

Atenuação de Cargas Dinâmicas em Linhas de Ancoragem de Plataformas Offshore

Naloan Coutinho Sampa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, naloan2008@hotmail.com

Fernando Schnaid

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, fschnaid@gmail.com

Marcelo Maia Rocha

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, marcelo.maiairocha@gmail.com

RESUMO: A utilização de plataformas flutuantes na atividade de exploração de hidrocarbonetos exige o entendimento dos mecanismos de interação entre a corrente em forma de catenária e o solo marinho, para racionalizar os métodos de dimensionamento das âncoras dos sistemas de ancoragem. Este trabalho visa estudar o comportamento da interação corrente-solo sob efeitos de carregamentos dinâmicos e medir a magnitude da atenuação de cargas dinâmicas provocada pela resistência do solo. Foram realizados experimentos de laboratório em modelos reduzidos com solos argilosos compostos por caulim e bentonita. Os ensaios foram realizados a partir de um sistema de carregamento dinâmico capaz de produzir e medir acelerações e frequências de vibração nas faixas desejadas. Para os níveis de carregamento utilizados, os resultados mostraram a existência da atenuação de cargas dinâmicas na faixa de 27 a 45%, cuja magnitude depende da resistência do solo, das propriedades geométricas da corrente, da força de tensionamento da corrente, do ângulo de referência e da aceleração e frequência de vibração.

PALAVRAS-CHAVE: Atenuação, Cargas Dinâmicas, Linhas de Ancoragem, Solo Argiloso, Modelo Reduzido, Fundações.

1 INTRODUÇÃO

A atividade de exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas é o resultado da crescente demanda pelos derivados de petróleo e da escassez dos mesmos nas águas rasas. Para evitar que estruturas flutuantes fiquem à deriva, elas são ancoradas por meio de sistemas compostos por linhas de ancoragem, âncoras e conexões. As condições ambientais extremas encontradas nesses locais exigem melhor entendimento da capacidade de carga destes sistemas, buscando desenvolver abordagens dos mecanismos da interação do segmento da linha de ancoragem enterrada no solo que permitam prever a configuração da corrente enterrada no solo e a distribuição de tensões ao longo da corrente.

Os principais estudos da interação entre a corrente e o solo foram feitos por Reese (1973), Gault e Cox (1974), Vivatrat et al. (1982), Yen e Tofani (1984), Degenkamp e Dutta (1989), Neubecker e Randolph (1995), Bang (1996), Det Norske Veritas (1998), Bang et al. (2003), Neubecker e O'Neill (2004), Randolph et al. (2005), Wang et al. (2010), Liu (2012), Liu et al. (2013), Rocha (2014), Rocha et al. (2016).

A partir desses estudos foi possível comprovar a existência de atenuação estática devido à resistência do solo, sendo que a magnitude da atenuação depende do comprimento da corrente, da propriedade geométrica da corrente enterrada no solo, do ângulo de aplicação da carga no *touch down point*, da resistência ao cisalhamento não drenada e do nível da força de pré-tensão.

Praticamente não existem estudos destinados a analisar a atenuação de cargas dinâmicas nas linhas de ancoragem enterrada no solo. A maioria dos estudos supracitados considera que a força aplicada no *touch down point* é equivalente à força estática obtida na análise dinâmica da linha de ancoragem, não considerando a resistência dinâmica do solo devido ao carregamento dinâmico. Este artigo aborda este problema, avaliando a utilização da carga dinâmica do pico obtida na análise de linha de ancoragem para dimensionar estacas Torpedo.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os principais parâmetros utilizados para caracterizar o solo argiloso dessa pesquisa foram obtidos através dos ensaios físicos e ensaios de mini palheta. As médias dos resultados desses ensaios foram tomadas como valores representativos do comportamento da argila.

Os ensaios foram realizados em solos argilosos obtidos no laboratório a partir da mistura de 85% de caulim composto de silicato de alumínio hidratado e 15% de bentonita sódica. O teor de umidade da mistura ficou em torno de 120%. Essa proporção de mistura (85% de caulim e 15% de bentonita) foi escolhida por representar uma argila com propriedades físicas similares às argilas siltosas encontradas na costa Brasileira. A curva granulométrica da argila é composta por 39% de argila (<0,002mm), 59% de silte (0,002 a 0,074mm) e 2% de areia fina (0,07 a 0,42mm). Os resultados dos ensaios de caracterização física estão apresentados na Tabela 1.

Os materiais foram misturados durante aproximadamente 15min. Depois da mistura dos materiais, a argila foi retirada à mão do misturador e colocada dentro de um tanque de acrílico retangular com dimensões internas de 27cm×152cm×82cm. Após o enchimento do tanque, uma lâmina de água de 3 a 4cm de altura foi colocada na superfície da argila para evitar perda da umidade. Foi adotado um tempo padrão de 24h depois do enchimento do tanque

para a realização dos ensaios. Esse tempo foi adotado com objetivo de ter uma condição única e padrão (S_u e umidade) para todos os ensaios e também, para permitir a estabilização de eventuais poro pressões geradas durante o enchimento do tanque.

Tabela 1. Principais propriedades físicas dos materiais.

Propriedades Físicas	Caulim	Bentonita	Argila
LL – (%)	40	439	108
LP – (%)	27	65	33
IP – (%)	13	374	75
g – (kN/m ³)	-	-	16,32
w – (%)	-	-	120
Índice de Vazios	-	-	2,57
D50 (mm)	0,0052	-	0,0038
Massa Específica			
Real dos Grãos (g/cm ³)	2,7	2,85	2,65

Para garantir a realização dos ensaios na condição não drenada, o ensaio de mini palheta foi realizado com a velocidade de 0,015rpm. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, a variação do teor da umidade de 3 amostras com 1 dia de *setup* e a variação da resistência ao cisalhamento não drenada ao longo da profundidade de amostras com diferentes períodos de *setup*.

Na Figura 1 foi observado que após 24h do enchimento do tanque, o teor de umidade decresce levemente até profundidade de 50cm. O processo de consolidação do material e/ou as reações químicas que ocorrem durante esse período contribuem para o acréscimo da resistência e redução do teor de umidade.

Os valores de S_u obtidos no ensaio de mini palheta mostraram um leve crescimento da resistência com a profundidade. Devido à presença da bentonita na mistura, a argila resultante apresenta um comportamento tixotrópico, permitindo um ganho da resistência do material ao longo do tempo.

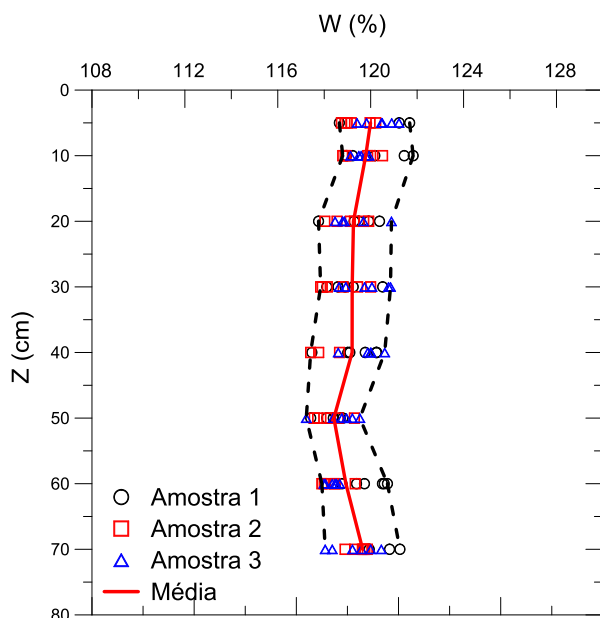


Figura 1. Variação do teor da umidade com a profundidade.

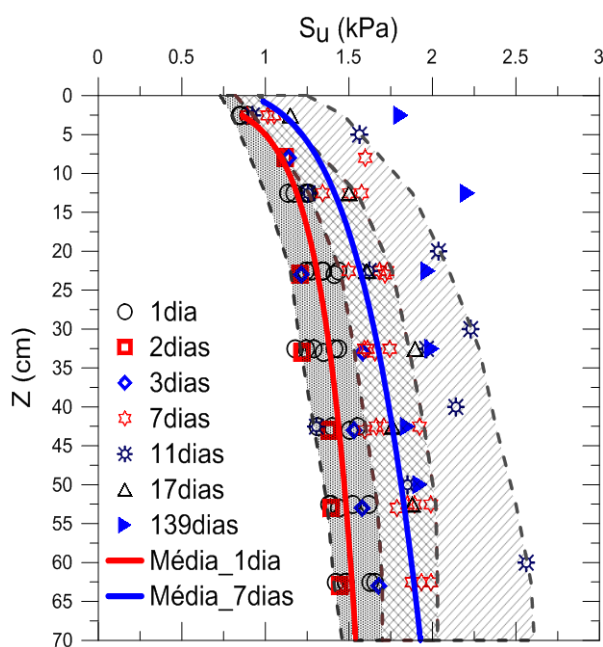


Figura 2. Variação da resistência ao cisalhamento não drenada com a profundidade.

3 METODOLOGIA

A Figura 3 apresenta o sistema de carregamento utilizado para realizar os ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos. O sistema consiste em um conjunto de equipamentos capazes de produzir e medir acelerações e frequências nas faixas desejadas.

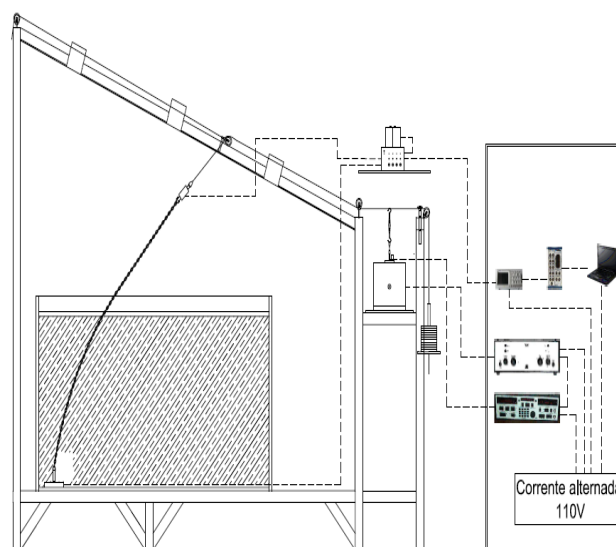


Figura 3. Sistema de carregamento utilizado para realizar os ensaios de carregamentos estáticos e dinâmicos.

O sistema de carregamento dinâmico é composto por: uma célula de carga superior utilizada para medir a força dinâmica aplicada na extremidade superior da corrente; uma célula de carga inferior utilizada para medir a força dinâmica aplicada na extremidade inferior da corrente localizada no fundo do tanque; um excitador de vibração (tipo 4808, Brüel&Kjær); um controlador de excitador de vibração (tipo 1050, Brüel&Kjær); amplificador (tipo 2712, Brüel&Kjær) e um acelerômetro piezoelétrico (tipo 4383 V, Brüel&Kjær). O sistema de aquisição de dados é da *National Instruments*, tipo 6036E.

Para aplicação de forças de tensionamento na corrente, foram utilizados 14 pesos de 1kgf cada. A corrente possui o diâmetro nominal de 3mm e é do tipo *studless*.

Antes da execução dos ensaios dinâmicos, o sistema foi calibrado estaticamente, com tanque preenchido de água até altura 72cm. A calibração estática foi realizada nos ângulos de referência de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 e 55° com relação à vertical. Em cada ângulo de referência, o sistema foi carregado à cada 20s através do acréscimo de 1kgf (9,81N) até 14kgf (137,34N), e depois descarregado totalmente. Depois da calibração estática do sistema, colocou-se a corrente no ângulo de referência de 0°, para em seguida encher o tanque com argila até altura de 72cm. Para evitar a perda de umidade do material, colocou-se uma lâmina de água na superfície do solo

argiloso, dando-se início a execução dos ensaios após 24h do enchimento do tanque.

Com base nos resultados da Rocha (2014), foram definidos 5 estágios para a realização dos ensaios dinâmicos, conforme a Figura 4. Os três primeiros estágios (7kgf (68,67N), 10kgf (98,10N) e 14kgf (137,34N)) localizam-se no ramo de carregamento, e os dois últimos estágios (10kgf (98,10N) e 7kgf (68,67N)) localizam-se no ramo de descarregamento.

Devido à limitação dos equipamentos utilizados, a máxima amplitude (pico ao eixo) do excitador de vibração foi de 6.35mm, e a faixa de frequência foi de 1 a 8Hz. Foram definidos dois grupos de ensaios dinâmicos, (A e B), de acordo com níveis de aceleração impostos pelo sistema. No grupo A, as faixas de aceleração e da frequência variam de 0.25 a 12,19m/s² e 8 a 1Hz, respectivamente, produzindo um deslocamento máximo de 6,35mm. As faixas de aceleração e de frequência do grupo B são: 0.12 a 6,09m/s² e 8 a 1Hz, respectivamente, correspondendo ao deslocamento máximo de 3,15mm. Para garantir uma rápida estabilização de aceleração, foi programada a variação da frequência no sentido decrescente de 8 a 1Hz, com a taxa de varredura de 0,5octave/min.

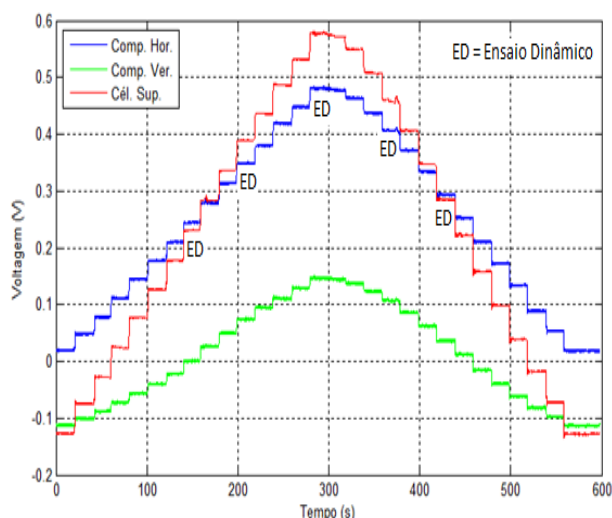


Figura 4. Definição dos locais da realização dos ensaios dinâmicos em uma curva tensão × tempo de um ensaio de carregamento estático.

Como mostra a Figura 4, o primeiro ensaio dinâmico é realizado no estágio de carga estática equivalente a 7kgf (68,97N). Assim, o carregamento estático é realizado previamente.

Os dados foram adquiridos a uma taxa de 256Hz durante os 360s de ensaios. Ao terminar o ensaio dinâmico, nesse estágio de carga, o sistema é carregado novamente até o estágio de 10kgf (98,10kgf), para em seguida repetir o procedimento. O procedimento é repetido nos estágios restantes de carregamento e nos ângulos restantes de referência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Exemplos típicos de resultados da atenuação de cargas dinâmicas do grupo A expressos em função da frequência são apresentados nas Figuras 5 a 8. As Figuras 9 a 12 apresentam os resultados do grupo B.

A atenuação de carga dinâmica, ζ_d é calculada de acordo com a Equação 1.

$$\zeta_d = \frac{F_{S,d} - F_{I,d}}{F_{S,d}} \quad (1)$$

onde: $F_{S,d}$ é a força dinâmica medida na célula de carga superior e $F_{I,d}$ a força dinâmica medida na célula de carga inferior.

O efeito do comprimento da corrente foi eliminado através da normalização da altura do solo pelo comprimento da corrente enterrada, representada pela razão H/L.

Pode-se observar a partir dos resultados dos grupos A e B que os valores de atenuação dinâmica decrescem com o aumento da frequência de vibração. Na maioria dos casos, esse comportamento é mais pronunciado nas frequências maiores que 4Hz.

A partir dos resultados do grupo A é possível observar que os maiores valores de atenuação ocorrem nos ângulos de referência de 15, 20 e 25°. A magnitude da atenuação dinâmica do grupo A varia de 32 a 45%.

Com relação aos resultados do grupo B, pode-se observar que os maiores valores da atenuação ocorrem nos ângulos maiores que 35°. Para os ensaios do grupo B, a atenuação dinâmica varia entre 27 a 40%.

Uma das possíveis razões para a diminuição dos valores da atenuação dinâmica com a frequência pode ser relacionada com aumento

da resistência do solo devido à parcela viscosa mobilizada pela baixa aceleração de aplicação da força dinâmica. Esse comportamento é contrário ao esperado, se for levado em conta às maiores manifestações dos efeitos dinâmicos da viscosidade em altas frequências.

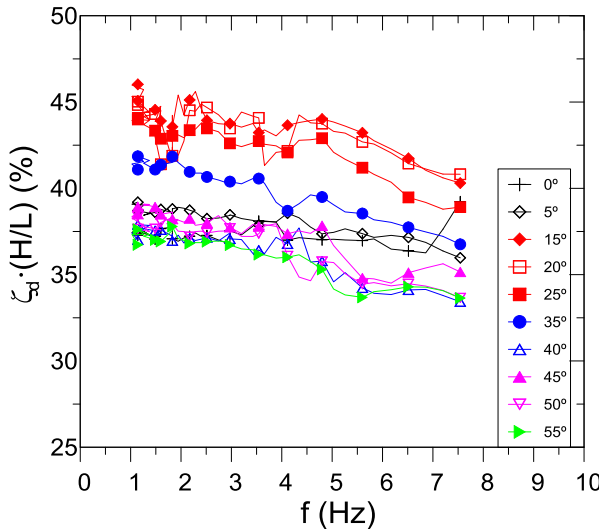


Figura 5. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo A (68,67N do carregamento).

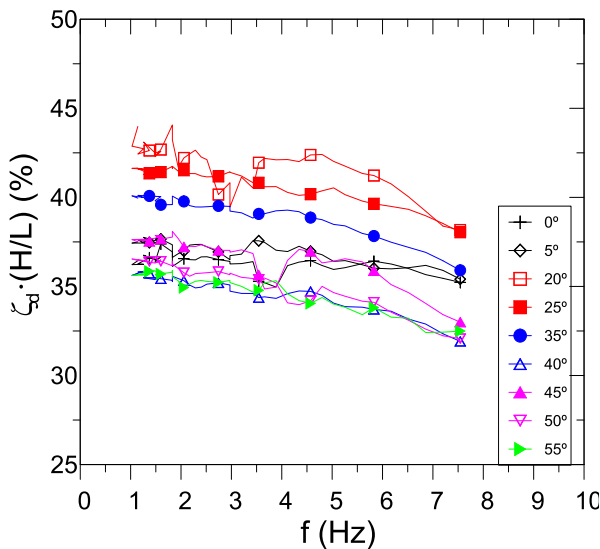


Figura 6. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo A (98,10N do carregamento).

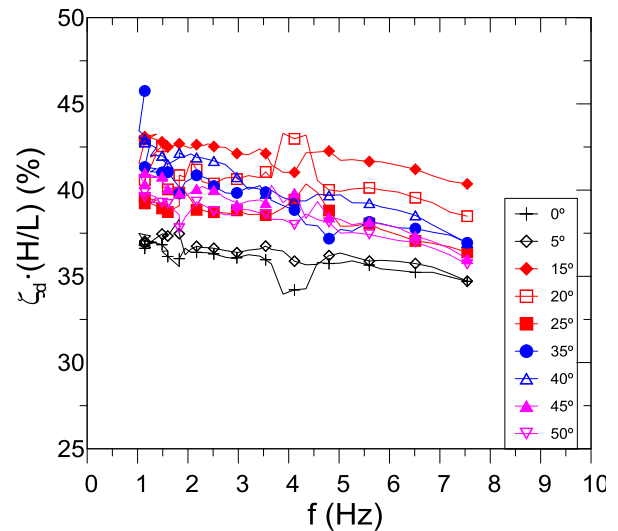


Figura 7. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo A (68,67N do descarregamento).

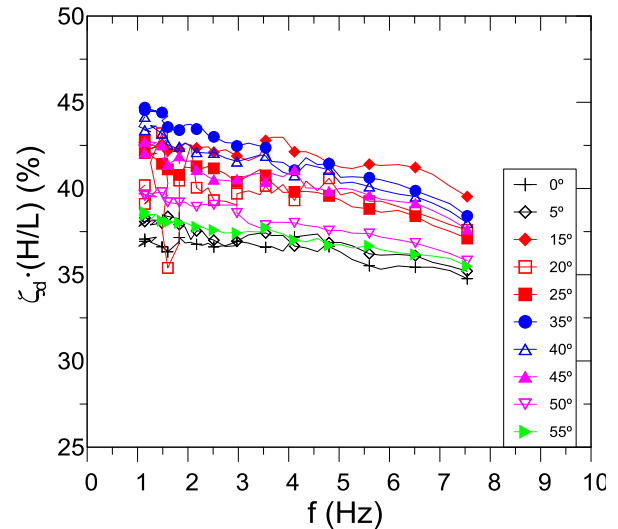


Figura 8. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo A (98,10N do descarregamento).

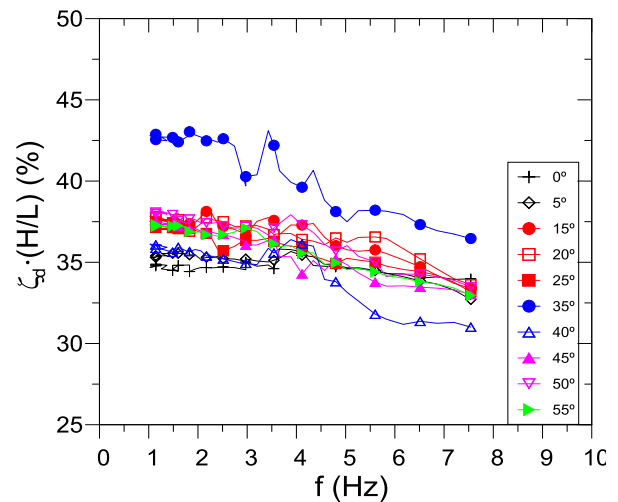


Figura 9. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo B (68,67N do carregamento).

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados em modelos reduzidos de linhas de ancoragem em solos argilosos, este trabalho apresenta resultados do comportamento da interação corrente-solo sob efeitos de carregamentos dinâmicos e a magnitude da atenuação dinâmica provocada pela resistência do solo. Observou-se um decréscimo da atenuação dinâmica com o aumento da frequência de vibração. Valores típicos de atenuação situam-se na faixa entre 27 a 45%. Recomenda-se mais estudos complementares para validação e aplicação desses valores de atenuação em projetos.

REFERÊNCIAS

- BANG, S. *Anchor mooring line computer program user's manual for chain-soil analysis program (csap)*. Contractor Report CR-6108-OCN. Naval Facilities Engineering Service Center. Jun. 1996.
- BANG, S. et al. *Calibration of Analytical Solution Using Centrifuge Model Tests on Mooring Lines*. In: The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003, Honolulu, U.S.A. Proceedings... 25-30 May. 2003.
- DEGENKAMP, G.; DUTTA, A. *Soil resistances to embedded anchors chain in soft clay*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v. 115, n. 10, Oct. 1989.
- GAULT, J. A.; COX, W. R. *Method for predicting geometry and load distribution in an anchor chain from a single point mooring buoy to buried anchorage*. In: Sixth Annual Offshore Technology Conference, Paper 2062, 1974, Houston, U.S.A. Proceedings... 6-8 May. 1974.
- NEUBECKER, S. R.; RANDOLPH, M. F. *Profile and frictional capacity of embedded anchor chains*. Journal of Geotechnical Engineering. New York, v. 121, n. II, Nov. 1995.
- NEUBECKER, S.R.; O'NEILL, M.P. *Study of chain slippage for embedded anchors*. Advanced Geomechanics. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 3-6 May, 2004.
- O'LOUGHLIN, C. D.; RANDOLPH, M. F.; RICHARDSON, M. *Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors*. In: Annual O.T. C, Houston, U.S.A. Proceedings... 3-6 May. 2004.
- REESE, L. C. A. *Design method for an anchor pile in a mooring system*. In: Offshore Technology Conference, Paper 1745, 1973, Houston, U.S.A. Proceedings... 29 Apr. - 2 May 1973.
- ROCHA, C. M. *Atenuação de cargas estáticas em linhas de ancoragem*. 2014, 209p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2014

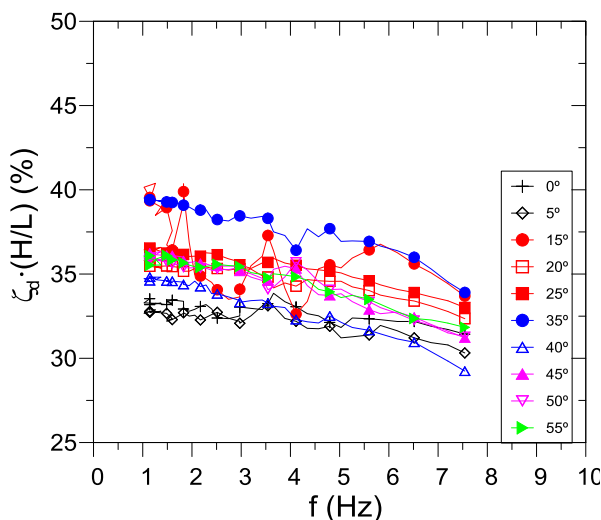


Figura 10. Curva $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo B (98,10N do carregamento).

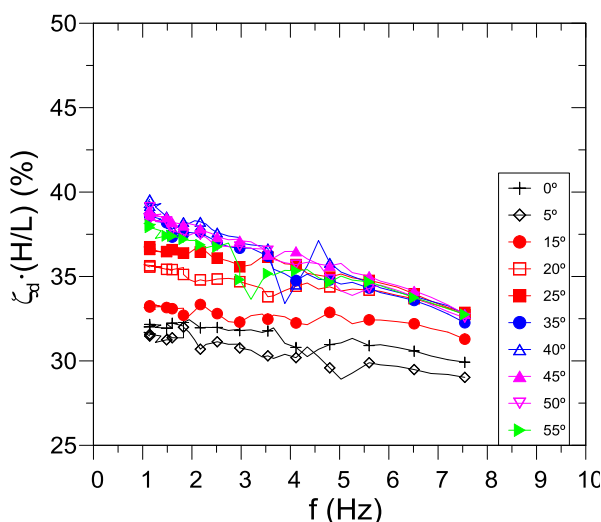


Figura 11. Curva de $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo B (68,67N do descarregamento).

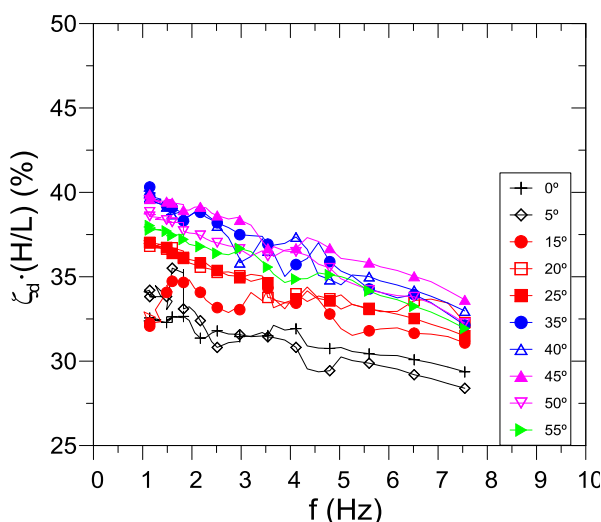


Figura 12. Curva de $\zeta_d \cdot (H/L) \times f$ – grupo B (98,10N do descarregamento).

- ROCHA, M. M.; SCHNAID, F.; ROCHA, C. C. M.; AMARAL, C. S. *Inverse catenary load attenuation along embedded ground chain of mooring lines*. Ocean Engineering, 122, p. 215–226, 2016.
- SAMPA, N. C. *Atenuação de cargas dinâmicas em linhas de ancoragem de plataformas offshore*. 2015, 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2015
- VIVATRAT, V.; VALENT, P. J.; PONTEIRO, A. A. *The influence of chain friction on anchor pile design*. In: 14th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4148, 1982, Houston, U.S.A. Proceedings... 3-6 may. 1982.
- VRYHOF ANCHORS. *Anchor Manual 2010: The Guide to Anchoring*. Netherlands 2010.
- WANG, L. Z.; GUO, Z. YUAN, F. *Three-dimensional interaction between anchor chain and seabed*. Ocean Research. Western Cape, South Africa, v. 32, n. 4, p. 404–413, oct. 2010.
- YEN, B. C.; TOFANI, G. D. *Soil resistance to Stud Link Chain*. In: 16th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4769, 1984, Houston, U.S.A. Proceedings... may. 1984.