

Adensamento Térmico: Proposta para Melhoria de Resposta Mecânica de Ancoragens Offshore em Solos Marinhos Moles

Hidden Jaime Machaca Huancollo

Catholic University of San Pablo and Continental University, Arequipa, Peru, hjmachaca@ucsp.edu.pe

Poliana do Carmo Jorge

Mestranda, UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, polianac.jorge@gmail.com

Jheyce Souza Moreira Oliveira

Doutoranda, UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, jheyce.souza@gmail.com

Sérgio Tibana

Professor, UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, stibana@gmail.com.

Fernando Saboya Jr.

Professor, UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, saboya@uenf.br

RESUMO: Em razão da profundidade de instalação das ancoragens offshore e pela baixa resistência do solo em leito marinho torna-se imperativo desenvolver metodologias para incrementar a eficiência dessas ancoragens. É sabido que o incremento de temperatura em solos finos pode melhorar consideravelmente seus parâmetros mecânicos. Os efeitos da temperatura na melhoria da resposta mecânica de solos argilosos moles são investigados nesta pesquisa, através de ensaios triaxiais térmicos. O estudo experimental foi realizado em amostras reconstituídas de argila marinha brasileira. É evidenciado na literatura, que solos de baixa permeabilidade exibem variação de poropressão quando submetidos a incrementos de temperatura em situações não drenadas, as quais, quando dissipadas resultam em deformação volumétrica contrativa. Os resultados demonstraram que a variação de temperatura interfere na resposta mecânica do solo, uma vez que o adensamento resultante do aquecimento drenado induz uma aceleração das deformações volumétricas. Neste estudo, observou-se que um acréscimo de 32°C provocou um aumento da resistência ao cisalhamento não drenada de 98% em relação àquela obtida em temperatura ambiente controlada de 23°C±1°C. Com base nas análises, melhorar a resposta mecânica de solos moles através da consolidação térmica torna-se uma solução atrativa e demonstra o seu potencial para contribuir com a capacidade de permanência de âncoras offshore instaladas em águas profundas.

PALAVRAS-CHAVE: Adensamento Térmico, Fundações Offshore, Argila Marinha, Triaxial Térmico.

ABSTRACT: Due to the depth of installation of offshore anchors and the low soil strength in the seabed, it becomes imperative to develop methodologies to enhance the efficiency of these anchors. It is known that the increase in temperature in fine soils can significantly improve their mechanical parameters. The effects of temperature on the improvement of the mechanical response of soft clayey soils are investigated in this research through thermal triaxial tests. The experimental study was conducted on reconstituted samples of Brazilian marine clay. It is evidenced in the literature that low permeability soils exhibit pore pressure variation when subjected to temperature increments in undrained situations, which, when dissipated, result in contractive volumetric deformation. The results demonstrated that temperature variation interferes with the soil's mechanical response, as the resulting consolidation from drained heating induces an higher rates of volumetric deformations. In this study, it was observed that an increase of 32°C caused an increase in the undrained shear strength of 98% compared to that obtained at a controlled ambient temperature of 23°C ± 1°C. Based on the analyses, improving the mechanical response of soft soils through thermal consolidation becomes an attractive

solution and demonstrates its potential to contribute to the load-bearing capacity of offshore anchors installed in deep waters..

KEYWORDS: Thermal consolidation, Offshore Foundation, Marine Clay, Thermal Triaxial.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o comportamento termomecânico dos solos argilosos tem sido amplamente investigado. Observações na literatura indicam que aumentos de temperatura exercem grande influência, sobretudo nas mudanças volumétricas dos solos de granulação fina (Sultan; Delage; Cui, 2002; Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007; Coccia; McCartney, 2016).

As primeiras pesquisas sobre este tema foram publicadas por Campanella e Mitchell (1968), onde os autores observaram que o incremento de temperatura levava a uma variação volumétrica permanente dos solos normalmente adensados, e conseqüentemente melhorando a sua resposta mecânica. Nesse aspecto, Campanella e Mitchell (1968) destacam que, ao se aquecer um solo argiloso, saturado e normalmente adensado, este desenvolve um excesso positivo na poropressão (devido expansão volumétrica diferencial experimentada pela água dos poros em relação aos minerais sólidos do solo) que posteriormente é dissipado, levando a reorganização das partículas e conseqüente redução de seu volume. Além disso, observou-se na literatura que as mudanças na viscosidade do fluido dos poros também são um mecanismo presente na contração termoplástica dos solos. De acordo com Ze-Jian Chen e Jian-Hua Yin (2023), temperaturas mais altas transformam a água adsorvida em água livre, reduzindo a viscosidade do contato mineral x mineral. Dessa maneira, uma consolidação adicional é induzida pelo aquecimento provocando uma compressão.

Esses estudos são de grande importância para o entendimento do comportamento do solo frente a diversas aplicações geotécnicas, tais como, o isolamento de resíduos nucleares, atividades de perfuração, injeção e produção de petróleo e solos adjacentes a cabos eletrificados (Cekerevac e Laloui, 2004), estacas geotérmicas (McCartney e Murphy, 2012; Casagrande et al., 2022), drenos verticais pré-fabricados (PVD) (Abuel-Naga; Bergado; Chaiprakaikeow, 2006; Chen et al., 2023), estabilidade de taludes (Loche e Scaringi, 2023) em que, o efeito da temperatura no comportamento mecânico dos geomateriais se mostra relevante.

Dentre aplicações descritas, a capacidade de permanência das ancoragens tipo torpedo se apresenta como mais uma área de enfoque para os estudos sobre a resposta dos solo sob influência da temperatura. Sabe-se que as argilas marinhas brasileiras apresentam baixa qualidade mecânica. Os estudos no campo geotécnico marinho envolvem muitas complexidades, entre as quais, nenhuma das técnicas de melhoramento de solos finos disponíveis podem ser aplicadas nesses ambientes. Dessa maneira, a compreensão clara dos efeitos da temperatura no comportamento desses solos, torna-se crucial para promover uma técnica térmica de melhoria da capacidade de permanência, permitindo que fundações offshore, como as estacas do tipo torpedo atuem também como a fonte de calor, objetivando causar adensamento térmico em seu entorno, e possam assim apresentar melhor resposta mecânica às solicitações.

Portanto, esse estudo propõe o adensamento térmico como técnica de melhoramento da resistência ao cisalhamento de solos marinhos moles.

2 METODOLOGIA

2.1 Amostragem e preparação do material

O comportamento termomecânico de uma argila marinha localizada na costa sul brasileira foi avaliado nesse estudo por meio de ensaios triaxiais especiais com controle de temperatura. As amostras usadas foram coletadas por meio de amostradores do tipo Shelby, que após serem extraídas e totalmente amolgadas foram posteriormente homogenizadas e reconstituídas em laboratório.

Os ensaios de caracterização seguiram os procedimentos preconizados nas normas brasileiras e as propriedades geotécnicas relevantes para esse solo são descritas na Tabela 1. Pela análise granulométrica (ABNT NBR 7181/84), o solo apresenta frações de 2,4% de areia fina, 27,5% de silte e 70,1% de argila.

Os corpos de prova desse estudo foram preparados com 230g de solo e dimensões de 76,2mm de altura e 38,0mm diâmetro em um molde cilíndrico bipartido utilizando consolidação anisotrópica sob tensão vertical de 100kPa, até atingir consistência suficiente para ser levado à célula triaxial..Após esta etapa, as amostras de solo seguiram para a célula triaxiais onde foram realizados os ensaios triaxiais tipo CIU.

Tabela 1 . Resumo das propriedades geotécnicas da argila marinha.

Norma	Parâmetro	Valor
ABNT NBR 6457/86	Umidade higroscópica	71.9 %
ABNT NBR 6508/84	Densidade Real dos Grãos	2.69 g/cm ³
ABNT NBR 6459/84	Limite de Liquidez (LL)	106.0 %
ABNT NBR 7180/84	Limite de Plasticidade (LP)	40.7 %

2.2 Programa Experimental

A campanha experimental visa caracterizar a resposta volumétrica termomecânica do solo por meio de ensaios triaxiais convencionais e térmicos.

Os ensaios triaxiais convencionais adensados hidrosticamente não drenados (CIU) foram realizados em temperatura ambiente controlada de 23°C ±1°C a fim de evidenciar o efeito da variação de temperatura na resistência do solo. Três testes, no total, foram executados para essa etapa, cada um sob tensão confinante efetiva constante diferente (100 kPa, 200 kPa e 400 kPa), sendo posteriormente cisalhados a uma velocidade constante de 0,06 mm/minuto..

Os ensaios térmicos foram realizados no equipamento triaxial térmico, que possui capacidade de induzir incrementos de temperatura em qualquer momento do ensaio. Este equipamento além das partes de um triaxial convencional possui uma célula resistente ao calor e um sistema de medição de temperatura autônomo com termopares e controle de temperatura interna. Um esquema do equipamento é mostrado na Figura 1.

A etapa térmica consistiu em seis testes, onde as variáveis controladas foram a temperatura, com ciclos de aquecimento e resfriamento e tensões efetivas constantes. Os ensaios triaxiais CIU consistiram em fases de saturação, adensamento mecânico, adensamento térmico a temperaturas de 40°C e 55°C, resfriamento e cisalhamento não drenado à temperatura ambiente, seguindo a mesma velocidade do ensaio triaxial convencional.

3 RESULTADOS

3.1 Adensamento térmico

Os resultados do adensamento térmico e incremento de temperatura em função da normalização dos índice de vazios, ef_2 - índice de vazios final depois do adensamento térmico sob tensão efetiva constante e ef_1 - índice de vazios final depois do adensamento mecânico, e a raiz do tempo dos ensaios triaxiais térmicos são mostrados na Figura 2. A normalização do índice de vazios foi utilizada devido aos estágios de consolidação, sendo a primeira uma consolidação mecânica isotrópica (100kPa) por cerca de 18 a 24 horas e após a consolidação térmica drenada por aproximadamente 24 horas.

A análise dos resultados revela que a temperatura influenciou fortemente na mudança de volume do solo. Observa-se que todas as amostras exibiram contração com o aumento da temperatura para um solo submetido a aquecimento drenado em condição normalmente adensada, o que coincide com as descobertas mencionadas em estudos anteriores (Campanella e Mitchell, 1968; Abuel-Naga; Bergado; Bouazza, 2007).

Comparando-se as deformações atingidas para uma mesma tensão confinante, nota-se que as deformações volumétricas induzidas por aquecimento foram maiores para a temperatura de 55°C. Esse comportamento se repetiu para as tensões de 200 kPa e 400 kPa.

Evidencia-se que fases mais longas do aquecimento provocarão uma fluência adicional e por consequência maiores reduções do volume.

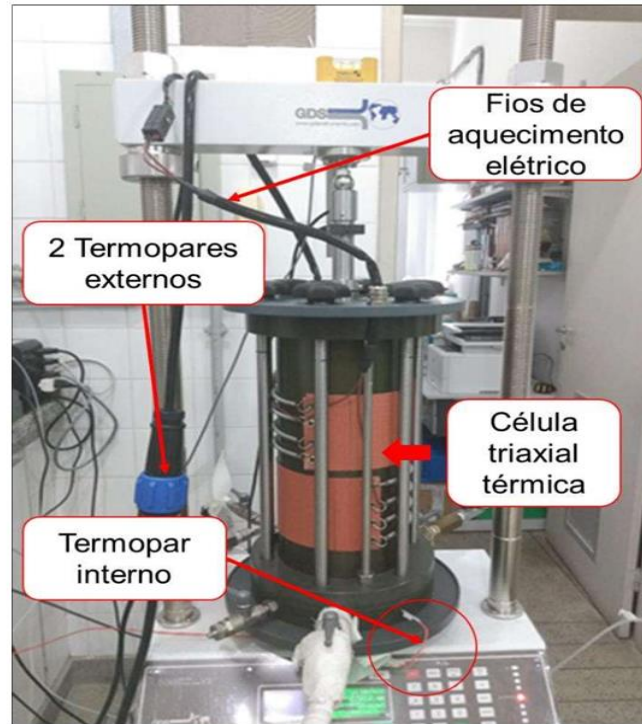


Figura 1. Equipamento triaxial térmico (Huancollo, 2020).

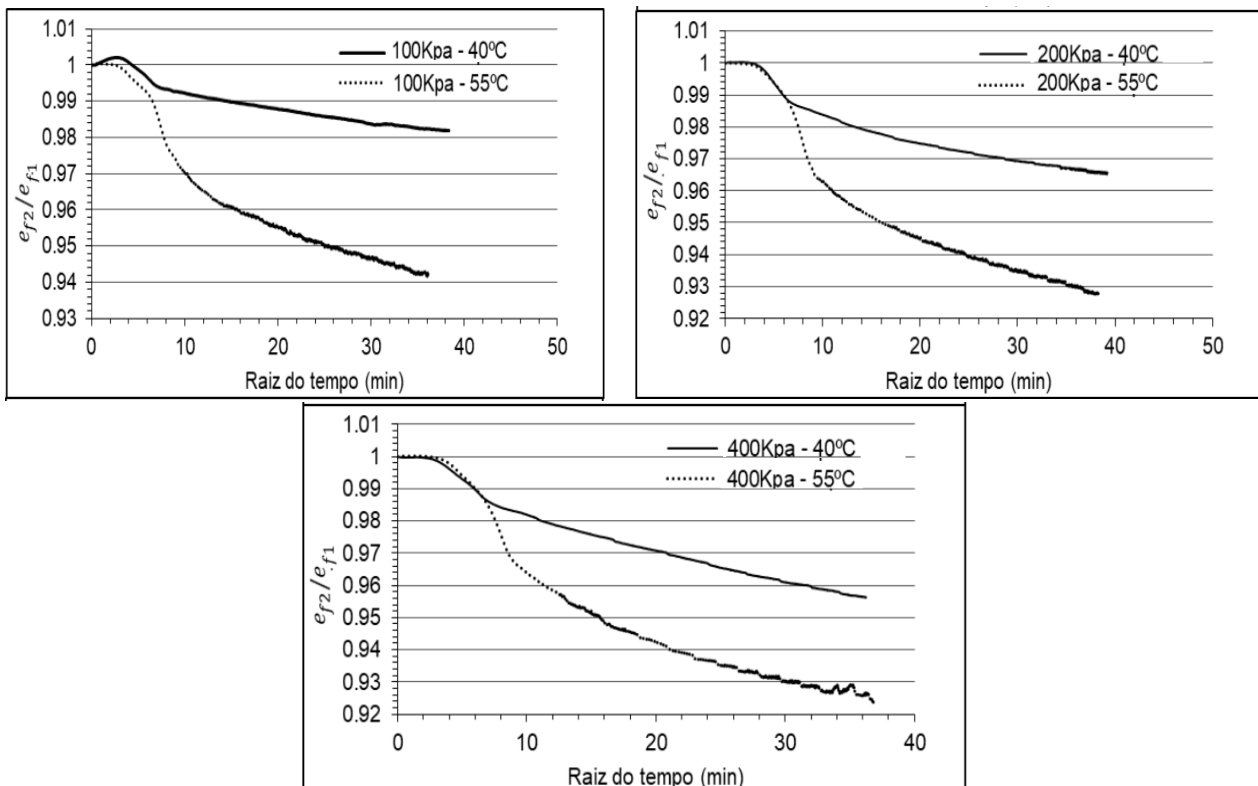


Figura 2. Curvas de adensamento térmico submetidas a incremento de temperatura 40°C e 55°C com diferentes tensões efetivas (Huancollo, 2020).

3.2 Efeito da temperatura na resistência ao cisalhamento do solo

A Figura 3 apresenta as curvas de tensão do desviadora versus deformação axial ($\sigma_d \times \epsilon_1$) e poropressão versus deformação axial ($\Delta u \times \epsilon_1$) para a argila adensada termicamente a 40°C e a 55°C. Os resultados são apresentados juntamente com os resultados dos ensaios convencionais, a fim de que sejam realizadas comparações entre eles.

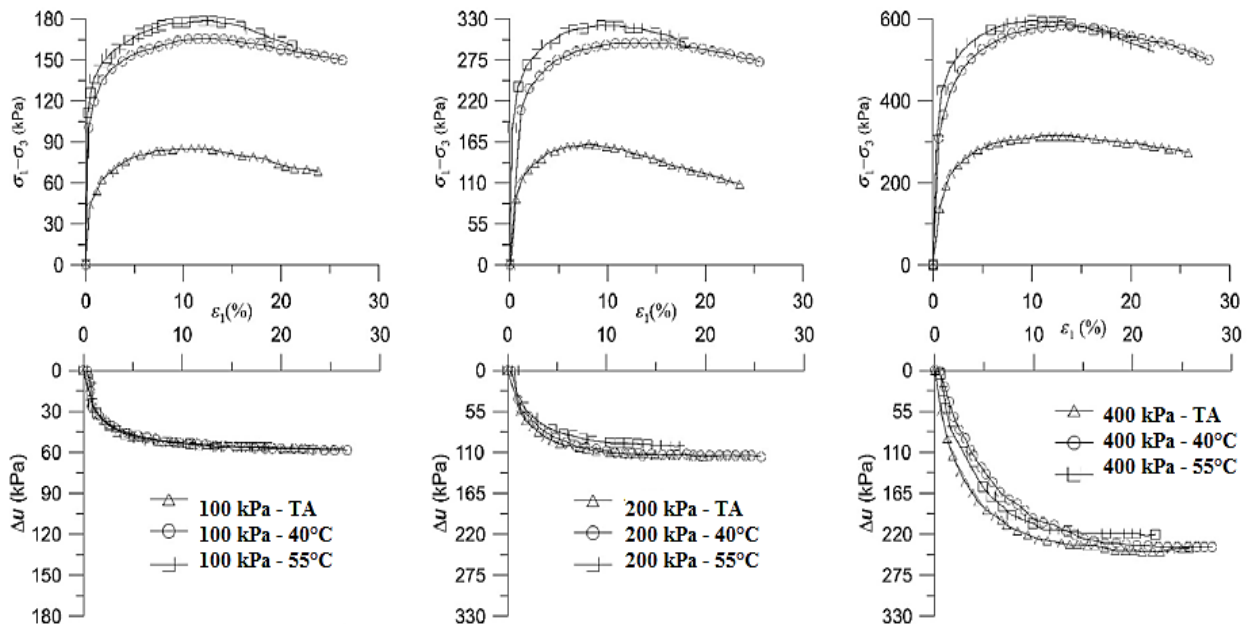


Figura 3. Curvas de tensão desviadora tensão versus deformação axial ($\sigma_d \times \epsilon_1$) e poropressão versus deformação axial ($\Delta u \times \epsilon_1$) (Huancollo et al., 2023)

Através das curvas pode-se observar que, em relação aos ensaios triaxiais convencionais à temperatura ambiente, os ensaios triaxiais térmicos realizados para a mesma tensão efetiva apresentaram resistência superiores, além de maior rigidez. Em relação a resistência ao cisalhamento não drenada o solo submetido a aquecimento drenado com temperatura de 40°C e posterior resfriamento, apresentou um aumento de 88% quando comparado a temperatura ambiente. Essa tendência continua com a temperatura de 55°C apresentando um acréscimo de 98% comparada a temperatura ambiente.

Quanto, a poropressão o incremento de temperatura não causou mudanças significativas em nenhuma das tensões analisadas.

3.3 Caminhos de tensão efetiva

Os caminhos de tensão efetiva ($q \times p'$) dos ensaios CIU são apresentados na Figura 5. Pode-se notar um aumento da tensão efetiva as amostras submetidas a diferentes temperaturas. Esse aumento foi maior para todos os casos comparados ao cisalhamento à temperatura ambiente, independente da tensão aplicada. Conforme discutido no item 3.1 do artigo, ocorre uma redução da resistência viscosa da água sob incremento de temperatura, desta forma, solos adensados termicamente tendem a possuir maior contato partícula-partícula da argila, apresentando uma maior rigidez inicial e por consequência deformações adicionais ocorreriam na fase inicial de cisalhamento. Em termos de tensões, isso significa que a tensão efetiva coincidiria com a tensão total até que ocorra a geração da poropressão. Como resultado obtém-se um aumento da resistência ao cisalhamento não drenada.

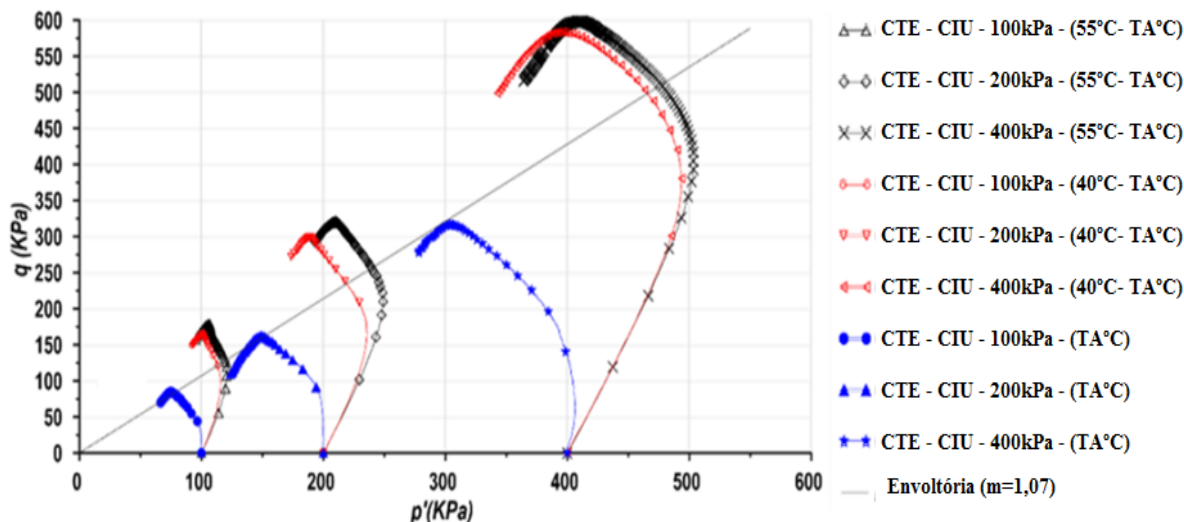


Figura 5. Trajetória de tensão efetiva sob variação de temperatura (Huancollo, 2020).

4 CONCLUSÕES

Os ensaios triaxiais térmicos mostraram importantes modificações na resposta sob solicitações não drenadas do material após o adensamento térmico sob diferentes tensões efetivas. Observa-se uma clara redução do índice de vazios após o ciclo térmico de aquecimento-resfriamento independente da tensão atuante. Nesse contexto, destaca-se quando a temperatura de adensamento sobe de 40°C para 55°C, apresentando essa última maiores deformações térmicas.

O material adensado termicamente apresentou maior rigidez inicial e maior resistência não drenada quando comparado ao mesmo teste realizado à temperatura ambiente. Por outro lado, não houve diferença significativa de resistência entre o material adensado a 40°C e a 55°C, apesar deste último ter mostrado maior redução de índice de vazios durante a fase de adensamento térmico. Uma comparação entre as tensões, denota que a resistência ao cisalhamento não drenada torna-se mais evidente com tensões confinantes mais altas. Para amostras adensadas termicamente a 400 kPa maiores valores de resistência não drenada são atingidas.

Os resultados indicam que a técnica é promissora quando se visa ao melhoramento de solos em geral, principalmente em locais onde a presença humana não é possível. Conclui-se que o adensamento térmico apresenta potencial de ser utilizado como técnica de melhoramento de argilas moles objetivando o incremento da capacidade de permanência de ancoragens em águas profundas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes, a Petrobras e a UENF pelo apoio ao desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUEL-NAGA, H.; BERGADO, D.; CHAI PRAKAIKEOW, S. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, n. 6, p. 359–370, dez. 2006.
- ABUEL-NAGA, H. M.; BERGADO, D. T.; BOUAZZA, A. Thermally induced volume change and excess pore water pressure of soft Bangkok clay. **Engineering Geology**, v. 89, n. 1–2, p. 144–154, 12 jan. 2007.
- CAMPANELLA, R. G.; MITCHELL, J. K. Influence of temperature variations on soil behavior. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 94, n. 3, p. 709–734, 1968.

- CASAGRANDE, B. et al. Investigation of a field-scale energy micropile in stratified soil under cyclic temperature changes. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 29, p. 100263, 1 mar. 2022.
- CEKEREVAC, C.; LALOUI, L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 28, n. 3, p. 209–228, 29 mar. 2004.
- CHEN, Z. J. et al. Experimental and molecular dynamics studies on the consolidation of Hong Kong marine deposits under heating and vacuum preloading. **Acta Geotechnica**, v. 18, n. 5, 2023.
- COCCIA, C. J. R.; MCCARTNEY, J. S. Thermal volume change of poorly draining soils I: Critical assessment of volume change mechanisms. **Computers and Geotechnics**, v. 80, p. 26–40, 1 dez. 2016.
- HUANCOLLO, H. J. M. **Melhoramento de Solos Moles Através da Técnica de Adensamento Térmico**. Dissertação de Mestrado—Campos dos Goytacazes -RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 28 out. 2020.
- HUANCOLLO, H. J. M. et al. Thermal Triaxial Tests to Evaluate Improvement of Soft Marine Clay through Thermal Consolidation. **Geotechnical Testing Journal**, v. 46, n. 3, p. 579–597, 1 maio 2023.
- LOCHE, M.; SCARINGI, G. Temperature and shear-rate effects in two pure clays: Possible implications for clay landslides. **Results in Engineering**, v. 20, 1 dez. 2023.
- MCCARTNEY, J. S.; MURPHY, K. D. Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations (DFI Young Professor Paper Competition 2012). **DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute**, v. 6, n. 2, p. 26–38, 23 dez. 2012.
- SULTAN, N.; DELAGE, P.; CUI, Y. J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. **Engineering Geology**, v. 64, n. 2–3, 2002.
- ZE-JIAN CHEN; JIAN-HUA YIN. A New One-Dimensional Thermal Elastic-Viscoplastic Model for the Thermal Creep of Saturated Clayey Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 149, n. 4, abr. 2023.