



Procedimentos para Instalação de Sistema Geotérmico Superficial visando a Realização de Teste de Resposta Térmica

Rafael Julinhaque Beraldo

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil,
r.julinhaque@gmail.com

Letícia Becher Niedvieski

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

Isak Andrade do Prado

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, Brasil,
isakandrade217@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus

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

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

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

RESUMO: O aumento da dependência do uso de equipamentos para climatização de ambientes pela população, bem como os danos que fontes de energia elétrica não renovável podem causar ao meio ambiente fazem com que a utilização da energia geotérmica seja uma opção a ser considerada no âmbito da sustentabilidade, pois se trata de energia limpa e renovável. Para a realização de projetos envolvendo aproveitamento geotérmico, é preciso determinar a condutividade térmica do solo, sendo o Teste de Resposta Térmica (TRT) um método utilizado em campo para sua obtenção. A partir disso, o presente trabalho apresentou os procedimentos para a instalação correta de tubulações PEAD em arranjo *slinky* dispostas em três valas trocadoras de calor no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa. Ainda, fez-se a realização do ensaio piloto para a determinação da condutividade térmica do solo local, caracterizado como uma argila silto-arenosa. Com a execução dos procedimentos de instalação e do ensaio, concluiu-se que o sistema foi adequadamente construído e o resultado da condutividade térmica encontrado de $2,02 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ se mostrou próximo ao valor obtido na literatura, corroborando a adequação do sistema de ensaio implementado.

PALAVRAS-CHAVE: energia geotérmica, vala trocadora de calor, Teste de Resposta Térmica, condutividade térmica, instalação de sistema geotérmico.

ABSTRACT: the increasing reliance on air conditioning equipment by the population, along with the environmental damage caused by non-renewable electricity sources, highlights geothermal energy as a viable option within the context of sustainability, as it is a clean and renewable energy source. For the development of projects involving geothermal energy use, it is necessary to determine the thermal conductivity of the soil, with the Thermal Response Test (TRT) being a field method commonly used for this purpose. Based on this, the present work presented the procedures for the proper installation of HDPE pipes arranged in a *slinky* configuration, distributed across three heat exchange trenches at the Experimental Geotechnical Research Site in Ponta Grossa. Additionally, a pilot test was carried out to determine the thermal conductivity of the local soil, which was characterized as a silty-sandy clay. With the completion of both the installation procedures and the test, it was concluded that the system was properly constructed, and the resulting thermal conductivity value of $2.02 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ was close to the value found in the literature, confirming the adequacy of the implemented testing system.

KEYWORDS: geothermal energy, heat exchange trench, Thermal Response Test, thermal conductivity, geothermal system installation.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis fósseis ainda é muito empregada para a geração de energia elétrica em todo o mundo, uma vez que a demanda por eletricidade por parte da população vem aumentando devido ao elevado uso de bens de consumo elétricos. Entretanto, o uso de fontes de energia não renováveis acaba sendo destrutivo para o meio ambiente, afetando o efeito estufa devido à emissão de gases poluentes na atmosfera (Cui *et al.*, 2019; Omido; Barboza; Júnior, 2017).

O Brasil apresentou um aumento no uso de aparelhos de ar condicionado no setor residencial entre 2005 e 2017, tendendo a aumentar significativamente até o ano de 2035 (Ministério de Minas de Energia, 2018). Mesmo o país possuindo a maior parte da sua geração de energia proveniente de fontes renováveis, como a hidrelétrica, ainda é necessária a busca por alternativas sustentáveis para suprir esse consumo.

Tonus (2023) destaca que é fundamental projetar edificações que proporcionem uma elevada eficiência energética da construção. Nesse contexto, a energia geotérmica superficial surge como uma opção sustentável para o aquecimento e resfriamento de ambientes internos das construções, diminuindo o consumo de energia elétrica devido ao uso de aparelhos de ar-condicionado.

A energia geotérmica é uma fonte energética limpa e renovável, armazenada em solos, rochas e fluidos presentes na crosta terrestre. Nas profundidades iniciais do solo, a variação de temperatura ocorre por meio da influência das condições climáticas e das estações do ano da região, recebendo e transmitindo o seu calor por meio de processos físicos de convecção, radiação e condução, sendo considerado um ponto de armazenamento de calor em dias ou épocas quentes e um local de liberação de calor em dias ou épocas frias. No entanto, a partir de uma determinada profundidade (em torno de cinco metros), a temperatura no subsolo torna-se constante, independente das condições climáticas que atingem a superfície. Essa temperatura constante produz uma energia denominada energia geotérmica de baixa densidade energética ou energia geotérmica de fonte solar (Bandeira Neto, 2015; Morais, 2019).

A condutividade térmica é uma propriedade do solo que indica a capacidade do material em conduzir calor e está relacionada com sua porosidade, conteúdo mineral e grau de saturação do material. Quanto mais poroso o meio, menor será a sua condutividade térmica efetiva. Isso se deve ao fato de que os fluidos (água ou ar) que preenchem os vazios possuem uma condutividade térmica menor que as partículas de solo, reduzindo a troca de calor por condução que ocorreria preferencialmente entre os grãos (Morais, 2019; Pessin, 2021).

Ademais, Loveridge (2012) comenta que a condutividade térmica também está associada à constituição mineralógica do material e ao seu grau de saturação. Em solos e rochas com alta concentração de quartzo em sua composição e que estejam completamente saturados apresentam maior condutividade térmica, pois o quartzo é o mineral que mais conduz calor, enquanto a água é mais condutora térmica que o ar.

Para a obtenção da condutividade térmica do solo, o Teste de Resposta Térmica (TRT) é um ensaio *in situ* que pode ser utilizado em local ou profundidade desejados. Esse ensaio é fundamental para a realização de projetos de climatização geotérmicos horizontais, fornecendo os parâmetros necessários para o seu dimensionamento (Bandeira Neto, 2015).

Neste contexto, considerando ser um ensaio de longa duração, a necessidade de adequado preparo do sistema trocador de calor para sua realização e a inexistência de normativa nacional sobre o tema, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os procedimentos necessários na etapa prévia à realização dos ensaios de Teste de Resposta Térmica, seguido de validação realizada através de ensaio piloto conduzido no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG).

2 TESTE DE RESPOSTA TÉRMICA

O Teste de Resposta Térmica é um ensaio realizado em campo para determinar parâmetros de condutividade térmica e resistência térmica do solo. Este ensaio consiste em injetar ou retirar calor no solo a uma taxa constante, por meio de um fluido responsável pela troca térmica (Bandeira Neto, 2015).

Primeiramente, deve-se realizar um furo prévio no solo, com a profundidade necessária para a obtenção dos parâmetros desejados. Em seguida, é inserido um tubo no subsolo que permitirá a circulação do fluido (normalmente água, por não ser poluente caso ocorram vazamentos e não congela devido ao clima tropical brasileiro) funcionando como trocador de calor com o auxílio de uma bomba (Bandeira Neto, 2015; Niedvieski, 2023).

Essa tubulação será conectada ao equipamento TRT, composto por um aquecedor (responsável pelo fornecimento de energia térmica ao fluido para realizar a troca térmica com o solo), uma bomba d'água

(responsável por realizar a circulação do fluido de troca térmica), medidor de vazão, sensores de temperatura na entrada e na saída da tubulação e um sistema de aquisição de dados. A Figura 1 apresenta um esquema de como é instalado o equipamento TRT em campo (Bandeira Neto, 2015).

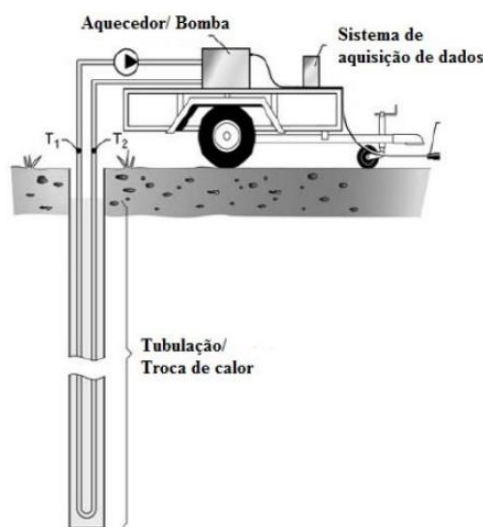


Figura 1. Esquema de instalação do equipamento TRT (Bandeira Neto, 2015)

O Teste de Resposta Térmica deve ser realizado com um tempo de duração entre 36 e 48 horas com a aplicação da carga térmica, sendo necessário desconsiderar os dados coletados nas primeiras 12 horas de ensaio. Isso se deve ao fato de que as primeiras horas possuem temperaturas mais elevadas devido ao efeito transitório, devendo-se anotar a temperatura do solo não perturbado (Urresta *et al.*, 2021; Niedvieski, 2023).

Para a interpretação dos dados coletados no ensaio, a condutividade térmica do solo é determinada utilizando o método de cálculo descrito por Urresta *et al* (2021) para trocadores geotérmicos horizontais, apresentado na Equação (1):

$$\lambda = \frac{q_E}{2 \pi \times m'} \quad (1)$$

Onde o q_E é a taxa de injeção de calor por unidade de comprimento e m' é a inclinação da reta. A inclinação da reta é obtida através do gráfico da temperatura média do fluido pelo logaritmo do tempo. Nesse gráfico, insere-se a reta de regressão linear e identificado o trecho mais linear, cujo coeficiente de determinação (R^2) está próximo da unidade. Com isso, a equação dessa faixa do gráfico fornecerá o valor de m' (Urresta *et al.*, 2021).

3 TROCADORES GEOTÉRMICOS HORIZONTAIS

Para terrenos em que a área não ocupada por construções seja consideravelmente grande, a utilização de trocadores de calor horizontais ou sistemas *ground heat exchanger* (GHE) pode ser uma opção mais econômica para a realização da climatização de edificações, uma vez que não haveria gastos com equipamentos sofisticados para realizar perfurações muito profundas. Todavia, o desempenho térmico do sistema acaba sofrendo com as variações sazonais impostas pelo meio, como temperatura ambiente, sombreamento, radiação solar, precipitação, entre outros (Visintin, 2023).

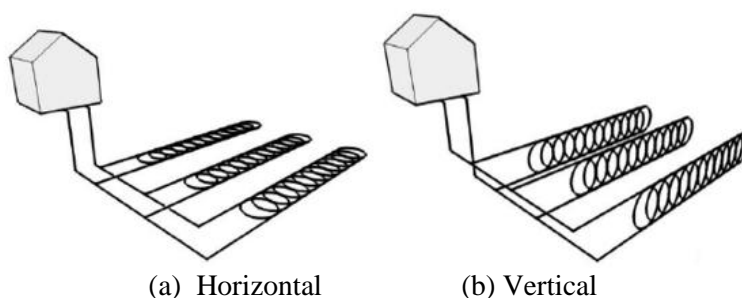
Para a instalação desses trocadores térmicos, torna-se necessário realizar a abertura de valas para, então, inserir os tubos que ficarão em contato direto com o solo para ocorrer a troca térmica (Cui *et al.*, 2019). A Figura 2 apresenta as principais configurações de tubulações de circuitos fechados que são colocadas nas valas.

(a) Arranjo *loop* linear(b) Arranjo *slinky*

(c) Arranjo espiral

Figura 2. Trocadores horizontais fechados: (a) *loop* linear; (b) *slinky*; (c) espiral (adaptado de Cui *et al.*, 2019)

Dentre essas configurações, o arranjo que busca o maior aproveitamento da área do terreno, onde possam ser abertas as valas, é a configuração *slinky*, pois a tubulação fica mais longa para o uso geotérmico. Os arranjos são laços que podem ser dispostos de maneira vertical ou horizontal na vala, como apresentado na Figura 3. Por possuir uma tubulação, há um aumento na demanda de funcionamento da bomba, diminuindo o seu desempenho (Cui *et al.*, 2019).



(a) Horizontal

(b) Vertical

Figura 3. Disposição da configuração *slinky*; (a) horizontal; (b) vertical (Cui *et al.*, 2019)

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia proposta para o desenvolvimento da pesquisa consiste em detalhar a preparação dos equipamentos necessários para a realização de ensaios de Teste de Resposta Térmica em sistemas geotérmicos horizontais, visando a apresentação de procedimentos para aplicação em ensaios futuros baseado em ensaio piloto de validação.

Inicialmente, na Figura 4, é apresentado o projeto de instalação e disposição das valas trocadoras de calor no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), no campus de Uvaranas, área constituída por uma argila silto-arenosa (Niedvieski, 2024). O sistema é composto por três conjuntos de tubulações em arranjo *slinky*, interconectáveis através de *manifolds* instalados entre as tubulações de cada vala. As cotas do projeto estão em centímetros.

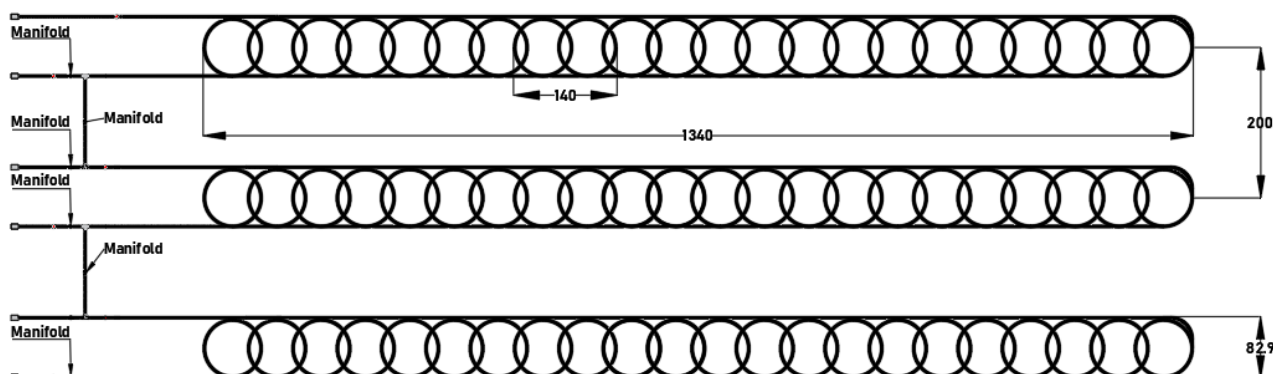


Figura 4. Disposições das valas geotérmicas em campo

Além disso, a Tabela 1 apresenta o quantitativo de materiais que foram utilizados durante o processo de execução do projeto de instalação das valas.

Tabela 1. Quantitativos de materiais empregados nas valas

Material	Quantidade
Tubulação PEAD Ø 32 mm	300 metros
Registro de esfera 1''	6 unidades
Adaptador de compressão PEAD RM 32mm x 1''	12 unidades
Tê de compressão PEAD Ø 32 mm	4 unidades
Cap PEAD Ø 32 mm	6 unidades

Para a execução desse projeto, foram utilizados tubos de material PEAD com 32 mm de diâmetro para a execução das tubulações na configuração *slinky*, permitindo um melhor aproveitamento da área do terreno. Foram realizados três conjuntos, com cada espiral amarrada com abraçadeiras de nylon, como mostrado na Figura 5.

Figura 5. Montagem em laboratório das tubulações em arranjos *slinky*

Com a finalização da montagem em laboratório, as tubulações e os *manifolds* foram transportadas e instaladas no CEEG-PG, seguido o projeto descrito na Figura 4. A escavação foi realizada a 1,5 metros de profundidade, não havendo a presença de nível d'água nessa posição no subsolo, uma vez que a água foi encontrada à cerca de 11 metros de profundidade, conforme estudo de Tonus (2023).

Para a escavação, utilizou-se uma retroescavadeira disponibilizada pela Prefeitura do Campus da Universidade Estadual de Ponta Grossa (PRECAM-UEPG), equipamento que realiza a escavação do solo e de maneira rápida e controlada. Durante o processo, cada vala foi executada individualmente, iniciando a construção da próxima assim que fosse finalizada a anterior.

A ligação das valas foi realizada por meio da instalação dos *manifolds*. Para isso, foi necessária a colocação de adaptadores de compressão para conectar o registro de esfera, permitindo o controle da entrada de água durante os ensaios. A conexão da vala com o equipamento TRT foi realizada utilizando os adaptadores de compressão já existentes no equipamento. A Figura 6 apresenta o processo de instalação do sistema trocador de calor horizontal, desde a escavação até as conexões finais.



(a) Escavação



(b) Manifold



(c) Ligação

Figura 6. Instalação de valas geotérmicas: (a) escavação; (b) manifold (c) conexão com o equipamento TRT

Com a finalização da instalação do sistema geotérmico horizontal, o equipamento utilizado para fazer o teste de resposta térmica foi o TRT, mostrado na Figura 7, desenvolvido pela empresa Solution IPD, que cedeu o equipamento para uso na presente pesquisa. Esse equipamento possui uma bomba de água, um aquecedor, um sistema de aquisição automatizada de dados (temperaturas de entrada e saída do fluido circulante) e medidor de vazão (Niedvieski, 2024).



Figura 7. Equipamento TRT

Esse equipamento foi abastecido com o sistema de fornecimento de água local, bem como conectado à rede elétrica, garantindo o correto funcionamento para a execução dos ensaios de campo. O tempo estimado para a realização do ensaio foi de 48 horas, acrescentando 48 horas adicionais destinadas à obtenção da curva de decaimento. O aquecedor foi acionado com uma temperatura de aquecimento da água de 40 °C, enquanto a bomba hidráulica operou com uma frequência de 30 Hz, correspondente à frequência mínima de funcionamento do equipamento. Para a obtenção da condutividade térmica do solo (λ), recorreu-se ao método de cálculo apresentado por Urresta *et al.* (2021).

5 RESULTADOS

O ensaio piloto foi executado em uma das valas e verificou-se que o sistema foi corretamente instalado, não apresentando nenhum dano durante a instalação em campo, o que possibilitou a realização do ensaio sem problemas de vazamento de água no subsolo.

Durante o transporte do equipamento TRT até a vala trocadora de calor em campo, o medidor de vazão foi danificado, interferindo na coleta de dados através da leitura diretamente pelo instrumento. Por essa razão, foi necessário realizar a medição da vazão de forma manual, através do controle de tempo para o bombeamento de água em recipiente com volume conhecido. O procedimento foi realizado com três repetições, resultando no valor de vazão de 19,93 L/min.

Os resultados obtidos para o ensaio piloto estão apresentados na Figura 8, mostrando a temperatura de entrada (saída do equipamento e entrada no solo), a temperatura de saída (saída do solo e entrada no equipamento) e a variação de temperatura (ΔT).

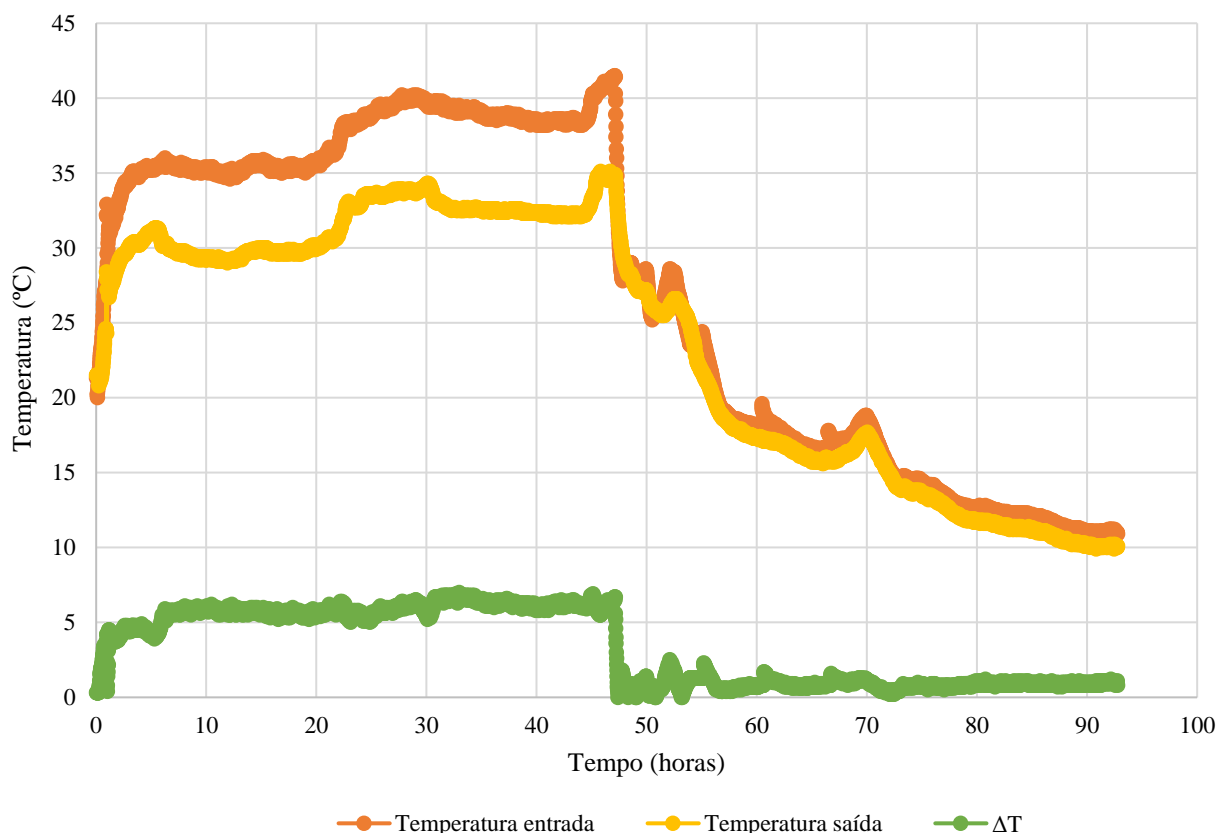


Figura 8. Temperaturas de entrada, de saída e variação de temperatura em relação ao tempo

Como pode ser observado, o Figura 8 mostra que a temperatura começou a estabilização a partir de 6 horas de ensaio, indicando uma variação média de aproximadamente 6,0 °C. Esse comportamento se manteve por mais 41 horas de ensaio, até que ocorreu um desligamento inesperado do aquecedor, o que fez com que a temperatura começasse a cair a partir das 47 horas, impedindo que o teste alcançasse as 48 horas inicialmente planejadas.

Após esse período, observou-se o decaimento da temperatura, que voltou a se estabilizar a partir das 77 horas de ensaio. A partir desse ponto, houve a estabilização térmica do solo, com uma variação média de temperatura de 0,9 °C, comportamento que se manteve até as 92 horas de ensaio.

Para o cálculo da condutividade térmica do solo, foram desconsideradas as primeiras 12 horas do ensaio, sendo utilizado o trecho mais retilíneo do gráfico da temperatura média do fluido pelo logaritmo do tempo antes do decaimento da temperatura, cuja inclinação da reta foi de 6,1816.

Com isso, o valor de condutividade térmica obtido foi de 2,02 W/m °C. Esse resultado se aproximou do valor de 1,47 W/m °C encontrado por Lopes (2024) no mesmo local, demonstrando, mais uma vez, que a montagem das valas foi bem-sucedida e que os ensaios futuros tendem a resultar em valores coerentes com a literatura.

Outro ponto importante é que Tonus (2023) identificou a presença do mineral quartzo no solo argiloso durante seu projeto de pesquisa. Isso justifica a condutividade térmica ser relativamente alta, já que solos com baixa saturação geralmente apresentam condutividade térmica menor. Além disso, a condutividade térmica de solos argilosos normalmente se encontra em um intervalo entre 0,9 W/m°C a 1,8 W/m°C. Em solos com baixa saturação, o principal mecanismo de troca de calor que ocorre no solo é a condução, podendo ser favorecida pela presença de minerais com alta condutividade térmica, como o quartzo (Bandeira Neto, 2015; Niedvieski, 2023).

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou a realização da montagem de sistemas geotérmicos horizontais, apresentando todos os procedimentos necessários para a instalação correta das tubulações dentro das valas. Ainda, deverá ser revisto o funcionamento do equipamento TRT, a fim de garantir a plena execução para outros ensaios. Isso mostra a importância de se transportar o equipamento de uma maneira mais segura, devido à fragilidade das peças. Apesar disso, o ensaio piloto apresentou um resultado coerente para o solo do local, o que garante confiabilidade aos ensaios futuros que serão executados nas valas trocadoras de calor.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto. À UEPG, por disponibilizar materiais, equipamentos e mão de obra para a execução das atividades no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos. À Solution IPD, por desenvolver o equipamento TRT para a realização do Teste de Resposta Térmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDEIRA NETO, L. A. *Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado*. 2015. Mestrado em Geotecnia – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- BRASIL. *Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética* (Nota Técnica EPE, No 030/2018). Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-epe-030-2018>. Acesso em: 16 mai. 2024.
- CUI, Y. et al. Techno-economic assessment of the horizontal geothermal heat pump systems: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, v. 191, p. 208–236, jul. 2019.
- LOPES, L. F. A. *Comportamento térmico do solo através de testes de resposta térmica (TRT) em trocadores geotérmicos superficiais*. 2024. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- LOVERIDGE, Fleur. *Characterisation of Ground Thermal and Thermo-Mechanical Behaviour for Shallow Geothermal Energy Applications*. 2012. University of Southampton, 2012.
- MORAIS, T. D. S. O. *Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical*. 2019. Doutorado em Geotecnia – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- NIEDVIESKI, L. B. *Energia geotérmica: determinação das propriedades térmicas do solo através do ensaio do cone térmico (TCT)*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2023.
- OMIDO, A. R.; BARBOZA, C. S.; JÚNIOR, O. M. *Energia geotérmica: Uma aliada na busca da eficiência energética*. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campo Grande: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017.
- PESSIN, J. *Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado*. 2021. Doutorado em Geotecnia – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.
- TONUS, B. P. A. *Avaliação da utilização do ensaio de cone térmico (TCT) na obtenção de propriedades térmicas necessárias ao dimensionamento de estruturas geotérmicas*. 2023. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- URRESTA, E. et al. *Ground thermal conductivity estimation using the thermal response test with a horizontal ground heat exchanger*. *Geothermics*, v. 96, p. 102213, nov. 2021.
- VISINTIN, A. F. *Avaliação de trocador geotérmico horizontal em solo residual de basalto*. 2023. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.