

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 da Interação Solo Estrutura em Estacas Geotérmicas: Uma Revisão da Literatura

Martha Maria Bezerra Santos

Mestranda em Engenharia Civil, UFPE, Recife, Brasil, martha.bezerra@ufpe.br

Ialysson da Silva Medeiros

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, Caruaru, Brasil, ialysson.medeiros@ufpe.br

Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Professora Doutora em Engenharia Civil, UFPE, Caruaru, Brasil, isabelamcvbello@hotmail.com

RESUMO: A busca por novas opções de climatização dos edifícios estimula o desenvolvimento de novas oportunidades construtivas, como as estacas geotérmicas, que resultam em uma redução do consumo de energia elétrica, beneficiando também o meio ambiente. Como essa é uma técnica ainda pouco estudada no Brasil, o objetivo deste trabalho é, por meio de uma revisão bibliográfica, reunir informações significantes acerca do tema. Com base nessa pesquisa, notou-se que esta prática ainda é recente e muitas vezes realizada de acordo com informações experimentais. Desse modo, muitos autores realizam diversas análises numéricas, estudando os fatores mais influentes, meios de melhor modelar a distribuição de carga na estaca, e a influência do calor dispersado no solo. Recentemente, os trabalhos começaram a apresentar soluções analíticas que correlacionam a carga térmica com a carga mecânica suportada pela estaca, a fim de avaliar o comportamento dessa estrutura, dando início a uma padronização no dimensionamento. Dessa forma, conclui-se que o estudo e utilização dessa tecnologia ainda é pouco difundido no Brasil, de forma que a aplicação do mesmo no clima e solos tropicais ainda necessita de estudos específicos.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Sustentável, Climatização, Fundações Profundas.

ABSTRACT: The search for new options for air conditioning in buildings encourages the development of new construction opportunities, such as geothermal piles, which result in a reduction in electrical energy consumption, also benefiting the environment. As this is a technique still little studied in Brazil, the objective of this work is, through a bibliographical review, to gather significant information about the subject. Based on this research, it was noted that this practice is still recent and often performed according to experimental information. Thus, many authors perform several numerical analysis, studying the most influential factors, ways to better model the load distribution in the pile, and the influence of heat dispersed in the soil. Recently, the works started to present analytical solutions that correlate the thermal load with the mechanical load supported by the pile, in order to evaluate the behavior of this structure, starting a standardization in the design. Thus, it is concluded that the study and use of this technology is still not widespread in Brazil, so that its application in tropical climate and soils still needs specific studies.

KEYWORDS: Sustainable Energy, Air Conditioning, Deep Foundations.

1 Introdução

A busca contínua por diferentes fontes de energia busca criar alternativas sustentáveis às matrizes energéticas atuais que, não existirão ou não serão mais viáveis futuramente. Nesse cenário, a verticalização das construções estimula ainda mais o desenvolvimento de novas opções para a climatização dos edifícios. Essa verticalização torna, também, mais corriqueiro o uso de fundações profundas, a fim de suportar o maior carregamento gerado pela edificação.

É nesse contexto que as estacas geotérmicas encontram cada vez mais espaço de utilização, já que essas estacas surgem como uma fonte de redução do consumo de energia elétrica. As estacas geotérmicas permitem o acesso direto a energia geotérmica renovável, além da transferência da carga estrutural ao solo e rocha. Isso



é possível por meio da inserção de um tubo em ciclo fechado ao longo do comprimento da estaca que funciona como condutor do fluido que permite a troca de calor (OLIA; PERIĆ, 2021).

Segundo Almeida (2021), o sistema geotérmico de estacas é composto basicamente por três elementos: a bomba de calor, o sistema de trocador de calor com o solo e o sistema que transmite o ar (aquecido ou resfriado) ao edifício. A composição da estaca geotérmica pode ser observada na Figura 1, que traz uma representação dos componentes e do processo envolvido para a troca de calor.

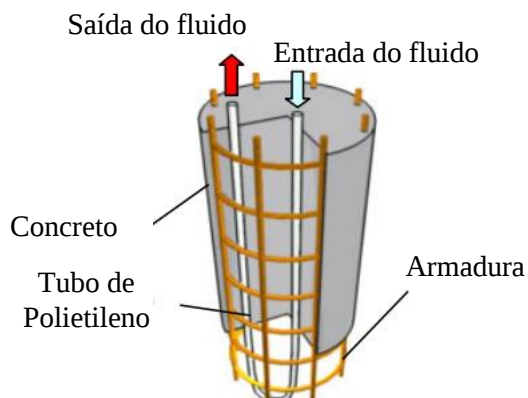


Figura 1. Esquema de uma estaca geotérmica. Fonte: Adaptado de Laloui, Nuth e Vulliet (2006)

Esse sistema já é utilizado na Europa, em locais onde o inverno rigoroso exige o sistema de calefação (LALOU; NUTH; VULLIET, 2006). Nessas regiões, são utilizadas principalmente como uma forma complementar de aquecimento do edifício no inverno. No verão, por sua vez, a troca de calor proporciona o resfriamento da construção. Com isso, é possível reduzir os gastos gerados pelos sistemas de climatização atuais, o que aumenta a eficiência do edifício, diminuindo a emissão de CO₂ na atmosfera, além de ter um custo relativamente baixo de implantação (OLIA; PERIĆ, 2021).

Segundo Almeida (2021) e Amis e Loveridge (2014) o uso de estacas geotérmicas no Reino Unido de 2005 à 2012 aumentou de 150 para 5012 estacas. Realizando uma correlação entre o uso das estacas e redução da emissão de CO₂ os mesmos autores perceberam que foi economizado cerca de 92,8 toneladas de CO₂ por ano em 2005 e, com o aumento da utilização das estacas em 2012, a economia foi de 6640,64 toneladas de CO₂ por ano. Nos países situados nos trópicos, como é o caso do Brasil, onde as temperaturas são mais elevadas e invernos não são tão rígidos, essa estaca tem por principal função a dissipação da energia térmica dos prédios nas camadas superficiais do solo (ALMEIDA, 2021).

Com isso, pode-se perceber que quanto maior o conhecimento acerca do tema, maior será sua aplicabilidade, utilizando um elemento estrutural de uma forma eficiente e com um propósito que beneficie tanto os usuários quanto o meio ambiente. Notando o uso ainda pouco difundido dessa tecnologia no Brasil, o objetivo desse trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre estacas geotérmicas com base em trabalhos nacionais e internacionais, a fim de reunir uma quantidade significativa de informações acerca do tema e sobretudo, sobre as soluções analíticas já obtidas e publicadas.

2 Metodologia

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica do tipo descritiva e de abordagem qualitativa em que, segundo Pereira (2018), é importante a análise e interpretação por parte do pesquisador. A amostra desse trabalho foi baseada na análise da literatura de publicação nacional e internacional sobre estacas geotérmicas, em forma de artigos, teses, dissertações e trabalhos apresentados em congressos. Assim, foram selecionados trabalhos já publicados acerca do tema entre os anos 2005 e 2021, escritos em inglês e português.

Para o levantamento dessa amostra, utilizou-se a base de dados Google, Google Acadêmico e Scopus, por meio de uso das palavras-chave: estacas geotérmicas e energy piles. Durante a busca, realizou-se o levantamento e seleção de 07 publicações coerentes com o assunto estudado.

De posse dos dados coletados, será feito uma análise comparativa entre os trabalhos de forma prática e de fácil percepção, analisando os pontos de metodologia utilizada, bem como os resultados obtidos. Assim, será possível avaliar o contexto geral e realizar recomendações para trabalhos futuros.



3 Resultados e Discussões

Os trabalhos selecionados serão resumidamente dispostos de forma cronológica em publicação. Os que apresentaram o desenvolvimento de equações analíticas, será monstada uma tabela ao final, de forma a reunir as equações possíveis.

Laloui, Nuth, Vulliet (2006) buscaram estudar o incremento de carga na estaca devido aos efeitos térmicos através de um modelo baseado em elementos finitos que fosse capaz de reproduzir os efeitos termomecânicos mais significantes. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com os resultados experimentais das estacas modeladas. Os resultados obtidos podem ser vistos nas imagens a seguir.

A Figura 2, apresenta as deformações ocasionadas na estaca devido ao ciclo de aquecimento e resfriamento, enquanto a Figura 3 trás as movimentações causadas na estaca devido a esse mesmo ciclo. Como a estaca não foi carregada mecanicamente, ela era livre para se movimentar para cima ou para baixo.

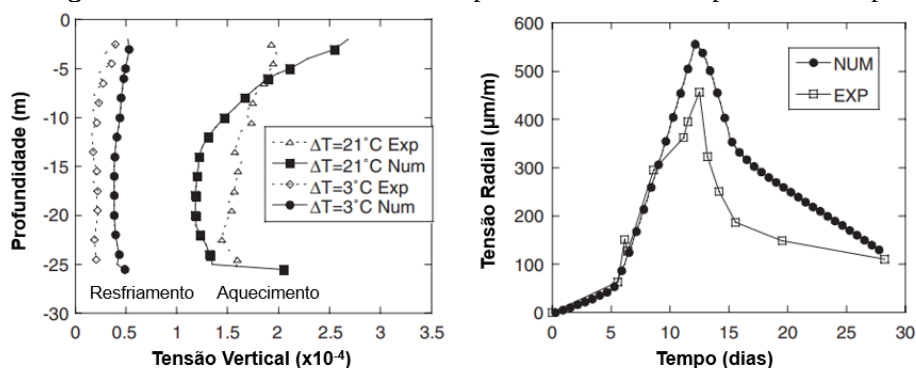


Figura 2. Deformações térmicas durante um período de aquecimento e resfriamento. Fonte: Adaptado de Laloui, Nuth e Vulliet (2006)

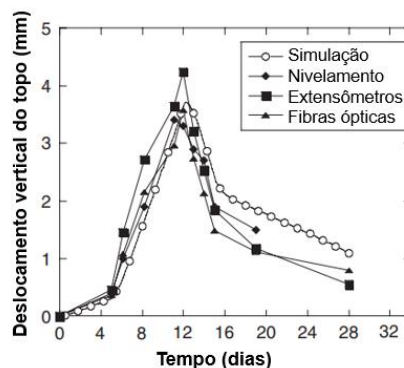


Figura 3. Elevação da estaca durante um ciclo de aquecimento e resfriamento. Fonte: Adaptado de Laloui, Nuth e Vulliet (2006).

De forma geral, o que os autores concluem é que as tensões nas estacas geotérmicas variam de intensidade de acordo com o tipo de solo que a cerca. Percebeu-se também que ao final da estaca, os efeitos térmicos induzem uma carga axial maior do que as causadas pelo peso próprio do edifício e isso é causado pela uniformidade natural dos efeitos térmicos (LALOU; NUTH; VULLIET, 2006).

Knellwof, Peron e Laloui (2011) propõem um método que considera a interação complexa entre o comportamento térmico e mecânico dessa estrutura. Esse método foi validado com a base de dados *in situ* dos próprios autores. Por convenção, os movimentos para cima foram considerados positivos e para baixo, negativos, enquanto as forças de tração foram consideradas positivas. O método segue as seguintes simplificações:

- O cálculo do recalque da estaca é feito em um esquema de diferenças finitas unidimensionais. Apenas os deslocamentos axiais são considerados. Os deslocamentos radiais e suas interações mecânicas com o solo são negligenciadas (tais considerações são consideradas pequenas no que diz respeito aos efeitos dos deslocamentos axiais);



- As propriedades da estaca, ou seja, seu módulo de Young, módulo de elasticidade e coeficiente de expansão térmica permanecem constantes ao longo da estaca e não mudam de acordo com a temperatura. O peso da estaca é negligenciado;
- A relação entre atrito e deslocamento lateral, tensão de ponta e deslocamento de ponta e tensão do topo e deslocamento do topo não mudam com a temperatura.

Primeiro deve-se calcular o estado de tensão e deslocamento das estacas induzidos pelo carregamento mecânico. Esse estado é definido com estado inicial e corresponde aos efeitos causados pela edificação. A partir desse estado, calcula-se a resposta da pilha causada pela carga térmica.

Para o carregamento mecânico, tem-se:

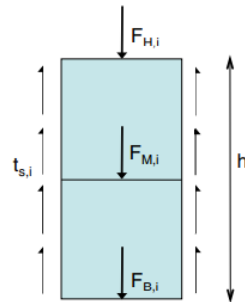


Figura 4. Esquema de uma estaca geotérmica. Fonte: Adaptado de Laloui, Nuth e Vulliet (2006).

Sabendo o valor de $F_{B,i}$ e assumindo uma tensão de cisalhamento constante, temos que o deslocamento relativo é dado por:

$$\Delta z_i = (F_{B,i} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h_i \cdot D \cdot \pi}{2} \cdot t_{s,i} \cdot (z_{M,i})) \cdot \frac{1}{A \cdot E} \cdot \frac{h_i}{2} \quad (1)$$

Com $\Delta z_i = z_{M,i} - z_{B,i}$,

$$z_{M,i} - z_{B,i} - \left(F_{B,i} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h_i \cdot D \cdot \pi}{2} \cdot t_{s,i} \cdot (z_{M,i}) \right) \cdot \frac{1}{A \cdot E} \cdot \frac{h_i}{2} = 0 \quad (2)$$

em que: h_i é o comprimento; D o diâmetro; $F_{B,i}$ a força axial atuante na ponta; $F_{M,i}$ a força atuante no meio; $F_{H,i}$ a força atuante no começo da estaca; $z_{B,i}$, $z_{M,i}$ e $z_{H,i}$ os deslocamentos axiais correspondentes; e $t_{s,i}$ o atrito lateral do elemento.

Para obter o valor de $z_{M,i}$ a equação 2 é resolvida iterativamente até se atingir a precisão desejada. Conhecendo $z_{M,i}$ pode-se obter a força axial no meio do elemento ($F_{M,i}$), em seguida de $F_{H,i}$ e de $z_{H,i}$, de acordo com as equações 3, 4 e 5 a seguir.

$$F_{M,i} = F_{B,i} + \frac{h_i \cdot D \cdot \pi}{2} \cdot t_{s,i} \cdot (z_{M,i}) \quad (3)$$

$$F_{H,i} = F_{B,i} + 2 \cdot (F_{M,i} - F_{B,i}) \quad (4)$$

$$z_{H,i} = z_{B,i} + \frac{F_{M,i}}{A \cdot E} \cdot h_i \quad (5)$$

Para o carregamento térmico tem-se:

$$\sum T_{th,NP} = \sum_{i=1}^{NP} T_{s,th,i} + T_{h,th} + \sum_{i=NP+1}^n T_{s,th,i} + T_{b,th} = 0 \quad (6)$$



Em casos sem carregamento mecânico o procedimento deve ser o seguinte:

1. Escolha de um valor inicial para a deformação observada

$$\varepsilon_{th,f} = \alpha \cdot \Delta T \quad (7)$$

2. Cálculo do deslocamento

$$\sigma_{th,i} = (T_{th,b} + h_i \cdot D \cdot \pi \cdot \sum_{j=n}^i T_{s,th,j}) \cdot \frac{1}{A} \quad (8)$$

3. Através da tensão mobilizada calcular a tensão térmica

$$\varepsilon_{th,d} = \frac{\sigma_{th}}{E} \leq \varepsilon_{th,f} \quad (9)$$

4. Subtraindo uma tensão da outra, temos a tensão observada

$$\varepsilon_{th,0} = \varepsilon_{th,f} - \varepsilon_{th,d} \quad (10)$$

Os passos de 2 a 4 devem ser repetidos até se atingir uma convergência. Em casos com carregamento mecânico o passo 2 deve começar com um deslocamento inicial diferente de zero e um estado de tensão induzido por esse carregamento.

Perić, Tran e Milić (2017) por sua vez, analisaram os efeitos da anisotropia na interação solo estrutura de uma estaca geotérmica, já que até o momento de publicação do artigo não era de conhecimento dos autores que se tivessem considerado tal efeito nas modelagem computacionais. Duas análises foram realizadas, uma considerando apenas a carga térmica e a outra considerando a carga térmica e carga mecânica atuando na estaca.

Um dos resultados obtidos pode ser visto na Figura 5, no qual percebe-se a variação da tensão vertical em três temperaturas diferentes em um ciclo de aquecimento, considerando o solo isotrópico e anisotrópico.

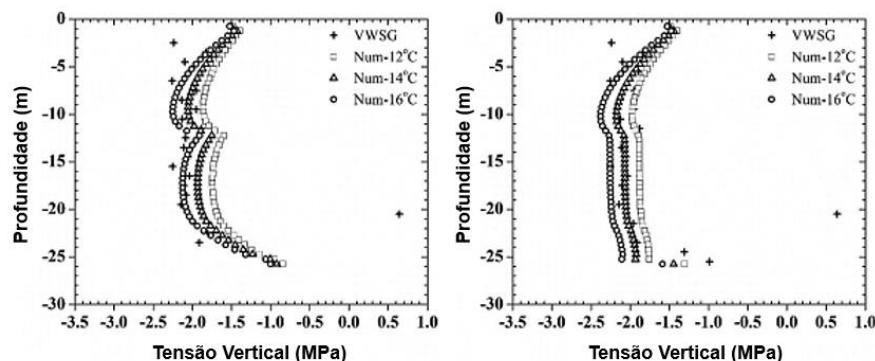


Figura 5. Tensão Vertical x profundidade em diferentes temperaturas no ciclo de aquecimento. (a) isotrópico e (b) modelo elástico anisotrópico. Fonte: Adaptado de Perić, Tran e Milić (2017).

Os autores chegaram a conclusão que não considerar a anisotropia no modelo subestima as tensões verticais de tração durante a fase de aquecimento, além de superestimar a tensão de compressão na estaca sujeita apenas a carga térmica. O fato contrário foi observado no estudo de carga mecânica e térmica combinados, no qual o modelo isotrópico superestima a tensão vertical de tração e subestima a tensão de compressão vertical.

Perić, Cossel e Sarna (2020) propuseram as seguintes soluções analíticas para solos homogêneos, sendo a tensão de compressão um valor negativo.



Resposta	Carga térmica	Carga térmica com k_b	Carga mecânica
$u(L)$	$\frac{\alpha \Delta T \sinh(\psi L)}{\psi \cosh(\psi L)}$	$\frac{\alpha \Delta T \sinh(\psi L)}{\psi \cosh(\psi L) + \frac{k_b}{E\psi} \sinh(\psi L)}$	$\frac{F \sinh(\psi L)}{AE\psi \cosh(\psi L)}$
$\varepsilon(0)$	$\alpha \Delta T \frac{1}{\cosh(\psi L)}$	$\alpha \Delta T \frac{1}{\cosh(\psi L) + \frac{k_b}{E\psi} \sinh(\psi L)}$	$\frac{F}{AE \cosh(\psi L)}$
$\varepsilon(L)$	$\alpha \Delta T$	$\alpha \Delta T \frac{1}{1 + \frac{k_b \sinh(\psi L)}{E\psi \cosh(\psi L)}}$	$\frac{F}{AE}$
$\sigma(0)$	$E\alpha \Delta T \left[\frac{1}{\cosh(\psi L)} - 1 \right]$	$E\alpha \Delta T \left[\frac{1}{\cosh(\psi L) + \frac{k_b}{E\psi} \sinh(\psi L)} - 1 \right]$	$\frac{F}{A \cosh(\psi L)}$
$\sigma(L)$	0	$E\alpha \Delta T \left[\frac{1}{1 + \frac{k_b \sinh(\psi L)}{E\psi \cosh(\psi L)}} - 1 \right]$	F/A

Figura 6. Equações para deslocamento, deformação e tensão nas estacas geotérmicas. Fonte: Adaptado de Perić, Cossel e Sarna (2020).

Iodice, di Laora e Mandolini (2020), também propuseram equações para definir a distribuição de carga na estaca geotérmica, que pode ser vista na Figura 7.

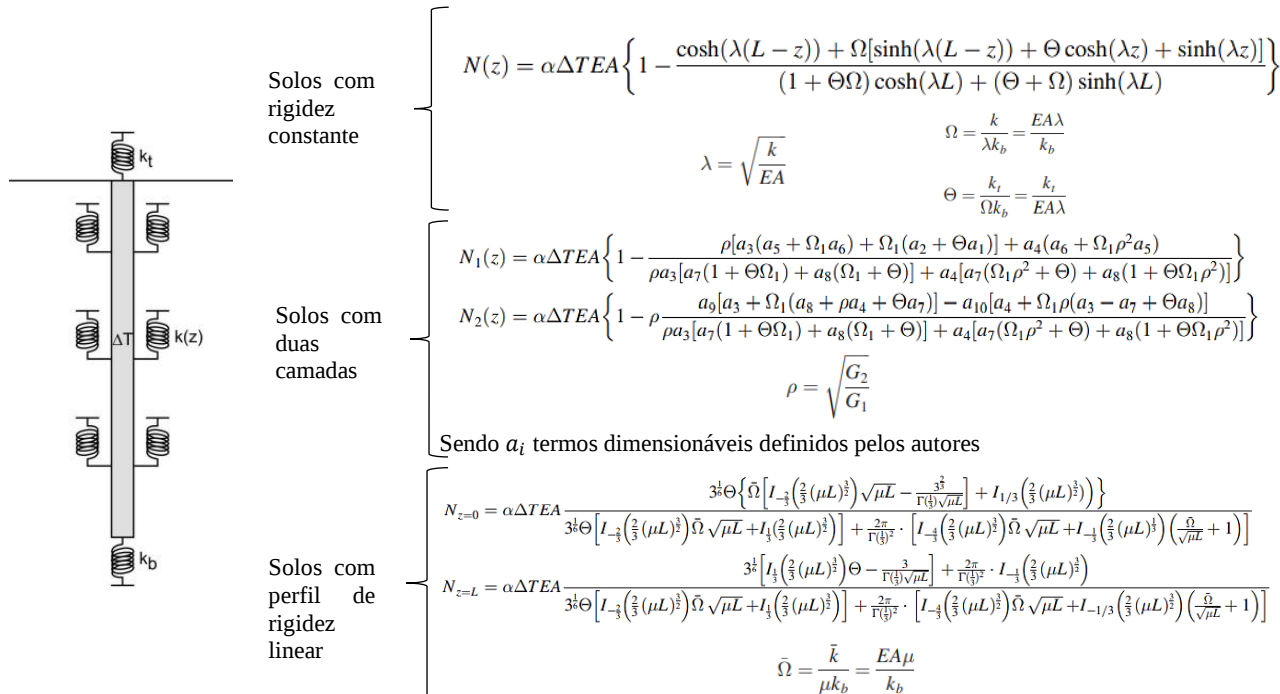


Figura 7. Equações propostas para diferentes rigidez e número de camadas do solo. Fonte: Adaptado de Iodice, di Laora e Mandolini (2020).

Olia e Perić (2021) propuseram soluções analíticas para estacas geotérmicas semiflutuantes

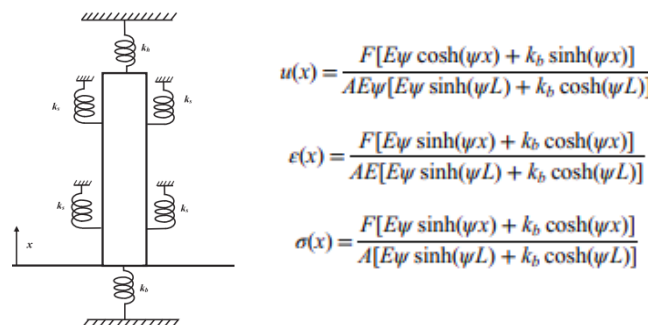


Figura 8. Modelo proposto para estacas geotérmicas semiflutuantes e equações para deslocamento, deformação e tensão. Fonte: Adaptado de Olia e Perić (2021).



Cenário de carregamento			Idealmente de resistência de ponta	Completamente flutuantes
Mecânica	u	$u(0)$	0	$\frac{F}{AE\psi \sinh(\psi L)}$
		$u(L)$	$\frac{F}{AE\psi} \tanh(\psi L)$	$\frac{F}{AE\psi \tanh(\psi L)}$
	ε	$\varepsilon(0)$	$\frac{F}{AE \cosh(\psi L)}$	0
		$\varepsilon(L)$	$\frac{F}{AE}$	$\frac{F}{AE}$
	σ	$\sigma(0)$	$\frac{F}{A \cosh(\psi L)}$	0
		$\sigma(L)$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$
Térmica	u	$u(0)$	0	$-\frac{\alpha \Delta T}{\psi} \tanh \frac{\psi L}{2}$
		$u(L)$	$\frac{\alpha \Delta T}{\psi} \tanh(\psi L)$	$\frac{\alpha \Delta T}{\psi} \tanh \frac{\psi L}{2}$
	ε	$\varepsilon(0)$	$\frac{\alpha \Delta T}{\cosh(\psi L)}$	$\alpha \Delta T$
		$\varepsilon(L)$	$\alpha \Delta T$	$\alpha \Delta T$
	σ	$\sigma(0)$	$E\alpha \Delta T \left[\frac{1}{\cosh(\psi L)} - 1 \right]$	0
		$\sigma(L)$	0	0

Figura 9. Deslocamento, deformação e tensão para a carga mecânica e térmica em estacas completamente flutuantes e idealmente de resistência de ponta. Fonte: Adaptado de Olia e Perić (2021).

Almeida (2021) buscou estudar o comportamento térmico de estacas geotérmicas assentes em solo arenoso saturado, por meio de simulações numéricas, a fim de identificar quais são as variáveis de maior interesse para projeto. Os dados utilizados foram obtidos por meio de uma estaca teste na Escola Politécnica da USP. O autor chega a conclusão que a realização de simulações menos refinadas, com 551.765 elementos resulta em dados confiáveis e, ao mesmo tempo, reduz o custo computacional.

Quanto aos parâmetros, os que ocasionaram maiores variações nas taxas de transferência de calor total foram: resistência de contato, grau de saturação e condutividade térmica do concreto. Com isso, foi possível que o autor fizesse algumas recomendações a fim de otimizar o projeto de estacas geotérmicas. Dentre elas que o concreto preferível seja o de alta densidade, pois de forma geral propiciam maiores condutividades térmicas, que o solo possuam um nível de água mais elevado, pois uma maior saturação proporciona maior troca de calor, velocidade/vazão do fluido estabilizante a partir de 10 L/min, tubos preferencialmente com materiais condutores térmicos como aço e cobre, e solos com maiores condutividade térmicas, podendo recorrer a procedimentos que aumentem essa condutividade.

4 Considerações Finais

Por meio dos estudos, foi possível perceber que as estacas geotérmicas são, realmente, boas alternativas para a economia de energia elétrica na climatização dos edifícios e por esse fato ser comprovado, os estudos estão se propagando cada vez mais no sentido de se delimitar equações que permitam analisar a influência da inserção desse tubo para a troca de calor no desempenho estrutural da estaca.

Notou-se também que as primeiras equações analíticas surgem apenas nos últimos anos, e com bastante condições de restrição, o que indica a necessidade de desenvolvimento de estudos e equações que sejam capazes de prever o comportamento das estacas geotérmicas, e que seja regido tanto pela carga mecânica quanto pela carga térmica.

Em relação à aplicação em território brasileiro, percebeu-se que a o estudo ainda se encontra nas fases iniciais. Com os trabalhos desenvolvidos até o momento, nota-se que o avanço desse assunto ainda se encontra



nos estudos numéricos e análise experimental de estacas piloto, sendo o primeiro uso reportado de estacas geotérmicas no Brasil no edifício-laboratório CICS na Escola Politécnica da USP.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar ainda mais ensaios em estacas pilotos em diferentes regiões, devido a grande extensão do Brasil, que ocasiona uma grande variedade de clima. Com isso também seriam gerados mais dados, que permitiriam o uso combinado para uma definição melhor da quantificação da eficiência do uso das estacas geotérmicas no país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ambos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) campus Caruaru e Recife.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C. R. De (2021) *Análise do comportamento térmico de estacas geotérmicas em solo arenoso*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia de São Carlos / USP, 210 p.
- Amis, T., Loveridge, F. (2014) Energy piles and other thermal foundations for GSHP developments in UK practice and research. *REHVA Journal*, p. 32-35.
- Iodice, C., di Laora, R., Mandolini, A. (2020) Analytical Solutions for Ultimate Limit State Design of Thermal Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146 (5), p. 04020016.
- Knellwolf, C., Peron, H., Laloui, L. (2011) Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (10), p. 890-902.
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006) Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30 (8), p. 763 – 781.
- Olia, A. S. R., Peric, D. (2021) Thermomechanical Soil-Structure Interaction in Single Energy Piles Exhibiting Reversible Interface Behavior. *International Journal of Geomechanics*, 21 (5), p. 04021065.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018) *Metodologia da pesquisa científica*, 1 ed., UAB/NTE/UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 119 p.
- Peric, D., Cossel, A. E., Sarna, S. A. (2020) Analytical Solutions for Thermomechanical Soil Structure Interaction in End-Bearing Energy Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146 (7), p. 04020047.
- Peric, D., Tran, T. V., Miletic, M. (2017) Effects of soil anisotropy on a soil structure interaction in a heat exchanger pile. *Computers and Geotechnics*, 86, p. 193-202.