), quando $|V_C| \geq X_W \cdot \omega_W + X_L \cdot \omega_L$, o aumento na dissipação de energia é calculado por:

$$\Pi_6 = \frac{3 \cdot \pi}{4} \cdot \left(\Pi_1 \cdot \Pi_2 + \frac{\Pi_2}{27} + 1 \right) \cdot |\Pi_4| \quad (21)$$

sendo, neste caso:

$$\Pi_4 = \frac{V_C}{X_W \cdot \omega_W + X_L \cdot \omega_L} \quad (22)$$

A eq. (21) é uma expressão aproximada. A diferença entre a eq. (21) e a formulação exata, apresentada por Hallai (2003), é inferior a 0,20% dentro das faixas dos adimensionais apresentadas na Figura 5:

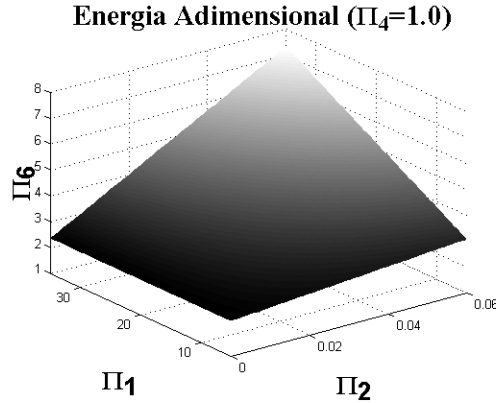


Figura 5: Efeito da Combinação Correnteza + Movimentos em Frequência de Onda

Conforme esperado, quando $\Pi_1 = \Pi_2 = 0$ a eq. (21) é idêntica à eq. (18):

$$\Pi_6 = \frac{3 \cdot \pi \cdot |\Pi_4|}{4}. \quad (23)$$

Quando $|V_C| < X_H \cdot \omega_H + X_L \cdot \omega_L$, a energia dissipada deve ser calculada através de integração numérica, pois ocorrem várias inversões no sentido da força de arrasto durante o ciclo de oscilação em baixa frequência e a obtenção de uma solução analítica seria demasiadamente trabalhosa.

Como aproximação, é possível utilizar a própria eq. (21) quando $|\Pi_4| \rightarrow 1$ ou, desprezando a correnteza, a eq. (14) quando $|\Pi_4| \rightarrow 0$. Observa-se que ambas as abordagens fornecem resultados subestimados e, portanto, estão a favor da segurança.

De forma análoga às apresentadas nas seções anteriores, o coeficiente de amortecimento equivalente corrigido é calculado por:

$$(c_{eq})_{LF+HF+cor} = \Pi_6 \cdot c_{eq} \quad (24)$$

MÉTODO ITERATIVO DE CÁLCULO DO AMORTECIMENTO

Conforme já explanado, a matriz de amortecimento desenvolvida depende do deslocamento do elemento; Por isso, tanto o amortecimento, como o deslocamento do elemento, devem ser calculados iterativamente. O procedimento adotado é resumido a seguir:

1. Como estimativa inicial, admite-se que os deslocamentos transversais (considerando as coordenadas locais dos elementos) são, por exemplo, 5% do comprimento do elemento. Este valor é absolutamente arbitrário;
2. Calculam-se os coeficientes de amortecimento dos elementos, obtendo-se a matriz de amortecimento do sistema;
3. Resolve-se o sistema no domínio da frequência, obtendo os deslocamentos em regime permanente;

4. Repete-se o passo 2 com os novos deslocamentos e, posteriormente, o passo 3 com a nova matriz de amortecimento;

O procedimento acima é repetido até que a convergência seja alcançada.

A partir deste procedimento, foi desenvolvido um programa, em ambiente MATLAB, para análise de linhas de ancoragem utilizando o método dos elementos finitos no domínio da frequência. O objetivo do programa é analisar a resposta da linha em regime permanente (*steady state*) sem e com amortecimento.

No caso dos movimentos bicromáticos, a correção devida aos movimentos em frequência de onda pode ser calculada ao longo de toda a linha, para todos os elementos, baseando-se nos movimentos em baixa frequência e em frequência de onda em cada um dos nós ou pode ser utilizada uma mesma correção para todos os elementos, baseada nos movimentos do *fairlead*.

EXEMPLOS DE CÁLCULO

Na Tabela 1 são apresentadas as características das linhas de ancoragem calculadas como exemplo.

Tabela 1: Características das Linhas Analisadas

	Linha 1	Linha 2
Lâmina d'água (m)	82,5	500,0
Material da linha	Amarras	Cabo de aço
Diâmetro da linha (m)	0,14	0,13
Comprimento total (m)	711,3	4000,0
Peso no ar (N/m)	3586,5	800,5
Peso submerso (N/m)	3202,0	664,4
Rigidez axial EA (N)	1,69e9	1,30e9
Força no <i>fairlead</i> (kN)	549,9	1133,6
Comprimento Suspenso (m)	168,8	1747,0
Coefficiente de arrasto	3,2	1,8
Coefficiente de massa adicional	2,6	2,0

Estas configurações foram adotadas durante um estudo comparativo sobre análise dinâmica de linhas de ancoragem, cujos detalhes são fornecidos por Brown; Mavrakos (1999). Também foram analisadas por Liu; Bergdahl (1998) e por Bauduin; Naciri (2000).

Apesar de as duas linhas serem homogêneas, o método pode ser facilmente aplicado a linhas heterogêneas.

O amortecimento é calculado para várias combinações de amplitude e período de excitação imposta no *fairlead* das Linhas 1 e 2, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Casos de Excitação Calculados

Caso n°	Excitação (LF+WF)
1.1	10m*100s + 5,4m*10s
1.2	10m*100s
1.3	20m*100s
1.4	10m*200s
1.5	20m*200s
1.6	5,4m*10s
1.7	10m*100s + 8m*10s
1.8	10m*100s + 5,4m*13s
2.1	30m*330s + 5,4m*10s
2.2	30m*330s
2.3	50m*330s
2.4	30m*330s + 8m*10s
2.5	30m*330s + 5,4m*13s
2.6	5,4m*10s

Os casos 1.1, 1.7, 1.8, 2.1, 2.4 e 2.5 são excitações bicromáticas, que consideram os movimentos em frequência de onda superpostos aos movimentos em baixa frequência.

As Tabelas 3 e 4 apresentam o coeficiente de amortecimento das Linhas 1 e 2, respectivamente, calculados pelo método proposto.

Tabela 3: Coeficiente de Amortecimento (kN*s/m)

Caso n°	Domínio da Frequência		M	B1	B2
	min.	max.			
1.1	102	119	-	123	115
1.2	12	18	14	-	-
1.3	25	37	29	-	-
1.4	6	9	7	-	-
1.5	12	18	14	-	-
1.6	72	105	96	-	-
1.7	145	178	-	176	169
1.8	79	92	-	93	89

Tabela 4: Coeficiente de Amortecimento (kN*s/m)

Caso n°	Domínio da Frequência		M	B1	B2	B3
	min.	max.				
2.1	393	1927	-	2294	4329	1119
2.2	224	660	538	-	-	-
2.3	365	1095	896	-	-	-
2.4	459	2367	-	2788	5854	1271
2.5	410	1900	-	2185	3469	1089
2.6	39	157	437	-	-	-

Os resultados fornecidos pelo método proposto estão listados na seqüência:

- **M**: Excitação apenas em baixa freqüência;
- **B1**: Correção devida aos movimentos em freqüência de onda calculada ao longo de toda a linha, baseando-se nas amplitudes dos movimentos em baixa freqüência e em freqüência de onda em cada um dos nós.
- **B2**: Correção única para os movimentos em freqüência de onda baseando-se nas amplitudes dos movimentos em baixa freqüência e em freqüência de onda apenas no *fairlead*. Esta correção é utilizada ao longo de toda a linha.
- **B3**: Correção devida aos movimentos em freqüência de onda calculada de forma análoga à B1, porém utilizada apenas numa fração do comprimento da linha, a partir do topo.

Os movimentos em freqüência de onda são calculados e armazenados previamente e então adicionados ao longo da linha nos casos B1 e B3.

Os resultados são comparados com os fornecidos por Brown; Mavrakos (1999), baseados nas contribuições dos 15 participantes do estudo comparativo cujo objetivo foi estimar a incerteza no cálculo de tensão dinâmica e amortecimento em linhas de ancoragem. São fornecidos pelo estudo os valores extremos obtidos por métodos no domínio do tempo e da freqüência (média dos resultados mais (ou menos) um desvio padrão).

Os resultados monocromáticos (M) estão sempre dentro da faixa de resultados obtidos utilizando métodos no domínio da freqüência, exceto no caso 2.6.

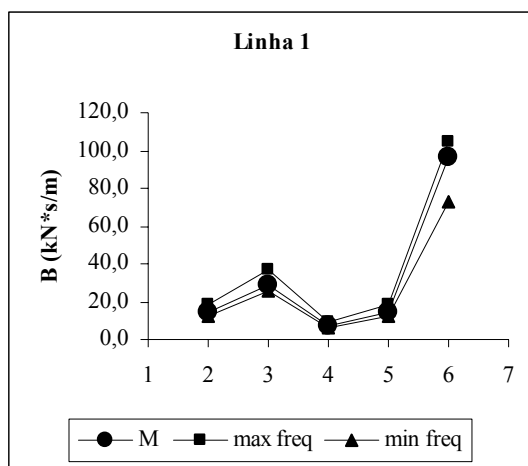


Figura 6: Resultados Monocromáticos (Linha 1)

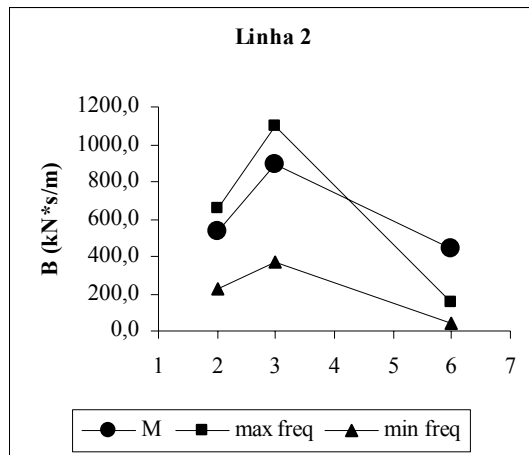


Figura 7: Resultados Monocromáticos (Linha 2)

Nos casos bicromáticos, para a Linha 1, o método B2 fornece resultados dentro da faixa de valores obtidos no domínio da frequência, enquanto o método B1 fornece valores ligeiramente superiores. Percebe-se que ambos fornecem boas estimativas do amortecimento nesta linha de ancoragem.

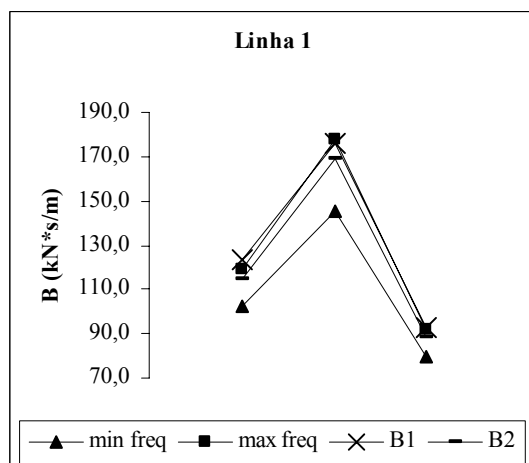


Figura 8: Resultados Bicromáticos (Linha 1)

Nos casos da Linha 2, a tendência se inverte: os maiores valores são obtidos com o método B2. O método B1 fornece valores ligeiramente superiores à média mais desvio padrão dos métodos no domínio da frequência. O método B3 fornece bons resultados, aplicado a 40% do comprimento da linha.

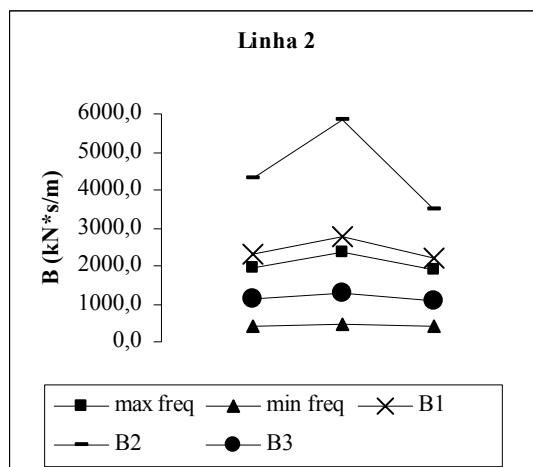


Figura 9: Resultados Bicromáticos (Linha 2)

Comparações mais sistemáticas ainda foram feitas com os resultados de Liu; Bergdahl (1998), que, além dos casos acima, compararam resultados quase-estáticos e obtidos através de um método no domínio do tempo numa faixa maior de frequências e amplitudes de oscilação.

Entre todos os resultados apresentados por Hallai (2003), foram selecionadas duas tabelas representativas. Em cada uma delas, é variada apenas a frequência de excitação em frequência de onda.

As Tabelas 5 e 6 contêm os resultados obtidos por dois métodos quase-estáticos e um método no domínio do tempo, além do método proposto. A última linha de cada tabela contém o caso monocromático correspondente, em baixa frequência. Ressalta-se que a comparação é de energia dissipada por ciclo de baixa frequência ao invés de coeficientes de amortecimento da linha.

As análises no domínio do tempo (TD) foram feitas pelo programa MODEX enquanto os resultados fornecidos pelo método quase-estático proposto por Liu; Bergdahl (1998) estão na coluna QS21. A coluna QS1 fornece os resultados obtidos através do método pioneiro de Huse (1986).

Tabela 5: Energia Dissipada na Linha 1 (*10⁶ J) sendo X_L=20m, T_L=200s, X_w=5,4m

T _w (s)	TD	QS1	QS21	B1
4	14,81	13,52	6,56	9,90
5	15,14	10,82	6,56	8,41
6	15,62	9,03	6,56	7,57
8	12,89	6,79	6,51	6,11
10	11,52	5,44	6,16	4,94
12	8,67	4,55	5,93	4,06
14	10,01	3,92	5,77	3,44
200	7,80	1,63	4,83	0,62
-	2,16	0,67	1,68	0,56

Tabela 6: Energia Dissipada na Linha 2 (*10⁷ J) sendo X_L=10m, T_L=165s, X_w=5,4m

T _w (s)	TD	QS1	QS21	B3
8	1,27	5,47	1,80	1,13
10	1,27	4,38	1,80	1,11
12	1,21	3,65	1,81	1,10
13	1,29	3,38	1,81	1,09
14	1,30	3,14	1,81	1,08
16	1,17	2,75	1,81	1,05
18	1,23	2,45	1,81	1,03
165	1,24	1,19	1,24	-
-	0,34	0,33	0,34	-

Conforme esperado, o método B1 fornece para a Linha 1 menores energias dissipadas ao se aumentar o período de excitação em alta frequência. Os métodos TD e QS1 também se comportam de acordo com a intuição, ao contrário do método QS21. Percebe-se observando a Figura 10 que o método no domínio do tempo não apresenta resultados monotonicamente decrescentes.

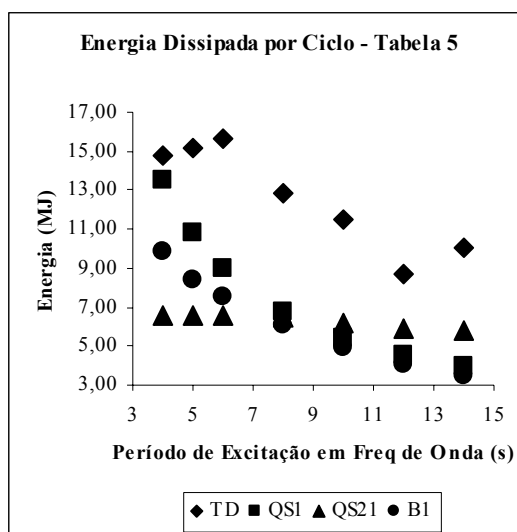


Figura 10: Energia Dissipada na Linha 1

É interessante notar que a dissipação de energia não varia de forma intuitiva em função do período de excitação nos casos analisados para a Linha 2; Tanto o método proposto como o método no domínio do tempo e o método quase-estático QS21 não fornecem menores valores de energia dissipada ao aumentar o período de excitação em frequência de onda. Apenas o método QS1 apresenta esta tendência.

Percebe-se então que ambos os métodos quase-estáticos apresentam o mesmo comportamento tanto para a Linha 1 como para a Linha 2. Por outro lado, os métodos B1 e B3 parecem acompanhar a tendência dos resultados no domínio do tempo¹ obtidos para as duas linhas de ancoragem analisadas.

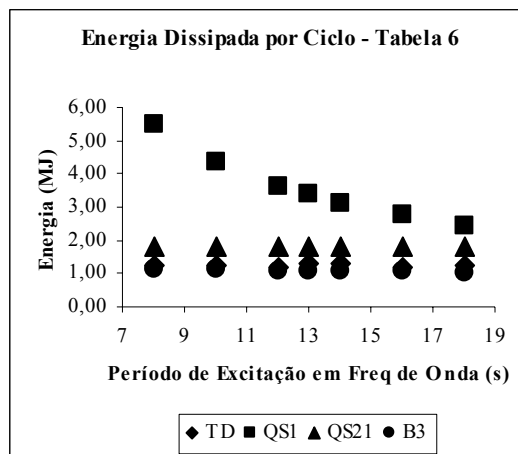


Figura 11: Energia Dissipada na Linha 2

CONCLUSÕES

Através deste trabalho, confirma-se mais uma vez a relevância do estudo do amortecimento nas linhas de ancoragem. O amortecimento limita os deslocamentos das linhas e, conseqüentemente, reduz as tensões e aumenta a vida em fadiga.

A influência da correnteza e dos movimentos em frequência de onda foi claramente demonstrada. Não se deve pensar em calcular o amortecimento nas linhas desprezando estes dois fenômenos.

O método proposto mostrou-se de fácil aplicação e de baixo custo computacional. Infelizmente, não é possível utilizá-lo em programas comerciais de elementos finitos, sendo necessário desenvolver um programa específico para explorar o método. Porém mostrou ser superior aos métodos quase-estáticos e ainda dispõe da flexibilidade de modelagem inerente ao método dos elementos finitos. Considerando o baixo custo computacional, é adequado às etapas iniciais de projeto.

Investigações experimentais que incluíssem correnteza e ondas para o cálculo do amortecimento seriam enriquecedoras e serviriam de paradigma para a avaliação das correções sugeridas neste texto, bem como do método iterativo de cálculo do amortecimento nas linhas de ancoragem proposto.

¹ Na falta de resultados experimentais, admite-se como paradigma o método no domínio do tempo, apesar de este fornecer resultados irregulares para a Linha 1.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT. Agradece ainda a permissão da PETROBRAS para publicação e apresentação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BAUDUIN, C.; NACIRI, M. A. Contribution on Quasi-Static Mooring Line Damping. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v.122, p.125-133, 2000.
- BROWN, D.T.; MAVRAKOS, S. Comparative Study on Mooring Line Dynamic Loading. **Marine Structures**, v.12, n.3, p.131-151, 1999.
- HALLAI, J.F. **Amortecimento em Linhas de Ancoragem**. 2003. 85p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- HUSE, E. Influence of Mooring Line Damping upon Rig Motions. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 18., Houston, 1986. **Proceedings**. Paper 5204. p.433-438.
- HUSE, E.; MATSUMOTO, K. Practical Estimation of Mooring Line Damping. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 20., Houston, 1988. **Proceedings**. Paper 5676. p.543-552.
- _____. Mooring Line Damping due to First and Second Order Vessel Motion. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 21., Houston, 1989. **Proceedings**. Paper 6137. p.135-148.
- LIU, Y.; BERGDAHL, L. Improvements on Huse's Model for Estimating Mooring Cable Induced Damping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 17., **Proceedings OMAE 1998**. New York: ASME, 1998.
- NIELSEN, F.G.; BINDINGBØ, A.U. Extreme Loads in Taut Mooring Lines and Mooring Line Induced Damping: An Asymptotic Approach. **Applied Ocean Research**, v.22, n.2, p.103-118, 2000.