XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/108

Modelagem Transiente do Desempenho Térmico de Estacas Trocadoras de Calor em Solo Argilo Silto Arenoso: Estudo de Caso em Ponta Grossa-PR

Maitê Milléo Almeida
Discente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, maitemilleo12@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus
Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, cerlautenschlager@uepg.br

Vitor Pereira Faro
Professor Colaborador, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

Luiz Fernando Anchar Lopes
Profissional mestre, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, luiz.anchar@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise numérica do desempenho térmico de um sistema de climatização geotérmica aplicado a um container de 40 pés (12 m) sem isolamento térmico, operando em ciclo de resfriamento em Ponta Grossa, PR. Devido à alta condutividade térmica do aço e à baixa inércia térmica da estrutura, a carga térmica máxima calculada foi de 14.783,09 W. A pesquisa utilizou modelagem computacional por elementos finitos para avaliar o comportamento de trocadores de calor do tipo estaca trocadora sob regime transiente de 48 horas. Os resultados iniciais demonstraram que a aplicação da carga total em uma única estaca causava saturação térmica severa, com temperaturas excedendo 180°C, comprometendo a integridade do sistema. Contudo, ao redistribuir a carga térmica em um campo de cinco estacas (3.385,06 W por unidade), o sistema apresentou estabilização térmica com temperaturas máximas seguras (abaixo de 40°C). Conclui-se que a configuração de campo de estacas é essencial para viabilizar o uso da energia geotérmica em estruturas metálicas de alta demanda, garantindo eficiência operacional e preservação dos componentes.

PALAVRAS-CHAVE: Geotermia, Modelagem, Energia geotérmica, Bomba de calor.

ABSTRACT: This study presents a numerical analysis of the thermal performance of a geothermal air conditioning system applied to a non-insulated 40-foot container operating in a cooling cycle in Ponta Grossa, Brazil. Due to the high thermal conductivity of steel and the low thermal inertia of the structure, the maximum calculated cooling load was 14,783.09 W. The research employed finite element computational modeling to evaluate the behavior of heat exchanger piles under a 48-hour transient regime. Initial results showed that applying the total heat rejection load to a single pile led to severe thermal saturation, with temperatures exceeding 180°C, thereby compromising the system's integrity. However, by redistributing the thermal load across a field of five piles (3,385.06 W per unit), the system achieved thermal stabilization with safe maximum temperatures (below 40°C). The study concludes that a pile field configuration is essential to enable the use of geothermal energy in high-demand metallic structures, ensuring operational efficiency and component preservation.

KEYWORDS: Geothermics, Modeling, Geothermal energy, Heat pump.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento da demanda energética e o avanço das metas globais de sustentabilidade impulsionaram a busca por soluções inovadoras para climatização de edificações com menor impacto ambiental (Morais, 2019). No Brasil, onde as diferenças bioclimáticas regionais intensificam o uso de sistemas de aquecimento e resfriamento, o consumo energético associado ao ar-condicionado representa uma parcela significativa da eletricidade residencial e comercial (International Energy Agency, 2023). Nesse contexto, o aproveitamento da energia geotérmica surgiu como alternativa promissora, capaz de reduzir o consumo elétrico e as emissões de gases de efeito estufa, aliando eficiência energética e sustentabilidade.

Paralelo ao crescimento por soluções de climatização de edificações, também observou-se o uso de containers como unidades habitacionais e comerciais modulares como uma forma de reutilização dessas estruturas, construção limpa e redução no custo de construção (Sajid et al., 2024). No entanto, a alta condutividade térmica do aço, aliada à frequente ausência de isolamento térmico adequado, impõe desafios críticos à climatização interna, resultando em elevado consumo energético em sistemas de condicionamento ambiental convencionais (Olivares, 2010). Pensando em soluções para a climatização desses containers, surgem as bombas de calor geotérmicas (GSHP – *Ground Source Heat Pumps*) como um recurso de alta eficiência (COP > 4), utilizando o solo como reservatório térmico para dissipação de calor Esse tipo de solução costuma apresentar coeficiente de desempenho (COP) superior à 4, indicando que o ssitema entrega quatro vezes mais energia térmica do que consome de eletricidade (Spitler; Gehlin, 2015).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe a análise numérica do desempenho térmico de um sistema de climatização geotérmica aplicado a um container de 40 pés (12 m de comprimento) sem isolamento térmico, operando em ciclo de resfriamento. Para realização da análise, foi realizada uma modelagem computacional para entender o funcionamento de uma configuração de trocadores de calor solo-tubo já estabelecida: estaca trocadora de calor. Essa configuração de modelagem foi selecionada com o objetivo de avaliar se a estaca trocadora de calor oferece desempenho térmico frente à carga térmica variável e extrema do container metálico, considerando a estaca oferece uma otimização do uso da área do terreno e garante contato com o solo em maiores profundidades.

2 METODOLOGIA

O objeto de estudo consiste em um container padrão de 40 pés (*Dry Box*), com dimensões de 12,19 m de comprimento, 2,44 m de largura e 2,60 m de altura. A estrutura é composta predominantemente por chapas de aço Corten de 3 mm de espessura. As especificações do aço corten consideradas foram de 50 W/m.K de conduvitidade térmica, densidade de 7800 kg/m³ e calor específico de 450 J/kg.K.

Para o cálculo da carga térmica do container foram consideradas as normas ABNT NBR 15220-2 (ABNT, 2022), ABNT NBR 16401 (ABNT, 2024) e ASHRAE Handbook of Fundamentals 2017 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017), empregando especificamente as recomendações de cálculo para aquecimento e resfriamento não residencial. Visando representar as condições reais de projeto usual em unidades modulares, o modelo adotado no trabalho apresentou a ausência de isolamento térmico interno e, consequentemente, a estrutura exibiu uma baixa inércia térmica e uma alta transmitância térmica ($U_{paredes} = 5{,}880\ W/m^2.K;\ U_{teto} = 4{,}761\ W/m^2.K$). Para o cálculo da carga térmica máxima foi considerado que o container estava localizado no Campo Experimental de Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) em Ponta Grossa, Paraná, que a temperatura de conforto interna no container seria equivalente à 24ºC e que o container possui uma pintura externa de cor preta. Com essas considerações, obteve-se uma carga térmica máxima de 14.783,09 W (50.440 BTU/h).

Considerando a necessidade de resfriamento para a climatização desse container, foi considerada no dimensionamento uma bomba de calor do tipo água-ar com capacidade nominal de resfriamento de 22,4 kW. Essa capacidade, superior à carga térmica calculada (14,78 kW), visa garantir a estabilidade térmica em condições de radiação solar extrema, destacando-se que o equipamento opera com tecnologia inverter, permitindo a modulação da capacidade conforme a demanda.

Além disso, o equipamento adotado utiliza um compressor do tipo scroll com tecnologia inverter e um fluido refrigerante R410A. A troca térmica com solo ocorre através de um trocador de placas de aço inoxidável,

operando com uma vazão nominal de 77 LPM e um Índice de Eficiência Energética (EER) nominal de 6,90 W/W. O controle de fluxo de refrigerante é gerido por uma válvula de expansão eletrônica, permitindo o ajuste preciso da capacidade frente à baixa inércia térmica da estrutura metálica do container. A partir das especificações do equipamento, foi possível determinar qual seria a carga térmica rejeitada para o solo, que seria a taxa de 16.925,6 W, correspondente à 57.750 BTU/h.

A modelagem computacional foi desenvolvida em um software de simulação de elementos finitos, utilizando o módulo de Transferência de Calor (*Heat Transfer Module*), com interface de Transferência de Calor em Sólidos (*Heat Transfer in Solids*). A simulação foi conduzida em regime transiente (*Time Dependent*), visando capturar a resposta térmica do sistema frente à carga térmica variável do container ao longo do tempo.

O domínio do solo, correspondente ao CEEG-PG, foi modelado considerando duas camadas distintas, baseado no perfil geotécnico do Campo (Niedvieski, 2025): argilo-silto-arenoso e arenoso. O solo argilo-silto-arenoso se encotrou até o limite de 12 m de profundidade e o solo arenoso apresentou espessura de 3 m de profundidade, totalizando 15 m o modelo completo, por 5 m de largura e 5 m de comprimento. As propriedades térmicas inseridas no software foram baseadas em (Niedvieski, 2025) e (Tonus, 2023). Para o solo argilo-silto-arenoso, a condutividade térmica utilizada foi de 2,20 W/m.ºC — sendo esse o valor médio encontrado entre as profundidades de 3m, 5m e 7m —, a densidade de 2630 kg/m³ e capacidade calorífica de 850 J/kg.ºC. Para o solo arenoso foram utilizados os valores de 3,3 W/m.ºC, densidade de 1800 kg/m³ e capacidade calorífica de 1250 J/kg.ºC, considerando o estado saturado. A estaca de concreto considerada apresenta 14 m de comprimento com seção quadrada de 0,2 m por 0,2 m e a tubulação em U considerada apresenta 0,032 m de diâmetro, conforme tubulações PEAD usualmente utilizadas em geotermia.

A simulação foi conduzida considerando um regime de 48 h (172.800 s), com período de operação e de repouso com 12 horas cada, por permitir a observação de dois ciclos completos de operação e repouso de 24 h. Esse intervalo foi considerado suficiente para caracterizar a resposta térmica transiente do sistema e para identificar o fenômeno de saturação térmica, estado em que o solo atinge a sua capacidade máxima de condutividade térmica, garantindo a compreensão da inércia térmica do solo sem a necessidade de um custo operacional excessivo para validação.

A geometria do trocador de calor foi discretizada no domínio sólido, onde se aplicaram as condições de contorno de fluxo de calor baseadas na taxa de rejeição da bomba de calor selecionada. A partir da Figura 1 pode-se observar a geometria do trocador de calor tipo estaca, além de perceber que (a) a região mais externa equivale à massa de solo, a região mais interna corresponde ao concreto da estaca trocadora de calor e a tubulação interna da estaca é a tubulação em U. Na Figura 1 (b) está representado o detalhamento da superfície da modelagem e em (c) observa-se a conexão U realizada para conectar as tubulações PEAD.

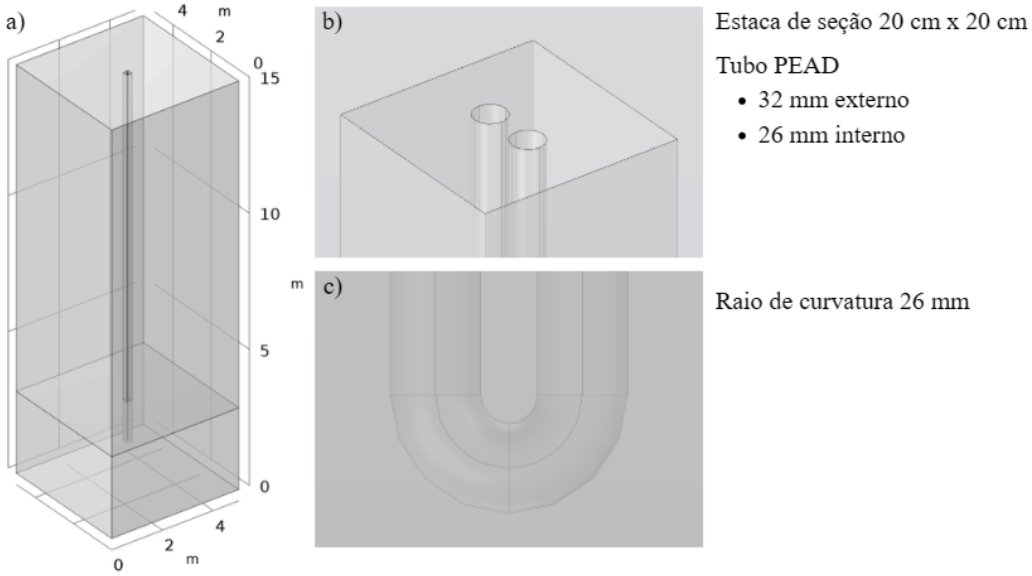


Figura 1. Geometria do trocador de calor tipo estaca (a) modelagem completa (b) aproximação da superfície (c) detalhamento da conexão em U

A malha computacional foi composta por elementos tetraédricos, com refinamento controlado nas interfaces de maior gradiente térmico (contato tubo-solo). Realizou-se um estudo de convergência de malha para garantir a independência dos resultados numéricos. As condições de contorno de temperatura e fluxo de calor foram extraídas do balanço térmico do container e da capacidade de rejeição da bomba de calor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados iniciais encontrados da simulação numérica foram relevantes para realizar a validação do dimensionamento do sistema geotérmico frente à alta carga térmica de resfriamento demandada pelo container sem isolamento térmico.

Nesse contexto, inicialmente foi realizada a simulação do cenário onde a carga total de rejeição de calor do sistema no solo (16,9 kW) era aplicada em uma única estaca trocadora de calor. Como possível de observar na Figura 2 e na Figura 3, a aplicação da carga total em uma unidade isolada de estaca resultou em temperaturas que excediam 80ºC na interface entre a tubulação de PEAD e o concreto da estaca.

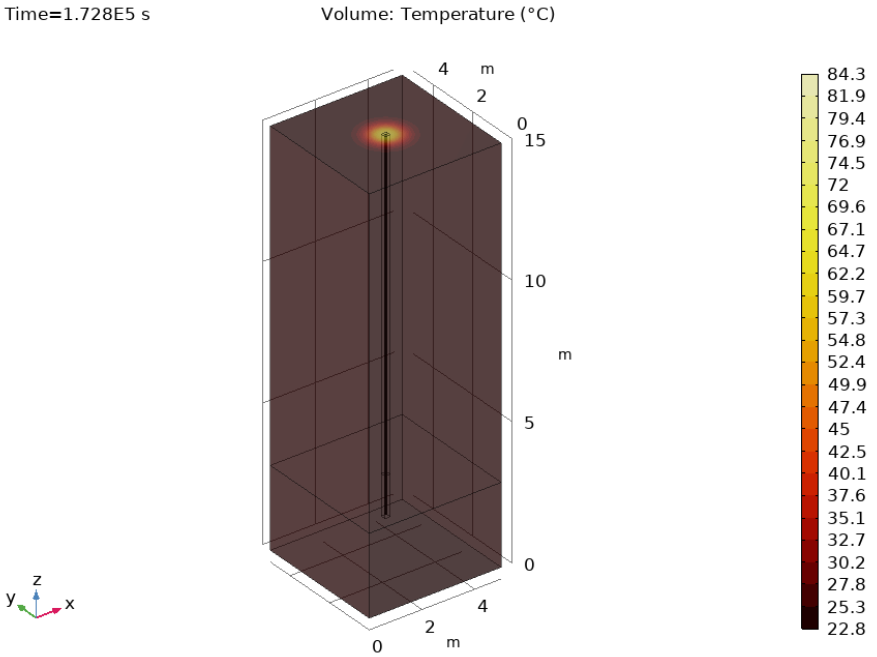


Figura 2. Mapa de calor 3D evidenciando a saturação térmica local (>80ºC) sob carga total

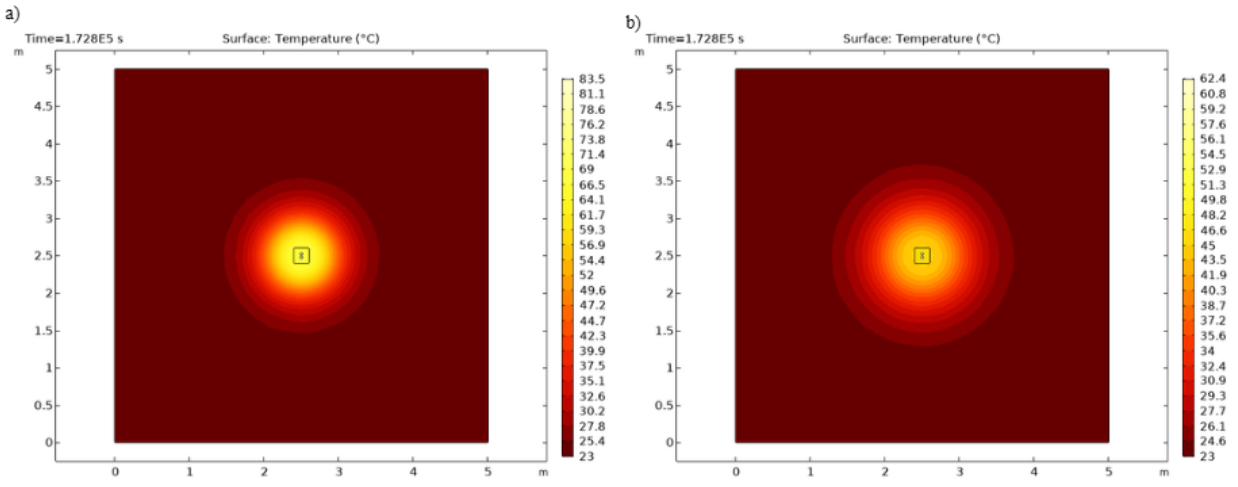


Figura 3. Perfil térmico vertical (Plano de Corte) realizado (a) à 7,5m da superfície e (b) à 12m de profundidade

De forma complementar, a análise do comportamento transiente de temperatura ao longo das 48 horas, possível de observar na Figura 4, revela um padrão de oscilação térmica crítico. Durante os períodos de operação (12 horas), é observada uma rampa de ascensão térmica acentuada. Destaca-se que essas medidas de temperatura obtidas para gerar o gráfico não representam um ponto específico, mas sim a variação de temperatura do modelo. Isso indica que a taxa de injeção de calor é realmente superior à taxa de difusão térmica do solo do CEEG-PG. Nos períodos de repouso (12 horas noturnas), a inclinação negativa da curva não é o suficiente para que a estaca retorne à temperatura basal de 24ºC do solo.

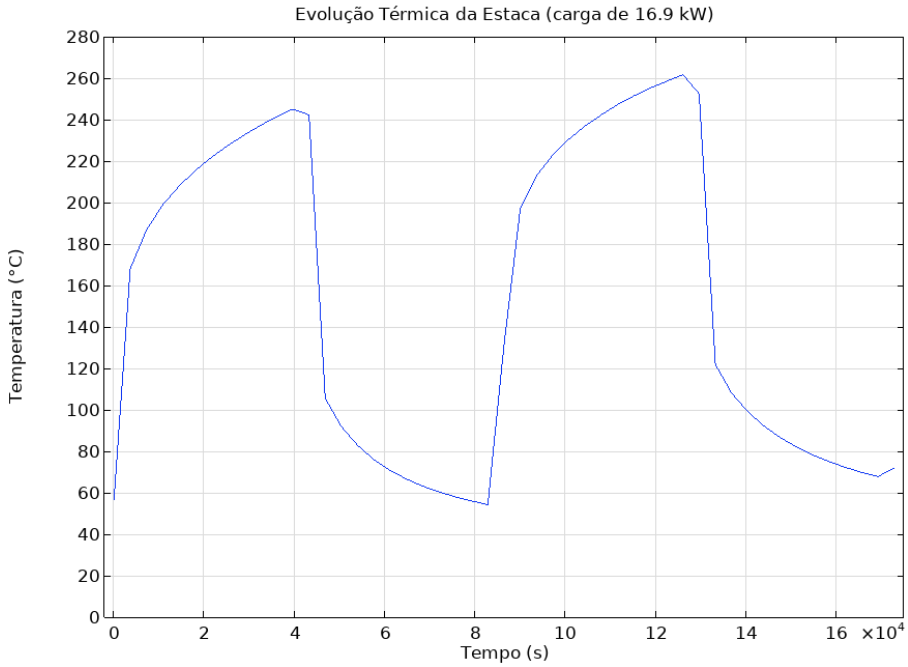


Figura 4. Gráfico Temperatura x Tempo

Esse fenômeno observado evidencia que, para uma única estaca, o calor acumulado no ciclo anterior não é totalmente dissipado antes do início do ciclo seguinte, entendendo como saturação térmica, ou seja, o momento em que o solo atingiu sua capacidade máxima de condutividade térmica. Como resultado disso, cada novo ciclo de operação parte de um patamar térmico mais elevado, conduzindo todo o sistema a uma saturação não reversível em pouco tempo de uso.

Este fenômeno de saturação térmica demonstra que a condutividade térmica da argila silto-arenosa de baixa consistência e da areia do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG) não apresentou capacidade de dissipação suficiente para absorver tal fluxo de calor de forma concentrada em uma única estaca. Temperaturas nessa ordem de grandeza poderiam causar problemas na integridade estrutural da estaca e a eficiência do ciclo de refrigeração, evidenciando a necessidade de um campo de estacas para a distribuição da carga térmica e para manter o sistema em níveis operacionais de segurança (abaixo de 40ºC).

Diante dessa situação, a estratégia de modelagem foi refinada para poder realizar a simulação do comportamento de uma estaca representativa inserida em um campo composto por dez unidades de estacas, equidistantes entre si por 3 m, visto que o efeito de dissipação não chega à metade da distância entre elas, como possível de observar na Figura 7 (b). Dessa forma, a carga térmica rejeitada no solo (16,9 kW) foi dividida, onde cada estaca passou a receber 10% da carga total, ou seja, 1.692,56 W.

As Figura 5 e Figura 6 apresentam o novo mapa de calor e o plano de corte para a estaca com carga térmica reduzida. Com a distribuição da carga, observa-se que as temperaturas se estabilizaram em níveis mais adequados, quando comparada com a única estaca, permitindo que o solo e o concreto da estaca atuem como um dissipador térmico eficiente dentro do regime transiente de 48 horas simulado.

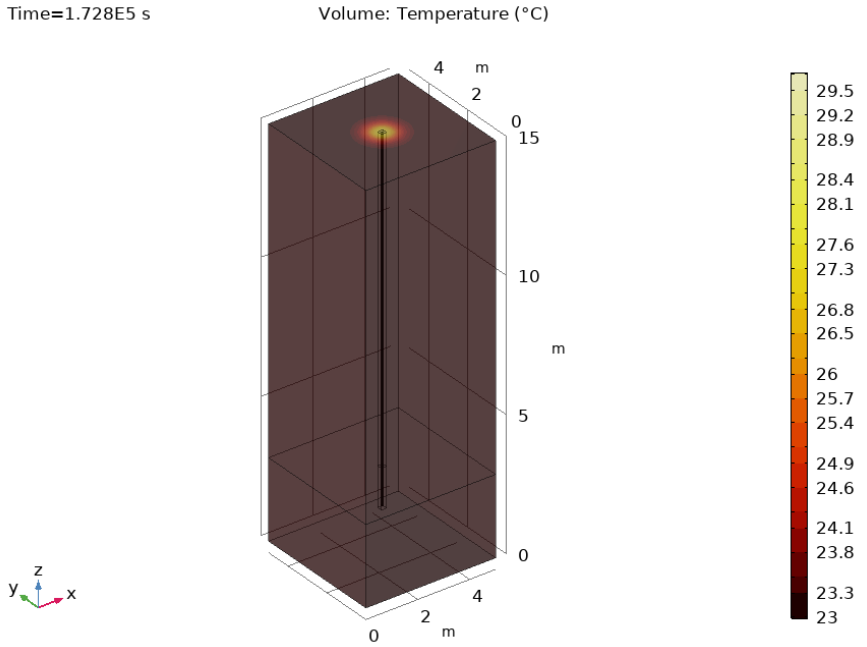


Figura 5. Mapa de calor 3D – Carga Qsolo particionada

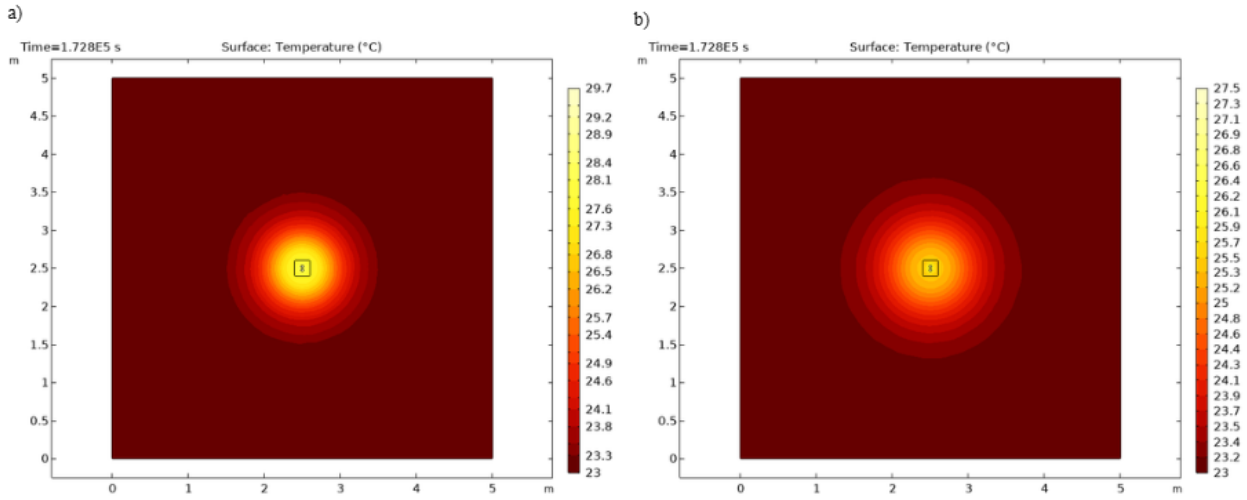


Figura 6. Perfil térmico vertical (Plano de Corte) (a) à 7,5m da superfície e (b) à 12m de profundidade – Carga Qsolo particionada

A eficácia em realizar essa redistribuição da carga térmica em um campo com dez estacas se torna evidente quando se compara o amortecimento da amplitude térmica no perfis de temperatura transiente (Figura 4 (a) e Figura 7). Enquanto no primeiro cenário (estaca única) a temperatura apresentava uma trajetória de ascensão não controlada, o gráfico para a estaca representativa com carga de 1.692,56 W exibe um comportamento de estabilização térmica.

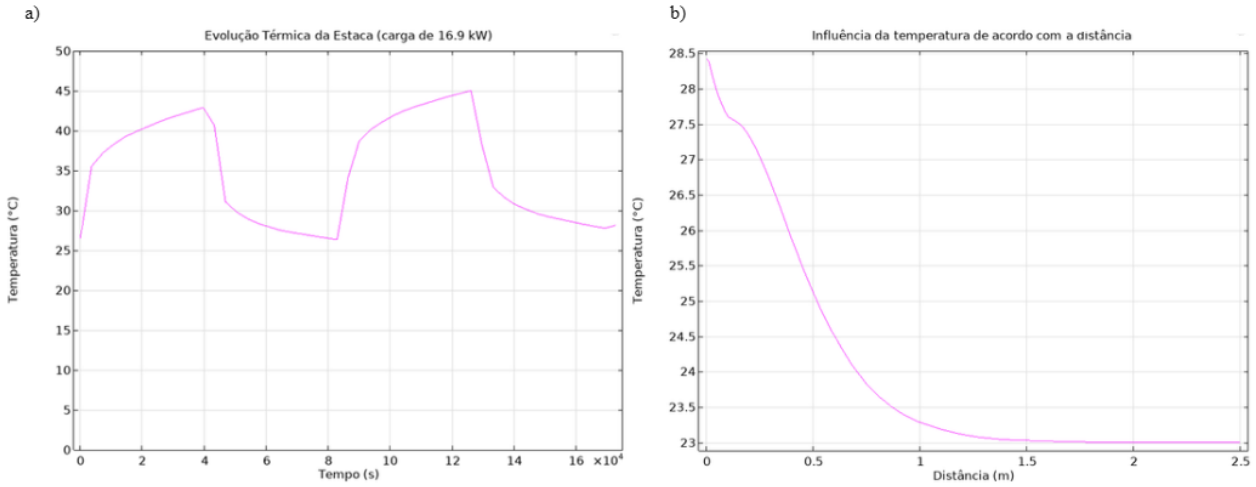


Figura 7. Gráfico (a) Temperatura x Tempo e (b) Temperatura x Distância – Carga Qsolo particionada

Nesse cenário alternativo, a inclinação da rampa de aquecimento durante as 12 horas de operação foi reduzido. Percebe-se também que a taxa de resfriamento durante as 12 horas de repouso mostrou-se o suficiente para dissipar a maior parcela do calor injetado no ciclo anterior. Apesar do fenômeno de saturação térmica ainda poder ser observado em escala reduzida, a temperatura máxima atingida na interface concreto-solo se estabilizou em patamares considerados seguros, não ultrapassando 50ºC.

Essa mudança de comportamento demonstra que o solo do CEEG-PG, apesar de suas limitações de condutividade térmica, pode atuar como um reservatório térmico viável desde que a taxa de injeção de energia seja compatível com a sua capacidade de difusão lateral. Consequentemente, a disposição simulada com dez estacas não somente protege a integridade estrutural do sistema, como garante uma temperatura de entrada mais baixa para o fluido da bomba de calor, otimizando o COP de todo o sistema de climatização do container ao longo do tempo.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo numérico demonstrou a potencial viabilidade técnica da utilização de estacas trocadoras de calor para a climatização de um container sem isolamento térmico, submetido às condições climáticas e geológicas de Ponta Grossa, no Paraná. A modelagem computacional transiente via software de simulação de elementos finitos permitiu identificar que a alta carga térmica de rejeição (16,9 kW) é o fator determinante para o design do projeto de condicionamento ambiental.

A simulação inicial com uma única estaca revelou uma saturação térmica severa, com temperaturas excedendo 180ºC. Esse resultado comprova que a taxa de injeção de calor de um container sem proteção térmica supera a capacidade de dissipação imediata da argila silto-arenosa local, tornando imperativo o fracionamento da carga.

O redimensionamento para um sistema composto por dez estacas (recebendo 1.692,56 W cada) mostrou-se eficaz na estabilização das temperaturas operacionais abaixo de 40ºC. Essa configuração permitiu que o concreto da estaca e o solo adjacente atuassem como um dissipador térmico eficiente dentro do ciclo de 48 horas.

A análise dos comportamentos cíclicos de temperatura confirmou que, embora ocorra o fenômeno de saturação térmica, a distribuição da carga atenua a amplitude térmica e permite uma recuperação parcial do solo durante os períodos de repouso noturno.

Os parâmetros térmicos adotados para o solo de baixa consistência do CEEG-PG mostraram que, apesar da resistência térmica do meio, a inércia do solo é um recurso valioso para a eficiência energética da bomba de calor geotérmica na região.

Em suma, a transição de uma análise de carga total para uma carga particionada validou a estratégia de projeto, garantindo a integridade dos materiais (PEAD e concreto) e a sustentabilidade térmica do sistema a

longo prazo. Como trabalhos futuros, recomenda-se a simulação de períodos sazonais prolongados e a análise do impacto do espaçamento entre as estacas na interferência térmica mútua.

AGRADECIMENTOS

À FUNESPAR, à Solution IPD, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, ao CEEG-PG e à aluna de iniciação científica Karine Saldanha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. 2017. ed. EUA: Mark S. Owen, 2017 [2017]. (ASHRAE HANDBOOK).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2 - Desempenho térmico de edificações - Parte 2 - Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD)**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16401-1 - Instalações de condicionamento de ar - Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projeto das instalações**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2023**. Paris, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023. Acesso em: 24 fev. 2026.

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. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06092022-112023/. Acesso em: 24 fev. 2026.

NIEDVIESKI, L. B. **Análise experimental e numérica de propriedades térmicas de solo residual argiloso empregando trocadores de calor geotérmicos superficiais**. 2025. 102 f. Dissertação - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025. Disponível em: Acesso em: 24 fev. 2026.

OLIVARES, A. A. P. **Sustainability in prefabricated architecture**. 2010. 250 f. Dissertação - Victoria University of Wellington, Wellington, Nova Zelândia, 2010. Disponível em: https://openaccess.wgtn.ac.nz/articles/thesis/Sustainability_in_Prefabricated_Architecture_A_Comparative_Life_Cycle_Analysis_of_Container_Architecture_for_Residential_Structures/16973995?file=31398280. Acesso em: 24 fev. 2026.

SAJID, Z. W. *et al.* Climate Change Mitigation through Modular Construction. **Smart Cities**, [*s. l.*], v. 7, n. 1, p. 566–596, 2024.

SPITLER, J. D.; GEHLIN, S. E. A. Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l.*], v. 50, p. 1125–1137, 2015.

TONUS, B. P. de A. **Avaliação da utilização do ensaio de cone térmico (TCT) na determinação de propriedades térmicas do solo para dimensionamento de sistemas geotérmicos**. 2023. 210 f. Tese - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.