

Ensaio piloto do Teste de Resposta Térmica aplicado em Solo Residual

Letícia Becher Niedvieski

Mestranda em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil, leti.bniedvieski@icloud.com

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Doutor em Engenharia Geotécnica, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

Bianca Penteadó de Almeida Tonus

Doutora em Engenharia da Construção Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Gabrielly Aparecida Chaves

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil, 22002721@uepg.br

RESUMO: A energia geotérmica é aquela proveniente do calor produzido naturalmente e armazenado nas camadas de solo, distribuídos em crosta, manto e núcleo. Para tanto, o Teste de Resposta Térmica é um método experimental aplicado para caracterizar o potencial geotérmico em campo, fornecendo parâmetros de condutividade térmica do solo e resistência térmica do furo trocador de calor. Foi empregado um equipamento em escala reduzida, que consiste em injetar ou remover calor sob uma taxa constante, por meio dos tubos trocadores de calor acoplados em uma estaca protendida com 14 metros de comprimento, cravadas em solo residual no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa. O campo é formado por uma camada de aproximadamente extensa de argila silto-arenosa, seguida de uma camada de areia siltosa, com características de um solo residual. Por se tratar de um ensaio relativamente novo, se faz necessário a implementação de estudo aprofundado e à longo prazo. O objetivo do trabalho é apresentar dados coletados do TRT em um ensaio piloto, contendo temperatura de entrada e saída dos tubos e potência aplicada no sistema, de maneira a apresentar a possibilidade de estimar a condutividade térmica de um solo local, validando o método para a implantação geotérmica. Cabe expor que o TRT piloto se encaixou na faixa diferencial de temperatura de 3,5 a 7,0°C recomendada pela ASHRAE para um funcionamento adequado, além de ser possível distinguir o período transiente do estacionário, após plotagem gráfica.

PALAVRAS-CHAVE: Teste de Resposta Térmica, Condutividade Térmica do solo, Solo Residual, Energia Geotérmica.

ABSTRACT: Geothermal energy is derived from heat naturally produced and stored in layers of soil, distributed in the crust, mantle, and core. Therefore, the Thermal Response Test (TRT) is an experimental method applied to characterize geothermal potential in the field, providing parameters such as soil thermal conductivity and thermal resistance of the heat exchanger borehole. A scaled-down equipment was used, consisting of injecting, or removing heat at a constant rate through heat exchanger tubes attached to a prestressed pile with a length of 14 meters, driven into residual soil at the Ponta Grossa Geotechnical Experimental Field. The field consists of a layer of approximately extensive silty-sandy clay, followed by a layer of silty sand, with characteristics of residual soil. It is a relatively new test, so, it is necessary to implement a long-term and in-depth study. The objective of the work is to present data collected from the TRT in a pilot test, including inlet and outlet temperatures of the tubes and power applied to the system, to demonstrate the possibility of estimating the thermal conductivity of local soil, validating the method for geothermal implementation. It should be noted that the pilot TRT fit within the temperature differential range of 3.5 to 7.0°C recommended by ASHRAE for proper operation, and it is also possible to distinguish the transient period from the stationary period after graphical plotting.

KEYWORDS: Thermal Response Test, Soil Thermal Conductivity, Residual Soil, Geothermal Energy.

1 INTRODUÇÃO

O sistema geotérmico se encaixa como uma fonte de energia limpa, renovável e sempre disponível, produzido e armazenado naturalmente nas camadas do solo. De tal forma, tem-se o solo como um meio de equilíbrio do sistema geotérmico, que se utiliza de elementos trocadores de calor para o aproveitamento energético.

Fatores geológicos locais e a presença de água, interferem diretamente na transferência de energia do solo para estruturas geotérmicas (Morais e Tshua, 2019). Tal transferência térmica se dá por meio de condução ou convecção, e de acordo com Prevedello (2010) a condução é um processo dominante em solo seco, enquanto a convecção proporciona níveis mais elevados de transferência de calor, porém, requer um meio saturado em conjunto com uma mudança de fase da água, como a evaporação, por exemplo.

A temperatura em regiões superficiais do solo, até profundidades em torno de 4 a 6 metros, tende a variar devido às variações climáticas diárias, enquanto, à medida que a profundidade aumenta, a temperatura do solo tende a permanecer constante, de modo que o solo é mais quente em comparação com o ambiente no inverno e mais frio no verão. Existe um gradiente geotérmico médio de aproximadamente 3°C por 100 metros de profundidade. Esse gradiente varia dependendo da localização, variando de 1°C por 100 metros em zonas continentais antigas a 10°C por 100 metros em áreas com vulcanismo ativo (Laloui e Loria, 2020).

É ideal ter conhecimento das propriedades térmicas, geotécnicas e mecânicas do solo para estimar a condutividade térmica local do solo e desenvolver um projeto adequado para a troca de calor (Tonus, 2023). Para medir a capacidade de produção de energia geotérmica, é necessário avaliar os parâmetros de condutividade térmica do solo. Assim, para analisar a condutividade térmica local do solo, o Teste da Agulha Térmica era tradicionalmente empregado, um método baseado na coleta de amostras em campo. Neste ensaio, uma pequena sonda é inserida na amostra de solo em laboratório, e a oscilação térmica ao longo do tempo é analisada. No entanto, este método envolve custo elevado e requer amostragem extensiva para representar abrangentemente o comportamento térmico do campo (Bandeira Neto, 2015).

Na busca por simplificar o estudo do solo para a implementação de um sistema geotérmico, o Teste de Resposta Térmica tem se mostrado como um método viável. Ele utiliza o próprio furo de fundação para a aplicação do condicionamento geotérmico como meio de medir os parâmetros térmicos do solo diretamente no local de implantação do sistema. Esta abordagem fornece um volume representativo de material, minimiza a perturbação do solo e permite a análise em tempo real dos resultados (Graham, 2006 *apud* Tonus, 2023, p. 73). Além disso, o equipamento mede prováveis deformações e afere a temperatura em estruturas geotécnicas, como em estacas, quando dimensionadas para o contexto geotérmico (Santos, 2020).

Um dos primeiros documentos publicados que inclui o uso do Teste de Resposta Térmica (TRT) remete à 1983, na conferência de Estocolmo. No entanto, somente em 1995 o equipamento foi considerado válido para testes práticos. O primeiro equipamento móvel foi desenvolvido na Universidade Técnica de Luleå, na Suécia, seguido por um equipamento desenvolvido em Oklahoma, EUA, em 1996 (Bandeira Neto, 2015).

No contexto brasileiro, o primeiro TRT foi conduzido na cidade de São Carlos, no estado de São Paulo, por Bandeira Neto em 2015. O teste foi realizado em uma estaca perfurada com profundidade de 12 m e diâmetro de 25 mm. Os tubos acoplados eram fabricados em polietileno de Alta Densidade (PEAD) e instalados em simples “U”. O TRT foi desenvolvido para abordar o comportamento termohidráulico do solo na presença de trocadores de calor. Tal ensaio foi realizado previamente em valas construídas em paralelo à 1,5 metros de profundidade em Maringá, no Paraná, conforme apresentado na pesquisa de Visintin (2023).

Dado um contexto recente, o objetivo deste artigo é apresentar dados coletados do TRT em um ensaio piloto realizado no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa em estacas trocadoras de calor, de maneira a apresentar a oscilação térmica que antecede e sucede a troca térmica do solo com o ambiente, validando a implantação geotérmica.

2 TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA

O Teste de Resposta Térmica (TRT) é um método experimental para caracterizar o potencial geotérmico em campo. Visa obter a temperatura do solo não perturbado, a condutividade térmica efetiva do solo e a resistência térmica do trocador de calor, independente do tempo (Laloui e Loria, 2020).

De acordo com Prevedello (2010), a condutividade térmica pode ser estabelecida como uma propriedade intrínseca do solo, medindo a quantidade de energia térmica que o solo pode transmitir por segundo por metro ($W/m.K$). De maneira simplificada, representa a capacidade do solo em conduzir energia térmica, enquanto a resistência térmica consiste na dificuldade do trocador de calor em permitir a passagem da corrente de calor.

Parâmetros como a condutividade térmica do solo e a resistência térmica do furo, dados em diâmetro, comprimento e preenchimento do furo, bem como configurações e materiais dos tubos responsáveis pela circulação do fluido trocador de calor, são considerados pré-requisitos para o projeto de sistemas geotérmicos (Zhang *et al.*, 2014).

No entanto, a aplicação do teste está associada à necessidade de analisar as condições geológicas e hidrológicas de um local específico para fornecer arranjos adequados para os tubos trocadores de calor (Kaczmarczyk, 2018). O Teste de Resposta Térmica consiste em injetar ou remover calor do solo a uma taxa constante por meio de um furo prévio, tal qual, contém uma estaca ou estrutura geotérmica acoplada a tubos que circulam água. O equipamento (Fig. 1) é composto por um aquecedor que fornece energia térmica ao fluido que circulará pela estrutura trocadora de calor, uma bomba de água responsável por circular o fluido dentro dos tubos trocadores de calor, sensores de temperatura tanto para entrada quanto para saída do tubo, um medidor de vazão e um sistema eletrônico para aquisição de dados (Bandeira Neto, 2015).

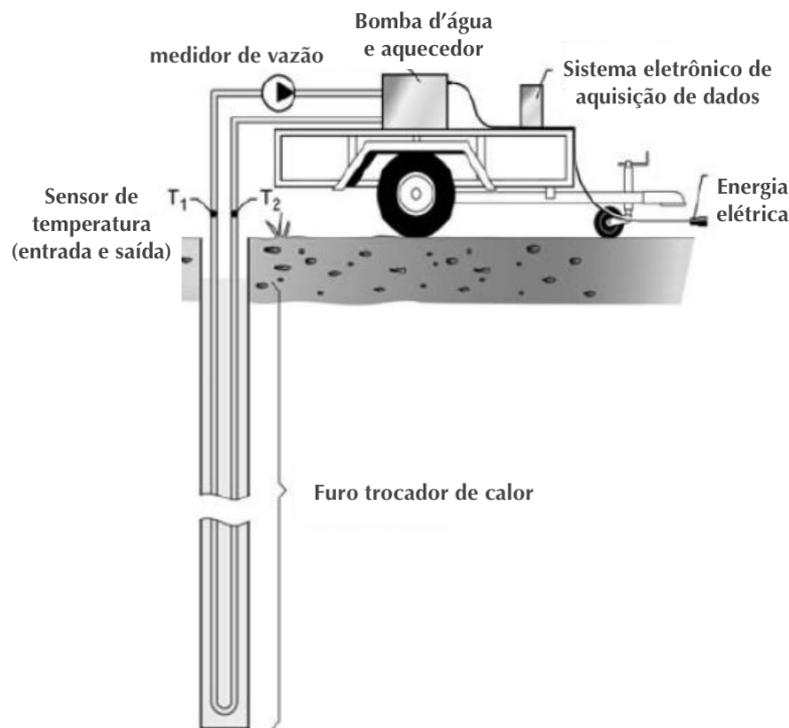


Figura 1. Equipamento do Teste de Resposta Térmica (Bandeira Neto, 2015)

Recomenda-se o uso de tubos trocadores de calor de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), devido às suas propriedades combinadas de resistência e flexibilidade, com um diâmetro igual ou inferior a 300 mm, para contribuir para uma duração reduzida do teste. Além disso, é recomendado que a distância da estrutura geotérmica analisada com o equipamento TRT seja inferior a 1,5 m. Uma camada de isolamento deve ser aplicada aos tubos e à máquina de teste para evitar que as condições ambientais influenciem na resposta (Laloui e Loria, 2020).

A bomba de circulação deve gerar um fluxo turbulento no circuito de troca de calor, juntamente com uma taxa de calor de 40 a 80 W/m , para homogeneizar o líquido circulante. Para medir a temperatura do solo não perturbado, pode-se calcular a média dos valores obtidos no período de circulação da água. O teste começa ligando o aquecedor, que deve permanecer ativo por um mínimo de 48 horas até atingir a estabilidade durante a execução do ensaio (Bandeira Neto, 2015). Além disso, é desejável descartar o período transiente, correspondente às primeiras 12 a 20 horas do teste para eliminar eventuais oscilações, já que as temperaturas tendem a subir rapidamente. Para tanto, recomenda-se analisar apenas os dados do ensaio referentes ao período

estacionário (Gehlin, 2002). O conceito de transitório está relacionado a variáveis que oscilam com o tempo, como vazão e temperatura, enquanto estacionário é o estado em que as variáveis permanecem constantes.

A duração necessária do teste aumenta significativamente conforme a condutividade térmica do material de preenchimento que compõe a estrutura geotérmica diminui em relação à condutividade térmica do solo. Além disso, a duração mínima do teste aumenta proporcionalmente com a resistência térmica do furo (Zhang *et al.*, 2014).

Se for necessário replicar o teste no mesmo furo, deve-se esperar de 10 a 14 dias, dependendo da condutividade térmica local, uma vez que, cada solo apresenta a estabilidade térmica em determinado patamar de temperatura. Bem como, não é recomendado fazer escavações em um raio de 10 metros ao redor do furo que está sendo testado (Bandeira Neto, 2015).

3 CAMPO EXPERIMENTAL DE ESTUDOS GEOTÉCNICOS DE PONTA GROSSA

O ensaio piloto do Teste de Resposta Térmica foi conduzido no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos, localizado na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), no centro-oeste do estado do Paraná. O campo abrange uma área de 11419 m². O local já conta com cinco furos de sondagem à percussão (SPT), bem como, amostragem de materiais deformados e indeformados de trincheiras (Fig. 2), com o intuito de realizar caracterização laboratorial e ensaios de cisalhamento direto e adensamento uniaxial. Resultados de caracterização geológica e geotérmica do campo experimental podem ser encontrados detalhadamente em (Tonus *et al.*, 2022; Tonus, 2023).

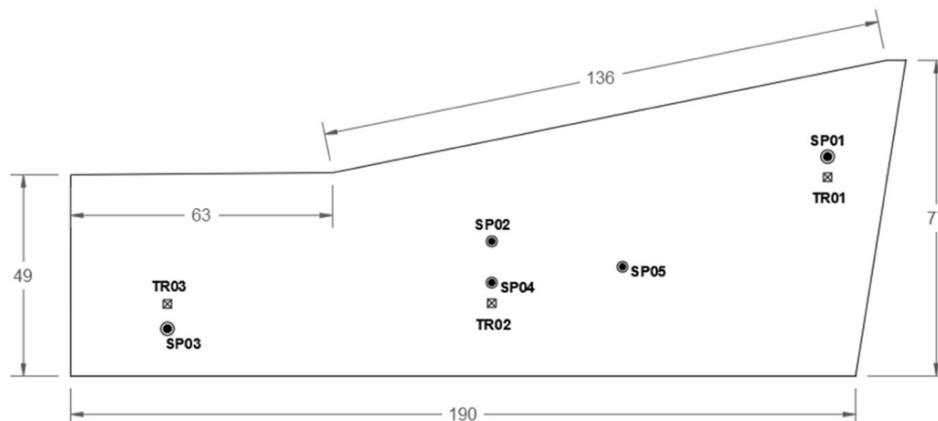


Figura 2. Detalhamento do CEEG-PG (Tonus *et al.*, 2022)

O perfil geológico-geotécnico do campo experimental engloba uma camada de aproximadamente 10 metros de argila silto-arenosa, seguida por uma camada delgada de areia siltosa. Desta forma, como a estaca de análise experimental possui 14 metros de profundidade, esta encontra-se apoiada em uma camada de areia siltosa. O lençol freático encontra-se à uma profundidade de 10 metros da superfície do terreno.

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Foi proposta a realização de um ensaio piloto de caráter experimental, executado no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CEEG-PG) com o intuito de viabilizar a implantação geotérmica no local e informar o tipo de resultado extraído do equipamento TRT. Ensaio piloto são importantes no contexto de ensaios de longa duração, possibilitando uma avaliação preliminar mais voltada ao funcionamento do equipamento para a condição desejada, bem como adaptações que se façam necessárias junto ao sistema trocador de calor em estudo.

O Equipamento TRT utilizado neste estudo foi desenvolvido pela empresa Solution IPD, e tem como principais características a junção de um medidor de vazão, bomba de água, aquecedor e sistema de captação de dados em um modelo compacto, de fácil transporte (Visintin, 2023).

Uma estaca pré-moldada de 14 metros de profundidade, confeccionada com tubos trocadores de calor em formato U na sua parte interna, foi cravada à percussão no campo experimental. Desta forma, o ensaio consiste em conectar a tubulação de PEAD presente na estaca com o equipamento TRT. Uma mangueira

conectada à rede de abastecimento de água é vinculada ao equipamento de forma a garantir o preenchimento total da tubulação do sistema. É importante checar se há vazamentos visíveis na tubulação, bem como, realizar a purga do sistema, eliminando o ar acumulado. Na sequência, o equipamento é ligado na rede elétrica, de forma a acionar a bomba de calor e o aquecedor, respectivamente. Os dados térmicos de entrada e saída da tubulação, diferença térmica de ambos, e potência aplicada pelo aquecedor, podem ser acompanhados em tempo real e coletados por meio de um Field Logger que coleta os dados dos sensores.

5 RESULTADOS

Seguindo a recomendação do ensaio, enfatizada na etapa metodológica, foram coletados dados de temperatura de entrada e saída dos tubos, ou seja, dados que antecedem e sucedem a passagem do líquido trocador de calor pelo solo. Para tanto, a água circulante entra no sistema por meio da bomba, passa pelo aquecedor e sai pela tubulação que é direcionada ao solo, e que realizará as trocas térmicas por um período aproximado de 100 minutos, com o objetivo de compreender de maneira visual o comportamento térmico do solo.

Bandeira Neto (2015), Morais (2019), Pessin e Tsuha (2023) executaram Teste de Resposta Térmica no Sudeste do Brasil, em São Paulo, e obtiveram resultados satisfatórios para condutividade térmica. Como trata-se de um tema relativamente novo, há a necessidade de aprofundamento do assunto, e se faz necessário a execução de testes por períodos mais longos, com o intuito de estabilizar a oscilação térmica e eliminar o período transiente. No entanto, o objetivo do presente estudo consiste em apresentar resultados preliminares obtidos em ensaio piloto, realizado com vistas a estabelecer no próprio campo a grandeza das variáveis de entrada para o problema, bem como assegurar o funcionamento do processo de circulação e dos sensores.

Foi determinada uma vazão de água turbulenta de 18 l/min no sistema. A bomba estava em funcionamento na frequência mínima permitida, de 30 Hz. As informações foram coletadas por meio de um *FieldLogger* instalado no próprio equipamento TRT, responsável pela coleta em tempo real dos dados obtidos pelos sensores de temperatura modelo ds18b20.

A Fig. 3 ilustra a estaca cravada com seção 20x20cm e comprimento de 14 metros, com a tubulação de entrada e saída para a realização do Teste de Resposta Térmica, bem como, representa o sistema completo acoplado ao equipamento para aquisição do resultado experimental.



Figura 3. (a) Estaca com tubo trocador de calor de entrada e saída. (b) Sistema eletrônico de captação de dados. (c) Teste de Resposta Térmica em andamento no CEEG-PG.

Com base na Fig. 4, percebe-se que a diferença térmica é variável de 2°C até 5,6°C, com valor médio de 3,7°C (dT), com uma baixa oscilação térmica, seguindo um comportamento esperado. Segundo a norma proposta pela ASHRAE RP-1118 (2001), esta temperatura diferencial deve se enquadrar em 3,5 até 7,0°C para

um sistema geotérmico apresentar um funcionamento adequado. Para mais, a temperatura de entrada na bomba de calor oscila de 30 até 40°C, enquanto, a temperatura após a troca térmica tende a ser mais baixa, variando de 25 até 37°C. Esta relação de temperatura está diretamente atrelada com a capacidade do aquecedor em atingir uma elevada temperatura, enquanto, a temperatura de retorno da bomba sempre será razoavelmente menor. Para mais, há um informativo no próprio gráfico, do período transiente, seguido pelo início da estabilidade térmica, sendo desejável que o ensaio persista por mais tempo, de forma que, as primeiras horas sejam desconsideradas em função da oscilação térmica. Por tratar-se de um ensaio preliminar, os resultados prévios indicaram o funcionamento dos sensores quando o TRT está acoplado ao sistema em estudo, bem como foi verificada a estanqueidade do sistema durante o teste de 100h, possibilitando a consecução de ensaios de longa duração. Além disto, este ensaio preliminar é aplicado para verificar condições de funcionamento do equipamento e avaliar o funcionamento e eficácia dos sensores na medição de variáveis necessárias no processo de interpretação, para obtenção da condutividade térmica.

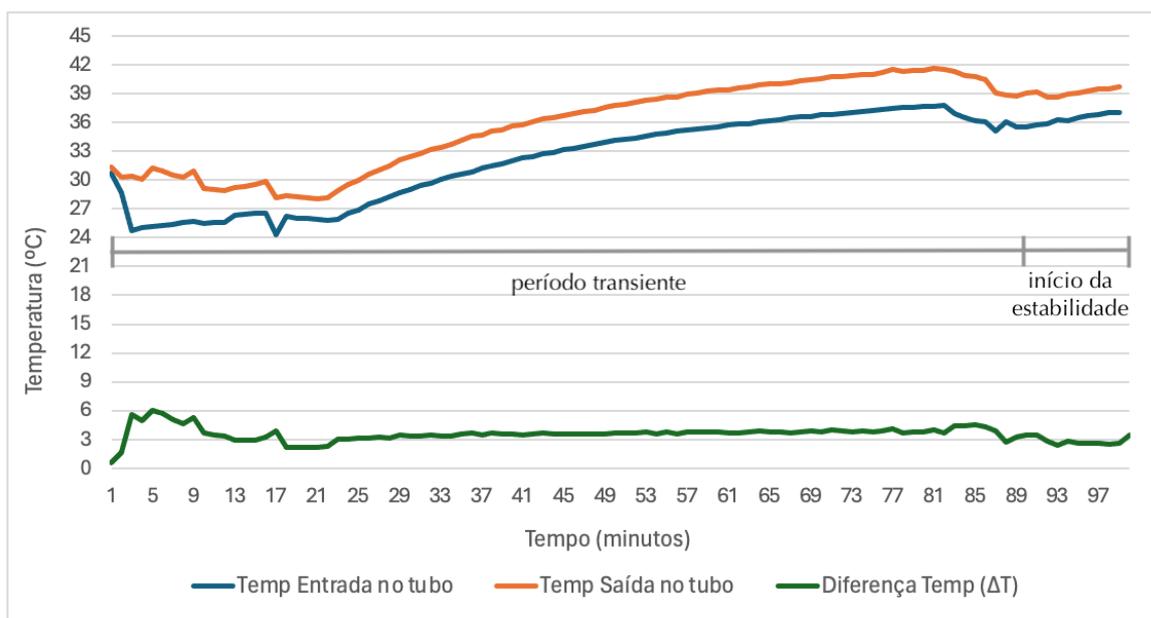


Figura 4. Temperatura de entrada e saída do Teste de Resposta Térmica

6 CONCLUSÃO

Este trabalho aborda um ensaio piloto para o Teste de Resposta Térmica em estaca, implementado em solo local da região Sul brasileira. Como trata-se de um tema relativamente novo, e foram realizados ensaios pontuais no Brasil, há uma demanda por uma exploração aprofundada e à longo prazo (mínimo de 72 horas), assim, é possibilitada a redução de oscilações térmicas e interferências do ambiente. Entretanto, tal ensaio apresentado já demonstra viabilidade para implantação geotérmica, comprovado pela temperatura diferencial suficiente para um devido funcionamento do sistema, e pela estabilidade na aquisição de dados após instalação e durante o ensaio.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento àqueles que contribuíram com o desenvolvimento da pesquisa, em especial, à empresa Ensolo Fundações, responsável pela execução, cravação e logística da estaca trocadora de calor. À UEPG pela disponibilização do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos para a realização do estudo. À PRECAM, prefeitura do campus da UEPG, pelo auxílio, execução de serviços e manutenção do Campo Experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE Research Project Report Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Test. RP – 1118, 2001.

- Bandeira Neto, L.A. *Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 2015.
- Gehlin, S. *Thermal Response Test: Method Development and Evaluation*. Tese de Doutorado, Lulea University of Technology, Suécia, 2002.
- Kaczmarczyk, M.; Kaczmarczyk, Magda.; Thürmer, K.; Klich, M. *Interpretation of rock mass thermal conductivity at the design stage of heat pump installation and its impact on system efficiency (COP)*. 4º Conferência Internacional de Geofísica aplicada, E3S Web of Conferences, v.66, 2018.
- Laloui, L.; Loria, A. F. R. *Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Application*. Reino Unido: Elsevier, 2020.
- Morais, T.S.O.; Tsuha, C.H.C. *Estacas Trocadoras de Calor no Brasil: Aspectos Executivos e de Desempenho Térmico*. XVIII Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e Engenharia geotécnica (COBRAMSEG). São Carlos, SP, 2019.
- Morais, T.S.O. *Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- Pessin, J. Tsuha, C.H.C. *In field performance of continuous flight auger (CFA) energy piles with different configurations*. Revista Applied Thermal Engineering, v. 224, 2023.
- Prevedello, C.L. *Energia térmica do solo (Cap. V)*. Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, p.298, 2010.
- Santos, B.C.B. *Avaliação termomecânica de uma estaca escavada submetida a gradientes térmicos*. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2020.
- Tonus, B.P.A.; Lautenschläger, C.E.R.; Visintin, A.F.; Faro, V.P.; Tsuha, C.H.C. *Site characterization for a study on a shallow geothermal energy exploitation in Southern Brazil*. Revista Soils and Rocks, v.45, 2022.
- Tonus, B.P.A. *Avaliação da utilização do Ensaio do Cone Térmico (TCT) na obtenção de propriedades térmicas necessárias ao dimensionamento de estruturas geotérmicas*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- Visintin, A.F. *Avaliação de trocador geotérmico horizontal em solo residual de basalto*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- Zhang, C.; Guo, Z.; Liu, Y.; Cong, X.; Peng, D. *A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. China, Elsevier, 2014.