

Efeito do Carregamento Térmico em Estaca Trocadora de Calor: Estudo de Caso em São Carlos - SP

Thaise da Silva Oliveira Morais

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

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

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

RESUMO: Sistemas geotérmicos acoplados às fundações, conhecidos como fundações por estacas trocadoras de calor, têm sido utilizados como uma nova fonte energética para a climatização de edificações, contribuindo para a redução de custos operacionais a longo prazo. O presente trabalho aborda o estudo pioneiro da implantação de estacas trocadoras de calor no Brasil, com foco no efeito do carregamento térmico nesta fundação quando submetida a ciclo térmico referente à demanda por resfriamento da temperatura ambiente. Para tanto, foi construída uma estaca escavada de 0,5 m de diâmetro e 12 m de comprimento, que foi instrumentada com sensores de deformação e temperatura em diferentes níveis ao longo do comprimento. Ainda foram instalados junto a armadura da estaca tubos de polietileno (sistema duplo U), de forma a permitir a transferência de calor do ambiente para o solo por meio de um fluido (no caso, água) que circula dentro deste circuito fechado. A estaca trocadora de calor estudada foi executada no Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos, em um perfil de solo tropical não saturado que cobre grande parte do território brasileiro e é típico do interior do estado de São Paulo.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca trocadora de calor, solos tropicais não saturados, clima tropical e subtropical.

1 INTRODUÇÃO

Energia geotérmica é a energia sob forma de calor armazenada no subsolo. Atualmente, devido à crescente demanda por fontes alternativas e renováveis de energia, vem sendo cada vez mais utilizada esse tipo de energia para a climatização de edificações, a partir de sistemas trocadores de calor instalados no solo.

As estacas trocadoras de calor, ou *Energy Piles*, são um tipo de sistema geotérmico que aproveita a estrutura de fundação da edificação para a troca térmica com o solo necessária à climatização. Segundo Loveridge (2012) devido à dupla função atribuída a este tipo de fundação, verifica-se cada vez mais o seu uso na Europa, sendo impulsionado principalmente pelo governo, a fim de reduzir o consumo energético, a emissão de dióxido de carbono e

incentivar o uso de fontes de energia limpas e renováveis. Brandl (2006) destaca ainda o grande potencial da utilização da geotermia de baixa profundidade, a partir da tecnologia das estacas trocadoras de calor, citando a utilização desta solução em aproximadamente 300 edifícios na Áustria.

As estacas trocadoras de calor podem ser utilizadas em qualquer tipo de construção e, a depender da demanda por climatização e das condições do subsolo, pode trabalhar extraindo ou depositando calor no solo (o sistema pode ser usado para aquecer ou resfriar o ambiente).

Devido a vasta extensão territorial e a predominância dos climas tropical e subtropical, o Brasil está atualmente entre os maiores consumidores mundiais de energia elétrica (Pereira et al., 2013). A maior parte deste consumo é destinado ao resfriamento via

sistemas de ar condicionado, sendo importante a busca por sistemas alternativos e sustentáveis.

Neste contexto, o presente trabalho aborda o efeito do carregamento térmico em uma estaca trocadora de calor quando submetida a um ciclo térmico de aquecimento da estaca. Este ciclo corresponde à situação em que o calor extraído do ambiente é depositado no solo, e a água que circula na estaca neste caso é resfriada pelo solo que envolve a estaca. Este trabalho faz parte de uma pesquisa que está sendo desenvolvida na EESC-USP a fim de avaliar a aplicação deste sistema de energia renovável para climatização de edificação no Brasil.

2 SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA CLIMATIZAÇÃO

O aproveitamento da energia geotérmica pode ser dividido em duas formas distintas: o uso da energia térmica a grandes profundidades e temperaturas, para a produção de eletricidade a partir da água quente e vapor; e a outra forma, a baixas profundidades e temperaturas, para a climatização de ambientes (Ferreira, 2013).

Sistemas geotérmicos de condicionamento de ambientes são constituídos por bombas de calor ligadas a tubos de absorção de calor instalados em contato com o subsolo. Existem diversos tipos de sistemas geotérmicos, os quais se diferenciam de acordo com a disposição e arranjo dos tubos no subsolo. Assim, podem ser citados os seguintes sistemas geotérmicos (Figura 1): horizontal, vertical (em profundidade), tubos dispostos em lagoa ou lago e por fim, os sistemas em loop aberto. Nesses sistemas, é circulado um fluido dentro da rede de tubos de absorção de calor (geralmente água), e é este fluido que atua no transporte da energia térmica entre o ambiente e o reservatório térmico, depositando ou retirando energia. Os sistemas geotérmicos são conhecidos como bomba de calor geotérmica (*Geothermal Heat Pump – GHP*) ou como bomba de calor com fonte térmica no subsolo (*Ground Source Heat Pump – GSHP*).

A tecnologia dos sistemas geotérmicos para climatização baseia-se na premissa de que a temperatura do subsolo é sempre constante. Deste modo, o sistema geotérmico oferece

condições mais favoráveis à troca, devido à estabilidade de temperatura média e a maior capacidade térmica, em relação à do ar (Vilela, 2004; Olgun e McCartney, 2014).

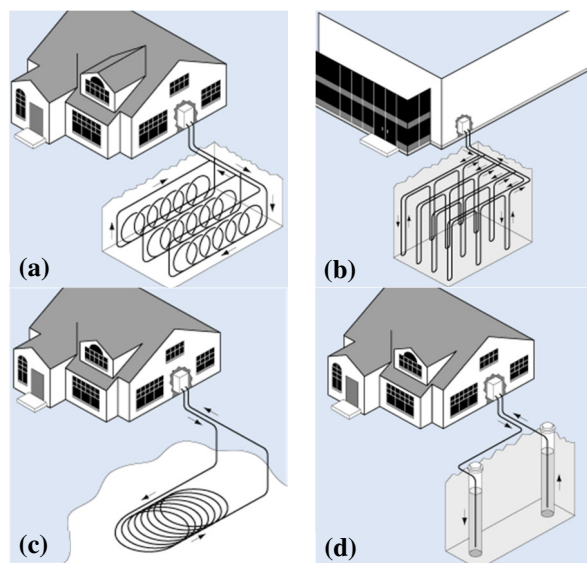


Figura 1. Principais sistemas geotérmicos: a) horizontal, b) vertical, c) lagoa ou lago e d) sistema aberto (Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2016).

2.1 Estacas Trocadoras de Calor

Brandl (2006) data desde o início da década 80 o uso de estruturas de fundação como trocadores de calor com o subsolo. Segundo o autor, desde essa época o uso desta tecnologia cresce a cada ano, tendo chegado ao total de 22.843 estacas trocadoras de calor instaladas na Austria até 2004.

As estacas trocadoras de calor são um sistema geotérmico de climatização do tipo vertical de loop fechado, que aproveita a condutividade térmica superior do concreto (comparado à condutividade do solo), o que torna a transferência de calor significativamente mais elevada do que nos sistemas geotérmicos convencionais (Brandl, 2006; You et al., 2014, Olgun e McCartney, 2014).

Da mesma forma que nos outros sistemas geotérmicos, são inseridos tubos trocadores de calor no interior da fundação nas mais diversas configurações: simples U, duplo ou triplo U, espiral e entre outras, dependendo das especificações de projeto. Estes tubos são instalados ao longo da estaca em posições pré-estabelecidas e antes da concretagem (no caso

de estacas moldadas em loco), devendo-se ter atenção e cuidados durante a instalação no campo para não ocorrer o estrangulamento da seção transversal dos tubos. De acordo com Loveridge (2012), o tipo mais comum de estacas trocadoras de calor são as estacas escavadas, onde é feito o pré-furo no solo, a instalação dos tubos de absorção de calor e por fim a concretagem da fundação.

A Figura 2 foi apresentada por Olgun e McCartney (2014), onde os autores expõem valores de potenciais de troca térmica em função do tipo de sistema geotérmico utilizado, além de classificarem a qualidade de troca térmica do solo em função destes valores. A partir da figura 2, verifica-se que para um solo com as mesmas características térmicas, o tipo de estrutura geotérmica de climatização interfere diretamente na energia térmica trocada com o subsolo. Segundo Olgun e McCartney (2014), embora as estacas trocadoras de calor possam não suprir toda a demanda de energia térmica necessária para aquecer/resfriar certa edificação, essas estruturas podem fornecer troca térmica suficiente para suprir parte da carga de aquecimento/resfriamento, em torno de 10-20% da demanda de pico segundo os autores. Assim, este sistema pode ser uma alternativa aos sistemas de climatização tradicionais, de forma que sejam utilizados apenas em momentos de pico da demanda por climatização.



Figura 2. Energia térmica em função do tipo de sistema geotérmico utilizado e da qualidade térmica do solo (adaptado de Olgun e McCartney, 2014).

Apesar do crescente interesse e utilização de estacas trocadoras de calor, Loveridge (2012) destaca que as pesquisas sobre o comportamento dessas estruturas de fundação termo-ativadas não apresentam o mesmo ritmo. Assim, ainda restam incertezas sobre diversos aspectos do comportamento das estacas

trocadoras de calor e estudos de casos consolidados para validar as abordagens para o projeto dessas estruturas (Loveridge, 2012).

2.2 Desempenho e Fatores Intervenientes a Troca Térmica

O desempenho de sistemas geotérmicos para climatização envolve fatores ligados à edificação (demanda energética, materiais utilizados e etc.), ao clima regional e, principalmente, às características térmicas do subsolo.

Em relação aos fatores que influenciam diretamente na temperatura do subsolo, podem ser citados: clima, temperatura média anual do ar do ambiente, os tipos de solo, teor de umidade, composição mineralógica, a presença ou não de cobertura vegetal, a profundidade e a inércia térmica, além das variações nas estações do ano.

De acordo com Brandl (2006), em regiões da Europa, a partir de 10-15 m de profundidade a temperatura média do subsolo permanece praticamente constante durante a maior parte do ano. Ainda segundo o autor, a mesma tendência de comportamento sazonal da temperatura do subsolo ocorre em regiões próximas aos trópicos, mas agora com maiores valores, variando entre 20-25°C. Entretanto, Brandl (2006) destaca que apesar das variações sazonais de temperatura na parte superficial do subsolo, o conforto térmico a partir do aquecimento e o arrefecimento das estruturas via utilização da energia geotérmica do subsolo ainda viabiliza economias no consumo.

Assim, é essencial conhecer e investigar as características térmicas peculiares a cada região em que se pretende utilizar sistemas geotérmicos para a climatização, sendo tais propriedades fundamentais à viabilidade do projeto.

3 PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DO SUBSOLO INVESTIGADO

Diferente dos países em que vem sendo amplamente utilizada a tecnologia das estacas trocadoras de calor, o Brasil apresenta certas peculiaridades que o diferencia destes outros

países, podendo ser citadas o clima e a vasta área territorial composta por perfis de solos tropicais não saturados. Desta forma, além do fato de que nunca foi investigado o desempenho de estacas trocadoras de calor no país, um dos fatores que motiva esta pesquisa são justamente os solos tropicais não saturados brasileiros.

O estudo pioneiro de estacas trocadoras de calor no Brasil vem sendo desenvolvido no Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), situado na cidade de São Carlos, na parte centro-oriental do estado de São Paulo.

O subsolo do Campo Experimental de Fundações é constituído por um perfil de solo composto por uma camada superficial de areia argilosa coluvionar laterítica seguida de uma camada de solo residual de arenito. As Figuras 3 e 4 apresentam resultados da caracterização geotécnica do subsolo do Campo Experimental a partir de ensaios de campo e de laboratório, respectivamente.

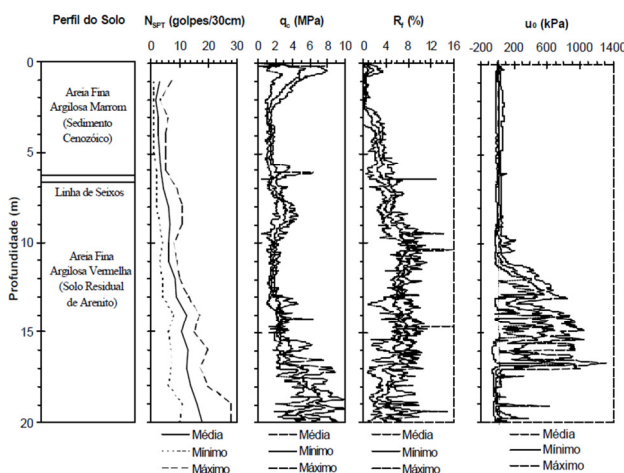


Figura 3. Resultados de caracterização via ensaios SPTs e CPTs no Campo Experimental de Fundações da EESC/USP (Menegotto, 2004).

A caracterização mineralógica do subsolo da área experimental realizada nesta pesquisa, a partir de ensaios de difratometria de raios X e de fluorescência de raios X, indicou que até a profundidade de 12 m a proporção de mineral quartzo neste solo varia entre 50-60%, e chega a 30% em proporção de óxidos de ferro e de alumínio (devido ao processo de laterização do solo).

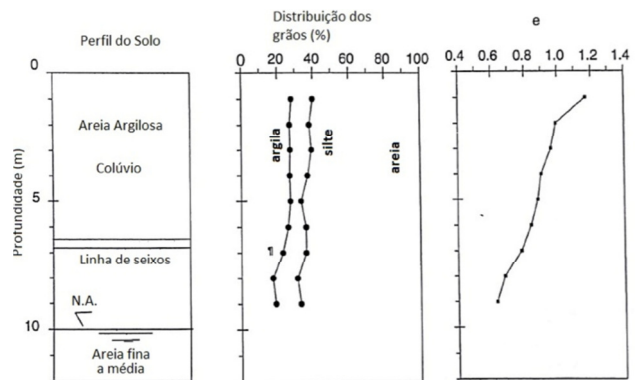


Figura 4. Caracterização do subsolo do Campo Experimental de Fundações da EESC/USP via ensaios de laboratório (adaptado de Machado e Vilar, 2003).

4 ESTACA TROCADORA DE CALOR, EQUIPAMENTO E ENSAIO TÉRMICO

Para a realização do ensaio térmico na fundação trocadora de calor foi necessária a construção de um equipamento em circuito fechado que possibilitasse a imposição e controle da carga térmica na fundação estudada.

A seguir, é feita a descrição da montagem do equipamento desenvolvido na EESC/USP, bem como o detalhamento da estaca trocadora de calor construída.

4.1 Equipamento Para Ensaio Térmico

O equipamento para a realização dos ensaios térmicos na fundação trocadora de calor foi construído exclusivamente para esta pesquisa.

Para a construção deste equipamento foram seguidas as recomendações do *Eurocode* (CEN/TC 341 N525, 2011). Assim, são componentes do equipamento os seguintes itens: reservatório-aquecedor (tipo boiler) com 100 L de capacidade e que possui duas resistências elétricas independentes de 1000 Watts cada uma (Fig. 5a); motor bomba com potência de 0,5 cv e vazão máxima de 40 L/min (Fig. 5b); medidor de vazão do tipo turbina (Fig. 5c); e sistema de aquisição de dados.

Durante o ensaio térmico as temperaturas do fluido (água) na entrada e na saída da estaca foram controladas via termoresistores do tipo PT100 (com 3 mm de diâmetro). A temperatura ambiente também foi monitorada durante o ensaio a partir de sensor tipo PT100 (com 6,35 mm de diâmetro, Figura 6a).

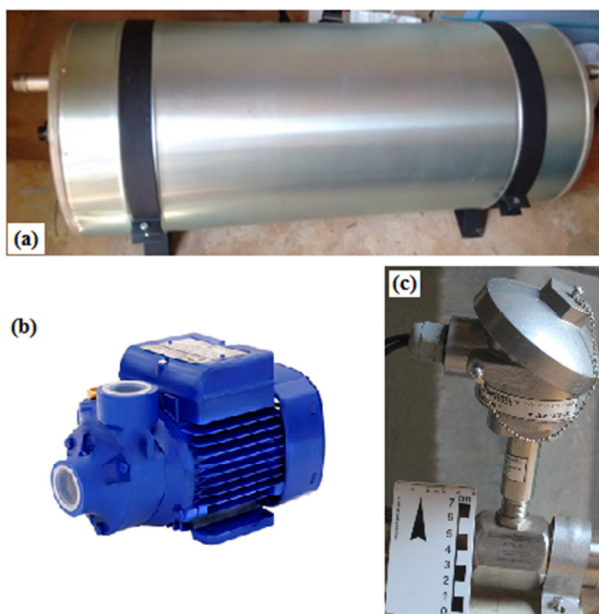


Figura 5. Equipamento da EESC/USP para ensaio térmico em fundação trocadora de calor: a) reservatório-aquecedor, b) bomba hidráulica e c) medidor de vazão.

O sistema de aquisição de dados utilizado é do tipo Quantum X modelo MX 1615, fabricado pela HBM e possui 16 canais para aquisição (Figura 6b).



Figura 6. a) Sensor tipo PT100 e b) Sistema de aquisição.

4.2 Estaca Trocadora de Calor da EESC/USP

A estaca trocadora de calor foi executada no mês de Dezembro de 2014 e, nesta época, o nível do lençol freático estava a 12,5 m de profundidade, limitando assim o comprimento da estaca, visto que optou-se por estaca do tipo escavada a seco. Desta forma, a estaca trocadora de calor possui 12 m de comprimento e 0,5 m de diâmetro.

Os tubos de absorção de calor que foram instalados na estaca são do tipo PEAD (polietileno de alta densidade), de acordo com o que é recomendado pelo *Eurocode* (CEN/TC 341 N525, 2011), e possuem diâmetro nominal

interno de 26 mm (32 mm x 3 mm). Os tubos PEAD foram instalados junto à armadura da estaca, de forma a ficarem igualmente espaçados e presos com abraçadeiras de plástico. A configuração de disposição dos tubos no interior da estaca foi do tipo duplo-U e o fluido utilizado nos ensaios térmicos foi água.

Além dos tubos de absorção de calor, a estaca trocadora de calor foi instrumentada com sensores de deformação à base de resistência elétrica (*strain gages*) e temperatura (PT100). Esses sensores foram instalados em diferentes níveis ao longo do comprimento, sendo: PT100 a 3,5 m, 7,5 m e 11,5m; e deformação em cinco níveis diferentes - 0,5 m, 3,0 m, 6,0 m, 9,0 m e 11,5 m.

Tanto os tubos de PEAD como os sensores da estaca trocadora de calor, foram instalados em suas devidas posições antes da concretagem da estaca, sendo possível verificar adequadamente as cotas de instalação de cada sensor além de garantir a integridade dos mesmos. A Figura 7 apresenta os detalhes da instrumentação e posicionamento dos tubos na estaca.



Figura 7. Montagem da estaca trocadora de calor.

Para monitorar as temperaturas do subsolo ao longo da profundidade enquanto a estaca fosse submetida a cargas térmicas, foram feitos dois furos no solo com trado manual de 4" de diâmetro e até 12 metros de profundidade. Estes furos foram locados a distância de 1 m (furo 1) e 2 m (furo 2) respectivamente, em relação ao eixo da estaca trocadora de calor (ou seja, 2 e 4 diâmetros). Nos dois furos foram instalados sensores PT100 nas mesmas profundidades dos

PT100 que foram instalados na estaca para posterior comparação.

A Figura 8 apresenta esquematicamente a estaca trocadora de calor construída, os dois furos no solo para medida de temperatura e o perfil do subsolo do campo experimental de fundações da EESC/USP.

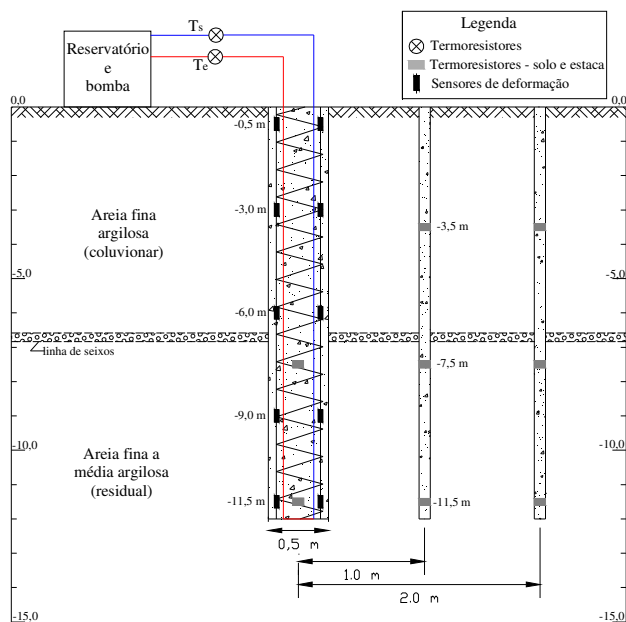


Figura 8. Perfil do subsolo e layout da estaca trocadora de calor e dos furos no solo para monitoramento da temperatura.

4.3 Carregamento Térmico na estaca Trocadora de Calor

O carregamento térmico consiste na imposição do fluxo de um fluido (água aquecida neste caso) dentro de um sistema fechado, formado pelos tubos trocadores de calor inseridos dentro da estaca trocadora de calor, mantendo-se constante a potência fornecida a este fluido.

O ensaio térmico abordado neste trabalho iniciou no dia 08 de agosto de 2015 e durou aproximadamente 8,5 dias. Durante o ensaio, foram obtidos continuamente os seguintes dados de temperatura: de entrada e de saída do fluido que conduzia o calor a ser depositado no subsolo, do ambiente, dos furos para monitoramento do solo ao redor da estaca, e da própria estaca.

Maiores detalhes sobre o ensaio térmico, peculiaridades do ensaio, assim como os resultados com relação as propriedades térmicas encontradas são apresentadas em Moraes et al. (2016).

5 RESULTADOS

A Figura 9 apresenta a distribuição de temperatura do subsolo ao longo da profundidade, entre os meses de Abril a Agosto de 2015, registradas anteriormente ao ensaio de carregamento térmico.

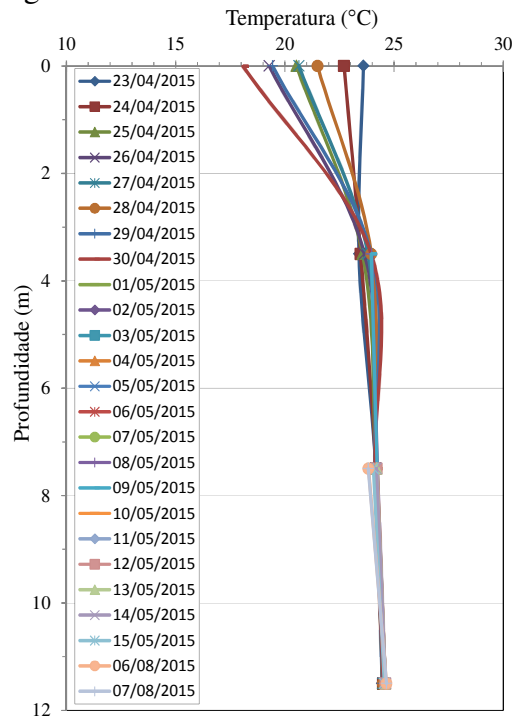


Figura 9. Perfil de temperatura do subsolo do Campo Experimental de Fundações da EESC/USP.

A partir dos resultados apresentados na Figura 9, observa-se que a partir de 3,5 m de profundidade a temperatura do subsolo passa a ser praticamente constante e igual a aproximadamente 24°C.

Durante o ensaio térmico na estaca trocadora de calor, o nível do lençol freático encontrava-se na profundidade de 11 m. Assim, durante o ensaio térmico a estaca encontrava-se 1 m em solo saturado e 11 m em solo não saturado. Esta informação é importante para as análises dos resultados encontrados a partir de ensaios térmicos visto que o teor de umidade influi nos processos de troca térmica entre o solo e as estruturas termo-ativas.

A evolução das temperaturas tanto na estaca como no solo foram monitoradas ao longo do ensaio térmico. Entretanto, o sensor de temperatura instalado na estaca à profundidade de 3,5 m foi danificado (por motivo desconhecido). As Figuras 10 e 11 apresentam a evolução das temperaturas no interior da estaca

e do solo ao seu redor durante o carregamento térmico (aquecimento da estaca).

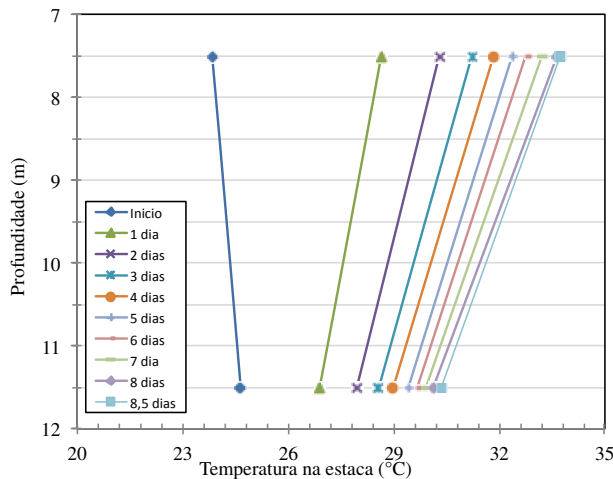


Figura 10. Evolução da temperatura no interior da estaca trocadora de calor durante o ensaio térmico (Bandeira Neto, 2015).

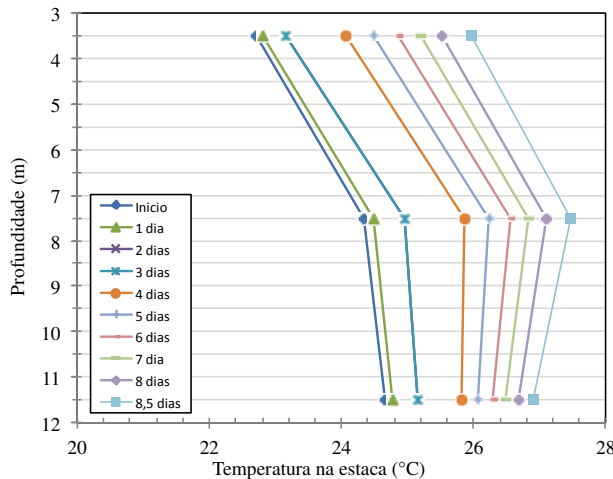


Figura 11. Variação da temperatura no solo a uma distância radial de 1 m do eixo da estaca durante o ensaio térmico (Bandeira Neto, 2015).

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 10 e 11 nota-se que para as temperaturas máximas alcançadas no ensaio térmico (aproximadamente 45°C), houve aumento na temperatura inicial do subsolo de em média 2,9°C à distância de 1 m do eixo da estaca (Furo 1). O aumento médio da temperatura do subsolo a 2 m foi de aproximadamente 0,5°C (furo 2).

A Figura 10 mostra que ocorreu um aumento de temperatura mais pronunciado na região central (cota -7,5 m) do que próximo à ponta da estaca (cota -11,5 m). A Figura 11 evidencia que a energia em forma de calor se move na direção radial.

São apresentados na Figura 12 os

deslocamentos medidos no topo da estaca trocadora de calor ao longo do ensaio térmico. Para a temperatura média da estaca de 32°C, que corresponde ao máximo incremento de temperatura do ensaio térmico, observou-se um deslocamento vertical da ordem de 1,3 mm no topo da estaca, para a situação de topo livre (simulação da estaca não carregada mecanicamente).

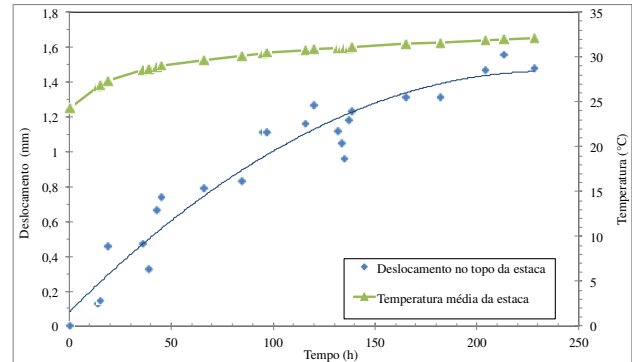


Figura 12. Deslocamentos no topo da estaca trocadora de calor durante o ensaio térmico.

As Figuras 13 e 14 apresentam a distribuição horizontal de temperatura em torno da estaca na cota -11,5 m, durante o ensaio térmico e ao longo do período de resfriamento, respectivamente.

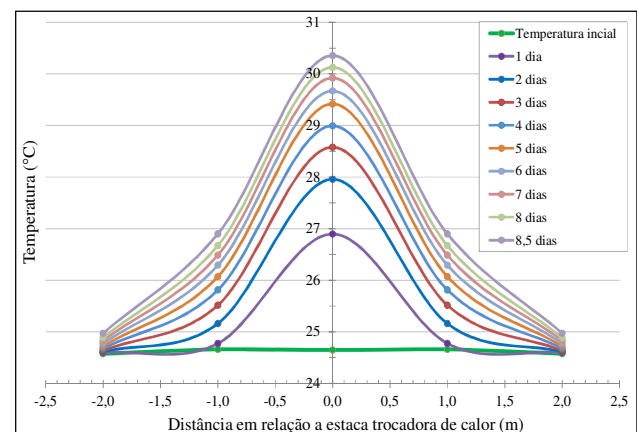


Figura 13. Perfil horizontal de temperatura ao redor da estaca trocadora de calor na cota -11,5 m, durante ensaio térmico.

A partir do gráfico das figuras 13 e 14, observa-se que mesmo para a cota -11,5 m (profundidade em que o aumento de temperatura foi menor por ser próxima a ponta da estaca), a maior variação de temperatura, tanto no aquecimento quanto no resfriamento após o término do carregamento térmico, aconteceu logo no início de cada um destes

eventos. Entretanto, nota-se que a 2 m de distância do eixo da estaca trocadora de calor, na cota -11,5 m o aumento da temperatura do solo não foi significativa (apenas 0,4°C em 8,5 dias de ensaio).

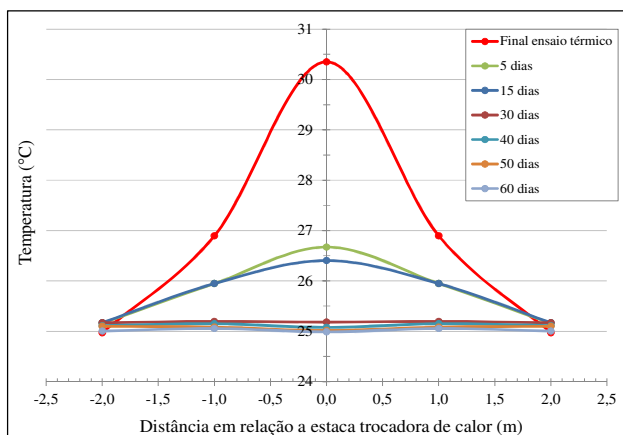


Figura 14. Perfil horizontal de temperatura ao redor da estaca trocadora de calor na cota -11,5 m, durante o período de resfriamento.

Os resultados das Figuras 13 e 14 são importantes para a avaliação do espaçamento necessário para evitar sobreposição de calor transmitido ao solo no caso de grupo de estacas trocadoras de calor.

6 CONCLUSÕES

O trabalho abordou aspectos relativos ao efeito do carregamento térmico em uma estaca trocadora de calor situada em perfil de solo tropical típico do Brasil. A estaca foi submetida a um ciclo de carregamento térmico (que durou 8,5 dias) e em seguida, submetida à dissipação natural do calor armazenado, durante 60 dias. Os resultados mostram uma tendência não linear de transmissão horizontal de calor no solo. Para o período de carregamento térmico avaliado, o depósito de calor no solo atingiu um raio de 4 diâmetros da estaca.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a FAPESP pelo financiamento da pesquisa (projeto N. 2014/14496-0), e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- Bandeira Neto, L.A. (2015). *Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56 (2), 81-122.
- European Committee for Standardization: TC 341 WI 00341067.6 (2011) Geotechnical Investigation and Testing - Geothermal Testing - Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock Using a Borehole Heat Exchanger.
- Departamento de Energia dos Estados Unidos (2016), disponível em: <http://energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>. Acessado em 24/04/2016.
- Ferreira, F. F. (2013). *Energias Renováveis e Rovas Tecnologias – Sustentabilidade Energética nos Museus*. Tese (Doutorado), Universidade Lusófana da Humanidades e tecnologias.
- Loveridge, F. (2012). *The Thermal Performance of Foundation Pile Used as Heat Exchangers in Ground Energy Systems*. Tese (Doutorado). University of Southampton, 206 p.
- Machado, S. L. e Vilar, O. M. (2003). Geotechnical Characteristics of an Unsaturated Soil Deposit at São Carlos, Brazil. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Vol. 2, p. 1305-1321.
- Menegotto, M. L. (2004). *Previsão da Curva Tensão-Recalque de Ensaios de Placa em Solo Não Saturado*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 246 p.
- Morais, T. S. O., Bandeira Neto, L. A., Tsuha, C. H. C. (to be submitted for publication). (2016) *Thermal performance of an energy pile in an lateritic unsaturated tropical soil in Brazil*.
- Olgun, C. G., McCartney, J. S. (2014). Outcomes from International Workshop on Thermoactive Geotechnical Systems for Near-Surface Geothermal Energy: from research to practice. *The Journal of Deep Foundations Institute*, Vol.8, p. 59-73.
- Pereira, C. D., Lamberts, R., Ghisi, E. (2013). *Technical note*. CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações, Brasil.
- Vilela, M. M. (2004). *Estudo de Método Experimental para Determinar a Potencialidade do Uso de Energia Geotérmica à Baixa Profundidade*. Tese (Doutorado), Programa inter-unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 278 p.
- You, S., Cheng, X. Guo, H. Yao, Z. (2014) In-situ experimental study of heat Exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers. *Energy and Buildings*, Vol. 79, p. 23-31.