

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise Paramétrica da Interação entre Solo e Linhas de Ancoragem de Plataformas *Offshore*

Naloan Coutinho Sampa

Professor, UFSC, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

RESUMO: As plataformas flutuantes utilizadas nas atividades de exploração de hidrocarbonetos são ancoradas no leito marinho por meio de sistemas de ancoragem. A interação entre os elementos desses sistemas e o solo influencia na instalação, no modo ruptura e na capacidade de carga das âncoras. Para entender esse comportamento, o presente artigo apresenta os resultados da análise paramétrica realizada para avaliar o efeito das variáveis de geometria, de pré-carga e de resistência do solo nos valores da atenuação de carga e do ângulo da força na âncora. Valores típicos foram atribuídos a cada uma das variáveis, sendo que a definição da faixa de variação das mesmas foi baseada na literatura. As análises foram feitas no *software* DIGIN utilizado pela Petrobras para analisar o processo de instalação de âncoras. Um conjunto de curvas normalizadas é apresentado e discutido, a partir do qual observa-se a redução tanto da atenuação de carga por metro como do ângulo de força na âncora com o aumento da força normalizada. A atenuação de carga sofre mais influência do diâmetro da linha, da profundidade de cravação e da resistência não drenada, ao passo que o ângulo da força na âncora é mais influenciada pela variação do diâmetro da corrente e do ângulo da força no leito marinho. A normalização dos resultados abre a possibilidade para o desenvolvimento de expressões mais simples que permitem prever a configuração da catenária e a distribuição da força ao longo da linha enterrada.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações Offshore, Atenuação de Carga, Linhas de Ancoragem, Âncoras.

ABSTRACT: Floating platforms used in hydrocarbon exploration activities are anchored to the seabed by means of mooring systems. The interaction between the elements of these systems and the soil influences the installation, the failure mode and the load capacity of the anchors. To understand this behavior, this paper presents the results of parametric analysis performed to evaluate the effect of geometry, preload, and soil resistance variables on the values of load attenuation and force angle at the anchor. Typical values were assigned to each of the variables, and the definition of their range of variation was based on the literature. The analyses were done in the DIGIN software used by Petrobras to analyze the anchor installation process. A set of normalized curves is presented and discussed, from which it is observed the reduction of both the load attenuation per meter and the angle of force at the anchor with the increase of the normalized force. The load attenuation is more influenced by the line diameter, the embedment depth and the undrained resistance, while the angle of force at the anchor is more influenced by the variation of the chain diameter and the force angle on the seabed. The normalization of the results opens the possibility for the development of simpler expressions to predict the configuration of the catenary and the force distribution along the buried line.

KEYWORDS: Offshore Platforms, Load Attenuation, Mooring Lines, Anchors.

1 Introdução

As plataformas flutuantes são instaladas no ambiente *offshore* para desempenhar diversas atividades de exploração de hidrocarbonetos e dos seus derivados, incluindo as de perfuração, produção, bombeamento, processamento ou armazenamento. A ancoragem dessas plataformas se dá por meio de sistemas de ancoragem dimensionados para resistir e equilibrar as forças de pré-carga e cargas ambientais atuantes na estrutura flutuante e nas linhas de ancoragem, de modo a manter as plataformas na estação, sem deriva, para desempenhar as suas funções com segurança. Tais sistemas são constituídos por linhas de ancoragem, conectores, equipamentos de tensionamento e âncoras (YEN E TOFANI, 1984; VRYHOF ANCHORS, 2010; MA ET AL., 2019).



As linhas de ancoragem servem para conectar plataformas *offshore* ou risers aos elementos de fundação que têm a função de transmitir as solicitações recebidas para o solo marinho. O comprimento total das linhas pode ser dividido em dois trechos. O primeiro trecho vai da plataforma ao leito marinho e o segundo vai do leito marinho à âncora (Figura 1). Dependendo do tipo de plataforma e da espessura da lâmina de água, as linhas do primeiro trecho podem assumir as configurações do tipo: catenária, taut leg ou tendões verticais. A configuração das linhas do segundo trecho é do tipo catenária invertida devido à resistência do solo contra o deslocamento normal das linhas (OLIVEIRA, 2009).

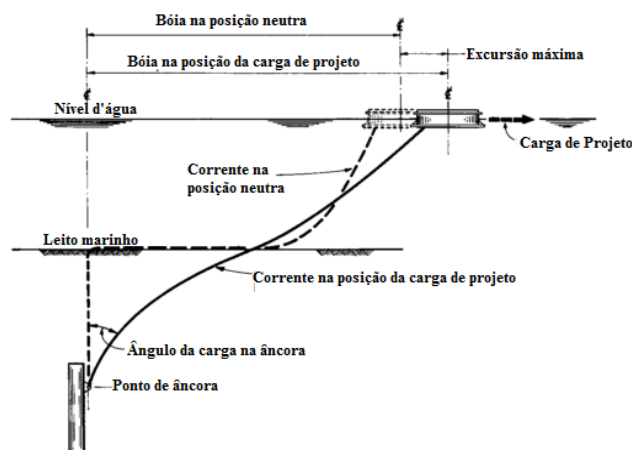


Figura 1 – Formação da catenária invertida (GAULT E COX, 1974).

A interação entre o solo e os elementos enterrados – segundo trecho da linha e âncoras – é responsável pela mobilização da capacidade de carga necessária para equilibrar as forças de pré-carga e cargas ambientais. Em função disso, a capacidade de carga total do sistema de ancoragem é o resultado da interação entre solo e âncoras e da interação entre solo e linhas de ancoragem enterradas.

Com relação aos dois processos de interação supracitados, o mecanismo de interação entre solo e âncoras é analisado com base nos conhecimentos sólidos da engenharia de fundações *onshore*, entretanto, o mecanismo de interação entre solo marinho e linhas de ancoragem enterradas ainda não é totalmente compreendido, e continua sendo objeto de vários estudos. O entedimento desses mecanismos é de extrema importância para os projetos de instalação de âncoras de arrasto e de dimensionamento de fundações *offshore*, consideração que eles influenciam no mecanismo de penetração, no comportamento cinemático, na capacidade de carga, na trajetória e no movimento das âncoras dentro do solo. De igual modo, a interação entre solo e linhas de ancoragem é a responsável pela formação da catenária invertida, que por seu turno influencia na magnitude e no ângulo da força aplicada nas âncoras, bem como no modo de falha das mesmas.

Tendo em conta a importância do entendimento dos mecanismos de interação supracitados, o presente trabalho visa analisar parametricamente a influência da geometria da linha, da resistência do solo e das condições de pré-carga na magnitude e no ângulo da força aplicada na âncora.

2 Conceito Teórico

Em águas profundas e ultraprofundas, é comum a utilização de linhas de ancoragem compostas por diferentes tipos de materiais, a fim de minimizar os problemas de redução da capacidade de restauração e acréscimo de peso na plataforma (Figura 2). Nesses casos, correntes de aço são posicionadas nas extremidades por resistirem melhor às intempéries do ambiente *offshore* e por apresentarem maior resistência à abrasão.

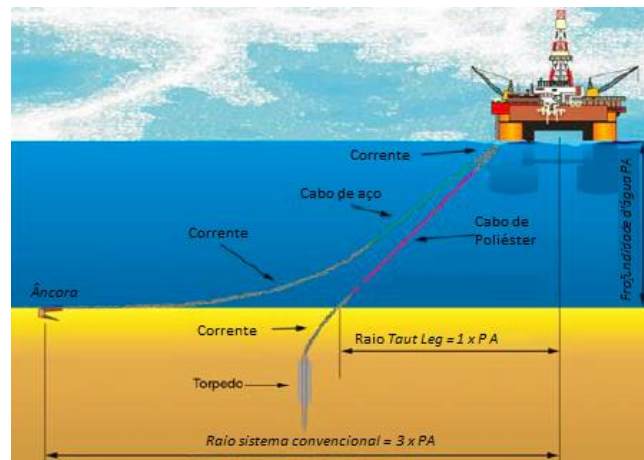


Figura 2 – Configurações das linhas de ancoragem (SAGRILO ET AL., 2010 E MA ET AL., 2019).

O trecho da corrente enterrada no solo assume a configuração denominada catenária invertida, cujo processo de formação depende do tipo de instalação dos elementos de fundação (DET NORSKE VERITAS, 1996). A lacuna de conhecimento ou de pesquisa científica sobre o mecanismo de interação entre solo e corrente enterrada motivou o desenvolvimento de vários estudos que contribuíram para a racionalização dos métodos de dimensionamento e de instalação de âncoras.

Os primeiros modelos analíticos foram formulados com o intuito de prever a configuração da catenária invertida e a distribuição de força ao longo do trecho das linhas enterradas, considerando as equações de equilíbrio entre as forças que atuam no trecho dessas linhas. Dentre os vários modelos existentes na literatura, o proposto por Vivatrat et al. (1982) é baseado em duas equações diferenciais ordinárias que permitem estimar a distribuição de força na linha e a curvatura da catenária invertida. Para o cálculo, o comprimento total da linha enterrada (corrente de aço) é dividido em vários segmentos infinitesimais de comprimento ds (Figura 3).

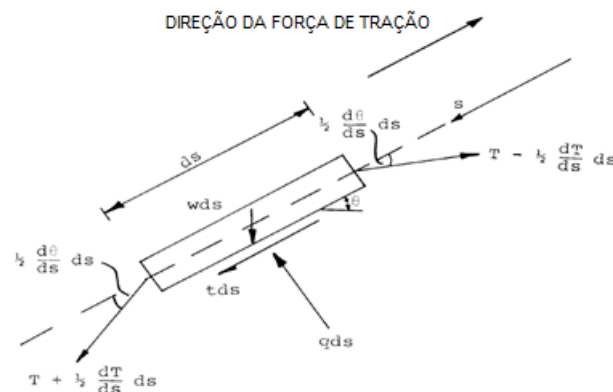


Figura 3 – Sistema de equilíbrio de um segmento infinitesimal (VIVATRAT ET AL., 1982).

Com base nas equações de equilíbrio das forças nas direções normal e tangencial ao segmento infinitesimal, estabelece-se as Equações Diferenciais Ordinárias 1 e 2 para estimar a variação de força $\left(\frac{dT}{ds}\right)$ e do ângulo $\left(\frac{d\theta}{ds}\right)$ ao longo do segmento, respectivamente. Conhecidas as condições de contorno em uma das extremidades do segmento, a geometria da corrente e as resistências do solo, determina-se a força e o ângulo doutra extremidade. A integração dessas equações ao longo do comprimento total da corrente fornece a carga aplicada na âncora e a configuração da catenária invertida.

$$\frac{dT}{ds} = -(F + w \sin \theta) \quad (1)$$



$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{Q - w \cos \theta}{T} \quad (2)$$

Nas equações acima, F e Q são as resistências unitárias do solo nas direções tangencial e normal ao segmento de corrente, respectivamente e mobilizadas no processo de formação da catenária invertida (DUTTA, 1988; DEGENKAMP e DUTTA, 1989). Em solos argilosos, F e Q são calculadas a partir das Equações 3 e 4, assumindo que o solo ao redor da corrente atinge o estado limite último, de modo que a resistência ao cisalhamento não drenada deve ser considerada (DUTTA, 1988).

$$F = f \cdot (EWSd) = (\alpha s_u) \cdot (EWSd) \quad (3)$$

$$Q = q \cdot (EWBd) = (N_c s_u) \cdot (EWBd) \quad (4)$$

onde w é o peso submerso da corrente, θ é o ângulo que o segmento forma com a horizontal, T é a força aplicada na extremidade do segmento, α é o fator de adesão corrente-solo, N_c é o fator de capacidade de carga, d é o diâmetro nominal de corrente, e s_u é a resistência não drenada do solo, EWS (*effective width in sliding*) é o parâmetro utilizado para calcular a largura efetiva de corrente no deslizamento ($B_s = EWSd$), EWB (*effective width in bearing*) é o parâmetro utilizado para determinar a largura efetiva de corrente no cisalhamento ($B_b = EWBd$).

A implementação das Equações 1 e 2 é trabalhosa por requerer iterações a cada percurso da catenária invertida devido a não linearidade do problema que envolve variáveis relacionadas à geometria de correntes, resistência do solo e condições de pré-carga.

Vários estudos investigaram as influências desses fatores na configuração da catenária invertida e na distribuição de força ao longo da linha. Degenkamp e Dutta (1989) realçaram a importância da confiabilidade dos parâmetros utilizados para calcular F e Q . Degenkamp e Dutta (1989), Neubecker e Randolph (1995) observaram que o atrito gerado na interação solo-corrente contribui para a redução da força aplicada na âncora. Neubecker e Randolph (1995) e Nie e Zimmerman (2010) afirmaram que o mecanismo de interação solo-corrente e a configuração da catenária invertida influenciam nos valores das componentes de forças que atuam nas âncoras, no modo de falha de âncoras, e no desempenho de instalação de âncoras de arrasto. Gault e Cox (1974) observaram que a força aplicada na âncora reduz significativamente caso for considerado o peso de corrente e a resistência do solo na direção tangencial à corrente. Vivatrat *et al.* (1982), Gault e Cox (1974), Degenkamp e Dutta (1989) observaram que a diferença entre a força aplicada no leito marinho e a força que chega na âncora cresce levemente à medida que força no leito marinho aumenta. De igual modo, observaram que a força aplicada na âncora cresce quase de forma linear com a força aplicada no leito marinho, enquanto que o ângulo da carga na âncora varia significativamente com aumento da força no leito marinho. Dutta e Degenkamp (1989), Rocha (2014) e Sampa (2015) observaram que a mudança da configuração da corrente é influenciada pelo aumento da resistência do solo. Como consequência, o ângulo da força na âncora é maior em solos mais resistentes, para o mesmo valor de força aplicada no leito marinho.

3 Metodologia

A análise paramétrica realizada através do *software* DIGIN visa investigar a influência da força aplicada no leito marinho (T_0) e do seu ângulo com a horizontal (θ_0), do diâmetro nominal da corrente (d), da profundidade de cravação de âncora (z), da razão entre o peso da corrente no ar e o peso da mesma na água (R_w), do fator de adesão solo-corrente (α) e da resistência não drenada (s_u) na magnitude e no ângulo da força aplicada na âncora (T_a e θ_a). Enfatiza-se que o *software* DIGIN foi desenvolvido por meio de um projeto industrial conjunto financiado pelas maiores empresas do ramo petrolífero, incluindo a Petrobras.

A Tabela 1 apresenta a faixa de variação das variáveis consideradas na análise paramétrica. Para análise da influência de uma certa variável nos valores de T_a e θ_a , os valores das demais variáveis mantêm-se constantes, assumindo os valores de referência da condição definida como padrão. Esses valores são θ_0 igual a 40°, z igual a 30 m, d igual a 12 cm, R_w igual a 0,87, α igual a 0,5 e s_u igual a 40 kPa. Em todos os casos



analisados, a resistência não drenada não varia com a profundidade e a argila é considerada homogênea, isotrópica e não sensível.

Tabela 1 – faixa das variáveis analisadas no estudo paramétrico.

Variável	Faixa de variação
T_0 (kN)	0 a 20000
θ_0 (°)	10, 20, 30, 40, 50 e 60
z (m)	10, 20, 30, 40 e 50
d (cm)	6, 9, 12, 15, 18 e 21
R_w	0,67, 0,77, 0,87, 0,97
s_u (kPa)	10, 20, 30, 40, 50 e 60
α	0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9

Dentre os vários resultados fornecidos pelo *software*, somente as forças aplicadas na âncora (T_a) e os seus respectivos ângulos com a horizontal (θ_a) foram apresentados e analisados neste artigo. Esses resultados foram plotados em termos de grandezas adimensionais – atenuação de carga por metro, ζ (Equação 5) e força no leito marinho normalizada (Equação 6) - para facilitar na interpretação. T_a , $\bar{Q}$ e L são a força aplicada no leito marinho, a resistência média do solo na direção normal e o comprimento de corrente enterrada no solo, respectivamente.

$$\zeta = \left(\frac{T_0 - T_a}{T_0} \right) / L \quad (5)$$

$$T_0^* = \frac{T_0}{z\bar{Q}} \quad (6)$$

4 Resultados

As Figuras 4 – 9 ilustram as influências das variáveis analisadas na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora. É importante salientar que a atenuação representa a dissipação da carga ao longo da catenária invertida devido à interação solo-corrente.

De modo geral, nota-se que tanto a atenuação de carga por metro como o ângulo da força na âncora decrescem com o aumento da força normalizada (T_0). Para o mesmo valor da T_0 , a variação de θ_0 , R_w e α não influenciam na atenuação de carga, da mesma forma que a variação de z , R_w , s_u e α não influenciam no ângulo da força na âncora. Essas observações permitem estabelecer relações para estimar diretamente valores da atenuação de carga e dos ângulos de força na âncora a partir da força normalizada.

Como era esperado, a maior influência na atenuação de carga é observada com a variação do diâmetro nominal da corrente, d . Os maiores diâmetros proporcionam maiores atenuações de carga por metro. Embora em menor intensidade, o aumento de z e s_u tendem a diminuir o valor da atenuação de carga por metro. Caso os resultados não fossem normalizados, o esperado seria o aumento da atenuação de carga com a profundidade de cravação e da resistência não drenada por causa de maior comprimento da linha e do atrito gerado na interface solo-corrente, respectivamente.

As Figuras 4 e 6 ilustram a influência de θ_0 e d nas curvas do ângulo da força na âncora, respectivamente. Para o mesmo valor da força normalizada, maiores valores do ângulo ocorrem em menores valores de θ_0 e d . Essas observações corroboram os resultados dos estudos anteriores, que mostram a mobilização de maiores resistências do solo com o aumento do diâmetro nominal. Maiores resistências do solo dificultam na formação da catenária invertida, resultando em maiores valores de θ_a .

Em termos práticos, é possível concluir que a redução de força ao longo do trecho da linha enterrada é um fator importante no dimensionamento de âncoras e estacas. A principal justificativa é que as menores forças aplicadas em âncoras significa a necessidade de menores elementos dos sistemas de ancoragem, assim como reduzidos custos para o transporte e a instalação dos mesmos.

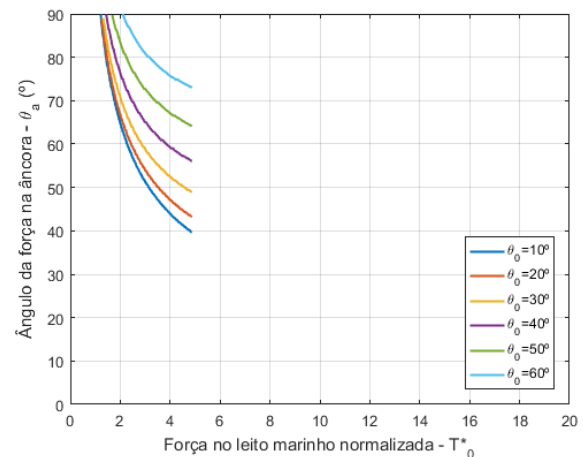
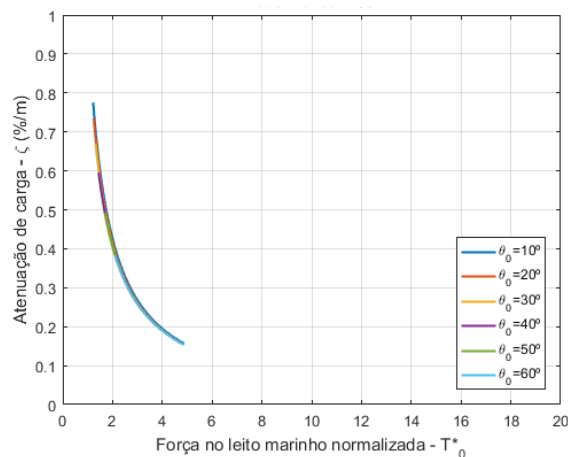


Figura 4 – Influência de θ_0 na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.

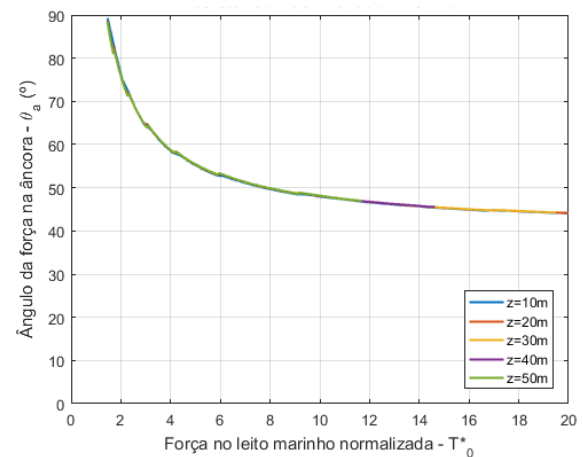
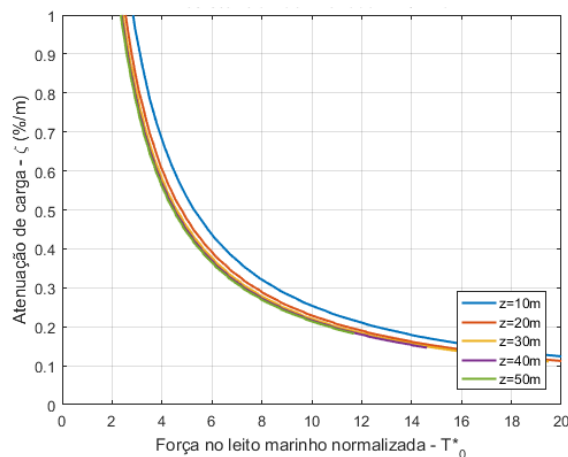


Figura 5 – Influência de z na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.

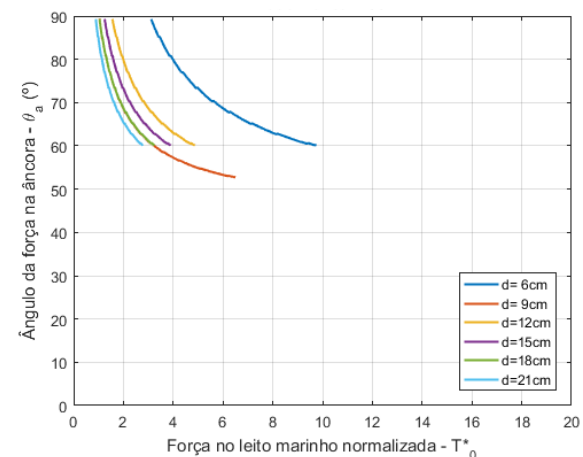
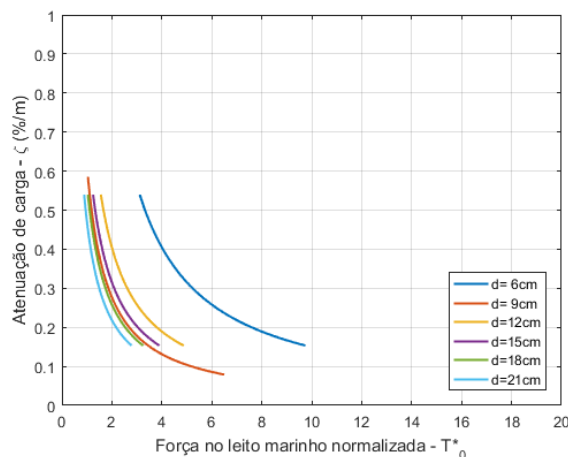


Figura 6 – Influência de d na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.

Tomando como exemplo a Figura 5, nota-se que mais de 1%/m de atenuação de carga ocorrem em forças normalizadas menores que 3. Caso for considerada um trecho de linha enterrada com 30 m de comprimento, a atenuação de carga ao longo desse trecho será igual a 30%. Ou seja, somente 70% da carga aplicada no leito marinho chegará à âncora, corroborando assim as conclusões obtidas por Rocha (2014) e Sampa (2015).

Com relação à variação do ângulo da força na âncora, mostrada na Figura 5, é possível concluir que o ângulo θ_a parte de 90° e reduz para 45° em maiores valores da força normalizada. Esse comportamento era



esperado, considerando que as linhas de ancoragem fica posição vertical logo após a instalação de estacas e só começa a formar catenária invertida com a aplicação de pré-carga. Nesse processo, as maiores curvaturas tendem a ocorrer nas menores profundidades, de modo que muita força normalizada é necessária para reduzir o valor do na ângulo na âncora.

A constatação de que a razão entre o peso da corrente no ar e o peso da mesma na água (R_w) e o fator de adesão solo-corrente (α) não influenciam na atenuação de carga nem no ângulo da força na âncora pode auxiliar na elaboração de expressões mais simplificadas que desconsideram a influência dessas variáveis.

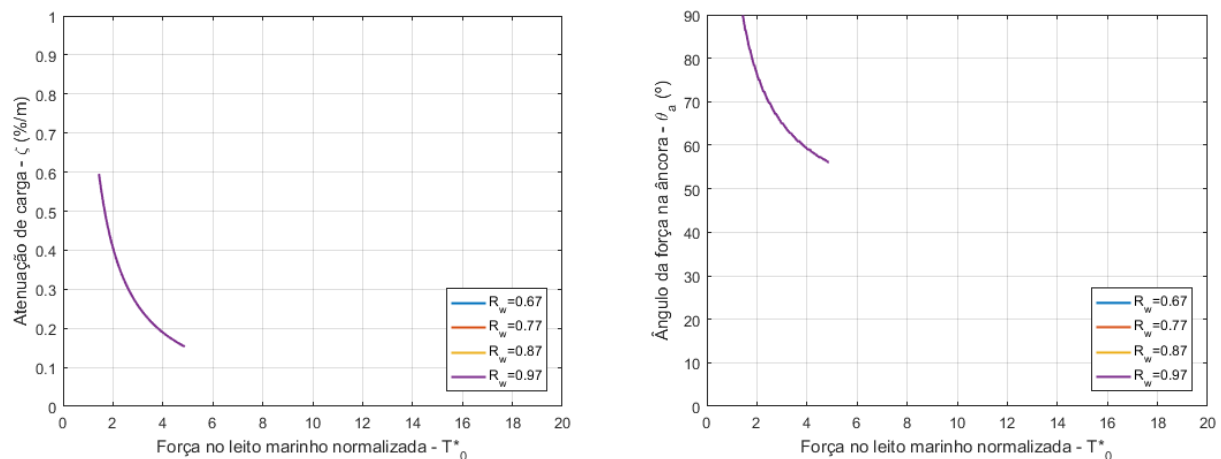


Figura 7 – Influência de R_w na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.

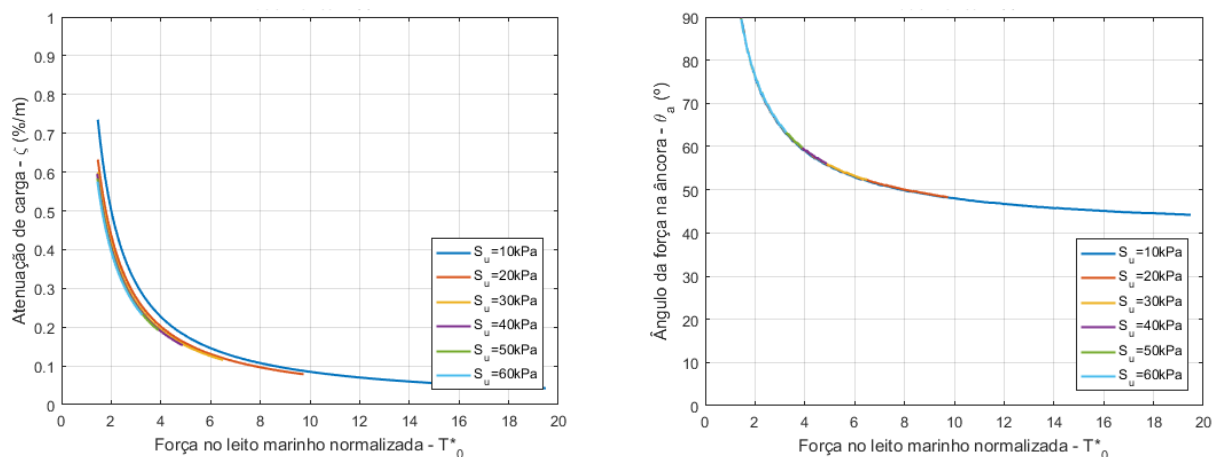


Figura 8 – Influência de s_u na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.

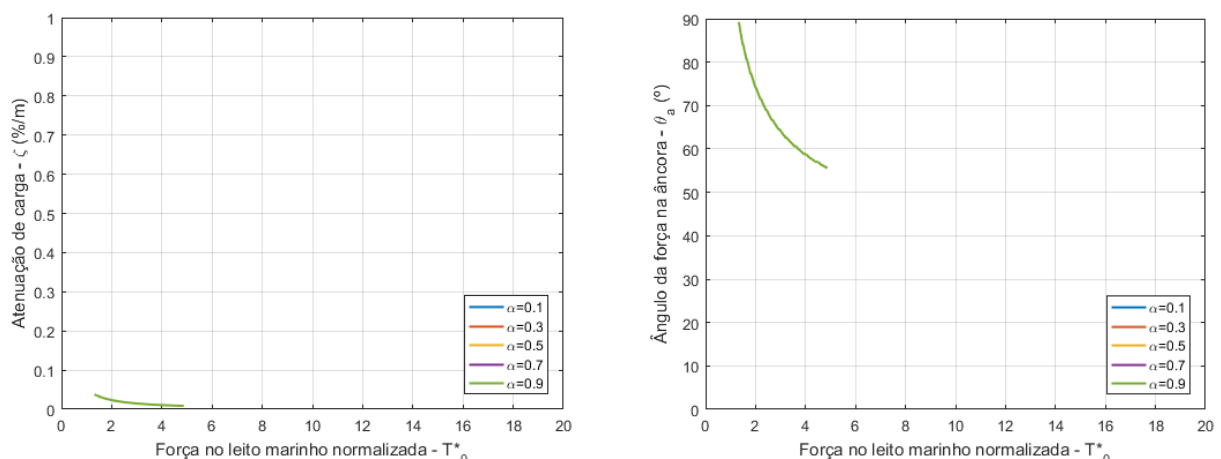


Figura 9 – Influência de α na atenuação de carga por metro e no ângulo da força na âncora.



Por fim, é importante salientar que esse artigo apresenta parte dos resultados de um projeto de pesquisa maior que inclui solos argilosos e arenosos com resistências uniformes e crescentes com a profundidade. Para além disso, o projeto faz uma análise mais completa para entender os mecanismos de interação solo-corrente.

5 Conclusão

Os resultados de uma análise paramétrica foram apresentados no artigo para avaliar a influência de várias variáveis na magnitude e no ângulo de força aplicada na âncora. As curvas normalizadas ilustram a redução tanto da atenuação de carga por metro como do ângulo de força na âncora com o aumento da força normalizada. A atenuação de carga sofre mais influência do diâmetro da linha, da profundidade de cravação e da resistência não drenada, ao passo que o ângulo da força na âncora é mais influenciada pela variação do diâmetro da corrente e do ângulo da força no leito marinho. O *software* DIGIN mostrou-se adequado para analisar o problema proposto, fornecendo resultados que permitem estabelecer conclusões compatíveis com as apresentadas na literatura. Para futuros trabalhos nessa linha, recomenda-se a utilização de solos com resistência crescente com a profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Degenkamp, G.; Dutta, A. (1989) Soil resistances to embedded anchors chain in soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, New York, v. 115, n. 10, oct. 1989.
- DUTTA, A. (1988) A simple method of analyzing mooring chains with embedded anchor point. *J. Offshore Mech. and Arctic Engrg.*, American Society of Mech. Engrg., v. 110, p. 71-73, 1988.
- Gault, J. A.; Cox, W. R. (1974) 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.
- Ma, K. T.; Luo, Y.; Kwan, T.; Wu, Yongyan. (2019) *Mooring system engineering for offshore structures*. Elsevier, 2019.
- 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.
- Neubecker, S. R.; Randolph, M. F. (1995) Profile and frictional capacity of embedded anchor chains. *Journal of Geotechnical Engineering*. New York, v. 121, n. II, Nov. 1995.
- Nie, R. C.; Zimmerman, E. H. (2010) Fully couple mooring line and anchor catenary analysis. In: Oceans Conference, 2010, Seattle, U.S.A. *Proceedings...* 20-23 sep. 2010.
- Oliveira, M. C. (2009) *FPSO cidade de Angra dos Reis (tupi pilot 1 unit) mooring system assessment*. Relatório técnico 008/2009. CENPES/EB-E&P/EM, Rio de Janeiro, 2009.
- 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
- Sagrilo, L. V. S. et al. (2010) *Safety factors evaluation for torpedo anchors*. *Mecânica computacional*, v. XXIX, p. 9023 – 9036, 2010.
- Vivatratt, V.; Valent, P. J.; Ponteiro, A. A. (1982) 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. (2010) *Anchor Manual 2010: The Guide to Anchoring*. Netherlands 2010.
- Yen, B. C.; Tofani, G. D. (1984) Soil resistance to stud link chain. In: 16th Annual Offshore Technology Conference, Paper 4769, 1984, Houston, U.S.A. *Proceedings...* 7-9 may. 1984.