

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/304

Ensaio Centrífgos a 100g para Avaliação do Comportamento à Tração Vertical e Inclinada de Estaca Torpedo T-120

Dhuann Paiva Antunes Fiori Bakr
Mestrando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, dhuann.fiori@coc.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida
Docente e Coordenador de Projeto, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marciossal@gmail.com

Maria Cascão Ferreira de Almeida
Docente, POLI e COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascão@poli.ufrj.br

Alessandra Conde de Freitas
Docente, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

David Sena Balreira
Doutorando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, dvdbalreira@coc.ufrj.br

RESUMO: O avanço na exploração e produção *offshore* em lâminas d'água ultra profundas necessita de novas tecnologias e procedimentos para os projetos e operações de campo, especialmente em subsolo argiloso com baixa resistência não drenada. A ancoragem de unidades flutuantes, solicitada vertical ou inclinadamente, pode ser por meio de estaca torpedo. Esta possui baixos custos de instalação e manutenção e reduzem a taxa de ocupação do leito marinho. A partir de ensaios centrífugos a 100g, este trabalho avalia a capacidade de carga à tração vertical (90°) e inclinada (45°) de estaca torpedo T-120 em solo argiloso (caulim *Speswhite*). Foram elaboradas duas amostras de solo, obtendo-se os perfis de resistência não drenada através de ensaio T-bar em voo. Utilizando-se estacas modelo isoladas sem aletas, fabricadas em PLA (*Polylactic Acid*) por impressão 3D e instaladas estaticamente a 1g no solo, foram realizados cinco ensaios centrífugos de arrancamento. As cargas de arrancamento vertical foram comparadas com as previsões analíticas, sendo ligeiramente superiores às previsões. Observou-se, na ruptura, maiores cargas e deslocamentos normalizados ao arrancamento inclinado em comparação aos verticais, em acordo com a literatura. A metodologia utilizada e os resultados obtidos, visto a dificuldade de realização de ensaios em escala real, auxiliaram no entendimento do comportamento solo-fundação em estaca torpedo embutida em argila mole.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Torpedo, Ensaio Centrífgos, Capacidade de Carga à Tração.

ABSTRACT: Advances in offshore exploration and production in ultra-deep water depths require new technologies and procedures for projects and field operations, especially in clayey subsoil with low undrained shear strength. The anchoring of floating units, requested vertically or inclined, can be by means of torpedo piles. This system has low installation and maintenance costs and reduces the occupancy rate of the seabed. Based on centrifuge tests at 100g, this work evaluates the vertical (90°) and inclined (45°) tensile pullout capacity of T-120 torpedo piles in clayey soil (*Speswhite kaolin*). Two soil samples were prepared, obtaining the undrained shear strength profiles through the T-bar test in flight. Using isolated model piles without fins, manufactured in PLA (*Polylactic Acid*) by 3D printing and statically installed at 1g in the soil, five pullout centrifuge tests were carried out. The vertical pullout loads were compared with the analytical predictions, being superior to them. At rupture, greater loads and displacements normalized to inclined pullout are observed in comparison to vertical pullouts, according to the literature. The methodology used and the results obtained, given the difficulty of carrying out full-scale tests, contributed to understand the soil-foundation behavior of torpedo piles embedded in soft clay.

KEYWORDS: Torpedo Piles, Centrifuge Tests, Pullout Capacity.

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente atuação de indústrias petrolíferas em águas ultra profundas, cada vez mais são necessárias pesquisas realacionadas ao desenvolvimento de novas tecnologias de ancoragem e metodologias capazes de otimizar tais atividades. Neste contexto, as estacas torpedo (Medeiros *et al.*, 1996) são constituídas de tubulação cilíndrica metálica (dotadas ou não de aletas), ponta cônica fechada e olhal no topo, sendo comumente utilizadas na ancoragem de unidades flutuantes relativas à exploração e produção de petróleo e gás natural na área *offshore*. Raaj *et al.* (2023) apresentam diversas configurações geométricas de estacas torpedo. Estas são instaladas por queda livre, sob ação do peso próprio, em subsolo marinho composto por argilas de baixa resistência não drenada e não necessitam de operações mecânicas complexas. Sendo assim, são consideradas como uma alternativa simples e econômica para lâminas d'água com profundidade superior a mil e quinhentos metros. A instalação desta fundação apresenta, de acordo com Medeiros Junior (2001), pouca variabilidade em seu custo.

De acordo com Raaj *et al.* (2023), as estacas torpedo apresentam esbeltez variando entre 10 e 17. Tal informação pode ser relacionada ao exposto por Freitas (2014), a qual afirma que as estacas torpedo funcionam como corpo rígido. Segundo Costa (2008), o olhal da estaca é responsável por receber cargas verticais e horizontais. A presença de aletas no fuste, segundo Li *et al.* (2014), altera o comportamento dinâmico das estacas torpedo, as quais aumentam sua estabilidade e verticalidade durante a instalação. Além disso, O'Loughlin *et al.* (2004) afirmam que as aletas proporcionam aumento da capacidade de carga de arrancamento à tração, devido ao aumento da área de contato entre a estaca e o solo. Todavia, O'Loughlin *et al.* (2013) expõem que as estacas torpedo com aletas apresentam diminuição da profundidade de embutimento durante a instalação, pela mesma razão citada anteriormente.

Ensaio a 1g em caulim normalmente adensado e em escala reduzida foram realizados por Gilbert *et al.* (2008). Estes consistiram em estaca sem aletas na escala de modelo 1:30 apresentando fuste cilíndrico e ponta cônica, visando aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento das estacas durante a instalação e posterior arrancamentos (vertical e inclinado) sob condição não drenada. Os autores concluíram que o aumento da capacidade de carga está diretamente relacionado ao peso e profundidade de embutimento da estaca.

Ao se tratar de ensaios centrífugos, Richardson *et al.* (2009) avaliaram a variação da capacidade de carga de estacas torpedo. Estas foram solicitadas ao arrancamento logo após serem instaladas em caulim normalmente adensado. Hossain *et al.* (2014) também efetuaram ensaios centrífugos em estacas torpedo. Os autores correlacionaram o acréscimo na capacidade de carga, quando da solicitação à tração, ao aumento da profundidade de embutimento, ao aumento do tempo após a instalação da estaca, aumento da resistência não drenada do solo e à diminuição do ângulo de arrancamento em relação ao solo. Os resultados apresentados por Liu *et al.* (2016) também apontam aumento da capacidade carga quando da solicitação da estaca ao arrancamento inclinado em comparação com o vertical (90°).

Um método de avaliar os resultados obtidos em estudos consiste em compara-los com as previsões analíticas da literatura técnica. Sendo assim, ao realizar estudo paramétrico com estaca torpedo apresentando quatro aletas e sujeita à variados carregamentos e características do solo argiloso, Costa (2008) comparou os resultados dos arrancamentos verticais (90°) com as soluções fechadas da API-RP-2A (2005). Estes resultados apresentam-se superiores, com diferença máxima observada de 5%. Quando do arrancamento inclinado para ângulos menores que 30° em relação ao plano horizontal, os resultados indicam que a resistência lateral influencia na carga de ruptura. Para ângulos maiores que 30°, as resistências lateral e da camada de solo sobre a estaca interferem na capacidade de carga. Freitas (2014) realizou prova de carga estática à tração vertical a 1g de estaca modelo instrumentada em escala 1:8, instalada em argila mole caracterizada. A autora também comparou os resultados do ensaio com previsões analíticas, como a sugerida pela API-RP-2GEO (2011), tendo observado que a API foi conservativa no caso estudado.

2 PROGRAMA DE ENSAIOS

Os ensaios em voo a 100g foram realizados em centrífuga geotécnica de braço, fabricada no ano de 2011. Esta apresenta dimensões externas de 1,7 m de altura e 2,2 m de largura, com massa de 1,44 tonelada. Sua capacidade de aceleração corresponde à 300 vezes a aceleração da gravidade, com o raio de rotação equivalente à 660 mm, máxima velocidade angular de 638 r/min e carga máxima permitida por caixa prismática de 60 kN (6 Gton), com momento de 13,4 kgm. A caixa prismática que comporta a amostra de solo

apresenta massa de 12,42 kg, com dimensões internas referentes à 180 mm de altura, 100 mm de largura e 300 mm de comprimento.

Ao longo das campanhas de ensaios centrífugos, equipamentos e programas eletrônicos, devidamente calibrados, possibilitaram o acompanhamento de informações e o acionamento de mecanismos. Estes referem-se à célula de carga, transdutores de poropressão, T-bar (diâmetro igual a 4 mm e comprimento igual a 16 mm) e atuador (vertical e horizontal). Os sistemas de cravação e alguns aparatos dos arrancamentos (vertical e inclinado) das estacas foram desenvolvidos e fabricados em material PLA através de impressão 3D, conforme apresentado na Figura 1 (a), (b) e (c), respectivamente.

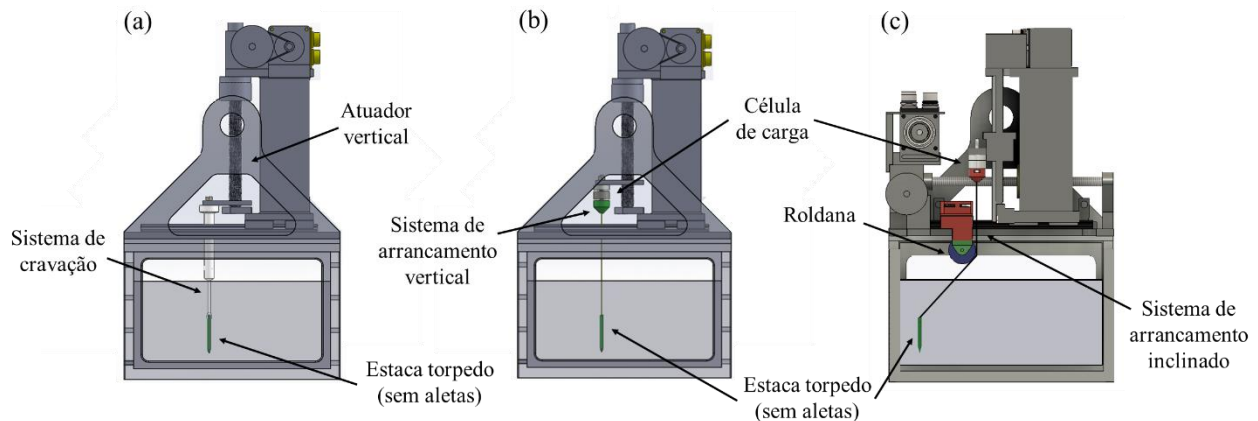


Figura 1. (a) sistema de cravação (b) sistema de arrancamento vertical (c) sistema de arrancamento inclinado

Por meio de modelagem física em centrífuga, investigou-se o comportamento de estaca torpedo solicitada à tração vertical (90°) e inclinada (45°), instalada em caulim *Speswhite*. A instalação estática a 1g, visou garantir a verticalidade e o embutimento do topo da estaca, correspondente a 50 mm. Tanto a cravação 1g quanto o arrancamento em voo, tiveram as velocidades controladas iguais a 0,14 mm/s, estimadas conforme Finnie and Randolph (1994), a fim de garantir a condição não drenada. O perfil de resistência não drenada de cada amostra de solo foi obtido através de ensaio T-bar em voo, com velocidades de cravação e extração iguais a 0,18 mm/s e alcançando profundidade superior ao embutimento da ponta da estaca no solo.

Foram elaboradas duas amostras de solo e um total de cinco ensaios de arrancamento: três verticais e dois inclinados. Estes ocorreram com estacas torpedo isoladas, sem aletas e confeccionadas em PLA (*Polylactic Acid* – polímero termoplástico fabricado a partir de materiais de fontes renováveis) por meio de impressora 3D. Utilizou-se linha de polietileno de 0,4 mm de diâmetro como a linha de ancoragem das estacas torpedo, a exemplo da metodologia utilizada por Richardson *et al.* (2009), devido à flexibilidade e alta resistência à tração, ao alongamento e desfiamento do material. Foram elaboradas curvas carga *versus* deslocamento normalizados e as capacidades de carga obtidas em ensaios de arrancamento verticais foram comparadas com as previsões analíticas da API-RP-2GEO (2011).

2.1 Modelagem Física da Estaca Torpedo

Para a determinação das dimensões da estaca modelo adotou-se abordagem similar à de Tobita e Iai (2016) em que o modelo centrífugo é resultado da aplicação de dois fatores de escala, o (N_1) de modelo virtual para centrífugo e o (N_2) de protótipo para modelo virtual (Tabela 1). Para a fabricação das estacas em PLA sem aletas, manteve-se o comprimento do modelo centrífugo da estaca torpedo T-120 e adotou-se o diâmetro do fuste equivalente à massa das estacas, conforme dimensões e escalas apresentadas na Tabela 1.

A Figura 2 (a) apresenta desenho esquemático da estaca torpedo T-120 com quatro aletas, a qual serviu de base para a estaca modelo virtual na escala 1:4 de protótipo ($N_2 = 4$) e, posteriormente, para o projeto e fabricação da estaca torpedo sem aletas em modelo centrífugo com fator de escala $N_1 = 100$ utilizada nos ensaios, apresentada na Figura 2 (b).

Tabela 1. Dimensões da estaca torpedo T-120 com quatro aletas e da estaca torpedo em PLA sem aletas

Dimensões (mm)	Estaca Torpedo T-120 (protótipo)	Modelo Virtual $N_2 = 4$	Modelo Centrifugo $N_1 = 100$	Estaca Torpedo PLA (sem aletas)
L_{aletas}	15600	3900	39	–
W_{aletas}	1220	305	3,05	–
D_{fuste}	1219	304,75	3,05	4,93
L_{ponta}	2203	550,75	5,51	5,51
L_{total}	23103	5775,75	57,76	57,76

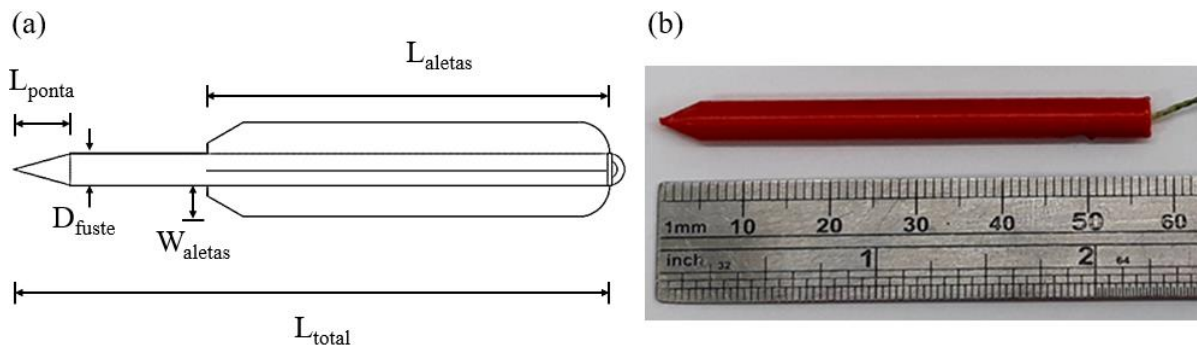


Figura 2. (a) esquema representativo da estaca torpedo T-120 (b) estaca torpedo modelo utilizada nos ensaios

2.2 Características das Amostras de Solo

Os ensaios com estaca torpedo foram realizados em solo argiloso, elaborado a partir de caulim *Speswhite*. Obtidas a partir de ensaios de caracterização, as propriedades deste material consistem em Limite de Liquidez (LL) igual a 58,5%, Índice de Plasticidade (IP) correspondente à 33,5% e Densidade Real dos Grãos (G_s) de 2,59.

O solo corresponde à proporção entre caulim *Speswhite* e água destilada obtendo-se uma mistura com umidade equivalente a 1,5 vez o Limite de Liquidez. Esta é depositada em uma caixa prismática, contendo sistema de drenagem, utilizando-se a técnica de grumos, conforme descrito por Oliveira (2005) e Soriano *et al.* (2019). Ao atingir-se a massa e o volume de solo previamente estabelecidos, a amostra é finalizada e posicionada no adensômetro configurado com cinco estágios de pressão e duração, sendo adensada até a tensão vertical efetiva de 80 kPa.

Ao término do adensamento a 1g, em cada amostra de aproximadamente 138 mm de espessura final, são instalados quatro transdutores de poropressão em dois níveis de profundidade, para possibilitar o monitoramento do excesso e dissipação de poropressão em voo. Os ensaios centrifugos (100g) de T-bar e arrancamentos vertical (90°) e inclinado (45°), em cada amostra, são efetuados após a equalização da poropressão em voo. A Figura 4 (a) e (b) explicita esquematicamente a configuração dos ensaios realizados na Amostra B.

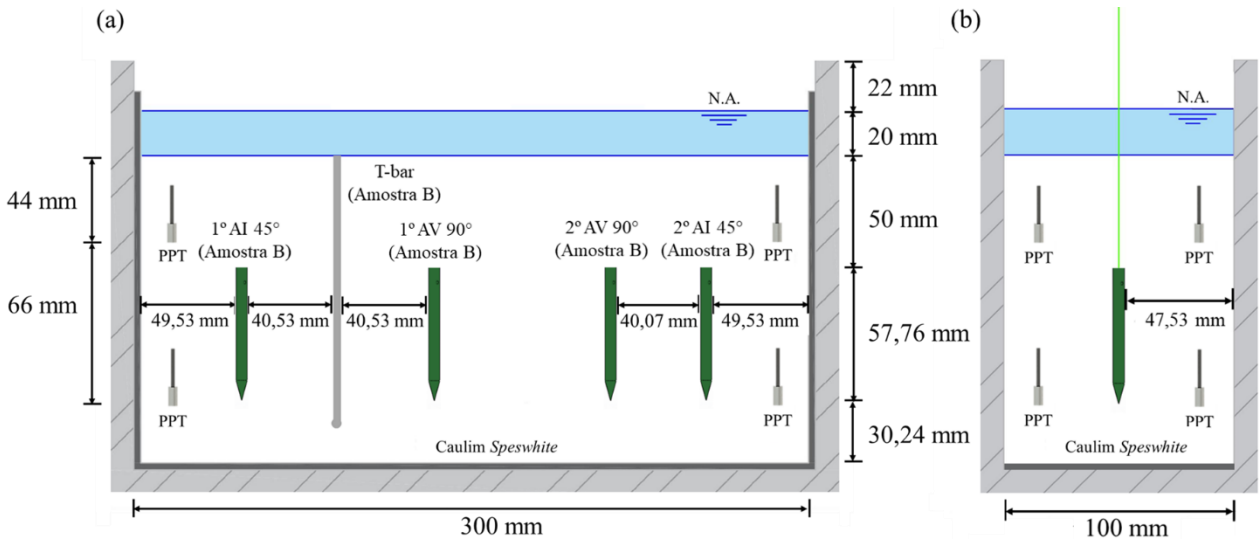


Figura 3. Amostra B: dimensões da caixa prismática e posições dos ensaios (a) corte frontal (b) corte lateral

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Perfis de Resistência não Drenada (S_u)

A partir dos ensaios centrífugos de T-bar, obteve-se os perfis de resistência não drenada das amostras, os quais são mostrados na Figura 5. Estes apresentam-se concordantes entre si e crescentes ao longo da profundidade do solo, conforme esperado. Verifica-se que a resistência não drenada média, na região de embutimento da estaca, está na faixa entre 7,6 a 8,5 kPa. Estes valores serão utilizados para fins de normalização das curvas carga *versus* deslocamento referentes aos ensaios de arrancamento da respectiva amostra.

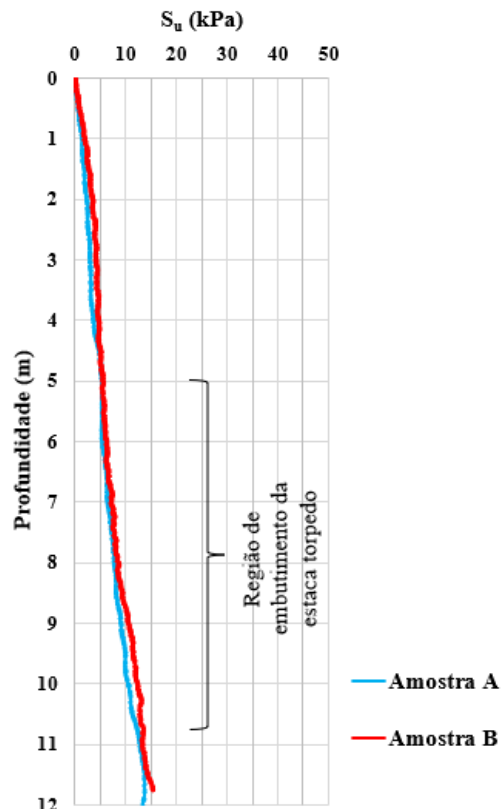


Figura 4. Perfis de resistência não drenada

3.2 Arrancamento Vertical (90°) e Inclinado (45°) da Estaca Torpedo (100g)

Os resultados normalizados dos ensaios de arrancamento vertical (90°) e inclinado (45°) em estaca torpedo em PLA isolada sem aletas, são apresentados na Figura 6. Devido os ensaios terem sido realizados em amostras diferentes (A e B), objetivando comparar os resultados obtidos, as cargas foram normalizadas. Esta ocorreu por meio da divisão da força experimental (F) registrada durante todo o ensaio pela área da seção transversal do fuste da estaca (A_p) e pela resistência não drenada média do solo na profundidade de embutimento da estaca ($S_{u\text{ médio}}$). Ao se tratar da normalização do deslocamento (u), estes foram normalizados pelo diâmetro do fuste da estaca torpedo (D_A), conforme apresentado por Hossain *et al.* (2014).

Ao analisar as curvas força normalizada *versus* deslocamento normalizado dos ensaios de arrancamento, observa-se mobilização da resistência, originando pico ao alcançar a máxima força medida, com posterior redução da resistência. Destaca-se a diferença no formato do pico entre as curvas dos arrancamentos verticais e inclinados, retratando uma mobilização mais gradual do solo nesta última configuração.

Os resultados referentes aos ensaios de arrancamento vertical (90°) apresentam valores de forças normalizadas e deslocamentos normalizados, na ruptura, na ordem de 60 a 75 e 1 a 2, enquanto os ensaios inclinados (45°) apresentam valores na faixa de 85 a 130 e 5 a 6, respectivamente. Em relação ao ensaio de arrancamento inclinado, denominado 2° AI 45° (Amostra B), verifica-se a ocorrência momentânea de alívio das forças medidas pela célula de carga. Este alívio ocorreu para valores de força e deslocamento normalizados, na faixa entre 58 a 64 e 3,8 a 4, respectivamente.

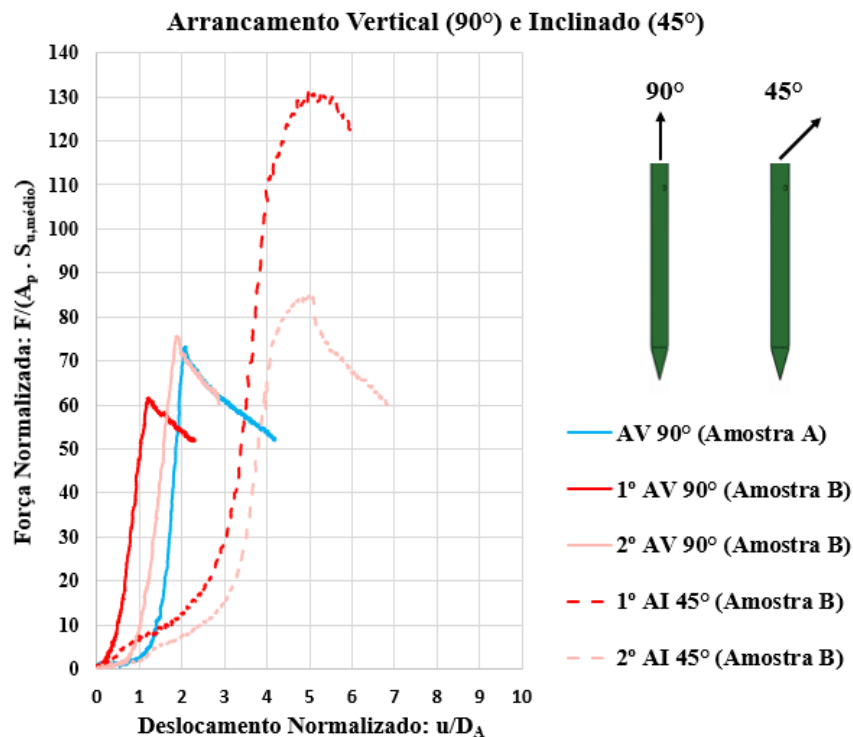


Figura 5. Resultados normalizados dos ensaios de arrancamento vertical (90°) e inclinado (45°)

3.3 Previsão e Comparação da Capacidade de Carga à Tração Vertical

As máximas cargas obtidas experimentalmente em ensaios centrífugos de arrancamento vertical (90°) em estacas torpedo em PLA sem aletas foram comparadas com previsões baseadas na API-RP-2GEO (2011), na escala de modelo. A Tabela 2 apresenta estes resultados comparativos. Destaca-se que as Amostras A e B, por apresentarem perfis S_u bem próximos, resultaram em valores de capacidade de carga experimentais semelhantes.

Observa-se que as capacidades de carga previstas pela API-RP-2GEO (2011) apresentam-se conservativas em relação aos dados obtidos experimentalmente, tendo em vista a diferença em termos médios de 29,7% entre os valores.

Tabela 2. Capacidade de Carga de Arrancamento Vertical (90°) – Experimental e Previsão

Amostra	Arrancamento Vertical (90°)	Previsão API-RP-2GEO (2011)	Diferença
A	10,3 N	6,83 N	33,7 %
B	9,6 N	7,65 N	20,3 %
	11,8 N		35,2 %

4 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios centrífugos de T-bar, os perfis de resistência não drenada apresentaram valores crescentes ao longo da profundidade, de acordo com o previsto.

Em relação aos resultados e interpretação das curvas força *versus* deslocamento normalizados, referentes aos ensaios de arrancamento vertical (90°), estes mostraram comportamento semelhante e condizente com os dados apresentados por Richardson *et al.* (2009) e Hossain *et al.* (2014).

A diferença entre os valores dos deslocamentos normalizados na ruptura referentes aos ensaios verticais e inclinados confirmam dados da literatura expressados por Freitas (2014) e Hossain *et al.* (2014) indicando que, à tração vertical, a ruptura ocorre para menores deslocamentos. Estas observações são muito importantes no que diz respeito à projeto, tendo em vista que as embarcações, equipamentos e sistemas devem ser dimensionados adequadamente às cargas atuantes e aos deslocamentos.

Ao realizar-se a exumação das estacas torpedo da Amostra B, verificou-se que a estaca referente ao ensaio de arrancamento inclinado 2° AI 45° (Amostra B) apresentou inclinação final maior do que a estaca do 1° AI 45° (Amostra B). Esta movimentação relativa pode ter ocasionado o alívio da força medida durante o ensaio (em $u/D_A = 4$) e a redução do valor da carga de ruptura (em $u/D_A = 5$), quando da comparação entre os ensaios inclinados (45°) da Amostra B.

A diferença entre as capacidades de carga experimentais, referentes à arrancamento vertical (90°), e as previstas pela API-RP-2GEO (2011) pode ser justificada devido à complexa interação estaca-solo, variabilidade inerente aos ensaios experimentais e à elevada rugosidade da estaca modelo, a qual é fabricada por meio da técnica de impressão 3D por deposição de filamentos.

Por fim, verifica-se que a metodologia de ensaio empregada, os sistemas desenvolvidos e os resultados obtidos, propiciaram maior entendimento sobre o comportamento deste sistema de ancoragem instalado em argila. Tal fato favorece o aprimoramento de técnicas, fomenta novas tecnologias e, conseqüentemente, o desenvolvimento de projetos mais eficazes.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi desenvolvido pela equipe acadêmica e técnica do Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ. Este ocorreu graças ao fomento da CENPES/Petróleo Brasileiro S.A., CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API – American Petroleum Institute (2005). *Recommended practice for planning, designing and construction fixed offshore platforms – Working stress design*, API-RP-2A – WSD, 21st Edition, USA.
- API – American Petroleum Institute (2011). ISO 19901-4:2003 (Modified), *Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures*, Part 4 – Geotechnical and foundation design considerations, API-RP-2GEO. USA.
- Costa, R. G. B. (2008) *Análise paramétrica das condições de ancoragem de plataformas offshore utilizando estacas torpedo a partir de elementos finitos*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 109 p.

- Finnie, I.M.S., Randolph, M.F. (1994) *Punch-Tough and liquefaction induced failure on shallow foundations on calcareous sediments*. Proceeding International Conference on Behaviour of Offshore Structures – BOSS'94, Boston, v. 1, p. 217-230.
- Freitas, A. C. (2014) *Comportamento à tração de estaca-torpedo modelo em argila mole*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 457 p.
- Gilbert, R.B., Morvant, M., Audibert, J. (2008) *Torpedo piles joint industry project – model torpedo pile tests in kaolinite test beds*. Minerals Management Service, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, Final Project Report, (575).
- Hossain, M.S., Kim, Y., Gaudin, C. (2014) *Experimental investigation of installation and pullout of dynamically penetrating anchors in clay and silt*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering @ ASCE, 140(7).
- Li, D.Y., Ke, P.F., Ou, L.J., Xing, X.Q., Liu, S.W. (2014) *Directional stability study of torpedo anchors*. Appl. Mech. Mater. 556, 1310-1313 (Trans Tech Publications).
- Liu, X., Fu, Y., Yeo, C.H., Li, Y., Lee, F.H., Gu, H., Sun, J. (2016) *Technique for modeling installations and pullout of DIAs on a beam centrifuge*. Geotechnical Testing Journal.
- Medeiros Junior, C.J., Hassui, L.H., Machado, R.D. (1996) *Pile for anchoring floating structures and process for installing the same*. Brazilian Patent Number 9603599-4, United States Patent Number 6106199. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US6106199A/id>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- Medeiros Junior, C.J. (2001) *Torpedo anchor for deep water*. In: Deep Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, RJ, October.
- Oliveira, J.R.M.S. (2005) *Modelagem centrífuga de um problema de interação solo estrutura*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 324 p.
- O'Loughlin, C.D., Randolph, M.F., Richardson, M. (2004) *Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors*. Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- O'Loughlin, C.D., Richardson, M. D., Randolph, M.F., Gaudin, C. (2013) *Penetration of dynamically installed anchors in clay*. Géotechnique, 63(11), 909-919.
- Raaj, S.K., Saha, N., Sundaravadivelu, R. (2023) *Exploration of deep-water torpedo anchors – A review*. Ocean Engineering, v. 270, p. 113607.
- Richardson, M., O'Loughlin, C., Randolph, M., Gaudin, C. (2009) *Setup following installation of dynamic anchors in normally consolidated clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Soriano, C.Y., Andrade, R.B., Mollepaza, S.F., Almeida, M.S.S., Almeida, M.C.F., de Oliveira, J.R.M.D.S., Trejo, P.C. (2019) *Simulation of a weak layered profile using geotechnical centrifuge*. In: Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges, p. 477-484. IOS Press.
- Tobita, T., Iai, S. (2016) *New modelling of models for dynamic behavior of a pile foundation*. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(33), 1200-1203.