

Estudo sobre adensamento térmico na capacidade de permanência de estacas torpedo por meio de modelos centrífugos

Marina de Souza Ferreira
Engenheira Civil, UENF, marinadesferreira@gmail.com

Fernando Saboya Jr.
Prof., UENF, Campos - RJ, Brasil, saboya@uenf.br

Sérgio Tibana
Prof., UENF, Campos – RJ, Brasil, tibana@uenf.br

Rodrigo Martins Reis
Prof., UENF, Campos – RJ, Brasil, reis@uenf.br

Ricardo Garske Borges
Engenheiro Civil, Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, garske@petrobras.com.br

RESUMO: O uso de estacas torpedo como elemento de ancoragem de estruturas offshore, alia simplicidade, baixo custo, quando comparados com outras alternativas, e logística trivial para sua instalação. No entanto, sua baixa capacidade de permanência puramente vertical impõe seu uso considerando o trabalho sob cargas inclinadas para se atingir a resistência requerida. Portanto, tornam-se importantes ações que resultem em uma melhor resposta do sistema de ancoragens e, dentre elas, o adensamento térmico é uma das alternativas, tendo a própria âncora como elemento de propagação de calor. O aquecimento de solos finos, tal como argilas marinhas, ocasiona o aparecimento de excesso de poropressão que, após dissipado resulta no adensamento térmico do solo adjacente ao torpedo, melhorando significativamente a sua capacidade de permanência. Ensaaios em centrífuga geotécnica foram executados para se estudar a influência do gradiente térmico no melhoramento da resposta mecânica do solo e conseqüentemente do arranjo solo x torpedo. Os resultados são promissores, onde ganho de resistência não drenada, por meio de ensaios T-bar, são consideráveis.

PALAVRAS-CHAVE: Ancoragens Offshore, Estacas Torpedo, Centrífuga Geotécnica, Melhoramento Térmico.

Torpedo piles as anchoring elements for offshore structures combines simplicity, low cost compared to other alternatives, and straightforward logistics for installation. However, their low purely vertical load-bearing capacity implies them to work under inclined loads to achieve the required resistance. Therefore, interferences leading to a better performance of the anchoring system are necessary, and among them, thermal consolidation is one alternative, with the anchor itself acting as a heat propagation element. Heating fine soils, such as marine clays, causes excess pore pressure to appear, which, once dissipated, results in thermal consolidation of the soil adjacent to the torpedo, significantly improving its mechanical response. Geotechnical centrifuge tests were conducted to study the influence of thermal gradient on the enhancement mechanical response and consequently on the soil-torpedo arrangement. The results are promising, with considerable gains in undrained strength detected by T-bar tests carried out during the centrifuge tests.

KEY-WORDS: Offshore Anchoring, Torpedo Pile, Geotechnical Centrifuge, Thermic Reinforcement.

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo em ambiente offshore tem avançado tecnologicamente nas últimas décadas abrindo horizontes para exploração em águas ultra-profundas. Uma das áreas mais impactadas pelo desenvolvimento tecnológico é aquela referente à ancoragem de estruturas, principalmente, as permanentes como a própria plataforma. As estacas torpedo, já bastante usadas no Brasil em ancoragens de estruturas

temporárias, surgem como alternativa de grande interesse pois apresentam grandes vantagens em relação às demais ancoragens mais usadas no mundo. As estacas torpedo não necessitam de aparo especial para seu lançamento, é cravada pelo peso próprio e tem baixo custo de fabricação. No entanto, sua baixa capacidade de permanência sob tração pura é a principal desvantagem em relação à sua concorrente mais próxima, a estaca de sucção, cuja instalação é muito mais complexa e onerosa. Por este motivo, as estacas torpedo tem que trabalhar sob cargas inclinadas em catenárias, ao contrário do sistema taut-leg usado nas estacas de sucção. Como consequência desse arranjo a área ocupada pelas amarras em catenária é excessivamente alta, o que traz grandes riscos e dificuldades de operações durante à exploração e produção de petróleo, especialmente em águas ultra profundas.

Em geral, o leito marinho brasileiro é constituído de argilas levemente a normalmente adensadas, plásticas e com baixa capacidade de suporte ou baixa resistência não drenada. As soluções adotadas para instalação de ancoragens nesses solos reside simplesmente no aumento de âncoras ou no incremento de suas dimensões. Ambas as possibilidades têm grandes inconveniente de logística e do aumento do números de amarras, congestionando sobremaneira o espaço submarino usado para atividades de exploração e produção.

Assim, uma alternativa seria promover a melhoria da resposta mecânica do solo do leito marinho. No entanto, técnicas plenamente dominadas e usadas em ambiente onshore, tais como inclusões rígidas, sobreadensamento mecânico, vácuo, eletro-osmose entre outros não são viáveis em águas ultra-profundas.

Por outro lado, estudos desenvolvidos nas ultimas décadas, inicialmente voltados para elucidar a consequência do incremento da temperatura no solo devido à passagem de cabos elétricos subterrâneos e armazenamento de rejeitos radioativos, mostraram efeito benéfico a longo prazo no que diz respeito à compressibilidade e resistência. Com a popularização das estacas trocadoras de calor, esses estudos foram impulsionados corroborando com os efeitos positivos do incremento de temperatura sob algumas situações específicas.

Baseado nesses estudos, o trabalho aqui propõe a aplicação de gradiente térmico para promover o adensamento nas zonas adjacentes à estaca torpedo aumentando assim a resistência não drenada nesta zona. Para isso ensaios em centrífuga geotécnica foram executados para elucidar os mecanismos envolvidos no melhoramento do solos bem como aferir o ganho de resistência não drenada, uma vez que a parcela de atrito na estaca torpedo depende diretamente deste parâmetro. Nesses estudos, a estaca torpedo é a própria fonte da calor a ser ativada depois ou durante a cravação. O modelo foi instrumentado com termopares e transdutores de poropressão em locais estratégicos e a resistência não drenada foi obtida por meio de quatro ensaios T-bar executados simultaneamente no modelo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros estudos sobre o efeito da temperatura em solos em geral foi conduzido por (Campanella; Mitchell, 1968). Os autores observaram respostas diferentes de um solo argiloso após este sofrer um ciclo de aquecimento e resfriamento, resposta essa que por sua vez era dependente da sua história de tensão. Para os solos normalmente ou levemente sobreadensados havia uma contração volumétrica plástica, enquanto aumento de volume era observado em argilas fortemente sobreadensadas. Em aquecimento rápido, esta tendência de variação de volume se refletia no desenvolvimento do excesso de poropressão, positivo para solos NA e negativos para solos PA.

Posteriormente, diversos estudos (Delage; Sultan; Cui, 2012; Houston; Houston; Williams, 1985; Huancollo Et Al., 2023; Maghsoodi; Cuisinier; Masrouri, 2020; Samarakoon; Ghaawod; McCartney, 2019; Sultan; Delage; Cui, 2002) entre outros mostraram ganhos consideráveis de resistência e diminuição da compressibilidade, indicando a potencialidade da técnica de adensamento térmico. Ghaawod; McCartney; Saboya, (2022) e Ghaawod; McCartney, (2018) realizaram ensaios em centrífuga e observaram incremento de poropressão no momento em que a temperatura é aumentada e com posterior dissipação após estabelecimento de fluxo térmico permanente.

Outros pesquisadores, Abuel-Naga et al., 2007; Trani; Bergado and Abuel-Naga, 2008 observaram que a poropressão retornava a valores negativos para argilas fortemente sobreadensadas.

Alguns autores propuseram soluções numéricas/analíticas para o problema do adensamento em torno de uma fonte pontual de calor em uma massa de solo saturado (Booker; Savvidou, 1984; Chaudhry et al., 2019; Savvidou; Booker, 1989) com boa aderência aos estudos experimentais.

Huancollo et al., 2023; Reis et al., 2023 realizaram ensaios triaxiais com controle de temperatura e concluíram que o aquecimento rápido não drenado seguido pelo adensamento e posterior resfriamento leva ao incremento significativo de resistência não drenada de solos plásticos, além da diminuição drástica da deformação axial para atingir a ruptura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram executados em um container cilíndrico de 464mm de diâmetro interno e 500mm de altura (Figura 1a). Para monitoramento do processo de adensamento, três transdutores de poropressão (PP C) foram instalados na parede do container e dois transdutores de deslocamentos à laser indicavam os recalques nessa fase de confecção do modelo.

A estaca torpedo foi confeccionada em alumínio, com 250mm de comprimento e 19mm de diâmetro externo, tendo no seu interior uma resistência elétrica com potência de 750W e comprimento de 200mm (Figura 1b). Três estações de monitoramento foram instaladas a 30, 60 e 120mm de distância da fonte da calor (estaca torpedo) para monitorar a distribuição de temperatura e também de poropressão durante o aquecimento, por meio de termopares e transdutores de poropressão, respectivamente.

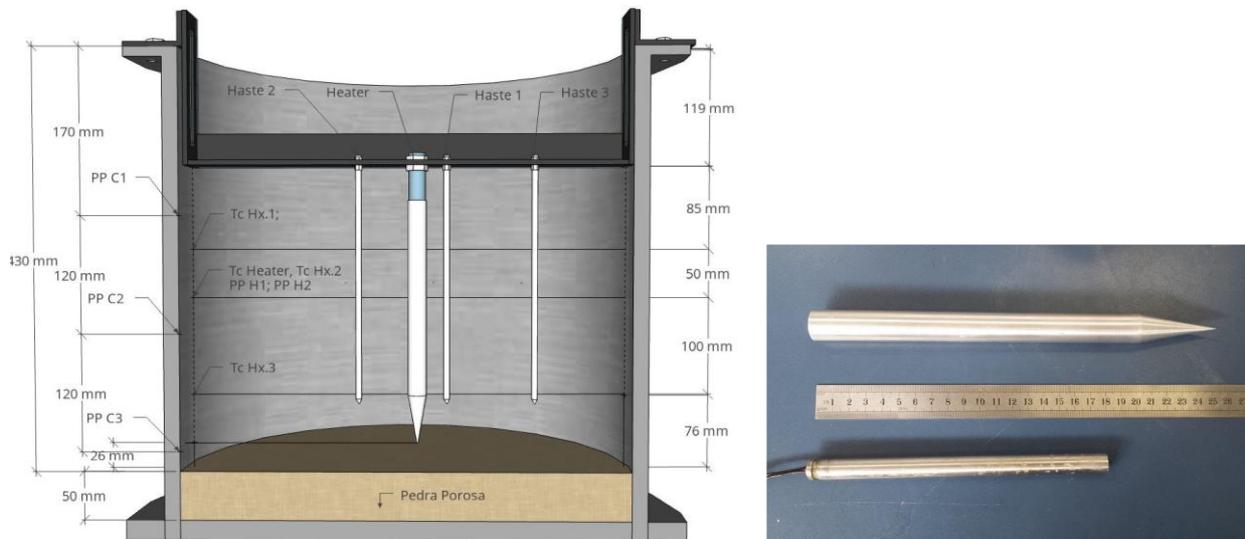


Figura 1. a) Arranjo geral do container, heater e estações de monitoramento; b) Detalhe do heater (torpedo)

Os termopares estão instalados nas estações nas profundidades de 50, 100 e 200mm. Nas estações 2 e 3 (afastadas de 60 e 120mm) estão instalados transdutores de poropressão na profundidade de 100mm, como pode ser visto na Figura 2.

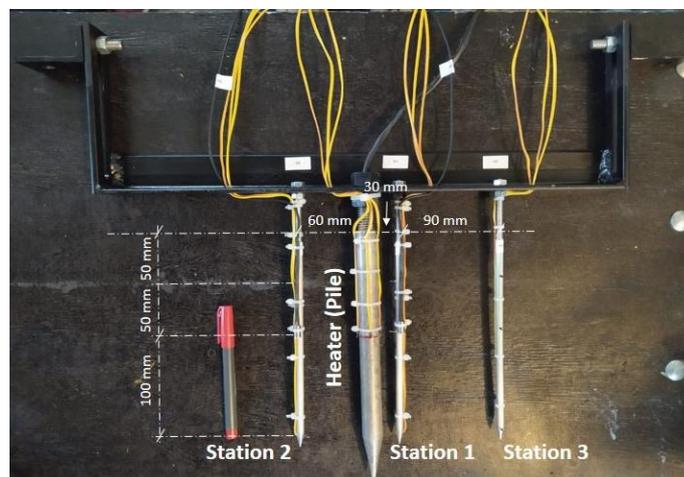


Figura 2. Detalhe das estações de monitoramento e da estaca torpedo

Para determinação da resistência não drenada durante o voo na centrífuga, foram utilizados penetrômetros do tipo T-bar. Como um dos objetivos do estudo era determinar o ganho de resistência com a distância da fonte de calor, quatro ensaios T-bar eram executados simultaneamente, para isso, foi desenvolvido um sistema de cravação onde cada T-bar era posicionado em uma distância específica da fonte de calor (Figura 3). Essas distâncias correspondem a 2, 3, 4 e 8 vezes o diâmetro da estaca.

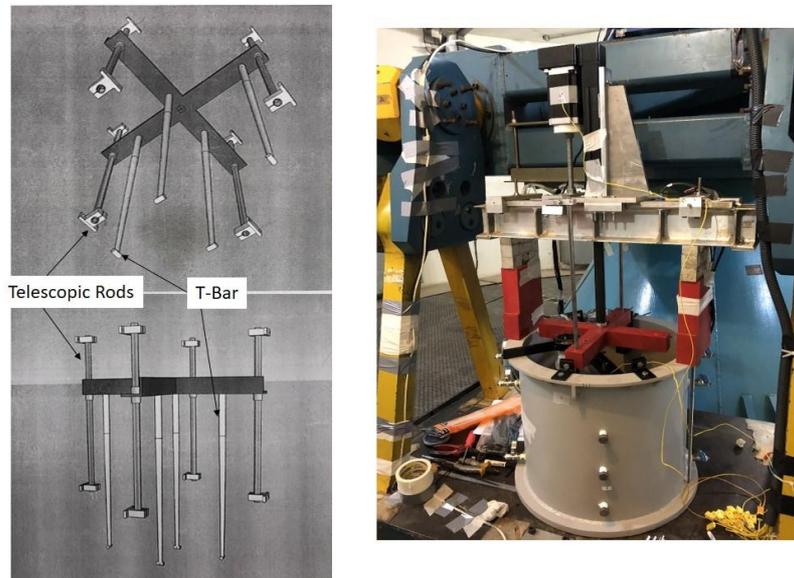


Figura 3. Detalhe do sistema de cravação dos T-bars e após instalado na centrífuga geotécnica

3.1 Preparação do modelo

O solo usado nos ensaios é resultante de uma mistura de caulim (40%) e metacaulim (60%) e moldado inicialmente com teor de umidade de 1,5 vezes o limite de liquidez. Após homogeneização, o solo apresentava 63% da fração silte e 35,5% de fração argila com IP de 19%. Para acelerar o processo de adensamento na centrífuga, procedeu-se previamente o adensamento mecânico em um consolidômetro de grandes dimensões.

Após a preparação, uma quantidade de solo necessária para formar uma camada de 70mm após adensamento, era adicionada ao container cilíndrico e adensada sob uma tensão levemente superior à tensão geostática equivalente à alcançada na centrífuga naquela profundidade. Usando o mesmo procedimento, as três camadas sobrejacentes foram formadas, para totalizar uma altura de 280mm de solo e obter um OCR médio de 2,5 durante vôo da centrífuga, tal como mostrado na Figura 4.

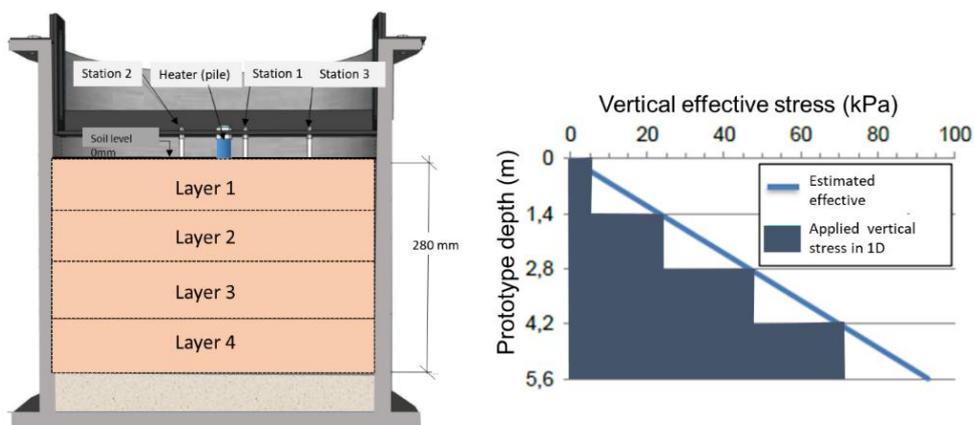


Figura 4. Preparação do modelo com adensamento prévio no consolidômetro

3.2 Ensaios Centrífugos

Após o adensamento no consolidômetro, a estaca (fonte de calor) e as hastes de monitoramento com os instrumentos são cravadas estaticamente no solo. Posteriormente, o sistema de cravação dos T-bars é posicionado no container e o modelo re-adensado na centrífuga geotécnica a uma aceleração de 20g.

Ao todo foram executados três ensaios na centrífuga geotécnica, sendo um de referência, à temperatura ambiente e outros dois com aquecimento e posterior resfriamento da estaca a 65°C e a 45°C, denominados ensaios E1, E2 e E3, respectivamente.

No ensaio E1 ao se atingir a aceleração de 20g e as leituras dos instrumentos mostrarem estabilização no readensamento, o sistema de T-bar é acionado a uma velocidade de 20mm/s para assegurar condições não drenadas, para execução de 4 ensaios simultâneos a diferentes distâncias da estaca.

No ensaio E1, de referência, os quatro T-bars eram esperados apresentar resultados iguais, no entanto, devido ao efeito de bordo e da própria variabilidade do solo, foi definida uma média entre eles que será usada para comparação com os ensaios E2 e E3. A Figura 5 mostra os perfis de s_u bem como a média obtida no ensaio E1 de referência.

Os ensaios E2 e E3 são preparados de maneira semelhante aos ensaios E1, sendo que esses incluem a etapa de adensamento térmico, isto é, a estaca sofre aquecimento de 65°C e 45°C respectivamente, e depois da estabilização das poropressões térmicas, são deixadas esfriarem naturalmente. A distribuição de temperatura com o tempo, em cada estação de monitoramento de E2 e E3 em função da distância normalizada está mostrada na Figura 6.

Nas estações de monitoramento 1 e 2 há, em cada, um sensor de poropressão instalado na profundidade de 100mm (escala do modelo). As poropressões devido ao aquecimento estão apresentadas na Figura 7, onde nota-se um pico no momento do aquecimento e posterior dissipação durante o adensamento térmico. Após resfriamento, observa-se um aumento na poropressão, comportamento típico de solos levemente sobreadensados.

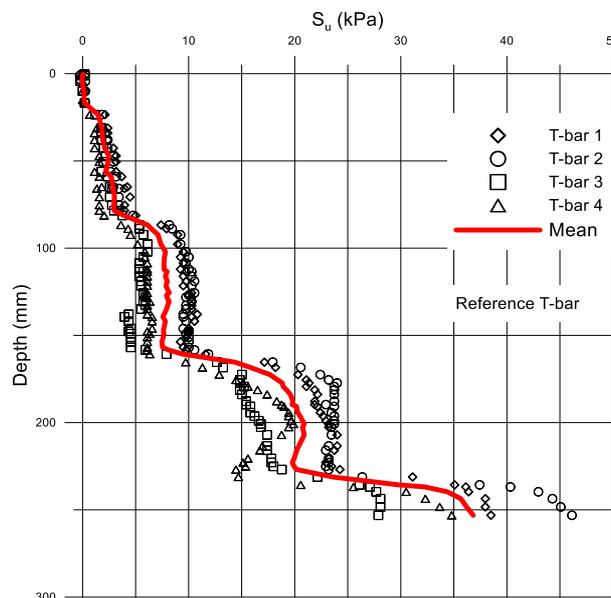


Figura 5. Perfil de resistência não drenada no ensaio E1 para os quatro T-bars executados

Após o adensamento térmico e total resfriamento do modelo, ensaios de T-bar foram executados, onde percebe-se um ganho considerável de resistência, sendo este mais evidente nas profundidades compreendidas entre 100 e 200mm e para o T-bar mais próximo à fonte de calor (estaca), onde o ganho de resistência atinge valores de 280% quando comparado com os valores de referência (Figura 8)

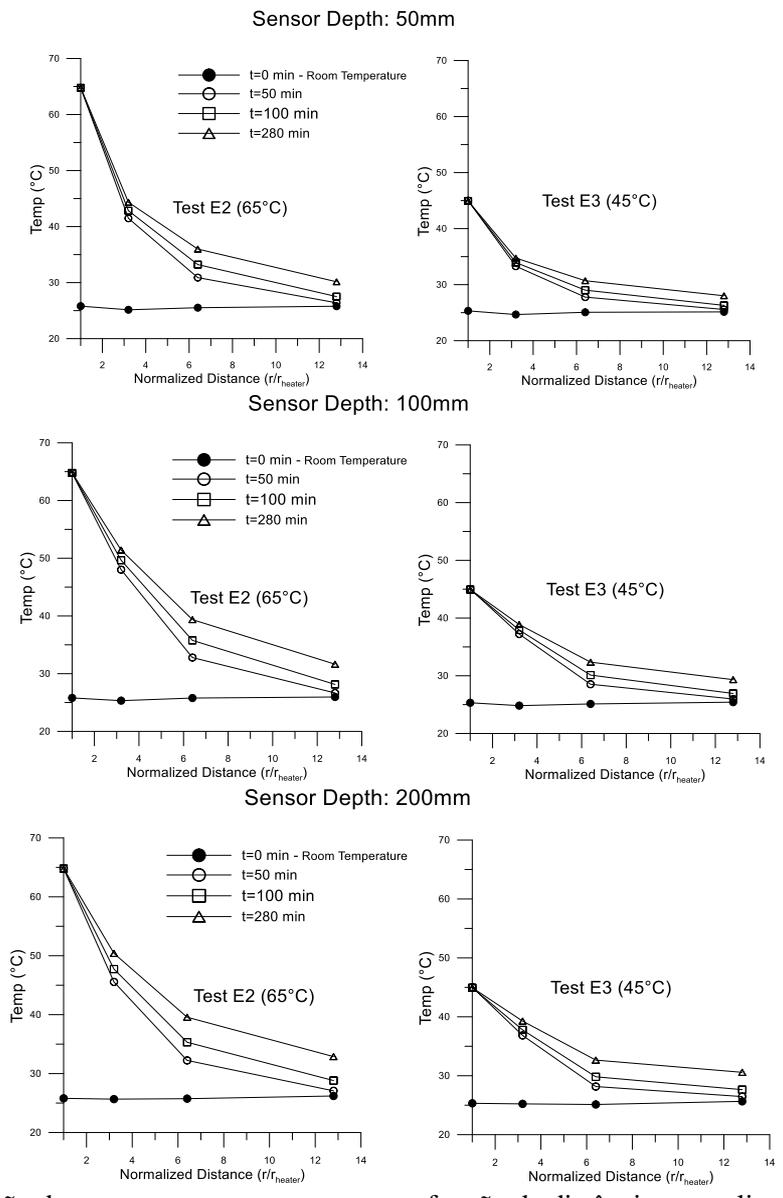


Figura 6. Distribuição de temperatura com o tempo em função da distância normalizada da fonte de calor

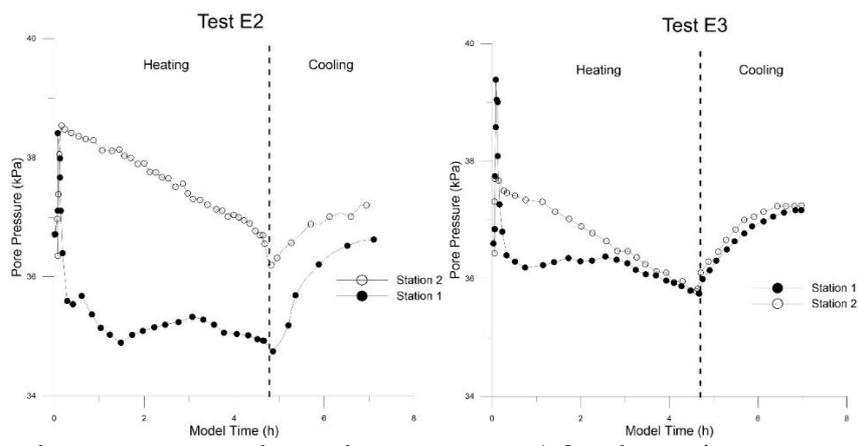


Figura 7. Variação das poropressões observada nas estações 1 e 2 e de monitoramento após aquecimento e resfriamento

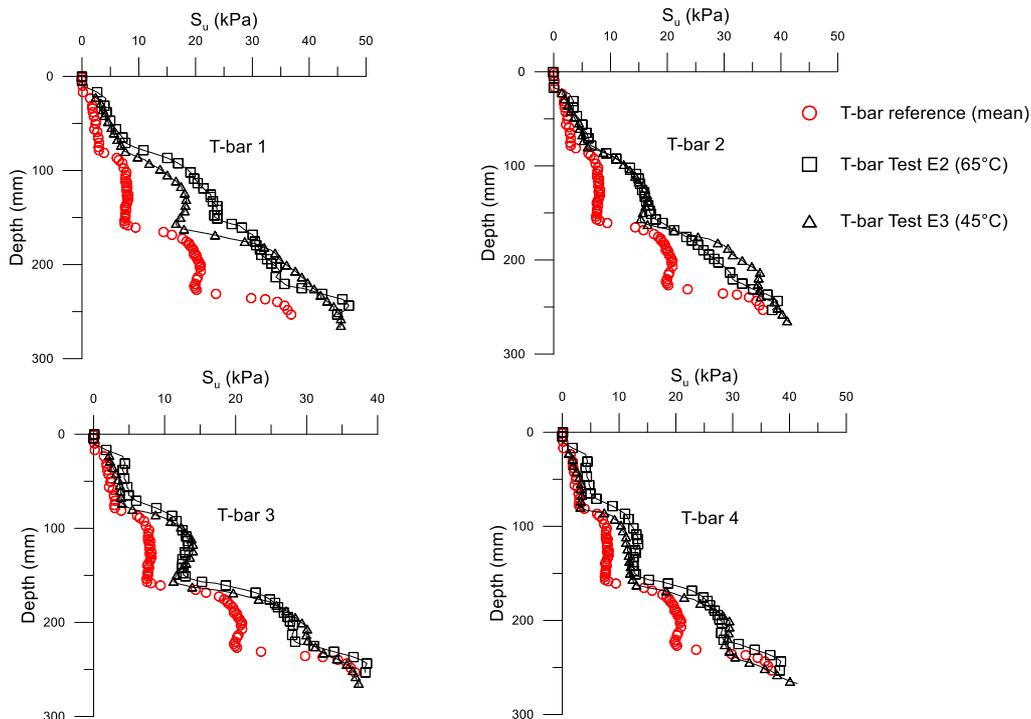


Figura 8. Comparação entre os perfis de resistência não drenada entre os ensaios E1, E2 e E3.

4 CONCLUSÕES

O efeito do adensamento térmico, sob variação de temperatura em solos moles, vem sendo comprovado ao longo da última década por meio de ensaios especiais em laboratório, mais especificamente ensaios triaxiais e oedométricos. Aqui, usou-se a modelagem física em centrífuga geotécnica, para comprovar o efeito da temperatura no ganho da capacidade de permanência de ancoragens tipo torpedo, cujo valor é diretamente ligado à resistência não drenada do solo onde estão inseridas. Assim, para verificar a eficiência do método e sua aplicação em ancoragens offshore, foram realizados 3 ensaios em centrífuga, sendo um de referência e os outros dois com adensamento térmico sob níveis de temperatura diferentes, 65°C e 45°C.

Observa-se um ganho considerável em ambos os casos, no entanto os ganhos de resistência não drenada após adensamento térmico, foram mais robustos no caso E2 sob temperatura mais elevada. Ainda assim, observou-se ganhos de 200% no ensaio E3, de temperatura mais baixa nas zonas mais próximas à fonte de calor.

Os ensaios mostraram a eficiência da técnica e sua possibilidade de uso em águas profundas onde a fonte de calor é a própria ancoragem tipo torpedo. Isso tem como consequência a diminuição de números de estacas no sistema de ancoragens bem como a verticalização das amarras, diminuindo consideravelmente o congestionamento submarino que tanto impacta negativamente as operações de exploração.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à Petrobras, ao CENPES e à CAPES pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T., Bouazza, A., Pender, M., Ramana, G. V., Bellia, Z., Ghembaza, M. S., Belal, T., Cheng, W., Hong, P. Y., Pereira, J. M., Cui, Y. J., Y. J. Jun, Tang, A. M., Chen, R. Peng, Coccia, C. J. R., McCartney, J. S., Cui, W., Potts, D. M., Zdravković, L., ... Ng, C. W. W. (2007). Volume change behaviour of saturated clays under drained heating conditions: experimental results and constitutive modeling H.M. *Computers and Geotechnics*, 30(13), 1303–1336. <https://doi.org/10.1002/nag>

- Booker, J. R., & Savvidou, C. (1984). Consolidation around a spherical heat source. *International Journal of Solids and Structures*, 20(11–12), 1079–1090. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(84\)90091-X](https://doi.org/10.1016/0020-7683(84)90091-X)
- Campanella, R., & Mitchell, J. (1968). Influence of Temperature Variations on Soil Behavior. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(3), 609–734.
- Chaudhry, A. A., Buchwald, J., Kolditz, O., & Nagel, T. (2019). Consolidation around a point heat source (correction and verification). *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43(18), 2743–2751. <https://doi.org/10.1002/nag.2998>
- Delage, P., Sultan, N., & Cui, Y. J. (2012). On the thermal consolidation of Boom clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 343–354. <https://doi.org/10.1139/t99-105>
- Ghaaowd, I., McCartney, J. S., & Saboya, F. (2022). Centrifuge modeling of temperature effects on the pullout capacity of torpedo piles in soft clay. *Soils and Rocks*, 45(1). <https://doi.org/10.28927/SR.2022.000822>
- Ghaawod, I., & McCartney, J. S. (2018). Centrifuge Modeling of Temperature Effects on the Pullout Capacity of Energy Piles in Clay. *Proceedings of the 43rd Annual Conference on Deep Foundations*, 24–27.
- Houston, S. L., Houston, W. N., & Williams, N. D. (1985). Thermo-mechanical behavior of seafloor sediments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(11), 1249–1263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:11\(1249\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:11(1249))
- Huancollo, H. J. M., Saboya Jr, F., Tibana, S., McCartney, J. S., & Borges, R. G. (2023). Thermal Triaxial Tests to Evaluate Improvement of Soft Marine Clay through Thermal Consolidation. *GEOTECHNICAL TESTING JOURNAL*, 46(3), 579–597. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220154>
- Maghsoodi, S., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2020). Thermal effects on mechanical behaviour of soil–structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(1). <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0583>
- Reis, F. B., Saboya, F., Tibana, S., Borges, R. G., & Abreu Fernandes, R. D. (2023). Physical modelling of subsea structure removal via thermally induced pore pressure. *Ocean Engineering*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116044>
- Samarakoon, R., Ghaaowd, I., & McCartney, J. S. (2019). Impact of drained heating and cooling on undrained shear strength of normally consolidated clay. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 0(217729), 243–249. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99670-7_31
- Savvidou, C., & Booker, J. R. (1989). Consolidation around a heat source buried deep in a porous thermoelastic medium with anisotropic flow properties. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 75–90.
- Sultan, N., Delage, P., & Cui, Y. J. (2002). Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, 64(2–3), 135–145. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00143-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00143-0)
- Trani, L. D. O., Bergado, D. T., & Abuel-Naga, H. M. (2008). *Thermal Effects on Undrained Shear Strength of Normally Consolidated Soft Bangkok Clay*. 40972(April 2015), 1069–1076. [https://doi.org/10.1061/40972\(311\)134](https://doi.org/10.1061/40972(311)134)