



## Uso de fundações por estacas trocadoras de calor no *CICS Living Lab* em São Paulo: um estudo de caso

Letícia Menezes Santos Sá

Doutoranda, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil,  
leticiamenezes@usp.br

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Professora, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil,  
chctsuha@sc.usp.br

Juliana Pessin

Professora, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, jpressin@id.uff.br

Milena Cardoso de Freitas Murari

Pós-doutoranda, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, milena.cardoso@usp.br

Alberto Hernandez Neto

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, ahneto@usp.br

**RESUMO:** A demanda por fontes de energia limpas e renováveis, que possam contribuir para redução das emissões de carbono, tem crescido substancialmente nos últimos anos, em virtude dos sérios problemas ambientais que o planeta tem enfrentado. A energia geotérmica superficial, que pode ser aproveitada por meio de sistemas *Ground Source Heat Pump* (GSHP) acoplados às fundações profundas de edificações, é uma alternativa interessante, que permite extrair ou rejeitar calor do/no solo ao longo do ano, possibilitando a climatização de ambientes de uma edificação através das trocas térmicas. Para avaliar esse tipo de tecnologia (largamente empregada em países de clima temperado) em condições de clima brasileiro, o futuro edifício *CICS Living Lab* está sendo construído no campus da Universidade de São Paulo empregando dois tipos de fundações trocadoras de calor: estacas hélice contínua e estacas tubulares metálicas preenchidas com graute. Portanto, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar o primeiro caso de obra monitorado utilizando fundações por estacas trocadoras de calor no Brasil e descrever a execução de ensaios térmicos que foram realizados nestas fundações, que serão empregadas para aproveitamento da energia geotérmica superficial presente no subsolo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas trocadoras de calor, energia geotérmica superficial, *CICS Living Lab*, GSHP.

**ABSTRACT:** Due to the serious environmental issues the planet has been facing, the demand for clean and renewable energy sources has grown substantially in recent years. Shallow geothermal energy is a promising alternative, which can be harnessed through *Ground Source Heat Pump* (GSHP) systems coupled to building deep foundations. Through thermal exchanges, this system allows the heating or cooling of a building throughout the year by extracting or rejecting heat from/into the ground. To evaluate this type of technology (widely used in temperate countries) under Brazilian climate conditions, the future *CICS Living Lab* building is being built on the

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





campus of the University of São Paulo using two types of heat exchanger foundations: continuous flight auger piles and metallic tubular piles filled with grout. Therefore, this paper presents the first case monitored of a building site using heat exchanger foundations in Brazil and describes the execution of thermal tests carried out in these foundations, which will be used to take advantage of the shallow geothermal energy present in the subsoil.

**KEYWORDS:** Heat exchanger piles, shallow geothermal energy, CICS Living Lab, GSHP.

## 1 INTRODUÇÃO

Diante de um cenário de crise climática e aquecimento global, a busca por fontes de energia limpas e renováveis tem se mostrado uma prioridade à nível mundial. O Brasil, apesar de ter 45,3% da sua matriz energética proveniente de fontes renováveis, ainda possui grande dependência da energia gerada pelas hidrelétricas, que é fortemente afetada por crises hídricas, como a ocorrida recentemente, em 2021, que foi a mais severa já registrada no país nos últimos 91 anos (Brasil, 2021; Brasil, 2018). Em situações como essa, ainda se recorre ao consumo de energia proveniente das usinas termoelétricas, que emitem gases poluentes e levam a um aumento nas contas de eletricidade de um modo geral.

Assim, considerando um contexto de mudança do clima, com a ocorrência de cada vez mais eventos extremos (dentre eles, eventos de seca) e do aumento das temperaturas em escala global, que tem levado a um crescimento expressivo da demanda por climatização artificial, é importante buscar alternativas que permitam diversificar a matriz energética brasileira. O Plano Nacional de Energia para 2050 (PNE 2050) já apresenta a energia geotérmica superficial como uma tecnologia potencialmente disruptiva, que pode alterar de forma significativa o mercado de energia nos próximos anos (Brasil, 2020).

Esse tipo de tecnologia já vem sendo amplamente empregado há décadas em diversos países do mundo e desde a década de 80 tem sido associado às fundações profundas (estacas) das edificações na Áustria e na Suíça, por exemplo (Brandl, 2006). As fundações por estacas trocadoras de calor consistem em elementos de fundação com dupla função: à função convencional, de resistir aos carregamentos da edificação (estados limite último e de serviço), é adicionado um segundo papel, o de realizar trocas térmicas com o solo. Esse processo se baseia no princípio da inércia térmica do subsolo em uma certa profundidade a partir da superfície (Bandeira Neto, 2015; Brandl, 2006; Clarke *et al.*, 2008; Florides; Kalogirou, 2007).

Através de um sistema de bomba de calor geotérmica (*Ground Source Heat Pump*, GSHP) acoplado às fundações profundas, é possível realizar o aquecimento ou resfriamento das edificações. O processo consiste em circular um fluido (geralmente a água, no caso do Brasil) por meio de tubos inseridos nas estacas (circuito primário, onde será feita a troca de calor com o solo). Esses tubos são conectados a uma bomba de calor geotérmica, que faz a ligação entre o circuito primário e os ambientes da edificação que serão resfriados ou aquecidos no processo (circuito secundário) (Narsilio *et al.*, 2014). Quando o sistema é usado para resfriamento, o calor de ambientes é rejeitado no subsolo ao longo do tempo. Já quando este é empregado para aquecimento, há a extração de calor do solo. Também há a possibilidade de extrair / rejeitar calor sazonalmente no subsolo de acordo com as demandas de aquecimento/resfriamento, a depender do clima do país.

No caso do Brasil, um país, em sua maior parte, de clima tropical, em que a demanda por resfriamento dos ambientes é predominante ao longo do ano, faz-se necessário entender como o uso desse sistema (até então majoritariamente difundido e empregado em países de clima temperado) se comportaria. Por isso, a fim de estudar o aproveitamento da energia geotérmica

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



superficial através das fundações aqui no Brasil, esse sistema será empregado no CICS *Living Lab*, um prédio que está sendo construído na Universidade de São Paulo para testar soluções sustentáveis do setor da construção civil em uma situação de uso real.

As fundações por estacas trocadoras de calor desse prédio foram finalizadas no início de 2020 e, desde então, vários ensaios têm sido realizados para melhor prever e compreender como será o comportamento desse sistema em situação de uso (Murari; Tsuha; Loveridge, 2022; Pessin; Tsuha, 2023; Sá *et al.*, 2022). Nesse contexto, surge o principal objetivo deste trabalho: apresentar o primeiro caso de obra monitorado utilizando-se fundações por estacas trocadoras de calor (*energy piles*) no Brasil e descrever os ensaios térmicos que foram empregados para analisar essas fundações.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 CICS *Living Lab*

O Centro de Inovação em Construção Sustentável (CICS) *Living Lab* está situado no campus da Universidade de São Paulo (USP), no sudeste de Brasil, estado de São Paulo (latitude: 23°33'15.8"S e longitude: 46°43'51.2"W). Este será o primeiro edifício do Brasil com climatização sustentável a partir de sistema de aproveitamento da energia geotérmica superficial por meio de fundações instrumentadas. Essas fundações já estão construídas e diversos ensaios já foram realizados até então para melhor compreender o seu comportamento.

A construção do CICS *Living Lab* tem se tornado possível por meio de parcerias entre a USP e empresas privadas. Esse prédio tem por finalidade testar e a demonstrar soluções sustentáveis e inovadoras, possibilitando avaliar o seu desempenho durante o uso, antes que sejam lançadas no mercado, reduzindo possíveis riscos associados (CICS-USP, 2020).

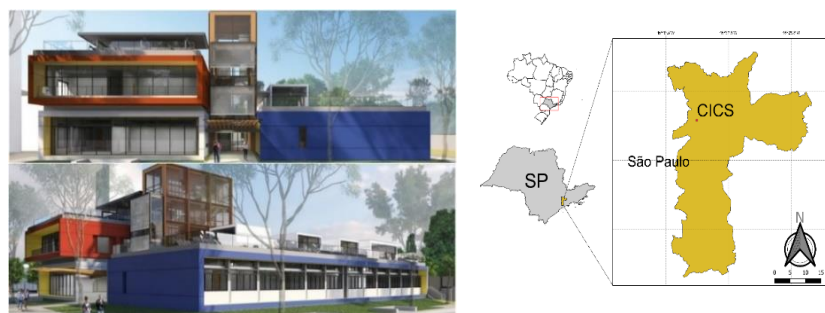


Figura 1. Vistas da fachada frontal e do fundo e localização do CICS *Living Lab* (Adaptado de Sá *et al.*, 2022 e CICS-USP, 2020).

### 2.2 Condições do Subsolo

Por meio de ensaios SPT (*Standard Penetration Test*) realizados no local de estudo obteve-se o perfil do terreno. Como pode ser verificado em Sá *et al.* (2022), há predominância de uma areia argilosa fina, medianamente compacta, com a presença de um aterro (argila siltosa e areia argilosa) próximo à superfície, seguido por uma camada de argila orgânica silto-arenosa muito mole, logo acima da camada de areia argilosa. Por fim, abaixo da camada de areia argilosa, é possível identificar a presença de lentes de argila siltosa mole, seguidas por uma areia argilosa fina compacta. O nível do lençol freático possui variação sazonal, ficando aproximadamente entre 2 e 4 m de profundidade a partir da superfície do terreno.

### 2.3 Características térmicas do solo e clima da área de estudo

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





A cidade de São Paulo está localizada na região sudeste do Brasil e possui clima subtropical, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos (temperatura média anual de 19,1°C).

Alguns trabalhos anteriormente desenvolvidos no CICS *Living Lab* forneceram dados importantes para a caracterização térmica da área de estudo. Através desses trabalhos, verificou-se que a partir de 4 a 5 m de profundidade, a temperatura do subsolo no CICS permanece aproximadamente constante, com um valor em torno de 24°C (Murari; Tsuha; Loveridge, 2022; Pessin, 2021). Além disso, através dos ensaios de resposta térmica (TRT's) nas estacas tubulares de aço piloto, previamente realizados por Murari; Tsuha; Loveridge (2022), foram obtidos valores de condutividade térmica média do solo ao longo do comprimento da estaca de aproximadamente 2,6 W/m°C.

### 3 ESTACAS TROCADORAS DE CALOR

Como solução de fundação do CICS *Living Lab* foram adotados dois tipos de estaca: estacas hélice contínua de concreto e as estacas tubulares metálicas. No interior das estacas trocadoras de calor foram inseridos tubos de polietileno da alta densidade (PEAD) para realização das trocas de calor com o solo, com diâmetro externo de 32 mm e interno de 26 mm.

No total, foram instaladas 46 estacas, sendo 45 trocadoras de calor. Dessas, têm-se 13 (treze) estacas do tipo hélice contínua mais 08 (oito) estacas tubulares metálicas, com a função de fundação do prédio a ser construído, e mais 05 (cinco) estacas hélice contínua e 20 (vinte) estacas metálicas piloto, utilizadas para ensaios realizados em diferentes pesquisas. As estacas-piloto também serão usadas para compor o sistema de climatização por geotermia do prédio, exceto uma das metálicas, que não possui tubulação para troca de calor (Figura 2).

Para realização dos ensaios, foram utilizadas as estacas piloto e apenas uma das estacas metálicas do prédio. Todas as estacas foram instrumentadas com sensores de temperatura ao longo da profundidade, do tipo PT-100 classe A, com uma precisão de  $\pm 0,15$  para 0°C e  $\pm 0,35$  para 100°C. Maiores informações sobre as estacas podem ser encontradas em Murari; Tsuha; Loveridge (2022) e Pessin; Tsuha (2023).

### 4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

A fim de melhor compreender as propriedades relativas à transferência de calor no subsolo e ao desempenho das fundações trocadoras de calor, foram executados dois tipos de ensaios no CICS *Living Lab*: ensaio de resposta térmica (*Thermal response test*: TRT) e ensaio de desempenho térmico (*Thermal performance test*: TPT).

#### 4.1 Ensaios de resposta térmica (TRT's)

O projeto de sistemas GSHP com maior precisão e qualidade envolve a determinação de parâmetros que usualmente são obtidos por meio do ensaio de resposta térmica (TRT), reconhecido como ensaio padrão para realização dessa estimativa (ASHRAE, 2015; IGSHPA, 2017). O TRT é muito utilizado para estimativa de parâmetros para projeto e avaliação do desempenho de sistemas trocadores de calor geotérmicos. Os principais resultados obtidos através do TRT são a condutividade térmica efetiva do subsolo até a profundidade investigada e a resistência térmica do furo ou estaca trocadora de calor. A principal característica desse ensaio é que uma taxa de energia térmica constante é imposta ao subsolo, por meio da circulação do fluido trocador de calor no interior dos tubos instalados nas estacas, formando um sistema fechado.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



Dessa forma, induz-se um fluxo de calor e monitora-se a resposta do solo durante um certo intervalo de tempo (Bandeira Neto, 2015; Morais, 2019).

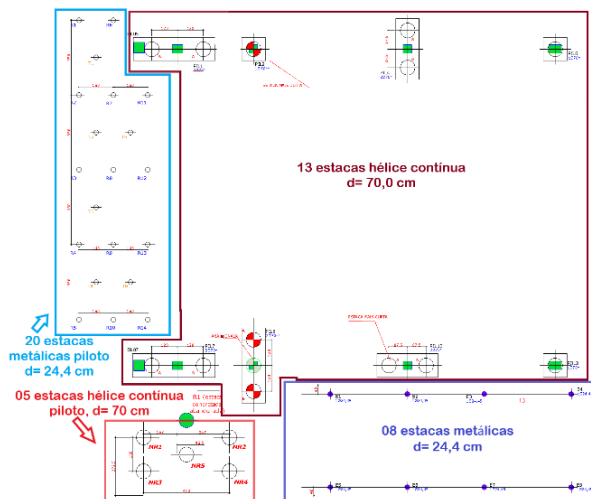


Figura 2. Adaptada com base no projeto de fundações da Consultrix Eng. Associados LTDA.

Não existe norma brasileira que oriente a execução do ensaio, mas, em geral, costuma-se seguir os procedimentos estabelecidos pelo *European Committee for Standardization*, na BS EN ISO 17628/2015 (CEN, 2015). A interpretação dos resultados obtidos através de um TRT pode ser feita de diferentes formas, podendo para isso ser utilizados modelos numéricos ou analíticos. Os métodos analíticos mais empregados para análise e compreensão dos resultados são a Teoria da fonte linear e a Teoria da fonte cilíndrica. Por meio desses métodos, com base nos resultados obtidos do ensaio TRT, é possível determinar a condutividade térmica efetiva do subsolo até a profundidade investigada ( $\lambda_{eff}$ ) e a resistência térmica do furo ou estaca trocadora de calor ( $R_b$ ), parâmetros importantes para a elaboração de projetos de sistema de climatização por bombas de calor geotérmica conectada às fundações por estacas.

#### 4.1.1 TRT's realizados no CICS *Living Lab*

Os primeiros registros de ensaios TRT realizados no Brasil estão presentes no trabalho de Bandeira Neto (2015). Nesta pesquisa, cinco ensaios de resposta térmica (TRT) foram executados no Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo em São Carlos/SP, antes do início da construção do CICS *Living Lab*.

Em seguida, Morais e Tsuha (2018) realizaram um ensaio TRT em uma estaca raiz trocadora de calor localizada no terreno do CICS *Living Lab* (que não fazia parte do projeto), sendo este o primeiro caso reportado na literatura de um TRT realizado na cidade de São Paulo.

Em seguida, Murari, Tsuha e Loveridge (2022) estudaram diferentes materiais de preenchimento das estacas tubulares metálicas do CICS (água, areia saturada, graute e graute com fibras de aço) para decidir qual seria o mais adequado em termos de custo, desempenho térmico, facilidade de execução na obra e sustentabilidade (menor emissão de  $CO_2$ ). Para isso, foram realizados ensaios TRT a fim de permitir a comparação entre os desempenhos desses materiais.

Com base nos parâmetros fornecidos a partir dos resultados dos ensaios TRT foram aplicados modelos numéricos e analíticos para avaliar cada uma das alternativas. Assim, por meio

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



dos resultados dos ensaios TRT, as autoras estimaram a condutividade térmica do solo e a resistência térmica da estaca por meio da solução analítica da Teoria da fonte linear. Além disso, foi possível verificar que a resistência térmica da estaca metálica preenchida com graute foi cerca de 20% maior do que a estaca preenchida com água, e semelhante às estacas preenchidas com areia saturada.

Concluiu-se, portanto, que, as estacas preenchidas com água ou areia saturada, dentre as opções testadas, foram as alternativas mais econômicas e com materiais que proporcionam menor emissão de CO<sub>2</sub>, além de fornecerem resultados iguais ou equivalentes em termos de desempenho térmico à solução com graute, que seria a mais convencional. A opção de graute com fibras de aço tem um custo muito maior do que as demais opções, apesar de ter fornecido uma resistência térmica da estaca um pouco menor que a estaca preenchida com água.

Por fim, Pessin e Tsuha (2023) executaram quatro ensaios de resposta térmica em estacas hélice contínua com diferentes configurações de tubo, instaladas no subsolo do CICS. Os ensaios foram feitos mantendo taxas de injeção de calor e vazões semelhantes para cada uma das configurações de tubo (W: 1481 W e 0,77 m<sup>3</sup>/h; triplo-U: 1512 W e 0,55 m<sup>3</sup>/h; espiral com espaçamento de 600 mm: 1422 W e 0,78 m<sup>3</sup>/h e espiral com espaçamento de 300 mm: 1517 W e 0,75 m<sup>3</sup>/h).

As autoras concluíram que a temperatura dos trechos de estaca instalados em camadas de solo com menor condutividade térmica (argila mole) era maior do que naquelas seções em que a condutividade térmica do solo circundante era maior (areia saturada), e que, a recuperação inicial da temperatura da estaca depois do ensaio de aquecimento foi mais rápida para a seção da estaca instalada na camada de areia com maior velocidade do fluxo de água subterrâneo. Esse fluxo possivelmente melhorou a transferência de calor no solo por convecção, segundo as autoras, o que conduziu a esses resultados.

Adicionalmente, notou-se também que as propriedades térmicas do solo ao longo do comprimento da estaca também afetaram as temperaturas das estacas vizinhas àquela que está sendo ensaiada, e que, no projeto de grupos de estacas trocadoras de calor, é importante levar em consideração a influência das múltiplas camadas de solo.

Além disso, ao analisar as diferentes configurações de tubo, as autoras concluíram que o efeito dessas diferentes configurações na resistência térmica e na eficiência de transferência de calor da estaca termoativa, não é diretamente proporcional a razão entre a área superficial de tubos e a área superficial da estaca. Isso ocorre porque existe interferência térmica entre os *loops* dos tubos trocadores de calor. Ou seja, um volume de tubos maior para o mesmo comprimento de estaca pode apresentar uma melhor eficiência apenas nas primeiras horas, pois, ao longo do tempo, esse efeito decresce dado que, nas estacas com maior volume de tubos há uma maior proximidade entre eles, o que pode ocasionar maior interferência térmica. Assim, é possível que em casos de operação intermitente, o efeito do maior volume de tubos possa ser mais significativo.

#### 4.2 Ensaios de desempenho térmico (TPT's)

O ensaio de desempenho térmico (TPT) é um método experimental relativamente recente quando comparado a outros ensaios utilizados para analisar o comportamento de estacas trocadoras de calor, como o Ensaio de Resposta Térmica (TRT). O TPT começou a ser utilizado apenas em meados dos anos 2000, tanto para estacas quanto para furos trocadores de calor.

Segundo Choi, Kikumoto e Ooka (2018), as estacas trocadoras de calor não possuem os mesmos comportamentos e desempenhos térmicos de um furo trocador de calor convencional, especialmente devido às diferenças de formato e material empregado. Assim, por conta dessas diferenças e levando em consideração a maior complexidade geométrica, que aumenta as

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





incertezas na construção, é crucial conhecer a capacidade de troca de calor real de uma estaca termotativa. Dessa forma, o ensaio de desempenho térmico (TPT) foi implementado para atender a essa demanda.

A principal característica do TPT é que a temperatura de entrada do fluido trocador de calor é controlada, de modo que seja mantida aproximadamente constante durante o ensaio, como condição experimental, diferente do que acontece no TRT, no qual a condição de ensaio é que seja mantida uma taxa de calor constante.

Por ser um ensaio de campo, o TPT permite avaliar o desempenho térmico das estacas trocadoras de calor *in situ*, em condições que possibilitam simular o uso de uma bomba de calor geotérmica instalada em um edifício comercial típico (Lee *et al.*, 2021). Dessa forma, com base nos dados obtidos através de um ensaio TPT, é possível calcular a taxa de troca de calor por profundidade da estaca ( $q$ ) através da Equação 1:

$$q = m \cdot c \cdot (T_{in} - T_{out})/L \quad (1)$$

Onde  $m$  é a vazão do fluido ( $\text{kg s}^{-1}$ );  $c$  é a capacidade de calor específica do fluido ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );  $T_{in}$  é a temperatura de entrada do fluido (K);  $T_{out}$  é a temperatura de saída do fluido (K) e  $L$  é o comprimento ativo da estaca (comprimento contendo tubos trocadores de calor) (m).

Diversos autores têm estudado o comportamento de estacas trocadoras de calor com diferentes configurações de tubos por meio do TPT (Gao *et al.*, 2008; Jalaluddin *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2016; Zarrella; De Carli e Galgaro, 2013). Além dos estudos analisando o desempenho de diferentes configurações de tubos trocadores de calor, tomando-se em conta o problema de aquecimento do solo a longo prazo em regimes desbalanceados, como é o caso do Brasil, em que a demanda por resfriamento é muito superior à de aquecimento ao longo do ano, a análise de diferentes modos de operação dos sistemas GSHP visando mitigar esse problema tem sido fundamental. Através de ensaios de desempenho térmico, é possível simular diferentes formas de funcionamento do sistema (contínuo, intermitente e alternado), a fim de analisar qual delas fornecerá uma melhor eficiência.

#### 4.2.1 TPT's realizados no CICS Living Lab

Inicialmente, foi realizado um primeiro TPT contínuo, com duração de cerca de 170 h, na estaca trocadora de calor em concreto com configuração de tubos em triplo U. Os resultados desse ensaio foram apresentados em (Sá *et al.*, 2022).

Ele foi executado a uma vazão média de 9,3 L/min e com temperatura de entrada de 35°C, obtendo-se como resultado que, após cerca de 110 h de rejeição de calor no solo, a temperatura da estaca tornou-se aproximadamente constante. Somado a isso, depois de algumas horas de ensaio, a taxa de troca de calor diminuiu de maneira significativa e praticamente se estabilizou a um valor quase constante de aproximadamente 85 W/m (capacidade de troca de calor por metro de estaca).

Além desse ensaio, Sá (2024, no prelo) realizou ensaios TPT para avaliar o desempenho térmico das estacas trocadoras de calor do CICS com diferentes modos de operação do sistema: contínuo e intermitente. Esses ensaios foram executados na estaca de concreto piloto com configuração dos tubos em triplo-U e em uma das estacas tubulares metálicas que servirá como fundação do prédio, com configuração dos tubos em U simples e preenchida com água. Com base nos resultados desses ensaios será possível comparar o desempenho das estacas trocadoras de calor com diferentes modos de operação do sistema, a fim de minimizar o problema da saturação térmica do subsolo ao longo do tempo devido à rejeição contínua de calor, o que poderia levar a

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



uma redução de eficiência do sistema.

Esses ensaios são o primeiro caso de execução de TPT's para avaliação do desempenho de estacas trocadoras de calor e a análise dos diferentes modos de operação do sistema (intermitente e contínuo) registrados no Brasil.

#### 4.3 Equipamento utilizado nos ensaios

O mesmo equipamento foi utilizado para a realização dos ensaios TPT e TRT, modificando-se apenas a condição de entrada: no caso do ensaio TRT, impõe-se que a taxa de energia térmica seja constante, enquanto no TPT, é a temperatura de entrada que se mantém. Os equipamentos empregados para a execução dos ensaios no CICS (Figura 3), são descritos a seguir:

- *Container* metálico de 3,00 m de comprimento por 2,30 m de largura, visando proteger o sistema das intempéries (Figura 3f).
- Reservatório de água quente, com capacidade de 0,1 m<sup>3</sup>, com a função de armazenar a água aquecida (fluido trocador de calor) que é utilizada para a realização dos ensaios (Figura 3a).
- Duas resistências elétricas, uma com 1000W e outra com 500 W de potência, instaladas no reservatório para fornecer o fluxo de calor necessário à execução dos ensaios. No caso dos ensaios TRT, controlou-se a potência fornecida ao sistema através do valor aproximadamente fixo fornecido por essas resistências; já nos ensaios TPT, a temperatura de entrada foi mantida aproximadamente constante em torno de 35°C por meio dos termostatos acoplados às resistências (Figura 3b).
- Bomba de circulação, para permitir a circulação da água no circuito. Nos TRTs e nos dois primeiros TPT's contínuos executados na estaca de concreto, foi utilizada uma bomba de 350 W, modelo TP 120 Komeco, com três chaves de potência (120 W, 248 W e 350 W). Já para os ensaios TRT nas estacas metálicas, para os demais TPT's na estaca de concreto e todos os TPT's da estaca metálica, foi utilizada uma minibomba circuladora modelo TP-40 Thermo G3 Komeco, com chaves de potência de 66 W, 92 W e 128 W (Figura 3d).
- Medidor de vazão tipo turbina, modelo SVLT de 1/2", fabricado pela empresa Contech Industria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda. (Figura 3c).
- Sensores de temperatura do tipo PT-100 classe A, com um erro absoluto de  $\pm 0,15$  para 0°C e  $\pm 0,35$  para 100°C e intervalo de operação de 0°C a 250°C, fabricado pela Salcas Indústria e Comércio Ltda (Figura 3e).
- Sistema de aquisição de dados de alta resolução, modelo PMX (Catman®software) fabricado por Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) (Figura 3f).

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como foco a apresentação das principais características de fundações por estacas trocadoras de calor e a descrição dos ensaios térmicos até então realizados no primeiro caso de uso desse tipo de fundação monitorada no Brasil, na área do CICS *Living Lab*, em São Paulo.

Com base nas informações apresentadas é possível concluir que os ensaios de resposta térmica (TRT) e de desempenho térmico (TPT) são ferramentas cruciais para obtenção de informações valiosas para o entendimento e aprimoramento dos projetos de fundações por estacas trocadoras de calor no Brasil. Através desses ensaios é possível obter propriedades térmicas do subsolo e entender como será o desempenho dessas estacas em situação de uso.

Para que a energia geotérmica superficial, até então vista como uma tecnologia disruptiva no Brasil, possa ser uma realidade nos próximos anos, faz-se necessário desenvolver trabalhos

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





nesse sentido, afinal, o uso desse tipo de energia limpa pode contribuir para mitigar o tão grave problema dos altos índices de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

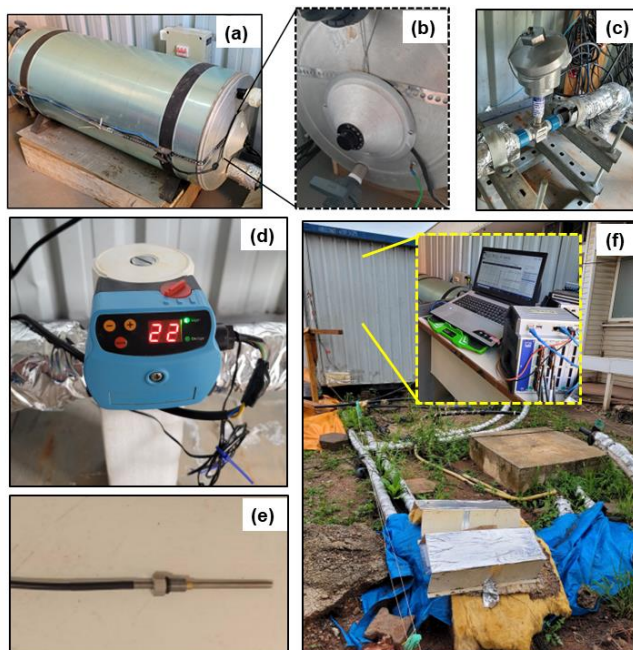


Figura 3 - Equipamentos que compõem o sistema para execução dos ensaios: (a) reservatório de água quente; (b) termostato e resistências; (c) medidor de vazão; (d) minibomba circuladora modelo TP-40 Thermo G3 da marca Komeco; (e) PT-100; (f) sistema de aquisição de dados, container e ramais que levam a água de entrada e coletam a de saída da estaca ensaiada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro dado pela TUPER S/A, o Centro de Inovação e Construção Sustentável (CICS/USP), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro (Processo 310881/2018-8), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo 2014/14496-0), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por fornecer a bolsa de doutorado da primeira autora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2015). *ASHRAE Handbook— Fundamentals*. Atlanta.
- Bandeira Neto, L. A. (2015). *Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 130 p.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), p. 81–12, <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>.
- Brasil (2018). *Balanco Energético Nacional - Relatório Síntese/ Ano Base 2018*. [s.l.] Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Brasil (2020). Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia - PNE 2050*. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, DF, 230 p.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





- Brasil (2021). *Brasil enfrenta a pior crise hídrica em 91 anos*. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/economia/audio/2021-09/brasil-enfrenta-pior-crise-hidrica-em-91-anos>>. Acesso em: 20 de outubro de 2021.
- Comitê Europeu de Normalização (2015). ISO 17628:2015. *Geotechnical investigation and testing — Geothermal testing — Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger*.
- Choi, W., Kikumoto, H., Ooka, R. (2018). New perspectives in thermal performance test: Cost-effective apparatus and extended data analysis. *Energy and Buildings*, 180, p. 109–121, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.008>.
- CICS-USP. (2020). *CICS -USP*. Disponível em: <<https://cics.prp.usp.br/>>. Acesso em: 20 de outubro de 2021.
- Clarke, B. G., Agab, A., Nicholson, D. (2008). Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 161(3), p. 161–168, <https://doi.org/10.1680/geng.2008.161.3.161>.
- Flórides, G., Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(15), p. 2461–2478, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>.
- Gao, J. *et al.* (2008). Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application. *Applied Energy*, 85(10), p. 901–910, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.02.010>.
- International Ground Source Heat Pump Association Standards Committee (2017). *Closed-Loop / Geothermal Heat Pump Systems. Design and Installation Standards*.
- Jalaluddin *et al.* (2011). Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. *Renewable Energy*, 36(2), p. 764–771, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.011>.
- Lee, S. *et al.* (2021). Dual performance of novel steel pipe heat exchangers equipped in cast-in-place energy pile. *Energy and Buildings*, 234, p. 110725, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110725>.
- Luo, J. *et al.* (2016). Thermo-economic analysis of four different types of ground heat exchangers in energy piles. *Applied Thermal Engineering*, 108, p. 11–19, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.085>.
- Morais, T. S. O. (2019). *Comportamento Térmico e Termomecânico de Fundações por Estacas Trocadoras de Calor em Solos Não Saturados em Região de Clima Subtropical*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 273 p.
- Morais, T. S. O., Tsuha, C. H. C. (2018). In-situ measurements of the soil thermal properties for energy foundation applications in São Paulo, Brazil. *Bulgarian Chemical Communications*, 50, p. 34–41.
- Murari, M. C. F., Tsuha, C. H. C., Loveridge, F. (2022). Investigation on the thermal response of steel pipe energy piles with different backfill materials. *Renewable Energy*, 199, p. 44–61, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.105>.
- Narsilio, G. *et al.* (2014). Geothermal Energy: Introducing an emerging technology. *Advances in Civil Engineering for Sustainable Development*, n. August, p. 141–154.
- Pessin, J. (2021). *Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- Pessin, J., Tsuha, C. de H. C. (2023). In-field performance of continuous flight auger (CFA) energy piles with different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 224, p. 120113, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120113>.
- Sá, L. M. S. *et al.* (2022). Thermal design of energy piles for a hotel building in subtropical climate: a case study in São Paulo, Brazil. *Soils and Rocks*, 45(1), p. 1–14, <https://doi.org/10.28927/SR.2022.077421>.
- Sá, L. M. S. (2024). *Análise do desempenho de fundações por estacas trocadoras de calor submetidas a diferentes ciclos de carregamento térmico em região de clima subtropical*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, no prelo.
- Zarella, A., De Carli, M., Galgaro, A. (2013). Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), p. 301–310, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.011>.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

