

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Acoplamento Iterativo Linha de Ancoragem-Âncora no Processo de Lançamento e Cravação de Estacas Torpedo

AUTORES:

Fábio Martins Gonçalves Ferreira, Heleno Pontes Bezerra Neto, Michele Agra de Lemos Martins, Eduardo Setton Sampaio da Silveira, Eduardo Nobre Lages

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

ACOPLAMENTO ITERATIVO LINHA DE ANCORAGEM-ÂNCORA NO PROCESSO DE LANÇAMENTO E CRAVAÇÃO DE ESTACAS TORPEDO

Abstract

Torpedo anchors have been used as part of the mooring system of offshore production platforms over the last 20 years in oil and gas fields in Brazil, with Petrobras, and elsewhere in the world, as an example of the Gulf of Mexico. The torpedo anchors are cylindrical steel tubes with fins and conical tips, filled with concrete and scrap, and use the potential energy to pinch free fall on the sea floor. The Laboratory of Scientific Computation and Visualization (LCCV/CTEC/UFAL) developed a computational tool, with educational bias, to simulate the launch and spike of torpedo anchors, both in the stage in which it is in the fluid medium, and in the stage in which it is buried in the marine soil, but without considering the interaction with the mooring line, commonly present in such systems. Another tool developed by the Laboratory is the DOOLINES framework, used by Petrobras in offshore systems design, capable of simulating the dynamics of mooring lines and risers submitted to wave, current and soil-structure interaction. Aiming to study how significant the influence of the mooring connected to the torpedo anchor is during the launching and crimping process, this work seeks to integrate the two tools through an iterative coupling process. The integration involves the prescription of displacements and forces, respectively, at the connection point of the mooring and the top of the torpedo anchor along the iterations until convergence is achieved. Thus, comparisons of launches and crimps of torpedo anchors with and without an attached tie can be made at its top. An example is presented and discussed to verify the coupling performed, as well as the influence of the tie in the torpedo anchors installation.

Introdução

Este trabalho trata de um dos sistemas de ancoragens de estruturas flutuantes empregadas no processo de exploração de petróleo *offshore*, que consistem em um arranjo apropriado de correntes, cabos e âncoras, denominadas estacas torpedo (Figura 1), que devem resistir às solicitações oriundas dos movimentos da estrutura flutuante, do peso próprio das diversas partes constituintes, do empuxo da água, assim como das correntes marinhas.



Figura 1: Lançamento de estaca torpedo (Fonte: MEDEIROS JÚNIOR, 2002).

A montagem deste sistema de ancoragem consiste no lançamento de uma estaca torpedo a partir de uma determinada altura do piso marinho, em que, pelo efeito de queda livre, a estaca obtém velocidade suficiente para cravar no solo em uma profundidade que a permita funcionar como âncora para uma linha de ancoragem da unidade flutuante. O uso desse tipo de âncora já acontece há décadas no Brasil, tendo sido desenvolvido e patentado pela Petrobras (PETROBRAS, 1998).

Ao longo dos anos esse sistema de ancoragem vem sendo intensamente investigado pelas comunidades científicas brasileira (p. ex. MEDEIROS JÚNIOR, 2002; FERNANDES et al., 2005; SILVA, 2005; KUNITAKI, 2006; MENDES et al., 2006; COSTA, 2008; SAGRILO et al., 2010; SILVA, 2010; AGUIAR, 2011; AGUIAR et al., 2011; SOUSA et al., 2011; SAGRILO et al., 2012; SOUZA JÚNIOR, 2014) e internacional (p. ex. RAIE e TASSOULAS, 2009; HASANLOO et al., 2010; HASANLOO e YU, 2011; HASANLOO et al., 2012; KIM et al., 2015a; KIM et al., 2015b; WANG et al., 2016; RAIE e TASSOULAS, 2016; SOH et al., 2017).

No Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), do Centro de Tecnologia (CTEC), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), as investigações com esse sistema de ancoragem deram início em 2002. Ramos Jr. et al. (2002a) revisaram e implementaram modelo para a simulação da cravação de estacas torpedo em solos marinhos, considerando a estaca como cilindro rígido que interagia com o solo marinho, de acordo com o modelo analítico de True (1976). Esse modelo da cravação foi posteriormente empregado no problema inverso da caracterização de solos marinhos (RAMOS JÚNIOR et al., 2002b). Nesses trabalhos, a linha auxiliar no processo de lançamento da estaca torpedo foi considerada indiretamente por uma contribuição no coeficiente de arrasto da estaca torpedo. Carvalho Júnior et al. (2004) incorporaram a linha auxiliar no processo de lançamento da estaca torpedo por meio de uma discretização do Método dos Elementos Finitos, concebendo-se a interação dessa com o solo marinho de acordo com o modelo analítico de True (1976). Nesse trabalho, a estaca torpedo foi considerada como um único elemento finito de barra com elevada rigidez axial. Ainda, Carvalho Júnior et al. (2005) utilizaram o Método dos Elementos Discretos para modelagem do solo por meio de um conjunto de partículas discretas, cujo comportamento é governado por leis físicas. Os contatos entre elas podem ser criados ou extintos à medida que o conjunto de partículas se deforma como um todo, o que caracteriza a não linearidade do meio granular. A estaca torpedo foi modelada por um aglomerado rígido de partículas discretas que interagem com as partículas representativas do solo marinho durante o processo de cravação. A linha auxiliar no processo de lançamento da estaca torpedo não foi considerada nesse modelo. Por fim, Araújo et al. (2005) formularam e implementaram um modelo para reconstrução do movimento da estaca torpedo a partir de dados da instrumentação da mesma por meio de acelerômetros e giroscópios.

Neste trabalho, retoma-se o processo de simulação do lançamento e cravação da estaca torpedo com uma proposta de acoplamento fraco iterativo da mesma com a linha auxiliar, em que a linha é modelada por meio do Método dos Elementos Finitos via DOOLINES (SILVEIRA et al., 2012) e a estaca é tratada com um modelo analítico de movimento vertical unidimensional (TRUE, 1976).

Metodologia

Na simulação do processo de lançamento e cravação de âncoras do tipo estaca torpedo, normalmente se faz uso do modelo matemático desenvolvido por True (1976), originalmente voltado para descrever a penetração de projéteis em solos marinhos, em especial aqueles de corpo cilíndrico e com ponta cônica. Nesse modelo, não há a presença de nenhum trecho de linha conectada ao projétil. No contexto da instalação da estaca torpedo, essa é lançada em conjunto com uma linha que a liga a uma unidade flutuante (Figura 2).

Como já apontado por Ramos Júnior et al. (2002a; 2002b), há uma influência da linha de lançamento acoplada à estaca torpedo à dinâmica do conjunto até o momento final da cravação da mesma no solo marinho, muitas vezes não considerada (p. ex. CARVALHO JÚNIOR et al., 2005; MENDES et al., 2006), que motiva a proposição da estratégia de acoplamento em pauta.

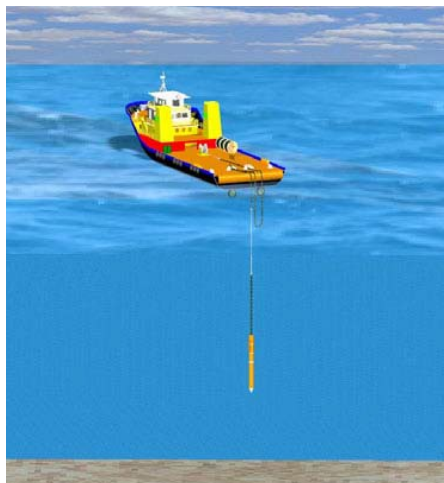


Figura 2: Esquema da estaca torpedo com a linha de lançamento (MASTRANGELO et al., 2003).

O modelo de simulação do lançamento e cravação da estaca torpedo, inicialmente considerado, contempla três estágios (Figura 3), a saber: estaca totalmente submersa, estaca parcialmente submersa/enterrada e estaca totalmente enterrada. Em cada um desses estágios, deve ser considerada, além do peso próprio, a interação da mesma com os meios envolventes ativos (fluido e solo marinho), que geram empuxo, arrasto lateral/ponta, resistência lateral/ponta e massa adicional.

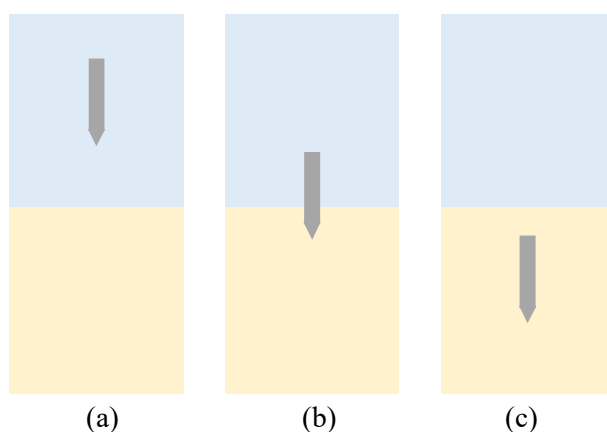


Figura 3: Estágios do lançamento e cravação: (a) totalmente submersa, (b) parcialmente submersa/enterrada e (c) totalmente enterrada.

Para a linha de lançamento, empregada para posicionar a estaca torpedo a partir da unidade flutuante até a profundidade de lançamento (Figura 2), a extremidade de conexão com a estaca torpedo acompanha todo o histórico do movimento da âncora. A princípio, na modelagem da linha, emprega-se o *framework* DOOLINES (SILVEIRA et al., 2012), que permite a análise dinâmica não linear no domínio do tempo para linhas de ancoragem e de produção em configurações tridimensionais quaisquer, na qual são consideradas as diversas formas de interação com o fluido (empuxo, arrasto e massa adicional) e com o solo marinho (superficial e enterrada). Esse *framework*, em sua versão atual, não contempla explicitamente o acoplamento forte das linhas com outros objetos que integre um cenário de análise. No entanto, esse pode ser utilizado em um acoplamento fraco com outros objetos, desde que se desenvolva uma camada de interação que faça a prescrição de movimentos dos objetos para as linhas e essas retornem as forças internas nas conexões para atualização das configurações dos objetos. Essa estratégia é a que foi implementada no programa DYNASIM (NISHIMOTO et al., 2002), na integração dos movimentos de unidades flutuantes e das linhas de ancoragem e de produção (Figura 4).

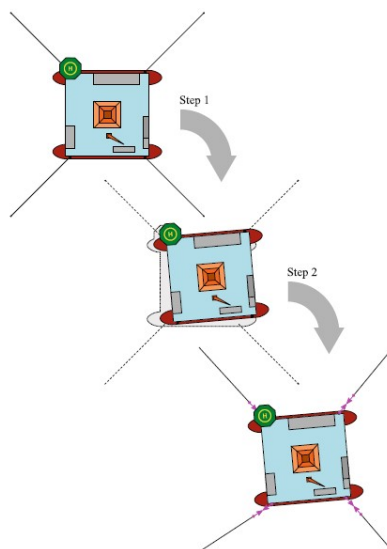


Figura 4: Acoplamento entre o DYNASIM e o DOOLINES (Fonte: SILVEIRA et al., 2012).

A estratégia iterativa proposta neste trabalho para o acoplamento entre as duas partes envolvidas (linha de lançamento e estaca torpedeiro) consiste em, inicialmente, integrar o movimento da estaca torpedeiro sem a presença da linha de lançamento. Em seguida, prescreve-se o histórico do movimento do ponto de conexão da estaca torpedeiro na extremidade correspondente da linha de lançamento, integrando o movimento da mesma. Ao final dessa análise, prescreve-se o histórico de força interna mobilizada nessa extremidade da linha na conexão com a estaca torpedeiro, cujo movimento volta a ser integrado ao longo do tempo sob o efeito dessa força interna e das demais forças de interação com os meios envolventes (fluido e solo marinho). Esse processo é repetido até que se atinja a convergência da resposta, controlada pela profundidade final de cravação da estaca torpedeiro.

Resultados e Discussão

A estratégia proposta é testada no lançamento de uma estaca torpedeiro com os parâmetros apresentados na Tabela 1, em conjunto com uma linha de lançamento vertical com folga superior, cujas propriedades estão especificadas na Tabela 2.

Tabela 1: Propriedades da estaca torpedeiro.

Propriedade	Valor
Comprimento (m)	15,0
Diâmetro (m)	1,0668
Peso no ar (kN)	600,0
Coefficiente de arrasto de ponta	0,8
Coefficiente de arrasto lateral	0,04
Coefficiente de massa adicional	2,0

Tabela 2: Propriedades da linha de lançamento.

Propriedade	Valor
Comprimento (m)	1145,0
Rigidez axial (MN)	1391,428
Diâmetro efetivo (m)	0,02
Massa linear (Mg/m)	0,08
Coefficiente de arrasto normal	2,0
Coefficiente de arrasto longitudinal	0,1

A estaca torpedeiro é lançada com a ponta a uma altura de 200,0 m do piso marinho, em uma lâmina d'água 1100,0 m, cuja densidade é de 1,03 Mg/m³. Considera-se que a convergência do processo iterativo proposto é atingida quando em duas análises sequenciais as profundidades finais de cravação da estaca torpedeiro diferem em, no máximo, 1,0 cm.

Para o modelo em pauta, são requeridas 25 iterações para a convergência. A Figura 5 mostra a evolução da profundidade de cravação da ponta da estaca torpedeiro ao longo do processo iterativo

proposto. A estaca torpedo atinge o piso marinho em 13,8 s e com uma velocidade de 14,5 m/s. Em 17,6 s encontra-se a configuração final de cravação, cuja ponta da estaca torpedo penetra 33,00 m no solo marinho. Caso não seja considerado a presença da linha de lançamento, a estaca torpedo atinge o piso marinho em 13,4 s e com uma velocidade de 18,2 m/s, e apresentaria uma configuração final de cravação em 17,0 s, com a ponta da estaca torpedo penetrando 35,31 m.

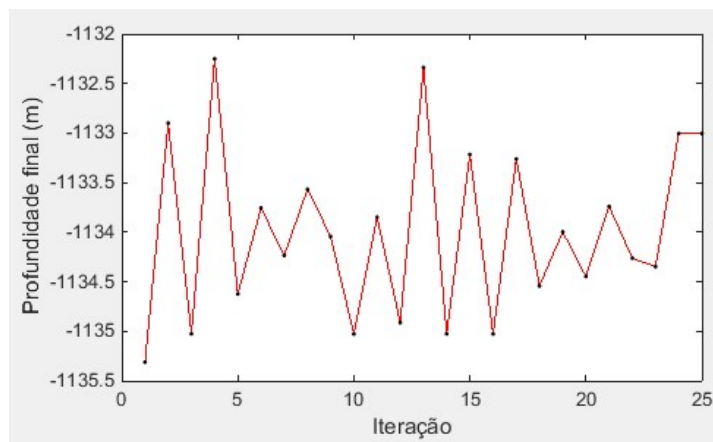


Figura 5: Convergência da estratégia de acoplamento.

Conclusões

Neste trabalho foi analisado o desempenho de uma proposta de acoplamento iterativo entre a estaca torpedo e a linha de lançamento, fazendo-se uso do DOOLINES (SILVEIRA et al., 2012) para a simulação da dinâmica da linha e de uma adaptação no modelo analítico de lançamento e cravação da estaca, com base no trabalho de True (1976). O módulo de controle desse acoplamento foi desenvolvido em MATLAB® e, de acordo com os resultados obtidos, ficou evidenciada a influência da presença da linha de lançamento no movimento da estaca torpedo, em particular na profundidade final de cravação, informação importante para cálculo da capacidade de carga da mesma, que serve de referência para a ancoragem de unidades flutuantes.

Agradecimentos

Ao CNPq e à Petrobras pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, C.S. **Análise da interação solo-estrutura de âncoras do tipo torpedo para plataformas offshore**. 2011. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- AGUIAR, C.S. et al. Numerical simulation of installed torpedo anchors embedded in cohesive soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 30, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: OMAE, 2011.
- ARAÚJO, J.P.N. et al. Visualização do lançamento e cravação de estacas torpedo através da recomposição do seu movimento. In: CILAMCE, XXVI, 2005, Guarapari. **Proceedings...** Guarapari:

ABMEC, 2005.

CARVALHO JÚNIOR, H. et al. Simulação na Web do Lançamento e Cravação de Estacas Torpedo no Solo Marinho. In: CILAMCE, XXV, 2004, Recife. **Proceedings...** Recife: ABMEC, 2004.

CARVALHO JÚNIOR, H. et al. Simulação do Lançamento e Cravação de Estacas-Torpedo em Solo Marinho com a Utilização do Método dos Elementos Discretos. In: CILAMCE, XXVI, 2005, Guarapari. **Proceedings...** Guarapari: ABMEC, 2005.

COSTA, R.G.B. **Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de modelos em elementos finitos**. 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FERNANDES, A.C. et al. Hydrodynamic aspects of the torpedo anchor installation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 24, Halkidiki. **Proceedings...** Halkidiki: OMAE, 2005.

HASANLOO, D.; WANG, H.K.; YU, G. Preliminary tests on the terminal velocity of a torpedo anchor in still water. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 20, Beijing. **Proceedings...** Beijing: ISOPE, 2010.

HASANLOO, D.; YU, G. A study on the falling velocity of torpedo anchors during acceleration. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 21, Maui. **Proceedings...** Maui: ISOPE, 2011.

HASANLOO, D.; PANG, H.; YU, G. On the estimation of the falling velocity and drag coefficient of torpedo anchor during acceleration. **Ocean Engineering**, v. 42, p. 135-146, 2012.

KIM, Y.H.; HOSSAIN, M.S.; WANG, D. Effect of strain rate and strain softening on embedment depth of a torpedo anchor in clay. **Ocean Engineering**, v. 108, p. 704-715, 2015.

KIM, Y.H. et al. Numerical investigation of dynamic installation of torpedo anchors in clay. **Ocean Engineering**, v. 108, p. 820-832, 2015.

KUNITAKI, D.M.K.N. **Tratamento de incertezas no comportamento dinâmico de estacas torpedo para ancoragem de sistemas flutuantes na exploração de petróleo offshore**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MASTRANGELO, C.F. et al. From early production systems to the development of ultra deepwater fields – experience and critical issues of floating production units. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2003, Houston. **Proceedings...** Houston: OTC, 2003.

MEDEIROS JÚNIOR, C.J. Low cost anchor system for flexible risers in deep Waters. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2002, Houston. **Proceedings...** Houston: OTC, 2002.

MENDES, R.B.; ALVES, J.L.D.; SILVA, C.E. Simulation of torpedo pile launching by coupled discrete and finite element analysis. In: CILAMCE, XXVII, 2006, Belém. **Proceedings...** Belém: ABMEC, 2006.

NISHIMOTO, K.; FUCATU, C.H.; MASETTI, I.Q. Dynasim – A time domain simulator of anchored FPSO. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME**, v. 124, n. 4, p. 203-211, 2002.

PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S.A. (Rio de Janeiro, RJ). Cipriano José de Medeiros Júnior, Luis Hissashi Hassui e Rogério Diniz Machado. **A pile for anchoring floating structures and process for installing it.** WO 1998008733 A1, 30 agosto 1996, 5 março 1998.

RAIE, M.S.; TASSOULAS, J.L. Installation of torpedo anchors: numerical modeling. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 12, p. 1805-1813, 2009.

RAIE, M.S.; TASSOULAS, J.L. Simulation of torpedo anchor set-up. **Marine Structures**, v. 49, p. 138-147, 2016.

RAMOS JÚNIOR, A.S. et al. **Desenvolvimento e Implementações de Modelos Numéricos para Análise da Interação Linha-Solo-Estacas Torpedo e Caracterização do Solo Marinho – Relatório Parcial I – UFAL/PETROBRAS.** Maceió, 2002a.

RAMOS JÚNIOR, A.S. et al. **Desenvolvimento e Implementações de Modelos Numéricos para Análise da Interação Linha-Solo-Estacas Torpedo e Caracterização do Solo Marinho – Relatório Parcial II – UFAL/PETROBRAS.** Maceió, 2002b.

SAGRILO, L.V.S. et al. Reliability-based design of torpedo anchors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 29, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: OMAE, 2010.

SAGRILO, L.V.S. et al. A study on the holding capacity safety factors for torpedo anchors. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2012, article ID 102618, 2012.

SILVA, U.A. **Modelo para análise dinâmica de estaca torpedo.** 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

SILVA, D.F.C. CFD hydrodynamic analysis of a torpedo anchor directional stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 29, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: OMAE, 2010.

SILVEIRA, E.S.S.; LAGES, E.N.; FERREIRA, F.M.G. DOOLINES: an object-oriented framework for non-linear static and dynamic analyses of offshore lines. **Engineering with Computers**, v. 28, n. 2, p. 149-159, 2012.

SOUSA, J.R.M. et al. Undrained load capacity of torpedo anchors embedded in cohesive soils. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 133, n. 2, 021102, 2011.

SOH, B.; PAO, W.; CHEN, X.H. Numerical analyses for improved terminal velocity of deep water torpedo anchor. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, v. 27, n. 2, p. 428-443, 2017.

SOUZA JÚNIOR, M.A. **Um estudo hidrodinâmico da estaca torpedo através do software ANSYS CFX®.** 2014. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)–Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

TRUE, D.G. **Undrained Vertical Penetration into Ocean Bottom Soils.** *PhD Thesis*, University of California, Berkeley, California, USA, 1976.

WANG, W.; WANG, X.; YU, G. Penetration depth of torpedo anchor in cohesive soil by free fall. **Ocean Engineering**, v. 116, p. 286-294, 2016.