

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MILENA CARDOSO DE FREITAS MURARI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS TUBULARES
METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS GEOTÉRMICOS SUPERFICIAIS**

Versão Corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa

São Carlos

2022

MILENA CARDOSO DE FREITAS MURARI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS TUBULARES
METÁLICAS UTILIZADAS EM SISTEMAS GEOTÉRMICOS SUPERFICIAIS**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,
como requisito para obtenção do Título de
Doutora em Ciências.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Cristina de Hollanda
Cavalcanti Tsuha

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

M972e Murari, Milena Cardoso de Freitas
Estudo do comportamento de fundações por estacas tubulares metálicas utilizadas em sistemas geotérmicos superficiais / Milena Cardoso de Freitas Murari; orientadora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. -- São Carlos, 2022.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Fundações. 2. Geotermia superficial.
3. Estacas trocadoras de calor. 4. Estaca tubular metálica.
5. Ensaio de troca térmica. 6. Modelagem física. 7. Modelagem numérica. I. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **MILENA CARDOSO DE FREITAS MURARI**.

Título da tese: "Estudo do comportamento de fundações por estacas tubulares metálicas utilizadas em sistemas geotérmicos superficiais".

Data da defesa: 25/05/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Profa. Associada **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Profa. Dra. **Fleur Alice Loveridge**
(University of Leeds/Inglaterra)

Aprovado

Prof. Dr. **Daniel Dias**
(Université Grenoble Alpes/France)

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Saboya Albuquerque Júnior**
(Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro/UENF)

Aprovado

Prof. Associado **Alberto Hernandez Neto**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

*Dedico este trabalho aos meus principais incentivadores:
Ao Gabriel meu esposo,
Aos meus pais e à minha irmã.*

AGRADECIMENTOS

Quando comecei a escrever os agradecimentos deste trabalho pensei que a melhor forma de o fazer seria seguindo a cronologia de como o projeto se iniciou.

Inicialmente quero agradecer à Deus pela saúde e proteção de todos os dias e por ter colocado tantas pessoas boas ao meu lado, que só contribuíram com a minha formação.

À minha orientadora Cristina Tsuha pela oportunidade de participar deste projeto de pesquisa, pela orientação, paciência e amizade.

Ao meu esposo Gabriel e à minha família pelo companheirismo e por todo o suporte e incentivo para que tudo fosse possível.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e pela bolsa do doutorado sanduíche.

À Tuper/SA pelo fornecimento de todas as estacas e financiamento da pesquisa.

Aos membros da Tuper: Fábio, Heber e Inácio, por todo o suporte durante a pesquisa e pela amizade construída.

Aos professores do departamento de Geotecnia, em especial ao Orêncio Vilar, Nelson Aoki, e Tarcísio Ceslestino, que tanto contribuíram com a minha formação durante o Doutorado.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia, Oscar, José Luiz e Benedito, por todo apoio na realização dos ensaios em laboratório. Também agradeço à secretaria do departamento: Maristela, Álvaro, e Neiva pela amizade e por sempre me ajudarem quando necessário.

Aos membros do CICS, principalmente à Diana Csillag, ao professor Vanderley John, por acreditarem neste projeto com tanta energia e inspiração. Ao Milton e à toda a equipe que me ajudou durante as montagens das estacas e dos ensaios, em especial ao Vivaldo, Francisco e Jhames.

Ao IPT Geotecnia (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) pelo empréstimo e calibração do macaco hidráulico e da célula de carga para os ensaios de prova de carga estática.

À Vertice Engenharia, por contribuir nos ensaios de prova de carga estática com o empréstimo das vigas de reação. À Stack Engenharia e Fundações Ltda pela disposição de toda a equipe para cravação das estacas metálicas. À Espaferro, na pessoa do Mateus

Soriani, pela doação dos espaçadores plásticos utilizados nas montagens dos tubos de geotermia.

À Professora Fleur Loveridge e à Universidade de Leeds pela oportunidade do Intercâmbio, e por tanto aprendizado durante este período.

A todos os amigos que conheci neste período do doutorado, em especial aos alunos do grupo de fundações, Thaise Morais, João Manoel, Juliana Pessin, Diogo Moreira, Bruno Oliveira, João Zacarrin, e Letícia Menezes pelas experiências e troca de conhecimento.

RESUMO

FREITAS, M. C. Estudo do comportamento de fundações por estacas tubulares metálicas utilizadas em sistemas geotérmicos superficiais. 2022. 250 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A utilização de fundações por estacas trocadoras de calor tem se mostrado um meio econômico e eficiente de aproveitar a energia geotérmica das camadas superficiais do solo para aquecer ou resfriar as edificações. O uso desta tecnologia, frequente em regiões de clima temperado, ainda é raro em zonas de clima tropical como o do Brasil. Em São Paulo, no campus da USP, as fundações de um edifício em construção, conhecido como CICS Living Lab, serão usadas para o resfriamento de ambientes. Para a fundação de parte do prédio, foram cravadas estacas tubulares metálicas, onde foram inseridas tubulações para realizar a troca térmica do edifício com o subsolo. Para uma melhor transferência de calor com o solo em seu entorno, as estacas tubulares precisam ser preenchidas com algum material, uma vez que o ar é um isolante térmico. Portanto, o objetivo principal desta pesquisa foi avaliar o desempenho térmico de quatro soluções diferentes de preenchimento para as estacas do prédio em construção. Os materiais testados nesta pesquisa foram: argamassa, argamassa com fibras metálicas, areia saturada e água. Ensaios de resposta térmica (TRT) foram realizados em quatro estacas preenchidas com os diferentes materiais, para verificar se alternativas mais econômicas poderiam proporcionar desempenho térmico similar às soluções convencionais de preenchimento. Para um melhor entendimento da transferência térmica entre estas estacas testadas e o solo, e para comparar o desempenho térmico de estacas de aço e de concreto, previamente foram realizados ensaios em modelo físico em laboratório, nos quais foram simuladas a troca térmica de seções de estacas trocadora de calor com areia seca e saturada. Para análise e interpretação dos ensaios de campo foram utilizados modelos analíticos e desenvolvidos modelos numéricos em 2D e 3D com o programa COMSOL. Por fim, o comportamento termomecânico da fundação trocadora de calor foi avaliado em campo por meio de prova de carga com carregamento térmico simultâneo. As principais conclusões deste trabalho foram as seguintes:

- (i) As soluções com melhor desempenho térmico foram as da estaca preenchida com água e com argamassa e fibras metálicas, no entanto em termos de custo a primeira é mais econômica;
- (ii) O desempenho térmico das estacas preenchidas com argamassa e com areia saturada foi similar, porém a segunda alternativa envolve menos custos;
- (iii) O satisfatório desempenho da estaca preenchida com água se deve ao efeito de convecção em seu interior, detalhado pela modelagem numérica 3D;
- (iv) Os resultados dos ensaios em modelo físico estão convergendo com o encontrado em campo, e indicaram melhor desempenho para as seções de estacas de aço;
- (v) O ensaio de carregamento termomecânico ilustrou o acréscimo de tensões axiais ao longo do comprimento das estacas, devido ao efeito do carregamento térmico simultâneo, modificando o diagrama de transferência de carga ao longo da profundidade da estaca.

Palavras chave: fundações, energia geotérmica superficial, estacas tubulares metálicas, estacas trocadoras de calor, ensaios de resposta térmica, modelagem física, modelagem numérica, comportamento termomecânico.

ABSTRACT

FREITAS, M. C. Study of the behaviour of steel pipe energy piles for shallow geothermal heat exchange. 2022. 250 p. Thesis (Doctorate) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022

Energy piles has proved to be a thrifty and efficient way to use the geothermal energy of the soil superficial layer to heat or cool buildings. This solution, frequent in temperate climate regions, is still rare in tropical climate zones such as Brazil. In São Paulo, on the USP campus, the foundations of a building under construction, known as CICS Living Lab, will be used to cool the building. In the building foundation project, steel pipe piles were driven for part of the building, and pipes were installed for the thermal conditioning of the building with the ground. To improve the heat transfer with the surrounding soil, tubular piles need to be filled. Therefore, the main objective of this research was to study and evaluate four different infill solutions for the piles of the building under construction. The filling materials tested in this research were: gout, grout with steel fibres, saturated sand and water. For this purpose, thermal response tests (TRT) were carried out on four piles with these different types of materials to verify the more economical alternatives could provide thermal performance similar to conventional filling solutions. For a better understanding of the heat transfer between these tested piles and the soil, and to compare the thermal performance of steel and concrete piles, tests were previously carried out in a physical model in the laboratory, in which the heat exchange of pile sections was simulated with dry and saturated sand. For analysis and interpretation of field tests, analytical models were used and numerical models were developed in 2D and 3D with the COMSOL program. Finally, the thermomechanical behaviour of the heat exchanger foundation was evaluated in the field by means of a load test with simultaneous thermal loading. The main conclusions of this work were the following:

- (i) The solutions with the best thermal performance were those of pile filled with water and with mortar with metallic fibres, however in terms of cost the first one is more economical;
- (ii) The thermal performance of the piles filled with mortar and with saturated sand was similar, but the second alternative involves less costs;
- (iii) The satisfactory performance of the pile filled with water is due to the convection effect inside it, detailed by 3D numerical modelling;

- (iv) The results of the tests in the physical model are in agreement with what was found in the field, and indicated better performance for the steel pile sections;
- (v) The thermomechanical loading test illustrated the increase in axial stresses along the pile length due to the effect of simultaneous thermal loading, modifying the load transfer diagram along the pile depth.

Keywords: foundations, surface geothermal energy, steel pipe piles, energy piles, thermal response tests, physical modelling, numerical modelling, thermomechanical behaviour.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Perfil esquemático da variação da temperatura acima e abaixo da superfície do terreno	26
Figura 2. 2 - Exemplo de diferentes aplicações de estruturas trocadora de calor	28
Figura 2.3- Tipos de sistema aberto para troca de calor	29
Figura 2.4 - Principais tipos de sistemas em circuito fechado para troca de calor: a) sistema em espiral, b) vertical, c) em lagoa e d) horizontal	30
Figura 2. 5 - Diagrama de funcionamento de uma bomba de calor para aquecimento de ambiente	33
Figura 2.6- Exemplo da distribuição anual da demanda e disposição de energia para aquecimento/resfriamento de um edifício sob estacas trocadoras de calor com o solo	34
Figura 2.7 - Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial	35
Figura 2. 8- Previsão de venda de ar-condicionado no setor residencial para 100 domicílios	36
Figura 2.9- Perfil de temperatura do subsolo do campo experimental de fundações da EESC/USP na cidade de São Carlos, Brasil	37
Figura 2.10 - Fluxo de calor em um elemento prismático	38
Figura 2.11- Relação entre a condutividade térmica e o teor de umidade para diferentes tipos de solo	39
Figura 2.12- Difusividade térmica em função da umidade volumétrica: (1) areia, (2) argila, (3) turfa	43
Figura 2. 13- Mecanismos de transferência de calor do solo em função do tamanho do grão e da saturação	44
Figura 2.14- Transferência por condução através de um meio sólido ou fluido estacionário	45
Figura 2. 15- Queda de temperatura devido à resistência térmica de interface entre diferentes materiais	46
Figura 2.16- Transferência de calor por convecção de fluido em movimento	47
Figura 2. 17- Troca de calor por radiação térmica entre duas superfícies	49
Figura 2. 18-A) Número acumulado de projetos de trocadores de calor geotérmicos no mundo e B) economia de CO ₂ trazida pelos projetos instalados	51
Figura 2.19- Espaçamento recomendado entre os tubos PEAD e a armadura longitudinal das estacas	52
Figura 2.20- Configurações dos tubos PEAD nas estacas trocadoras de calor	53
Figura 2. 21- Perfis de velocidade de escoamento: a) Fluxo laminar; b) Fluxo turbulento	55
Figura 2. 22- Transferência de calor em estaca: (a) plano com os elementos do sistema (fluido, tubo PEAD, estaca e solo); (b) diferenças de temperatura e resistências dos elementos.	57
Figura 2. 23- Resistência térmica do poço (borehole) R_b com configuração e U simples para diferentes espaçamentos entre os tubos (posições A, B e C) e diferentes valores de condutividade térmica do material de	59
Figura 2. 24- Seção transversal de um poço (borehole) preenchido com água, temperatura anular (T_{ann}) e	59
Figura 2. 25- Efeito da temperatura nas estacas de energia submetidas ao aquecimento ($\Delta T > 0$) e resfriamento ($\Delta T < 0$)	61
Figura 2. 26- Efeito do carregamento térmico das estacas durante o resfriamento da edificação para diferentes tipos de solo: (a) perfil da deformação térmica axial ϵ , (b) perfil da carga axial P , (c) atrito lateral solo/estaca	63
Figura 2.27- Resposta da estaca ao carregamento termomecânico: (a) Somente carregamento, (b) resfriamento, (c) Carregamento e resfriamento combinados, (d) Aquecimento, (e) Carregamento e aquecimento combinados.	64

<i>Figura 2.28- Comportamento geral de uma estaca trocadora de calor</i>	66
<i>Figura 2. 29- Configuração típica do ensaio TRT – injeção de calor no solo</i>	68
<i>Figura 2. 30- Resultado típico de ensaio de troca térmica TRT</i>	70
<i>Figura 2.31- G-Function para diferentes configurações de poços</i>	79
<i>Figura 2. 32- Resultados do ajuste de parâmetros (λ_s e R_b) para quatro espaçamentos entre tubos testados (Caso A, B, C, e D)</i>	81
<i>Figura 2. 33- Exemplo da técnica para estimativa de parâmetros para a avaliação do resistência térmica de borehole e a condutividades térmicas efetivas do solo</i>	82
<i>Figura 3. 1– Layout do edifício CICS</i>	85
<i>Figura 3. 2- Identificação do local aonde será construído o CICS</i>	85
<i>Figura 3.3- Locação das sondagens na área do CICS</i>	87
<i>Figura 3.4- Resultado da sondagem SPT S2 com perfil do subsolo do CICS</i>	87
<i>Figura 3.5- Direção do fluxo de água subterrânea e corte com perfil geológico do terreno nas proximidades do CICS</i>	89
<i>Figura 3.6- Posição relativa dos poços de monitoramento</i>	90
<i>Figura 3.7- Perfil estratigráfico do terreno do CICS do poço de monitoramento PM1</i>	91
<i>Figura 3. 8- Corte da caixa com a configuração da montagem e espaçamentos dos sensores de temperatura</i>	93
<i>Figura 3.9- Montagem das estacas para os modelos físicos</i>	95
<i>Figura 3. 10- Fibras metálicas misturados com o concreto</i>	95
<i>Figura 3. 11- Curva granulométrica da areia</i>	96
<i>Figura 3. 12- Separação da caixa em camadas para o preenchimento com areia</i>	97
<i>Figura 3. 13- Posição dos sensores de temperatura PT100 no entorno da estaca e detalhe dos espaçamentos</i>	98
<i>Figura 3. 14– Aquecedor com termostato utilizado no ensaio</i>	98
<i>Figura 3. 15 - Etapas de montagem e execução do ensaio E1</i>	99
<i>Figura 3. 16- Etapas de montagem do ensaio em areia saturada</i>	99
<i>Figura 3. 17- Sistema de aquisição de dados- ADS 2000</i>	102
<i>Figura 3. 18- Resistências usadas para calibração do PT100</i>	103
<i>Figura 3. 19- Tela do Aqdados para calibração por regressão linear</i>	103
<i>Figura 3. 20- Locação das estacas na área do CICS</i>	104
<i>Figura 3. 21- Equipamento tipo bate estaca usado para cravação das estacas metálicas do CICS</i>	105
<i>Figura 3. 22 – Solda com eletrodo revestido utilizada na emenda dos tubos metálicos</i>	105
<i>Figura 3. 23- Luva de conexão rápida para emenda das estacas tubulares (A- Imagem das Luvas e apresentação do mecanismo de funcionamento, B – posição inicial em campo e C – posição final em campo)</i>	106
<i>Figura 3. 24-Espaçadores plástico adotado para montagem do sistema de geotermia das estacas metálicas</i>	109
<i>Figura 3. 25–Protótipo da estaca trocadora de calor A –em laboratório e B- em campo</i>	110
<i>Figura 3. 26- Estacas piloto com geotermia instaladas na área do CICS</i>	111
<i>Figura 3. 27 Estacas piloto com geotermia e materiais de preenchimento adotados</i>	112
<i>Figura 3.28– Configuração da ponte de wheatstone com os sensores biaxiais nas barras instrumentadas</i>	112
<i>Figura 3. 29– Montagem do ensaio de calibração das barras instrumentadas</i>	113

<i>Figura 3. 30– Proteção mecânica das barras instrumentadas com strain gauges</i>	113
<i>Figura 3. 31-Instalação dos tubos de geotermia nas estacas metálicas</i>	114
<i>Figura 3. 32- Preenchimentos das estacas piloto com diferentes materiais</i>	114
<i>Figura 3.33 – Instalação dos sensores nas estacas piloto do CICS</i>	116
<i>Figura 3.34- Instalação dos sensores nas estacas preenchida com água</i>	116
<i>Figura 3. 35– Posição dos sensores ao longo das estacas e estratigrafia do terreno do CICS</i>	117
<i>Figura 3. 36– Seção da estaca preenchida com argamassa à 12,5 m de profundidade instrumentada com</i>	117
<i>Figura 3. 37– Planta com locação das estacas metálicas para os ensaios de prova de carga estática</i>	119
<i>Figura 3. 38- Sistema de ancoragem das reações para o ensaio de prova de carga estática</i>	120
<i>Figura 3. 39– Montagem do ensaio e equipamentos utilizados na prova de carga estática</i>	121
<i>Figura 3. 40– Equipamentos usados no ensaio TRT (boiler, bomba, medidor de vazão e sistema de aquisição de dados PMX)</i>	123
<i>Figura 3. 41– Croqui da montagem das tubulações de entrada e saída do fluido circulante</i>	124
<i>Figura 3. 42- Revestimento usado para o isolamento térmico das tubulações</i>	125
<i>Figura 3. 43- Montagem do ensaio termomecânico na estaca T6</i>	128
<i>Figura 3. 44- Seção da estaca trocadora de calor do modelo em 2D</i>	130
<i>Figura 3. 45- Geometria e malha do modelo 3D desenvolvido</i>	135
<i>Figura 3. 46- Comparação entre resultados experimentais de campo e numéricos da evolução da temperatura de saída para escoamento laminar e turbulento</i>	140
<i>Figura 3. 47– Malha utilizada no modelo 3D</i>	143
<i>Figura 4. 1– Resultado do ensaio ES-P1 para a fase de aquecimento da estaca</i>	146
<i>Figura 4. 2- Resultado do ensaio ES-P2 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com concreto magro e fibras metálicas)</i>	147
<i>Figura 4. 3 Resultado do ensaio ES-P3 para a fase de aquecimento da estaca</i>	147
<i>Figura 4. 4- Resultado do ensaio ES-P4 para a fase de aquecimento da estaca</i>	148
<i>Figura 4. 5- Evolução da temperatura dos sensores nas duas direções analisadas 0° e 90° para os tempos 12h, 24h, 48h, 72h e 96h de aquecimento em areia seca</i>	149
<i>Figura 4. 6– Gráfico da variação da temperatura x tempo na interface das estacas analisadas a 0° e a 90</i>	150
<i>Figura 4. 7– Contornos das temperaturas no entorno das estacas P1, P2, P3 e P4 no final da fase de</i>	152
<i>Figura 4. 8- Variação da temperatura radial no entorno da estaca para a fase de resfriamento dos ensaios</i>	153
<i>Figura 4.9- Resultado do ensaio E SAT-P1 para a fase de aquecimento da estaca</i>	155
<i>Figura 4. 10- Resultado do ensaio E SAT-P3 para a fase de aquecimento da estaca</i>	156
<i>Figura 4. 11- Resultado do ensaio E SAT-P4 para a fase de aquecimento da estaca (estaca de concreto)</i>	156
<i>Figura 4. 12- Resultado do ensaio E SAT-P4 para a fase de aquecimento da estaca</i>	157
<i>Figura 4. 13- Gráfico da variação da temperatura x tempo na interface das estacas analisadas a 0° e a 90°</i>	159
<i>Figura 4. 14- Contornos das temperaturas no entorno das estacas P1, P3, P4 e P5 no final da fase de</i>	160
<i>Figura 4. 15– Variação da temperatura nas posições analisadas durante a fase de aquecimento para 12h, 24h, 48h, 72h e 96h de aquecimento em areia saturada</i>	161

Figura 4. 16– Resultados da fase de resfriamento dos ensaios nas estacas P4 e P5 em areia saturada _____	162
Figura 4. 17 -Variação da temperatura do sensor no centro da estaca P5 durante a fase de resfriamento _____	163
Figura 4.18– Taxa de calor calculada para os ensaios em areia seca _____	165
Figura 4. 19- Taxa de calor calculada para os ensaios em areia saturada _____	166
Figura 4. 20- Distribuição radial da temperatura no término dos quatro ensaios para as duas direções analisadas _____	168
Figura 5. 1– Perfil de temperatura do subsolo do terreno do CICS _____	170
Figura 5. 2- Resultado do TRT-1: estaca metálica preenchida com areia _____	172
Figura 5. 3- Resultado do TRT-2: estaca metálica preenchida com argamassa _____	172
Figura 5. 4- Resultado do TRT-3: estaca metálica preenchida com argamassa e fibras metálicas _____	173
Figura 5. 5- Resultado do TRT-4: estaca metálica preenchida com água _____	173
Figura 5. 6– Variação normalizada da temperatura do fluido durante os TRTs _____	174
Figura 5. 7– Perfil da temperatura das estacas em diferentes tempos durante o ensaio TRT: 6h, 12h, 24h, 48h e 72h. _____	175
Figura 5. 8- Relação entre o aumento da temperatura média do fluido e o logaritmo natural do tempo dos quatro ensaios executados _____	178
Figura 5. 9– Ajuste visual dos modelos analíticos ILSM-Simplificado e ILSM-Integral exponencial com os _____	179
Figura 5. 10- Ajustes lineares para a fase de recuperação térmica (recovery) desconsiderando as primeiras 5 horas do ensaio _____	181
Figura 5. 11- Variação da condutividade térmica das estacas para diferentes valores de t_{min} (ILSM-simplificado) _____	183
Figura 5. 12– Variação da resistência térmica das estacas para diferentes valores de t_{min} (ILSM-simplificado) _____	183
Figura 5. 13- Variação da condutividade térmica das estacas para diferentes intervalos de tempo analisado _____	185
Figura 5. 14- Variação da condutividade térmica com o tempo para as diferentes camadas do solo calculada _____	186
Figura 5. 15– Perfil do solo com os dados de condutividade térmica determinados para cada camada pelo _____	187
Figura 5. 16– Ajuste visual do modelo analítico SCSM proposto por Man et al., (2010) e dos dados experimentais para $F_0=5$ _____	189
Figura 5. 17 - Ajuste visual do modelo empírico G-Function e os dados experimentais _____	190
Figura 5. 18- Análise dinâmica da resistência térmica das estacas obtidas pelos modelos analíticos para os ensaios: TRT-1 (Areia), TRT-2 (Argamassa), TRT-3 (Argamassa com fibras) e TRT-4 (Água) _____	192
Figura 5. 19– Análise dinâmica da condutividade térmica do solo obtidas pelos modelos analíticos para os ensaios: A – TRT-1 (Areia), B – TRT-2 (Argamassa), C – TRT-3 (Argamassa com fibras) e D -TRT-4 (Água). Comparação com a variação da temperatura ambiente no decorrer do ensaio _____	193
Figura 5. 20- Variação da temperatura do fluido e temperatura do solo em 30 anos para os diferentes valores de resistência térmica calculados para os diferentes materiais de preenchimento _____	196
Figura 5. 21- Resultado das interações da análise paramétrica realizada numericamente pelos modelos em 2D para os três diferentes materiais de preenchimento (areia, argamassa e argamassa com fibras metálicas), a) TRT-1, b) TRT-2 e c) TRT-3 _____	199
Figura 5. 22– Distribuição da temperatura no entorno da estaca obtida numericamente no término da análise numérica em 3D _____	201

<i>Figura 5. 23-Varição da temperatura de saída da água obtida pelo ensaio TRT e pela simulação numérica em 3D</i>	201
<i>Figura 5. 24– Variação da temperatura ao longo do tempo obtida numericamente e experimentalmente nas posições dos sensores instalados na borda da estaca (2m, 4m, 8m, 12m, 16m e 20m)</i>	202
<i>Figura 5. 25— Variação da temperatura ao longo do tempo obtida numericamente e experimentalmente nas posições dos sensores instalados no centro da estaca (profundidades de 4m, 12m, e 20m)</i>	203
<i>Figura 5. 26– Coordenadas X, Y e Z adotadas para a estaca nas análises</i>	204
<i>Figura 5. 27– Campo das velocidades e temperatura gerados na análise numérica 3D na seção transversal XZ da estaca</i>	205
<i>Figura 5. 28- Campo das velocidades e temperatura gerados na análise numérica 3D na seção transversal YZ da estaca</i>	205
<i>Figura 5. 29– Resistência térmica da estaca calculada com os dados obtidos pela análise numérica em 3D</i>	206
<i>Figura 5. 30- Resultados de resistência térmica das estacas obtidos pelos métodos analíticos e numéricos</i>	210
<i>Figura 5. 31- Resultados da resistência térmica da estaca obtidas numericamente vs. custo por metro de</i>	211
<i>Figura 6.1- Esquema de deformações térmicas em estaca com topo livre</i>	213
<i>Figura 6.2- Diagramas de deformação axial, carga axial e atrito lateral de uma estaca trocadora com</i>	213
<i>Figura 6. 3- Profundidades da instrumentação (strain gauges e sensores de temperatura)</i>	214
<i>Figura 6. 4– Variação da temperatura do fluido e da temperatura ambiente durante o aquecimento e</i>	215
<i>Figura 6. 5- Variação da temperatura dos sensores na estaca durante a) o aquecimento e b) o resfriamento natural</i>	215
<i>Figura 6. 6-Seção a 12,5 m de profundidade com instrumentação no tubo PEAD, no centro e na borda da</i>	216
<i>Figura 6. 7– Variação da temperatura na estaca ao longo da profundidade durante a) o aquecimento e b) o resfriamento natural</i>	217
<i>Figura 6. 8-Influência do efeito da temperatura ambiente nas leituras dos strain gauges para a) fase de</i>	218
<i>Figura 6. 9- Variação da tensão axial atuante (devido à subida da estaca sem restrição no topo) na seção a 20 metros de profundidade durante o carregamento térmico nas fases de a) aquecimento e b) resfriamento natural.</i>	219
<i>Figura 6. 10–Curvas da tensão axial e carga induzidas na profundidade de 20 metros versus a variação da temperatura na fase de aquecimento</i>	220
<i>Figura 6. 11–Curva da variação da tensão axial e carga induzidas na profundidade de 20 m versus a variação da temperatura na fase de resfriamento</i>	220
<i>Figura 6. 12 – Dados tratados dos strain gauges desconsiderando o efeito do ambiente em a) aquecimento e b) resfriamento</i>	221
<i>Figura 6. 13– a) carga axial termicamente induzida durante o ensaio, b) atrito unitário induzido e c) perfil de temperatura</i>	221
<i>Figura 6. 14-Cargas axiais ao longo de estaca trocadora de calor devido a carregamento térmico (sem carga no topo)</i>	222
<i>Figura 6. 15- a) carga axial termicamente induzida durante o ensaio, b) atrito unitário induzido e c) perfil de temperatura (resfriamento)</i>	223
<i>Figura 6. 16- Carga recalque (ensaio anterior até carga de ruptura e ensaio até carga de serviço)</i>	224

<i>Figura 6. 17–Diagrama de esforço normal da estaca por estágios de carregamento até a carga de serviços de 1220 kN</i>	225
<i>Figura 6. 18– Valores de N_{SPT} e Resistência por atrito lateral unitária mobilizada para a carga de serviço</i>	226
<i>Figura 6. 19 – Dados da instrumentação da temperatura ambiente e Carga axial (kN) na estaca</i>	227
<i>Figura 6. 20- Dados descartados devido ao efeito da temperatura ambiente nos resultados dos strain gauges</i>	227
<i>Figura 6. 21– Temperatura média no fluido e nos sensores instalados ao longo da profundidade da estaca</i>	228
<i>Figura 6. 22– Curva carga x tempo do ensaio termomecânico</i>	229
<i>Figura 6. 23– Curva do recalque ao longo do tempo do ensaio termomecânico</i>	229
<i>Figura 6. 24- Diagrama de atrito (aquecimento) e variação de temperatura ao longo da estaca</i>	230
<i>Figura 6. 25- Diagrama de atrito (resfriamento natural) e variação de temperatura ao longo da estaca</i>	230

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Condutividade térmica e capacidade de calor de alguns constituintes do solo	39
Tabela 2.2- Propriedades térmicas médias do solo	41
Tabela 2.3- Valores típicos de resistência térmica de estacas trocadora de calor	58
Tabela 2. 4-A.1 -Parâmetros de ajuste de curva para Gg l- limite superior para $0,1 < Fo < 100.000$	76
Tabela 2. 5- A.2- Parâmetros de ajuste para Gg - limite inferior para $0,25 < Fo < 100.000$	76
Tabela 2. 6- Parâmetros de ajuste para Gg - limite superior para $0,1 < Fo < 100.000$	77
Tabela 3.1- Condutividade hidráulica e velocidade de fluxo obtidas pelo ensaio de campo	90
Tabela 3.2- Traço dos concretos utilizados nos ensaios	94
Tabela 3. 3- Caracterização da areia	96
Tabela 3. 4- Relação dos ensaios realizados em laboratório	100
Tabela 3. 5- Dados das estacas metálicas piloto do CICS	108
Tabela 3. 6- Estacas piloto com geotermia e materiais de preenchimento adotados	111
Tabela 3. 7- Traço da argamassa para o volume de $1m^3$	115
Tabela 3.8- Duração e fases dos ensaios TRT nas estacas piloto	126
Tabela 3. 9- Dados do ensaio termomecânico	128
Tabela 3. 10- Parâmetros iniciais adotados nos modelos numéricos em 2D	132
Tabela 3. 11- Parâmetros dos materiais adotados no modelo 3D	138
Tabela 3. 12 -Propriedades termomecânicas da água a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$	139
Tabela 4. 1- Ensaio conduzidos em tanque com areia seca (ES)	145
Tabela 4. 2- Variação da temperatura na interface das estacas ensaiadas em areia seca nas direções a 0° e a 90° do alinhamento dos tubos após 96 horas de aquecimento	148
Tabela 4. 3- Ensaio conduzidos em tanque com areia saturada (E SAT)	154
Tabela 4. 4- Variação da temperatura na interface das estacas nas direções a 0° e a 90° após 96 horas de aquecimento em areia seca	157
Tabela 4. 5 -Condutividade térmica dos materiais encontrada em literatura	159
Tabela 4. 6- Resistências térmicas calculadas para o ensaio em areia seca	165
Tabela 4. 7- Resistências térmicas calculadas para o ensaio em areia saturada	167
Tabela 5. 1- Características das estacas piloto ensaiadas	169
Tabela 5. 2- Dados dos quatro ensaios TRT executados nas estacas piloto	171
Tabela 5. 3- Valores de condutividade térmica do solo, resistência térmica da estaca e erro quadrático médio (RMSE) entre os métodos analíticos e os dados medidos em campo	182

<i>Tabela 5. 4- Condutividade térmica do solo e resistência térmica determinada pelo modelo da fonte cilíndrica sólida (SCSM)</i>	<i>188</i>
<i>Tabela 5. 5- Condutividade térmica do solo e resistência térmica determinada pelo modelo semi-empírico G-Function proposto por Loveridge e Powrie (2013)</i>	<i>190</i>
<i>Tabela 5. 6- Valores médios das resistências térmicas obtidas pelos métodos analíticos para T_{min} de 25 horas</i>	<i>195</i>
<i>Tabela 5. 7- Eficiência térmica das estacas preenchidas com diferentes materiais</i>	<i>197</i>
<i>Tabela 5. 8- Parâmetros adotados para a estaca de metálica de aço nas análises numéricas em 2D</i>	<i>198</i>
<i>Tabela 5. 9- Melhores parâmetros de ajuste obtidos pela análise numérica em 2D</i>	<i>198</i>
<i>Tabela 5. 10- Resistências térmicas das estacas preenchidas com diferentes materiais calculada pelo método multipole model (HELLSTROM, 1991)</i>	<i>200</i>
<i>Tabela 5. 11- Resistência térmica da estaca e RMSE entre os dados medidos em campo e o resultado do modelo numérico para os pares de valores λ_{solo} e R_b</i>	<i>206</i>
<i>Tabela 5. 12- Resumo dos resultados de condutividade térmica do solo, resistência térmica da estaca e erro quadrático médio dos métodos utilizados para análise dos ensaios TRTs</i>	<i>208</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. OBJETIVOS.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. ENERGIA GEOTÉRMICA SUPERFICIAL DO SOLO.....	25
2.2. SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA CLIMATIZAÇÃO	26
2.2.1. Tipos de sistema.....	28
ii. Circuito fechado	29
2.2.2. Bomba de Calor Geotérmica (GSHP).....	31
2.2.3. Demanda de energia	33
2.2.4. Condicionamento térmico no Brasil	34
2.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO.....	37
2.3.1. Condutividade térmica	37
2.3.2. Capacidade térmica	40
2.3.3. Difusividade térmica	42
2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO SOLO	43
2.4.1. Condução térmica	44
2.4.2. Convecção térmica.....	47
2.4.3. Radiação térmica.....	49
2.5. ESTACAS TROCADORAS DE CALOR	50
2.5.1. Características Gerais.....	50
2.5.2. Transferência de calor em estacas termoativas.....	54
2.5.3. Comportamento termomecânico de estacas trocadoras de.....	60
2.6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO E DA ESTACA ..	66
2.6.1. Teste de resposta térmica (TRT)	67
2.6.2. Procedimento do ensaio.....	68
2.6.3. Análise dos resultados pelos métodos analíticos	70
2.6.3.1. Teoria da fonte linear infinita (ILSM)	70

2.6.3.2. ILSM (Recovery)	73
2.6.3.3. Teoria da fonte cilíndrica.....	73
2.6.3.4. Método semi-empírico G- Function	75
2.6.3.5. Multipole Model.....	77
2.6.4. Métodos Numéricos	78
2.6.5. Colinearidade entre os parâmetros R_b e λ_g	80
2.6.6. Incertezas do ensaio TRT	82
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
3.1. EDIFÍCIO CICS Living Lab	84
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO DO CICS	86
3.2.1. Sondagem SPT	86
3.3. MODELO FÍSICO EM LABORATÓRIO	92
3.3.1. Descrição do modelo.....	92
3.3.2. Execução das estacas.....	93
3.3.3. Caracterização da areia.....	95
3.3.4. Montagem e execução do ensaio	97
3.4. FUNDAÇÕES EM ESTACAS TROCADORAS DE CALOR DO CICS	103
3.4.1. Projeto estrutural e instalação das estacas	103
3.4.2. Projeto de estaca tubular metálica para uso de energia geotérmica superficial	108
3.4.3. Montagem do sistema de geotermia e instrumentação das estacas em campo	110
3.4.3.1. Estacas Piloto	110
3.4.3.2. Estacas da fundação do prédio do CICS	117
3.5. ENSAIOS NAS FUNDAÇÕES POR ESTACAS METÁLICAS DO CICS.....	118
3.5.1. Ensaio Mecânicos	118
3.5.2. Ensaio térmicos (Thermal Response Test).....	121
3.5.3. Ensaio termomecânico	127
3.6. MODELAGEM NUMÉRICA DOS ENSAIOS TRT	128
3.6.1. Desenvolvimento de modelo em 2D	129
3.6.1.1. Parâmetros de entrada	130

3.6.1.2. Análise paramétrica.....	132
3.6.2. Desenvolvimento de modelo em 3D.....	134
3.6.2.1. Fluxo de água nos tubos	135
3.6.2.2. Transferência de calor	136
3.6.2.3. Convecção natural dentro da estaca.....	138
3.6.2.4. Condições de contorno	140
3.6.2.5. Análise da malha	142
3.6.2.6. Validação do modelo.....	143
3.6.2.7. Resistência térmica.....	143
4. MODELO FÍSICO DE SEÇÃO DE ESTACA TROCADORA DE CALOR.....	144
4.1. ENSAIOS EM CAIXA COM AREIA SECA.....	144
4.2. ENSAIOS EM CAIXA COM AREIA SATURADA	154
4.3. ESTIMATIVA DE TAXA DE CALOR NO ENSAIO	163
4.3.1. Resultados ensaios em areia seca	164
4.3.2. Resultados ensaios em areia saturada.....	165
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM AREIA SECA E SATURADA	167
5. EFEITO DE DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO NO DESEMPENHO TÉRMICOS DAS ESTACAS – ENSAIOS EM CAMPO	169
5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS TRT	170
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRT.....	176
5.2.1. Métodos Analíticos	176
5.2.1.1. Modelo da fonte linear infinita (ILSM)	176
5.2.1.2. Modelo da fonte cilíndrica sólida (SCSM)	187
5.2.1.3. Modelo empírico G-Function	189
5.2.1.4. Análise dos métodos analíticos.....	191
5.2.2. Cálculo da eficiência	196
5.2.4. Análise numérica em 3D	200
5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	206
6. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE ESTACAS TUBULARES METÁLICAS COMO TROCADORES DE CALOR	212
6.1. CARREGAMENTO TÉRMICO	212

6.2. CARREGAMENTO TERMOMECÂNICO	223
6.2.1 CARREGAMENTO MECÂNICO	224
6.2.2 CARREGAMENTO MECÂNICO + TERMICO (SIMULTANEO).....	226
7. CONCLUSÕES.....	231
8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	234
APENDICE A.....	250
APÊNDICE B.....	252

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da energia utilizada globalmente para geração de eletricidade e para o conforto térmico dos ambientes é geralmente derivada de combustíveis fósseis. Estes recursos são finitos e a sua combustão é prejudicial ao meio ambiente devido à emissão de gases que contribuem com o efeito estufa. A demanda por energia elétrica tende a aumentar e a escassez dos recursos fósseis já é prevista. Esta preocupação tem motivado o aumento da busca pela utilização de fontes alternativas de energia, para reduzir desta forma a dependência e a demanda da sociedade por combustíveis fósseis.

Diante deste cenário, a Organização das Nações Unidas (ONU), em um dos seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), criou o objetivo de número 7 *Energia Limpa e Sustentável*, sendo uma das metas aumentar substancialmente o uso de energias renováveis como matriz energética global até 2030. O uso da energia geotérmica superficial se torna uma das alternativas energéticas para a climatização de edifícios, o que mostra a relevância e a necessidades de estudos para a sua correta utilização.

A crosta terrestre armazena uma quantidade abundante de energia conhecida como energia geotérmica superficial, que se encontra amplamente disponível. Recentemente, esta fonte de energia tem despertado o interesse da comunidade mundial que busca a cada dia aprimorar o conhecimento e testar novas alternativas de utilização deste recurso. Alguns países como Áustria, Suíça, Suécia, Islândia, França, Estados Unidos, Austrália, têm se tornado experientes na utilização da geotermia superficial para aquecer ou resfriar o interior das edificações, porém pouco se conhece sobre a sua aplicação em condições de solo e clima tropicais.

A temperatura média do solo a partir de certa profundidade é geralmente constante, sendo inferior à temperatura ambiente no verão, e superior no inverno. Desta forma, a utilização de energia geotérmica superficial para climatização de edifícios tem sido um procedimento bem-sucedido em diversos países. O uso de sistemas geotérmicos de climatização acoplados às fundações de obras civis, conhecidas como “estacas trocadoras de calor” é uma alternativa inovadora que reduz significativamente os custos operacionais de um edifício. Este sistema pode ser instalado em qualquer tipo de construção apoiado em fundações por estacas que, por serem instaladas em

profundidade, permitem uma grande área de contato para a ocorrência da troca térmica dos ambientes do edifício com o solo.

Por outro lado, pouco se conhece sobre a aplicação deste recurso em regiões tropicais, onde a temperatura do solo e do ambiente são maiores, e a variação da temperatura atmosférica ao longo do ano é menor, comparada aos países de clima temperado, onde estes sistemas de climatização de ambiente são normalmente utilizados. As primeiras pesquisas experimentais no Brasil foram desenvolvidas com o objetivo de obter informações sobre a variação da temperatura do solo, dados de condutividade térmica de solos tropicais ricos em óxido de ferro e alumínio, e comportamento termomecânico de estacas de concreto utilizadas como trocadoras de troca de calor em solo não saturado (BANDEIRA NETO 2015, MORAIS 2019).

Além destas pesquisas, foram também realizados ensaios experimentais por Saboya et al. (2022), Santos (2020), Ferreira, (2017). Durante a execução das fundações trocadoras de calor, são instalados tubos de polietileno na armação da estaca, que permitem a transferência de calor do ambiente para o solo e vice-versa, por meio de um fluido (geralmente água) que circula em um circuito fechado.

Com o intuito de avaliar esta solução de fonte de energia renovável para climatização de ambientes, a presente pesquisa tem como objetivo global investigar experimentalmente a eficiência na troca de calor com o solo de fundações por estacas tubulares metálicas, para climatização do edifício Centro de Inovação em Construção Sustentável CICS, projeto da POLI/USP. O CICS tem por objetivo testar, em condições reais de uso, sistemas inovadores que promovam a sustentabilidade. Deste modo, esta é uma oportunidade única de testar e demonstrar a nova tecnologia acoplada às fundações em nosso país.

Este será o primeiro caso da aplicação de sistemas de climatização por meio das fundações de um edifício no Brasil. Em 2005, o condicionamento de ar já representava 20% do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro e 47% no setor comercial (Eletrobrás, 2009).

Neste cenário, o uso de sistemas geotérmicos instalados nas fundações pode ser uma solução interessante para a economia de energia elétrica consumida com climatização.

Além de ser pioneiro no Brasil, este estudo é inovador e desafiador devido aos seguintes aspectos:

- i) Em outros países onde estes sistemas são utilizados, o calor do ambiente é rejeitado no solo no verão e extraído no inverno, permitindo que a temperatura natural do solo não se altere ao longo do tempo. No entanto, nos casos de clima tropical e subtropical do Brasil, a rejeição de calor do ambiente no solo seria predominante, podendo ao longo do tempo alterar-a sua temperatura média e reduzir a eficiência do sistema;
- ii) A temperatura média do subsolo brasileiro é mais elevada comparada aos casos de clima temperado, onde estes sistemas são normalmente utilizados e já foram avaliados;
- iii) Experiência internacional no acoplamento de tubos de geotermia em fundações por estacas de aço é rara, e resume-se apenas à um caso no Japão de estacas metálicas de seção tubular, preenchidas com concreto ou graute. Portanto, o desenvolvimento de sistema de tubos de geotermia acoplados em estacas metálicas preenchidas com diferentes materiais será um estudo pioneiro neste tema.

1.1. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como principais objetivos:

Desenvolver e testar sistema de geotermia acoplado em fundações por estacas tubulares metálicas;

- i) Avaliar o comportamento térmico das estacas metálicas preenchidas com diferentes materiais (areia, concreto magro, concreto magro com fibras e água) por meio de modelos físicos desenvolvidos em laboratório;
- ii) Comparar a eficiência do uso de estacas tubulares preenchidas com diferentes materiais de preenchimento das estacas por meio de ensaios de resposta térmica em campo (*Thermal Response Tests*);
- iii) Desenvolver modelos numéricos para análise dos ensaios de resposta térmica e validar com os dados experimentais;
- iv) Avaliar o efeito dos ciclos de cargas térmicas no comportamento mecânico das fundações por estacas tubulares trocadoras de calor (mobilização de resistência por atrito lateral e de ponta sob carga de serviço).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENERGIA GEOTÉRMICA SUPERFICIAL DO SOLO

A energia geotérmica, é basicamente a energia armazenada na forma de calor na superfície sólida da Terra (ANTICS et al., 2007). Este calor é proveniente das elevadas temperaturas do núcleo terrestre, que tendem a resfriar ao atingir a crosta, equilibrando com a temperatura da superfície.

Segundo Omer (2006), o calor da terra é gerado pelo lento decaimento de elementos radioativos e pela imensa pressão gravitacional atuando nas rochas e minerais no interior da Terra. A crosta continental é rica em elementos radioativos como K, Rb, Th e U, sendo que 60% do calor no seu interior é gerado pelo decaimento radioativo destes quatro elementos (GLASSLEY, 2014).

Os diferentes tipos de uso da geotermia estão inteiramente associados à temperatura disponível em cada local. Segundo ASHRAE (2011) – *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, existem basicamente três tipos de utilização da energia geotérmica:

- i. Geração de energia elétrica quando as temperaturas são altas ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- ii. Aplicações com uso direto, quando as temperaturas são intermediárias ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- iii. Aplicação em climatização de ambiente por meio de bomba geotérmica de calor, quando as temperaturas são baixas ($<32\text{ }^{\circ}\text{C}$).

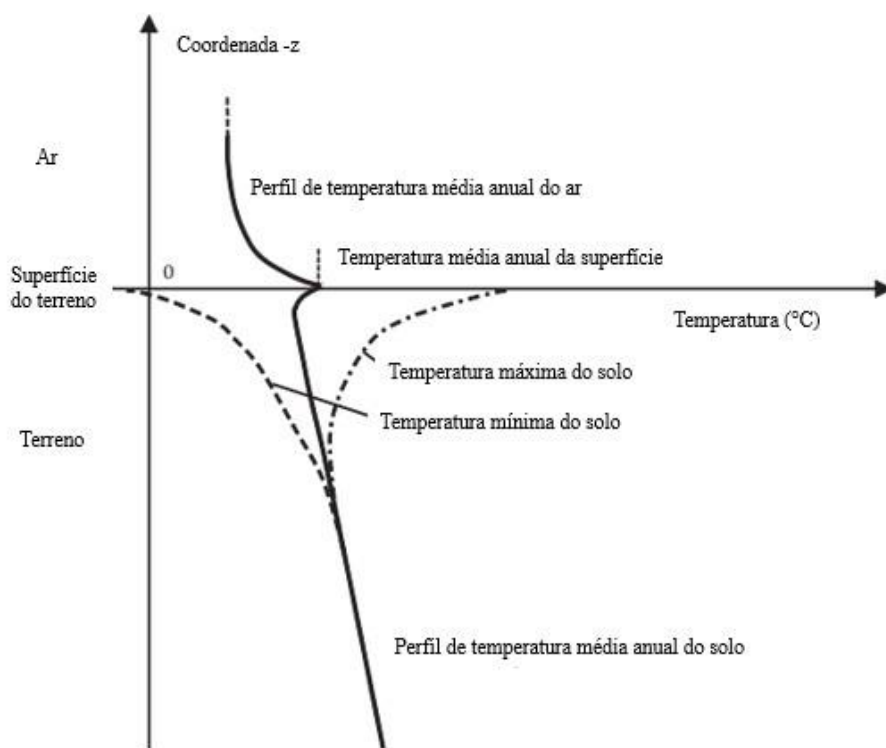
Existe uma forte relação entre o limite das placas tectônicas e a localização de usina geotérmica de alta entalpia para geração de energia elétrica, sendo este tipo de utilização restrito aos 24 países aonde há atividade vulcânica (GLASSLEY, 2014).

Neste trabalho será abordado o uso de energia geotérmica superficial de baixa entalpia ($T < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) para o condicionamento térmico de edificações. Neste contexto a energia geotérmica superficial se torna uma fonte de energia limpa e renovável, amplamente disponível, e suas propriedades variam de acordo com a localização, profundidade, constituição do solo, teor de umidade, e profundidade do lençol freático (GUPTA et al., 2006). A temperatura do solo sofre a influência das variações sazonais até profundidades entre 10 e 15 m. Abaixo desta profundidade, a temperatura do solo é constante até profundidades da ordem de 50 m ao longo do ano, variando entre 10 e 15 $^{\circ}\text{C}$ na Europa, e entre 20 a 25 $^{\circ}\text{C}$ em regiões tropicais, correspondendo aproximadamente

à temperatura média anual do local (SYNTEC, 2017, BRANDL., 2006). Com o aumento desta profundidade, a temperatura do solo aumenta devido fluxo de calor geotérmico, que varia geralmente entre $0,05 - 0,11 \text{ W/m}^2$ de acordo com as condições geológicas do terreno. A Figura 2.1 apresenta o perfil esquemático da variação da temperatura acima e abaixo da superfície do terreno.

Assim como nas caves, a temperatura do solo é superior à temperatura da superfície no inverno e inferior no verão. A aplicação da energia geotérmica para climatização associada às bombas de calor geotérmicas tem aumentado consideravelmente em vários países nestes últimos anos sendo a motivação principal a substituição da energia gerada por combustíveis fósseis e consequentemente a redução da emissão de CO_2 .

Figura 2.1- Perfil esquemático da variação da temperatura acima e abaixo da superfície do terreno



Fonte: Adaptado de Stauffer et al. (2014)

2.2. SISTEMAS GEOTÉRMICOS PARA CLIMATIZAÇÃO

O sistema de troca de calor com o solo consiste na absorção de calor do solo no inverno ou injeção de calor no solo no verão. Isso ocorre pela circulação de um fluido transportador de calor, geralmente a água, que circula dentro do solo em tubos de pequeno diâmetro instalados no interior de estruturas trocadoras de calor

(KNELLWOLF et al., 2011). A grande vantagem deste sistema com relação aos sistemas de ar condicionado tradicionalmente utilizados é que a troca térmica é feita com o solo que possui temperatura relativamente constante ao longo de todo o ano, sendo esta temperatura superior à temperatura ambiente no inverno e inferior à temperatura ambiente no verão. As vantagens termodinâmicas do acoplamento do sistema ao solo e as eficiências operacionais favoráveis resultam no elevado crescimento do interesse pela tecnologia nos últimos anos.

Os primeiros casos do uso de geotermia para climatização datam de 1970 na Áustria e na Suíça (BRANDL, 2006). Inicialmente, utilizavam-se poços profundos (entre 100 e 200 metros) conhecidos como *boreholes* como elementos trocadores de calor. Posteriormente, os sistemas de geotermia passaram a ser incorporados em elementos estruturais, como é o caso das estacas de fundação, conhecidas como estacas de energia, nos anos de 1980 (LOVERIDGE E POWRIE, 2012). Neste caso, há uma otimização da implantação do sistema pois o elemento trocador de calor tem dupla função: transferir as cargas do edifício para o solo e permitir a troca de calor entre o fluido circulante e o solo (VIEIRA ET AL., 2017). Vários conceitos adquiridos com os poços profundos (*boreholes*) são estendidos às estacas trocadoras de calor para compreender alguns parâmetros essenciais que controlam seu comportamento.

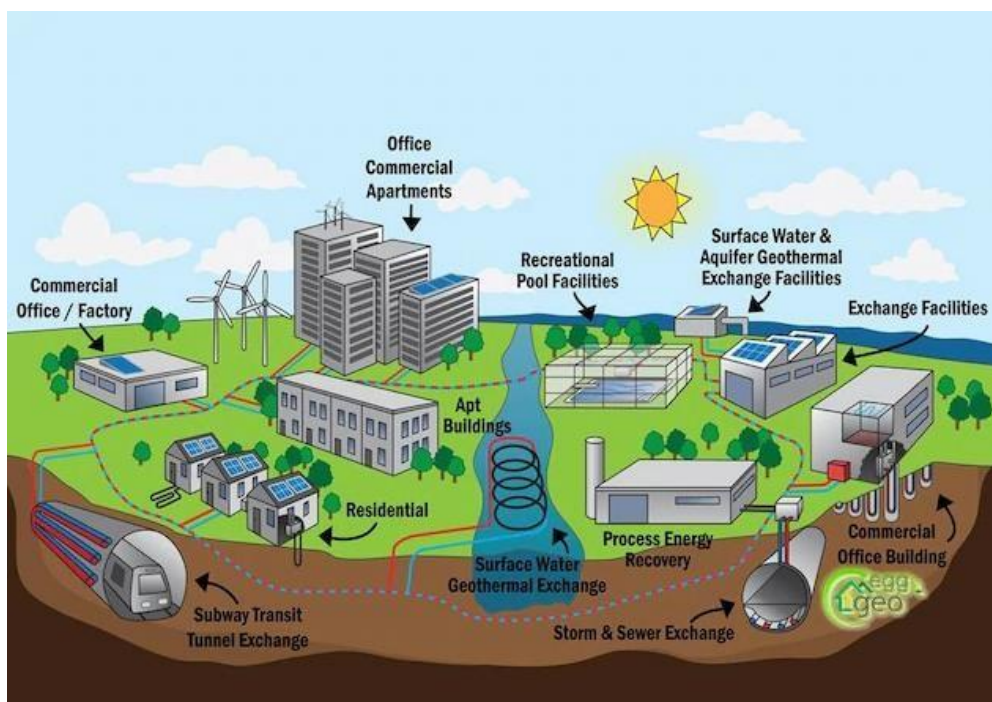
Os sistemas de geotermia também podem ser instalados em outras estruturas como por exemplo muros e paredes de contenção, parede diafragma, ou túneis (Figura 2. 2). O túnel do metrô U2 em Viena (Áustria) é um dos únicos casos internacionalmente conhecido de geotermia instalada em túneis. Na França, recentemente tem sido instalada geotermia nas paredes de contenção das estações de metrô (SYNTEC, 2017; DELERABLÉE et al., 2018). Análise realizada pela Agência Internacional de Energia em 2006, mostra que em mais de 72 países utiliza-se energia geotérmica para climatização de ambientes (GLASSLEY, 2014).

Segundo Loveridge e Powrie (2012), a filosofia de operação dos sistemas de geotermia para climatização são:

- Para uso doméstico, geralmente destinado a uma única demanda (aquecimento ou resfriamento) em conjunto com bomba de calor. Neste caso, o a transferência de calor é unidirecional, e o sistema deve ser projetado de modo a prevenir o desenvolvimento de temperaturas excessivas no entorno das estacas, comprometendo a sua eficiência;

- Para grandes estruturas, com demanda por aquecimento e resfriamento, deve-se balancear os dois modos de utilização de forma que haja o equilíbrio da temperatura do solo. Desta forma, haverá uma maior eficiência do sistema, que deverá ser projetado em conjunto com bomba de calor reversível;
- Em algumas circunstâncias é possível adotar o chamado “sistema livre” em que o fluido circula diretamente entre o solo e a edifício, sem necessidade da bomba de calor sendo altamente eficiente. Porém, nestes casos, a temperatura do solo deverá ser suficiente para atender a demanda de energia.

Figura 2. 2 - Exemplo de diferentes aplicações de estruturas trocadora de calor



Fonte: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/10-myths-about-geothermal-heating-andcooling>

2.2.1. Tipos de sistema

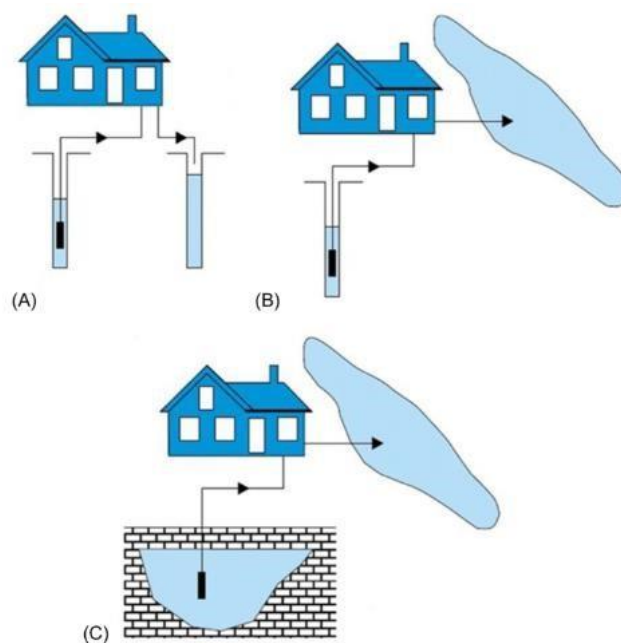
Os sistemas de troca de calor com o solo geralmente são associados à bomba de calor podendo ser configurados basicamente de duas maneiras: em circuito aberto ou fechado.

i. Circuito aberto

No circuito aberto ocorre interação direta com o solo. Neste caso são perfurados poços até atingir o lençol freático, aonde são instalados tubos que captam a água subterrânea, ou água superficial de lagos e lagoas para a troca térmica. Essa água é encaminhada à bomba de calor e, em seguida, é descarregada em outro poço ou diretamente em lagoas, como apresentado na Figura 2.3 (LUND et al., 2004). O tipo mais comum entre os dois apresentados são os poços profundos de extração.

Os poços devem estar espaçados a uma distância suficiente para garantir que não ocorra interferência entre eles. Segundo Hemmingway et al. (2014), a relação entre a área afetada em torno do poço e a mudança de temperatura de aquecimento é perfeitamente linear. Além disso, quando há fluxo de água subterrânea considerável no local de instalação dos poços, deverá ser analisada a direção do fluxo de forma a instalar os poços em direção favorável para que não ocorra o aquecimento do poço de sucção de água.

Figura 2.3- Tipos de sistema aberto para troca de calor



Fonte: Singh et al (2019)

ii. Circuito fechado

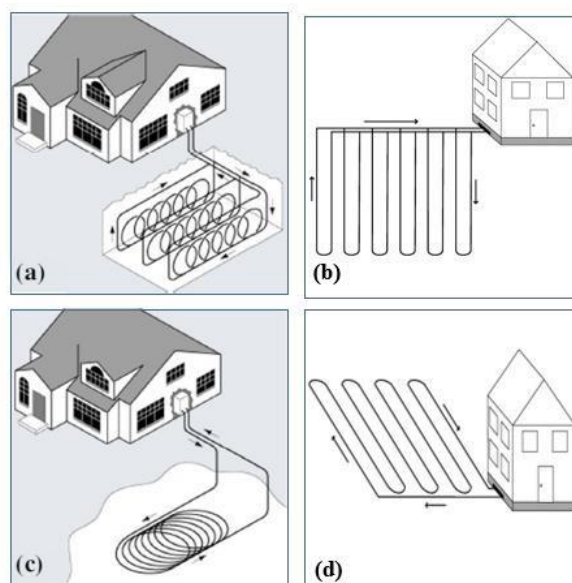
No circuito fechado o fluido de transferência de calor (geralmente água) não tem contato direto com o solo. No interior do solo são instalados tubos plásticos de polietileno e a transferência de calor ocorre através do fluido que circula dentro de tubos

e o solo. Existem basicamente quatro tipos de configuração do sistema em circuito fechado: horizontal, vertical, espiral e sistema disposto no interior de lagoas, como ilustrado na Figura 2.4.

Os circuitos fechados horizontais são instalados a uma profundidade de 1 a 2 m. A principal recarga térmica neste sistema é dada pela radiação solar na superfície do solo (OMER, 2006) e o sistema está sujeito a grande variação sazonal (Figura 2.4-d). As vantagens dos circuitos horizontais são custos relativamente menores de instalação, porém necessitam de uma grande área para a sua implantação.

Os sistemas com *loop* em espiral (Figura 2.4-a) funcionam da mesma forma que os sistemas horizontais, uma vez que são instalados em baixas profundidades. A vantagem destes sistemas é necessitar de uma área de instalação e trincheiras menores, pois otimizam a troca de calor com o solo. A troca de calor também pode ser feita com a água sendo os tubos em PEAD inseridos em lagoas, conforme ilustrado na Figura 2.4-c. Recomenda-se que os lagoas tenham pelo menos 3 metros de profundidade para garantir que as variações da temperatura natural na sua base sejam baixas (BANKS, 2008).

Figura 2.4 - Principais tipos de sistemas em circuito fechado para troca de calor: a) sistema em espiral, b) vertical, c) em lagoa e d) horizontal



Fonte: Adaptado Self et al. (2013)

O circuito fechado vertical (Figura 2.4-b) são executados em poços profundos aonde são instalados tubos de polietileno geralmente em forma de U, por onde circula o

fluido responsável pela troca térmica. A profundidade dos furos varia de 45 a 100 m para casos residenciais, e 150 m para instalações industriais (SELF et al., 2013 e LUND et al., 2004). A grande vantagem desta configuração é reduzir a área necessária para instalação, porém os custos de escavação são elevados.

Os diâmetros dos poços verticais geralmente são pequenos, com valores da ordem de 102 mm para casos de climatizações residenciais, com espaçamentos variando de 5 a 6 m para que não haja interferência térmica de um no outro (Self et al., 2013). O espaço anular no interior do poço deve ser preenchido com material que garanta o contato entre o tubo e o solo, sendo tradicionalmente utilizado o concreto. Existem alguns trabalhos, como por exemplo o de Erol et al. (2014) e Desmedt et al. (2012), que avaliaram o efeito de diferentes materiais de preenchimento do poço na transferência de calor.

Devido aos elevados custos de perfuração do solo para os circuitos verticais e a necessidade de grandes áreas para implantação dos circuitos horizontais, recentemente o acoplamento dos circuitos fechados tem sido utilizado em elementos estruturais necessários à construção, como o caso das fundações (SURYATRIYASTUTI et al., 2012).

2.2.2. Bomba de Calor Geotérmica (GSHP)

Para o condicionamento térmico de ambientes com energia geotérmica, geralmente utiliza-se o sistema GSHP – *Ground Source Heat Pump*, que são bombas de calor que coletam e transferem o calor retirado do solo às edificações. O mesmo sistema pode servir tanto para o aquecimento quanto para o arrefecimento dos ambientes.

O sistema de bomba de calor geotérmica (GSHP) inclui três subsistemas principais: a conexão com o solo (circuito primário), a bomba de calor, e a distribuição do calor na edificação (circuito secundário). O circuito primário é constituído por tubos de polietileno enterrados no solo na direção vertical por meio de furos profundos (conhecidos como *boreholes*), ou na direção horizontal em trincheiras. Recentemente tem-se utilizado as próprias estacas de fundação das edificações como elementos trocadores de calor, aonde são inseridos os mesmos tubos de polietileno no seu interior. O fluído circula por estes tubos para trocar calor do edifício com o solo. Geralmente o fluído utilizado é a água ou água com glicol (anticongelante) nos casos de países aonde há temperatura abaixo de 0 grau.

Segundo Glassley (2014), a bomba de calor em sua essência corresponde à manifestação de ciclos de Carnot e o seu funcionamento baseia-se nos princípios básicos da termodinâmica. Omer (2006) subdivide a bomba de calor em três partes principais (Figura 2. 5):

- Evaporador: que tem a função de retirar o calor do fluído circulante;
- Compressor: que cria a diferença de pressão, de modo a atingir a temperatura necessária, que faz com que este ciclo repita indefinidamente;
- Condensador: que transfere o calor para um tanque de água quente que alimenta o sistema secundário de distribuição).

A medida de eficiência e produção de energia do sistema é determinada pelo coeficiente de desempenho COP (*coeficiente of performance*) da bomba de calor. Este parâmetro é definido pela razão entre a energia de saída da bomba de calor (kW) e a energia de entrada no sistema para operação (kW) que corresponde à energia elétrica para o compressor (BRANDL, 2006). O valor do COP varia geralmente entre 3 e 6, sendo que quanto maior o número, maior é a eficiência da bomba de calor, pois menor será a energia elétrica necessária para alcançar a temperatura desejada. Para que o sistema seja econômico, recomenda-se um valor de $COP \geq 4$.

O sistema GSHP pode operar de modo simples, utilizado somente para aquecer ou resfriar o ambiente, ou pode ser operado de modo sazonal, resfriando o ambiente no verão e aquecendo no inverno. No modo simples, o fluído circula em uma única direção, e características como elevada porosidade dos solos e elevado gradiente hidráulico do lençol freático contribuem de forma positiva com o sistema (BRANDL, 2006). Para operar de forma sazonal, utiliza-se a inércia termodinâmica do solo para armazenar a energia térmica para operar quando houver inversão do fluxo de energia. Desta forma, este modo de operação proporciona automaticamente o equilíbrio térmico do sistema (SURYATRIYASTUTI, et al., 2012).

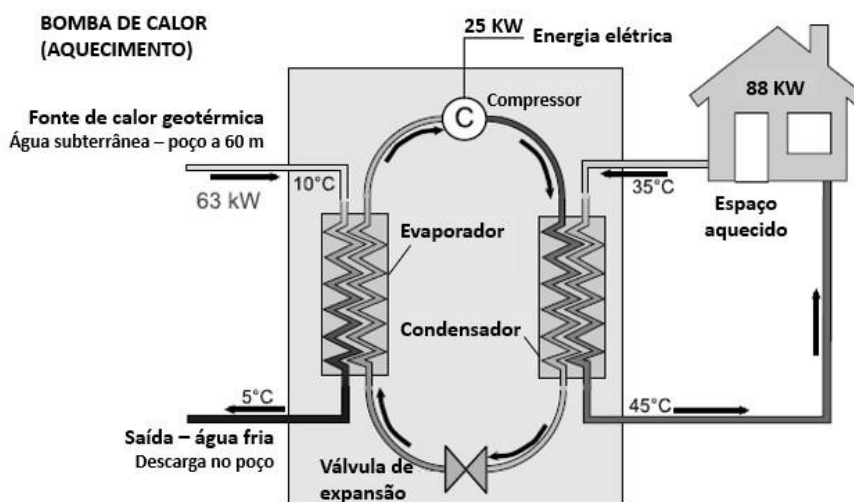
Para o modo de resfriamento, em que a energia térmica é retirada do ambiente e injetada no solo, o sistema opera na direção oposta à apresentada na Figura 2. 5, sendo o condensador conectado ao solo para retirar calor e o evaporador conectado ao ambiente que será resfriado.

A eficiência da troca térmica depende de uma série de fatores incluindo: o tipo de estrutura usada para a troca térmica com o solo (SYNTEC, 2017), propriedades térmicas do material (ABU-HANDEH et al., 2000; DESMEDT et al., 2012)

comportamento térmico do solo no entorno (HILLEL, 2003; CÔTÉ et al., 2005) e da demanda térmica (LOW, 2015).

O desempenho do sistema também pode ser avaliado pelo fator de desempenho sazonal (SPF – *Sazonal performance factor*) que é análogo ao COP. A grande diferença é que nesta outra abordagem considera-se não só a energia da bomba de calor, mas também outras entradas de energia como por exemplo a energia utilizada pela bomba para circulação do fluido trocador de calor. Este fator é geralmente calculado ao longo de um período de utilização do sistema, considerando uma ou mais estações. Portanto, oferece uma melhor indicação da real operação sendo útil para estimar os custos de funcionamento, economia na redução de emissão de CO₂, e na comparação com do sistema com outras tecnologias (LOVERIDGE, 2012, REES, 2016).

Figura 2. 5 - Diagrama de funcionamento de uma bomba de calor para aquecimento de ambiente



Fonte: Adaptado Banks (2012)

2.2.3. Demanda de energia

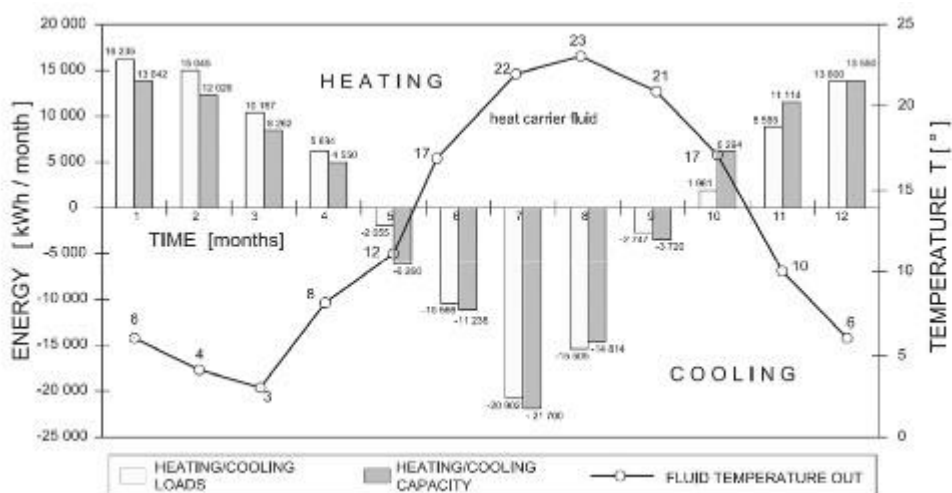
Os sistemas de troca de calor com o solo com bomba de calor são dimensionados para atender à demanda do edifício. Neste caso a demanda está associada não somente à temperatura externa, mas também às características do prédio, ao espaço ocupado e ao tipo de uso do edifício. Além disso, para o projeto do sistema, é necessário determinar o perfil de carga térmica ao longo de um ano típico de operação. Para determinar a curva de demanda geralmente são utilizados softwares. Existe uma série de ferramentas

disponíveis como exemplo Energy Plus, e QUEST, ENER-WIN, Green Building Studio (GBS), e TRNSYS (STAVRAKAKIS, et al., 2021).

Rosen et al. (2001) demonstraram que na Suécia se uma bomba de calor para uso doméstico for dimensionada para atender 60% da energia térmica de pico, ela é capaz de atender 90% da energia térmica necessária ao longo de um ano. Neste caso, sistemas complementares podem ser utilizados para suprir a demanda dos 10% faltantes.

Na Figura 2.6 apresenta-se um exemplo das distribuições anuais da demanda de energia por aquecimento e resfriamento (sistema compensado), a energia térmica disponível e a curva com a temperatura do fluido circulante de um edifício sob estacas trocadoras de calor. Quando o sistema é utilizado para resfriamento o calor é retirado do edifício e injetado no solo, portanto ocorre o aquecimento do fluido transportador de calor. No caso do aquecimento, o calor é retirado do solo e transportado para a bomba de calor ocorrendo o resfriamento do fluido circulante.

Figura 2.6- Exemplo da distribuição anual da demanda e disposição de energia para aquecimento/resfriamento de um edifício sob estacas trocadoras de calor com o solo



Fonte: Brandl (2013)

2.2.4. Condicionamento térmico no Brasil

De acordo com a EPE (2018), estima-se que o aumento de energia elétrica com ar condicionado no setor residencial no Brasil tenha atingido 237% nos últimos 12 anos, chegando a 18,7TWh em 2017. Na Figura 2.7 apresenta-se o crescimento da energia elétrica total consumida pelo setor residencial e o aumento do consumo de energia por condicionadores de ar neste setor entre 2005 e 2017. No Brasil, o número de ar

condicionado por habitante ainda é considerado baixo ($\sim 0,4$) quando comparado com outros países. Porém, estima-se que até 2035 a posse mais do que dobrará, atingindo 0,96 unidades/habitante até 2035 (

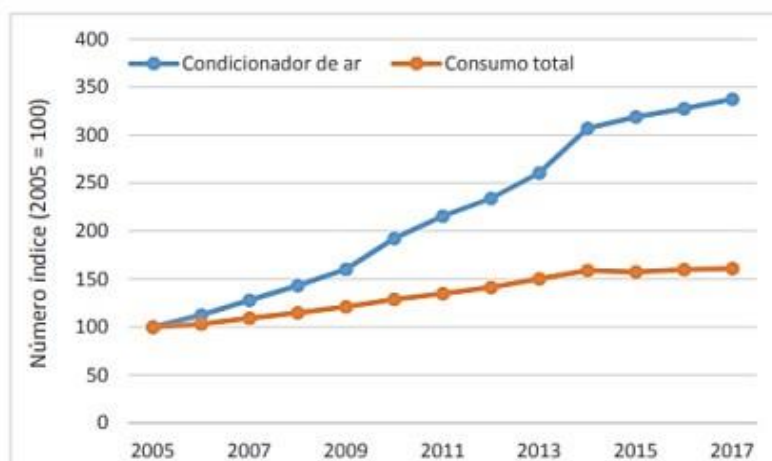
Figura 2. 8).

No setor industrial, o consumo de energia elétrica com condicionadores térmicos representa 30 a 40% da energia total consumida (OLIVEIRA et al., 2021). O setor residencial somado com o setor comercial representam 43% do consumo de energia elétrica no país.

A matriz elétrica brasileira é constituída por usinas hidrelétricas (65,2%), seguido por gás natural e outros derivados do petróleo (13,5%), biomassa (8,2%), eólica (6,8%), carvão (4,1%), nuclear (2,5%) e solar (0,13%), de acordo com BEN (2018). Deste modo 80,4% da eletricidade é fornecida por fontes renováveis, sendo este número bem acima da média mundial ($\sim 22,8\%$).

Neste contexto, torna-se necessário buscar soluções mais eficientes e que consomem menos energia elétrica para o condicionamento térmico nos setores residenciais e industriais sendo o uso da geotermia uma alternativa. O Plano Nacional de Energia 2050 elaborado pela empresa de Pesquisa Energética (EPE) a partir de diretrizes do Ministério de Minas e Energia do país prevê a geotermia superficial como uma tecnologia destrutiva e com poucos elementos ainda para prever a sua inserção como matriz energética.

Figura 2.7 - Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial



Fonte: EPE (2018)

Figura 2. 8- Previsão de venda de ar-condicionado no setor residencial para 100 domicílios



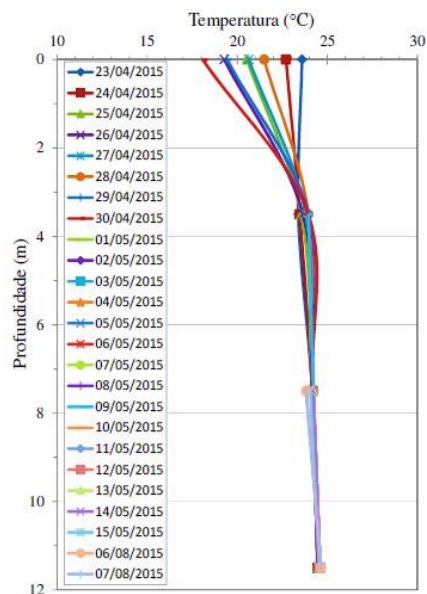
Fonte: EPE (2018)

No Brasil, não há relatos da utilização de energia geotérmica no país, porém este tema tem sido recentemente estudado por uma série de pesquisadores como Vilela (2004); Alves et al., (2015); Bandeira Neto, (2015); Morais e Tsuha, (2016); Orozco, (2016) e Ferreira, (2017). No trabalho de Morais e Tsuha (2016) encontram-se os primeiros dados do perfil de distribuição térmica ao longo da profundidade em solo tropical, medida entre os meses de abril e agosto do ano de 2015, na cidade de São Carlos/SP. Os dados mostram que até a profundidade de 3,5 m houve a variação da temperatura do solo com a temperatura ambiente. Para profundidades superiores, as temperaturas se mantiveram constantes, com valores médios da ordem de 24 °C, conforme apresentado na Figura 2.9.

Bandeira Neto (2015) e Morais (2019) realizaram 5 ensaios TRT para determinarem a condutividade térmica do solo arenoso não saturado na cidade de São Carlos. Os autores encontraram condutividades da ordem de 2,8 a 3,2 W/mK. Na cidade de São Paulo também foi realizado um ensaio TRT por Morais (2019) em uma estaca do tipo raiz, com diâmetro de 35 cm e profundidade de 15 m. O nível d'água no terreno na época em que o ensaio foi executado era de -1,5 m, sendo o solo praticamente saturado. A condutividade térmica obtida pelo ensaio foi de 2,44 W/m°C.

Os estudos indicam que o potencial uso da geotermia no Brasil, porém estudos precisam ser realizados para compreender a sua aplicação e viabilidade de aplicação em condições de solo e clima tropicais.

Figura 2.9- Perfil de temperatura do subsolo do campo experimental de fundações da EESC/USP na cidade de São Carlos, Brasil



Autor: Moraes e Tsuha (2019)

2.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

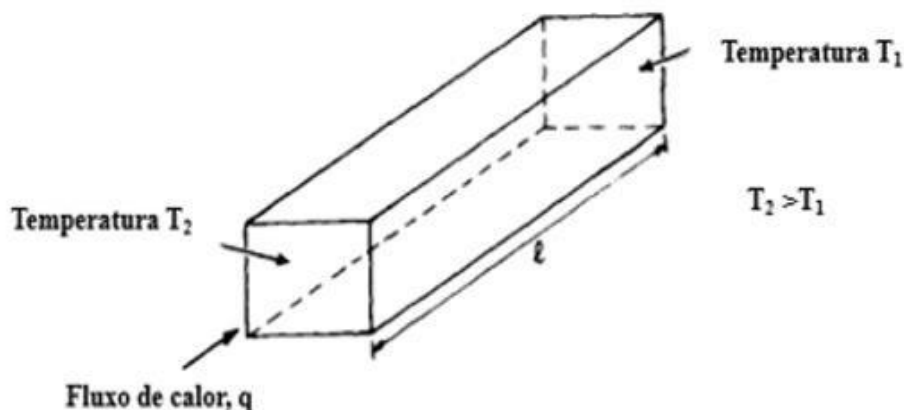
2.3.1. Condutividade térmica

Para projetos preliminares de sistemas geotérmicos, o parâmetro principal necessário é a condutividade térmica do solo (λ ou k). Este parâmetro é definido por Hillel (2003) como a quantidade de calor transferido, por uma unidade de área do corpo condutor, por unidade de tempo, sob um gradiente unitário de temperatura.

Rees et al. (2000) define condutividade térmica como uma constante de proporcionalidade que relaciona a taxa com que o calor é transmitido por condução a um material para um gradiente de temperatura. Considerando um elemento de solo prismático, ilustrado na Figura 2.10, com seção transversal A , fluxo de calor q , e comprimento l do elemento, a condutividade térmica pode ser definida pela Equação 2.1. O fluxo de calor ocorre espontaneamente quando existe uma variação de temperatura, sempre na direção do mais quente para o material mais frio, de modo a atingir o equilíbrio térmico.

$$\lambda = \frac{q}{A(T_2 - T_1)/l} \quad (2.1)$$

Figura 2.10 - Fluxo de calor em um elemento prismático



Fonte: Adaptado Farouki, 1981

A condutividade térmica é um parâmetro intrínseco ao solo e expressa basicamente a capacidade do material de armazenar e conduzir calor, no regime estacionário. No Sistema Internacional de Unidades, a condutividade térmica do solo é expressa em W/mK.

Propriedades como textura, composição mineralógica, densidade, teor de umidade, porosidade, quantidade de matéria orgânica e propriedades químicas da água nos poros, influenciam na condutividade térmica do solo (ABU-HAMDEH & REEDER, 2000; BRANDL, 2006; HILLEL, 2003). A sua variação também é sensível à forma, tamanho, e arranjo das partículas de solo (HILLEL, 2003).

A Tabela 2.1 apresenta os valores de condutividade térmica médios para os diferentes minerais constituintes do solo, além da água e do ar. Nota-se que a condutividade térmica da água é bem superior à do ar, como resultado, a presença de ambos interferem na condutividade térmica do material de forma não linear, como ilustrado na Figura 2.11. Quanto maior a presença de água no solo, maior será a condutividade térmica do material. Dentre os constituintes do solo apresentados na Tabela 2.1 destaca-se a condutividade térmica do mineral quartzo que é três vezes superior à condutividade térmica dos argilominerais.

Geralmente, solos com maior densidade apresentam menores valores de porosidade e maior contato entre as partículas, resultando em maiores valores de condutividade térmica. A condutividade térmica dos minerais é maior do que a condutividade da água e do ar. Como a água possui maior valor de condutividade térmica do que o ar, geomateriais com poros preenchidos por água terão maiores

condutividades térmicas do que os preenchidos com ar (LALOUIE LORIA, 2020). Nos casos de solos não saturados, como o teor de umidade varia constantemente acompanhando as variações sazonais, conseqüentemente, a condutividade térmica do solo também se torna um parâmetro variável.

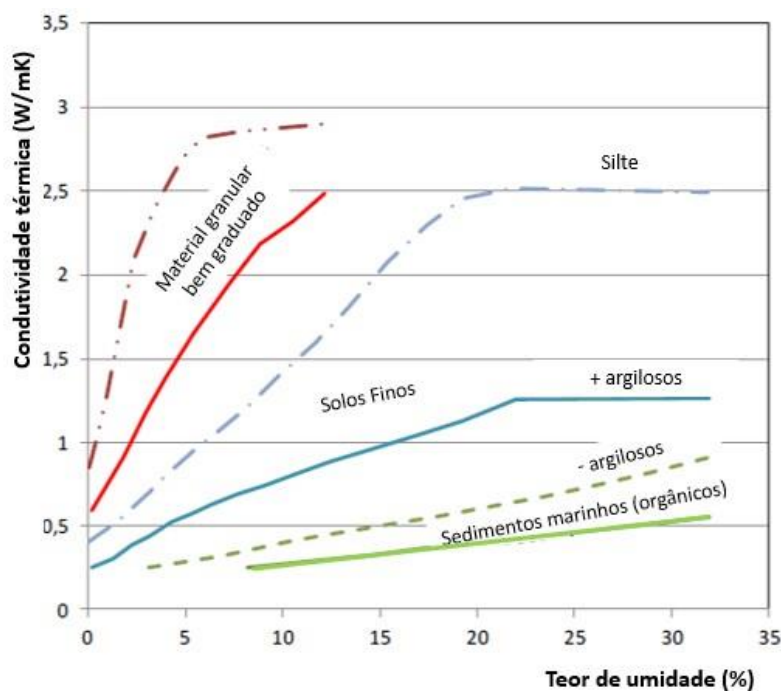
Tabela 2.1- Condutividade térmica e capacidade de calor de alguns constituintes do solo

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade térmica específica (J/Kg K)	Densidade (Kg/m ³)
Quartzo	8,79	2010	2660
Argilominerais	2,93	2010	2650
Matéria Orgânica	0,25	2412	1300
Água	0,57	4186	1000
Gelo	2,18	1884	920
Ar	0,025	1,256	1,25

Fonte: Adaptado Rees et al. (2000) e Choi et al. (2011)

As características térmicas do solo e a sua condutividade térmica podem ser estimadas por dados disponíveis na literatura, equações empíricas, ensaios em laboratório, e teste de resposta térmica em campo, sendo mais recomendado o ensaio em campo, conhecido como TRT, que permite a verificação *in situ* da condutividade térmica do solo.

Figura 2.11- Relação entre a condutividade térmica e o teor de umidade para diferentes tipos de solo



Fonte: Adaptado de Syntec (2017)

2.3.2. Capacidade térmica

A capacidade térmica do solo (C) é a propriedade do material que define a quantidade de energia ou calor fornecido, para uma variação unitária de temperatura, representando o potencial de calor que o material expressa pelo Sistema Internacional de unidades em J/K. Geralmente, a capacidade térmica do solo é definida através do somatório do calor específico relativo ao volume de cada constituinte do solo, como apresentado na Equação 2.2 (REES et al., 2000 e BRANDL, 2006).

$$C = \chi_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 + \chi_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 + \chi_3 \cdot \rho_3 \cdot c_3 \quad (2.2)$$

Na equação apresentada χ corresponde a fração volumétrica de cada constituinte do solo (sólido, ar e água), ρ é a massa específica, e c é o calor específico de cada material. Segundo Rees et al. (2000), a fração volumétrica de cada constituinte apresentado na Equação (2.2) pode ser determinada em função da porosidade η (volume de vazios/volume total) e do grau de saturação S (volume de água/volume total) do solo. As Equações 2.3, 2.4 e 2.5 apresentam estas relações.

$$\chi_1 = 1 - \eta \quad (\text{Fração de sólidos}) \quad (2.3)$$

$$\chi_2 = \eta \cdot S_1 \quad (\text{Fração de água}) \quad (2.4)$$

$$\chi_3 = \eta(1 - S_1) \quad (\text{Fração de ar}) \quad (2.5)$$

Brandl (2006) define a capacidade térmica gravimétrica ou específica do solo (c_g), ou calor específico, como a quantidade de energia armazenada no material, por unidade de massa, para uma mudança unitária de temperatura. A unidade adotada para o calor específico é J/KgK e este parâmetro pode ser determinado pela Equação 2.6 em que q é a energia armazenada (J), m é a massa (Kg) e ΔT é a variação da temperatura do material (OROZCO, 2016).

$$c_g = \frac{q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.6)$$

Segundo o mesmo autor, a capacidade térmica específica do solo depende das fases que compõe o solo (sólido, líquido e gases que preenchem os poros), dos minerais

constituintes e da densidade do material. Além disso, uma das variáveis mais relevantes no valor da capacidade térmica específica é o teor de umidade do material (HILLEL, 2003).

Segundo Suryatriyastuti et al. (2012) solos saturados possuem uma capacidade térmica maior do que solos não saturados sendo a condutividade térmica dos solos secos cinco vezes inferior à dos solos saturados.

A capacidade térmica volumétrica (C_v) é derivada da capacidade térmica específica e da densidade aparente do material, representando a média aritmética ponderada dos componentes específicos do solo (Brandl, 2006). Ela representa o calor necessário para que 1 m³ do material sofra uma variação de temperatura de 1K. A unidade no Sistema Internacional para a capacidade térmica volumétrica é J/m³K. Segundo Suryatriyastitu et al. (2012), a capacidade térmica volumétrica indica a habilidade de uma substância de armazenar energia térmica. Segundo Loveridge (2012), a capacidade térmica volumétrica do solo geralmente é adota para realizar análises uma vez que não existe nenhuma base de dados confiável.

As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam os valores da capacidade térmica volumétrica específica e volumétrica para diferentes constituintes e tipos de solo. Nota-se que embora a densidade da água seja inferior a densidade dos minerais constituintes do solo, o seu calor específico é mais de duas vezes maior. Já o ar apresenta densidade da ordem de 1/1000 a da água, e sua contribuição para o calor específico do solo composto geralmente pode ser negligenciada (HILLEL, 2006). Portanto, a Equação 2.2 pode ser simplificada, desprezando a parcela referente ao ar do somatório.

Tabela 2.2- Propriedades térmicas médias do solo

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade calorífica vol. (KJ/m³K)
Pedregulho	2,0-3,3	2200 - 2700
Areia	1,5 -2,5	2500 - 3000
Silte	2,4 – 2,0	2500 - 3100
Argila	0,9 – 1,8	2200 - 3200
Argilito	2,6 – 3,1	2340 - 2350
Arenito	3,1 – 4,3	- 2200

Fonte: (Lhendup, 2014)

2.3.3. Difusividade térmica

A difusividade térmica de um material também é uma propriedade térmica relevante para o desenvolvimento de projetos de transferência de calor entre diferentes meios. Segundo (OROZCO, 2016), a propriedade descreve a capacidade do material de conduzir energia em relação à disposição para armazenar energia térmica, ou seja, descreve a relação entre a condutividade térmica e a capacidade térmica do solo, sendo sua unidade no SI m^2/s . Segundo Loveridge (2012), esta propriedade descreve a velocidade de resposta do material à variação de temperatura.

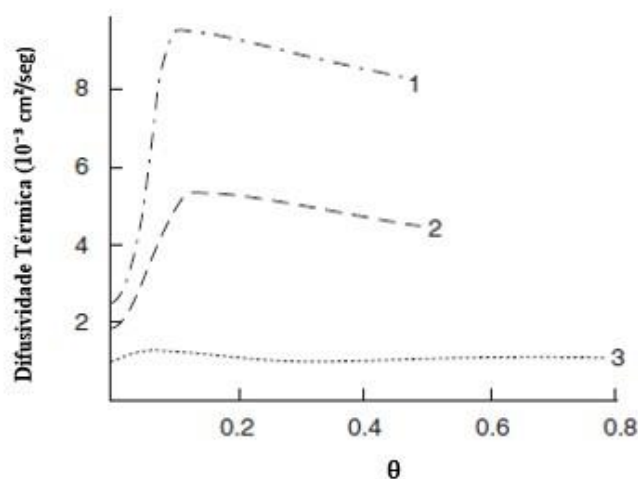
A difusividade térmica pode ser expressa pela Equação 2.7 em que λ é a condutividade térmica, ρ é a massa específica, c_g é a capacidade térmica específica e C_v a capacidade térmica volumétrica do solo.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_g} = \frac{\lambda}{C_v} \quad (2.7)$$

Um elevado valor de difusividade térmica implica na rapidez com que o material alterara a sua temperatura. Farouki (1981) apresenta um exemplo da variação da difusividade térmica de solos congelados e não congelados. Segundo o autor, o solo congelado apresenta uma difusividade térmica maior do que os solos não congelado pois, a sua condutividade térmica é maior e o seu calor específico é bem inferior ao do solo não congelado. Conseqüentemente, em solos congelados a variação da temperatura é mais acelerada do que nos solos não congelados, sendo a difusividade térmica do gelo da ordem de 8 vezes superior à da água.

A Figura 2.12 apresenta a interferência do teor de umidade na difusividade térmica para os diferentes tipos de solo: areia, argila e turfa. Nesta figura nota-se que os solos arenosos apresentam maior difusividade térmica do que os solos argilosos e turfas.

Figura 2.12- Difusividade térmica em função da umidade volumétrica: (1) areia, (2) argila, (3) turfa



Fonte: Hillel (2003)

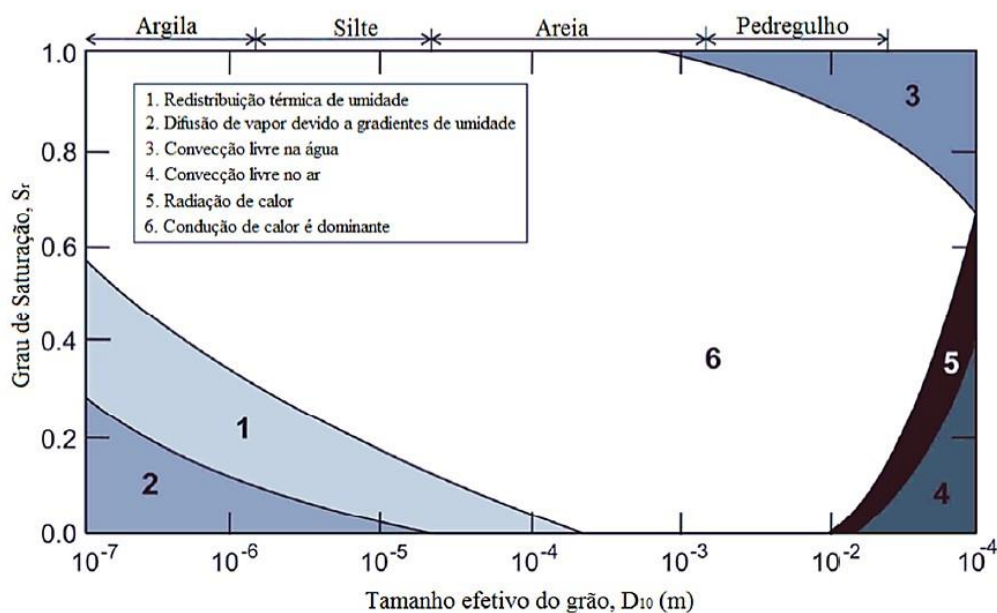
2.4. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO SOLO

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido à uma variação espacial da temperatura (BERGMAN et al., 2011). O solo é um material multifásico com um complexo mecanismo de transferência de calor que envolve a condução, convecção e radiação.

Segundo Farouki (1981), os mecanismos de transferência de calor no solo estão associados à sua composição mineralógica, à temperatura, e ao teor de umidade. O mecanismo de transferência de calor dominante nos solos é a condução térmica, como apresentado na Figura 2.13, que relaciona cada mecanismo com a granulometria dos solos, representada pelo diâmetro efetivo D_{10} , e com o grau de saturação S_r .

Segundo Bocquet et al. (2017), os principais parâmetros para determinar o potencial geotécnico de utilização do solo para a troca de calor são: a condutividade térmica do solo e a presença de fluxo de água subterrânea. Estas grandezas compreendem os mecanismos físicos que governam a transferência de calor em meios porosos: condução térmica (associada ao gradiente de temperatura), e advecção ou convecção (relacionada à presença de lençol freático e fluxo de água).

Figura 2. 13- Mecanismos de transferência de calor do solo em função do tamanho do grão e da saturação



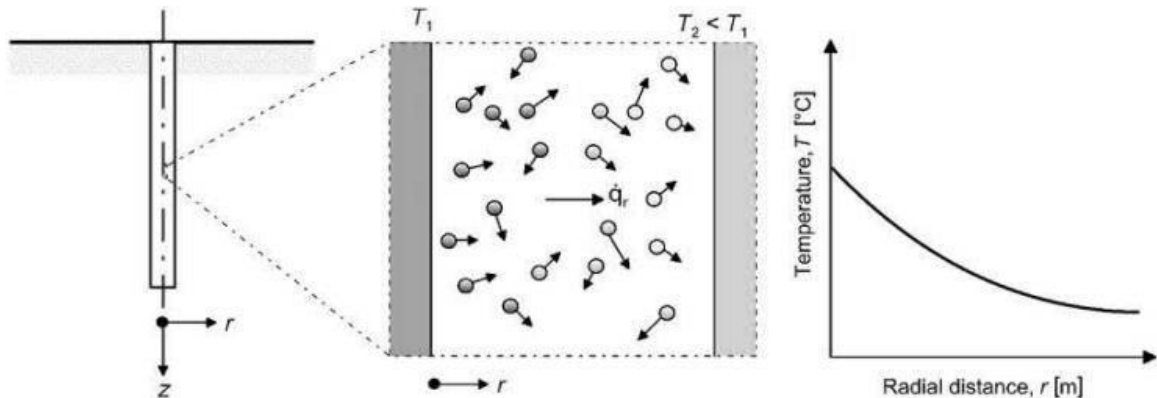
Fonte: Farouki, (1986) apud Loveridge, (2012)

2.4.1. Condução térmica

Segundo Suryatriyastuti et al. (2012), a transferência de calor no solo ocorre predominantemente por condução. Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo ser constituído por material sólido ou líquido, é utilizado o termo condução térmica para a transferência de calor (BERGMAN et al., 2011).

Quando existe um gradiente de temperatura entre dois corpos, a transferência de calor ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. A temperatura é a expressão da energia cinética molecular de um corpo, ou seja, elevadas temperaturas estão associadas ao elevado grau de agitação molecular, e o choque entre duas moléculas vizinhas resulta na transferência de energia entre moléculas, ilustrada na Figura 2.14.

Figura 2.14- Transferência por condução através de um meio sólido ou fluido estacionário



Fonte: Laloui e Loria (2020)

É possível quantificar o processo de transferência de calor por condução por meio da Lei de Fourier, apresentada na Equação 2.8, considerando que transporte ocorre no estado estacionário.

$$q_{cond} = \frac{Q}{A} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.8)$$

Na Equação q_{con} é o fluxo de calor, Q é a energia térmica ou calor transferido (J), A é a área a secção transversal ao fluxo de calor, λ é a condutividade térmica do material (W/m.K), e $\frac{\partial T}{\partial n}$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor.

Reconhecendo que o fluxo de calor é uma grandeza vetorial, a Lei de Fourier pode ser escrita em função da taxa de calor propagada nas diferentes direções, considerando o operador tridimensional (∇) e a temperatura como grandeza escalar (Equação 2.9). Nesta Equação, o fluxo de calor está na direção perpendicular à superfície isotérmica (BERGMAN et al.,2011). Apesar do sinal negativo na Equação 2.9, o fluxo de calor se torna positivo pois a sua direção é no sentido da maior para a menor temperatura.

$$q_{cond} = -k\nabla T = -k \cdot \left(i \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

Assim como na eletricidade, a resistência ao fluxo de calor também pode ser definida. Este conceito relaciona as propriedades térmicas e geométricas do material, pela Equação 2.10 apresentada.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{A\lambda} \quad (2.10)$$

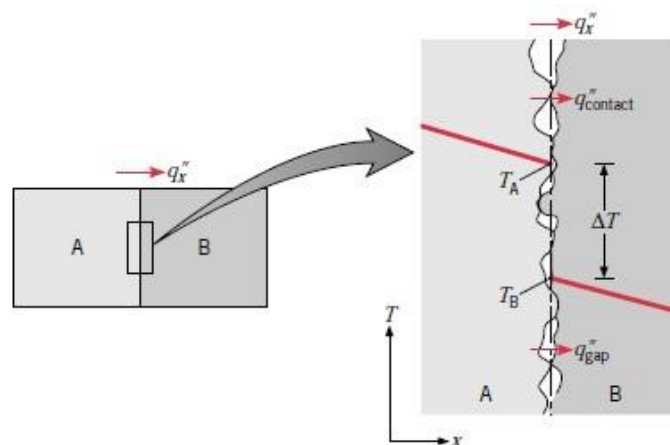
Na Equação L é o comprimento da peça analisada, A é a área da secção transversal ao fluxo de calor, e λ é a condutividade térmica do material. No estado estacionário de transferência de calor tanto as propriedades geométricas como a resistência térmica são consideradas constantes (LOVERIDGE, 2012).

Segundo Bergman et al. (2011), apesar de muitas vezes negligenciada, é importante considerar que em sistemas compostos existe a queda de temperatura na interface entre os materiais, conhecida como resistência de interface, ilustrada na Figura 2.15.

A existência de uma resistência de contato deve-se principalmente à rugosidade da superfície que resulta na redução dos pontos de contato entre os materiais, com espaços vazios geralmente preenchidos por ar. A transferência de calor ocorre pela condução térmica através da área de contato real e a convecção e/ou radiação através dos vazios (BERGMAN et al., 2011). A resistência de contato pode ser determinada pela Equação (2.11).

$$R_{A-B} = \frac{T_A - T_B}{q_x''} \quad (2.11)$$

Figura 2. 15- Queda de temperatura devido à resistência térmica de interface entre diferentes materiais



Fonte: Bergman et al., (2011)

Quando o fluxo de calor por condução é instável, e o gradiente de temperatura varia com o tempo, deve-se adotar a equação de difusão de calor (Equação 2.12) para determinar a transferência de calor.

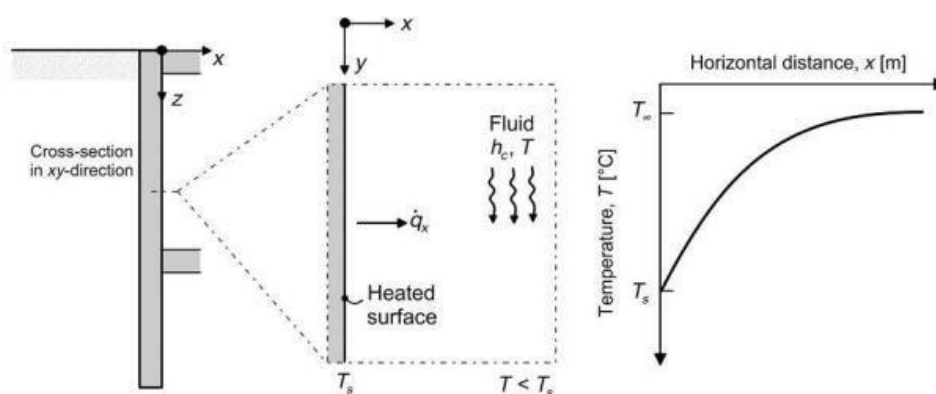
$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{\rho C_g}{\lambda} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (2.12)$$

Nesta Equação α é a difusividade térmica em m^2/s , ρ é a densidade do material e C_g é a capacidade térmica específica do material.

2.4.2. Convecção térmica

O termo convecção refere-se à transferência de calor que ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento devido à um diferencial de temperatura, conforme apresentado na Figura 2.16. Segundo Rees et al. (2000), a transferência de calor por convecção em solos é atribuída ao transporte de líquidos e gases no seu interior.

Figura 2.16- Transferência de calor por convecção de fluido em movimento



Fonte: Laloui e Loria (2020)

O efeito da convecção pode ser expresso pela lei de resfriamento de Newton apresentada na Equação 2.13. Nesta equação, o fluxo de calor por convecção q_{conv} (W/m^2) é proporcional à diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido, e o parâmetro h ($W/m^2.K$), que corresponde ao coeficiente de transferência de calor por convecção. Este parâmetro, de acordo com Bergman et al. (2011), depende das condições da camada limite, que são influenciadas pela geometria da superfície,

propriedades termodinâmicas do fluido, e natureza do movimento do fluido. Na Equação 2.13 T_s é a temperatura da superfície e T_∞ é a temperatura do fluido.

$$q_{conv} = \frac{Q}{A} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.13)$$

A convecção em solos pode ocorrer de forma livre ou forçada, sendo mais comum em solos com elevada permeabilidade e índice de vazios como areias e pedregulhos. Em solos finos como argilas raramente ocorre o efeito da convecção (LALOU E LORIA, 2020). De acordo com Martynov (1959), a convecção livre pode se tornar importante para temperaturas acima de 30°C ou em gradientes de alta temperatura ($dT/dx \geq 1^\circ/\text{cm}$). Acima destes valores de gradientes críticos de temperatura ocorre o aumento na condutividade térmica efetiva do solo devido à contribuição adicional da convecção na transferência de calor (LOVERIDGE, 2012).

A convecção forçada é mais significativa do que a convecção livre e ocorre quando existe o fluxo de água subterrânea através do solo. A convecção resulta na combinação de dois processos que operam simultaneamente: a difusão através do solo e advecção devido ao fluxo em meio poroso, sendo ambos os processos descritos pela Equação 2.14.

De acordo com Hellstrom (1991) o desempenho de sistemas geotérmicos superficiais pode ser afetado pela convecção se a condutividade hidráulica for maior do que 10^{-5} m/s. Segundo as recomendações de Syntec (2017), a permeabilidade dos solos para utilização de geoestruturas térmicas deverá estar compreendida no domínio de interesse entre 10^{-2} e 10^{-7} m/s. Permeabilidades inferiores implicam em baixas velocidades de fluxo e troca térmica puramente condutiva.

$$\frac{\rho'c' dT}{\lambda' dx} = \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} - \frac{\rho_w c_w}{\lambda'} v \frac{dT}{dx} \quad (2.14)$$

Nesta equação são utilizadas as propriedades térmicas efetivas do solo.

$$\rho'^{Sc'} = n\rho_w S_{cw} - (1 - n)\rho_s S_{cs} \quad (2.15)$$

$$\lambda' = n\lambda_w + (1 - n)\lambda_s \quad (2.16)$$

Nas equações 2.15 e 2.16 n corresponde à porosidade do solo, e os subscritos w e s referem-se à água dos poros e ao solo.

Estudos analíticos e numéricos de sistemas geotérmicos superficiais afetados pelo fluxo de águas subterrâneas como Claesson & Hellstrom, (2000), Chiasson et al. (2000), Tolooiyan et al. (2014) indicam que o efeito do fluxo das águas subterrâneas torna-se significativo para velocidades acima de 1 m/dia.

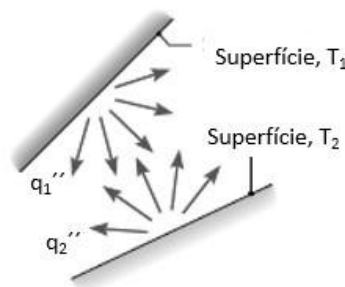
Ao longo do tempo os elementos trocadores de calor com o solo tendem a esquentar ou resfriar o solo no seu entorno, de acordo com a sua utilização. Conseqüentemente, o desempenho da troca térmica pode ser comprometido, pois a variação da temperatura do fluido circulante e o solo é reduzida. Neste contexto, um grande benefício da existência do fluxo de água subterrânea é que ele garante a recuperação da temperatura natural do solo.

Apesar de estudos apresentarem o valor de velocidade típico para o fluxo, o impacto precisa ser avaliado de local para local, especialmente porque o efeito das águas subterrâneas será diferente dependendo do funcionamento do sistema.

2.4.3. Radiação térmica

A transferência de calor por radiação térmica, entre duas superfícies com diferentes temperaturas, ocorre pela emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas, Figura 2.17. Conseqüentemente, na ausência de um meio interveniente, há transferência líquida de calor por radiação entre os elementos.

Figura 2. 17- Troca de calor por radiação térmica entre duas superfícies



Fonte: Adaptada Bergman et al. (2011)

Segundo Rees et al. (2000), o efeito da radiação térmica na transferência de calor em solos contribui de forma insignificante sendo que, em areias o seu efeito é inferior a 1% da transferência global de calor à temperatura atmosférica. Porém, para materiais rochosos, com partículas superiores a 20 mm, a transferência de calor por radiação pode ser significativa, podendo chegar a 10% à temperatura normal. Geralmente, o efeito da radiação não é considerado nas análises de transferência de calor.

2.5. ESTACAS TROCADORAS DE CALOR

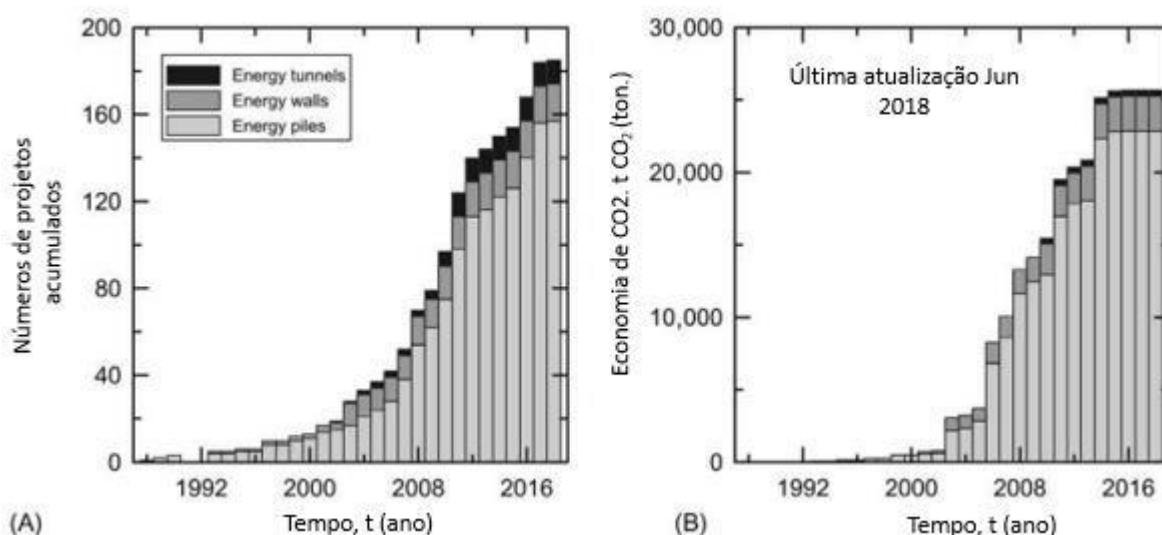
2.5.1. Características Gerais

As estacas trocadoras de calor com o solo são um tipo especial de sistema em circuito fechado utilizadas para a climatização de edifícios. A grande vantagem é aproveitar os elementos que já são necessários por questões estruturais para esta outra finalidade, trazendo economia de energia, redução de emissão de CO₂ e benefícios quanto ao condicionamento térmico.

O uso da energia geotérmica superficial por meio de trocadores de calor tem crescido ao longo dos últimos 20 anos em vários países do mundo, com destaque para o uso de estacas trocadoras de calor após os anos 2000. Estudo realizado por Di Donna et al. (2017) apresenta a quantidade de tubos trocadores de calor instalados mundialmente em túneis, estacas e paredes de contenção e a respectiva economia em emissão de CO₂ trazidas pelos projetos, Figura 2.18

Segundo Laloui et al. (2003), as estacas geotérmicas são estacas nas quais são inseridas redes de tubos de pequeno diâmetro, por onde circula um fluido trocador de calor (geralmente a água) que garante a troca térmica com o solo. Os tubos tradicionalmente instalados nas estacas são de PEAD (polietileno de alta densidade), com diâmetro nominal de 26 mm (segundo as recomendações de SYNTEC, 2017).

Figura 2. 18-A) Número acumulado de projetos de trocadores de calor geotérmicos no mundo e B) economia de CO₂ trazida pelos projetos instalados



Fonte: Adaptada de Di Donna et al. (2017)

Todos os tipos de estacas de fundação podem ser utilizados como elementos trocadores de calor. De acordo com Knellwolf et al., (2011), os tipos mais comuns de estacas geotérmicas são as pré-moldadas de concreto e as moldadas *in loco*. Porém, existem trabalhos como Lennon et al., (2009) que mostram estacas tubulares metálicas preenchidas com argamassa utilizadas como trocadores de calor.

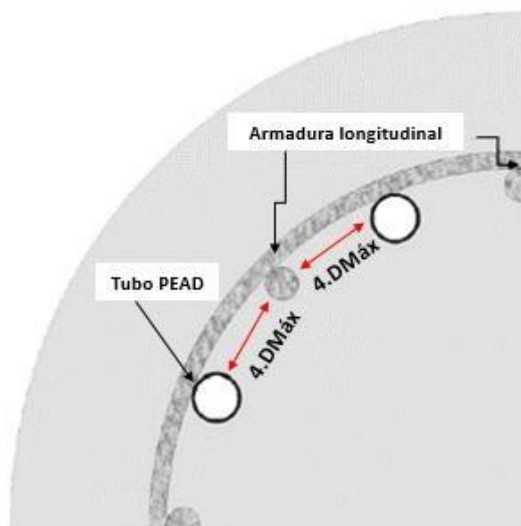
O concreto é um material adequado para a troca de calor com o solo pois possui uma boa condutividade térmica (ZARELLA et al., 2013). Segundo Brandl (2006), para atingir 1 kW de calor é necessário aproximadamente uma superfície de contato de 20 m² (para solos saturados) e 50 m² (para areias secas) para estruturas de concreto, podendo variar com as propriedades do solo.

A condutividade térmica do concreto é um parâmetro importante para a projeto da transferência de calor entre a estaca e o solo. Além disso, o concreto nas estacas deve conciliar bom desempenho estrutural, trabalhabilidade e boa condutividade térmica. Segundo Loveridge (2012), a condutividade térmica do concreto depende principalmente da litologia do agregado usado, do volume e da razão entre água e cimento.

Para as estacas pré-moldadas, e estacas tubulares metálicas, os tubos são instalados na parte oca em contato com a parede interna da estaca. No caso das estacas moldadas *in loco* os tubos em PEAD geralmente são fixados nas armaduras das estacas de forma que seja garantido o correto posicionamento, como apresentado nos trabalhos Loveridge e Powrie, (2012) e Sani et al., (2017).

Segundo Syntec (2017), como as armaduras possuem função estrutural, recomenda-se um espaçamento mínimo entre a armadura longitudinal e os tubos PEAD de 4 vezes o diâmetro máximo do agregado utilizado no concreto, como apresentado na Figura 2.19.

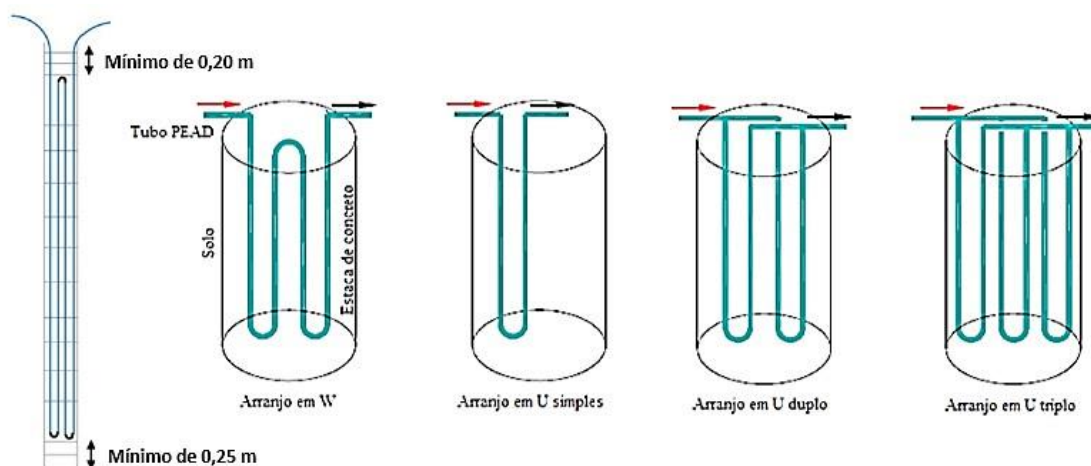
Figura 2.19- Espaçamento recomendado entre os tubos PEAD e a armadura longitudinal das estacas geotérmicas



Fonte: Adaptada de Syntec (2017)

Estudos como Gao et al., (2008) e Park et al. (2015) analisam a performance térmica de diferentes configurações dos tubos no interior da estaca, por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas. Foram testadas configurações do tipo U simples, U duplo, U triplo e W, conforme apresentado na Figura 2.20, para as mesmas condições de subsolo e concreto das estacas (GAO et al., 2008). Segundo os autores, o arranjo em W foi o que apresentou melhor desempenho.

Figura 2.20- Configurações dos tubos PEAD nas estacas trocadoras de calor



Fonte: Adaptada de Syntec, 2017 e Gao et al., 2008

Batini et al., (2015) também avaliou o comportamento térmico de estacas com diferentes arranjos como U simples, U duplo e em W. Por meio de simulações numéricas, os autores concluíram que o arranjo em W apresentou troca térmica 54% vezes maior do que em U simples, concordando com os resultados obtidos por Gao et al. (2008).

Zarella et al., (2013) fizeram uma análise numérica comparativa para avaliar o comportamento térmico de duas configurações dos tubos PEAD: em espiral e triplo U. Segundo os autores, com base nos resultados obtidos, a configuração em espiral apresentou melhor desempenho do que a em triplo U.

Syntec (2017) propõe algumas limitações quanto a configuração dos tubos em PEAD com base no diâmetro da estaca. As recomendações para os respectivos diâmetros são:

- Para $\phi < 40$ cm – 1 loop;
- Para $40 \text{ cm} \leq \phi \leq 60$ cm – 2 loops;
- Para $60 \text{ cm} < \phi \leq 80$ cm – 3 loops;
- Para $60 \text{ cm} < \phi \leq 100$ cm – 4 loops.

Em Syntec (2017) também são apresentadas algumas recomendações quanto a disposição dos loops nas extremidades da estaca. Recomenda-se que na base inferior seja mantido um espaçamento de 25 cm entre a extremidade e os loops. Para a base

superior, recomenda-se um espaçamento de 20 cm, conforme apresentado na Figura 2.20.

2.5.2. Transferência de calor em estacas termoativas

A troca de calor entre a estaca e o solo, assim como outros elementos constituintes do sistema, como fluido circulante e os tubos instalados dentro da estaca, é realizada principalmente por condução e convecção. A convecção forçada ocorre pelo fluxo do fluido de transferência de calor no interior dos tubos PEAD instalados na estaca. Já a condução térmica ocorre nas paredes dos tubos de PEAD, no material de preenchimento das estacas e no solo (LOVERIDGE, 2012). Na Figura 2.22 é apresentado um modelo simplificado da transferência de calor entre o fluido circulante e o solo através da estaca (LOVERIDGE & POWRIE, 2011).

A transferência de calor em estacas trocadoras depende dos seguintes parâmetros (LALLOUI & LORIA, 2020):

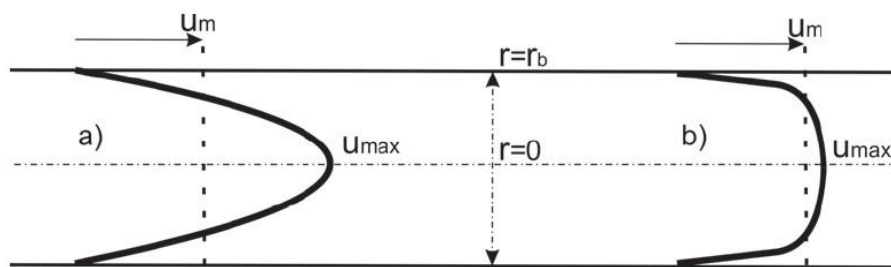
- Geometria da estaca;
- Estratigrafia do terreno no entorno ao longo da estaca;
- Configuração dos tubos no seu interior e quantidade de tubos instalados;
- Vazão de circulação do fluido (fluxo em regime turbulento ou laminar);
- Propriedades térmicas do material de preenchimento da estaca;
- Propriedades térmicas do solo no entorno da estaca.

A taxa de transferência de calor do fluido para as paredes do tubo depende fortemente das condições do fluxo do fluido no interior do tubo, sendo que o fluxo turbulento provoca maiores taxas de troca de calor (LOVERIDGE, 2012). Devido ao atrito na parede do tubo PEAD, tanto o perfil de velocidade quanto o perfil de temperatura no seu interior variam ao longo da seção transversal. Para o fluido em regime laminar, o perfil de velocidade do fluido é uma parábola, ao passo que para o regime turbulento, a forma do perfil é mais plana, como apresentado na Figura 2.21.

Segundo Brandl (2006), sob fluxo turbulento o coeficiente de troca térmica é sempre superior comparado com o fluxo laminar, portanto algumas normas de energia geotérmica recomendam utilizar o fluxo turbulento no interior das tubulações. Porém, em regime de fluxo turbulento não é somente a velocidade de escoamento do fluido que

interfere no valor do coeficiente de troca térmica, mas também a característica dos materiais, geometria, profundidade e fluxo de água subterrânea.

Figura 2. 21- Perfis de velocidade de escoamento: a) Fluxo laminar; b) Fluxo turbulento



Fonte: Adaptada Loveridge (2012)

You et al. (2014), por meio de ensaios experimentais com fluxo turbulento mostram a influência da vazão nos valores da taxa de calor por metro do elemento trocador de calor. Segundo o autor, a vazão mais eficiente para a troca térmica está entre 0,5 e 0,6 m/s. Bandeira Neto (2015), também avaliou experimentalmente o efeito da vazão e na troca de calor por metro do furo, e concluiu que a vazão de 19,4 l/min (0,61 m/s) foi a mais eficiente, confirmando os resultados de You et al. (2014).

Para determinar a temperatura do solo no entorno da estaca é essencial conhecer o valor da sua resistência térmica (R_b). Tradicionalmente os métodos de projeto assumem que a estaca está em regime estacionário de transferência de calor, portanto, a resistência térmica se torna constante. Para isto, é necessário um tempo mínimo de aquecimento para que a transferência de calor passe de regime transiente para regime estacionário.

Estes tempos mínimos são calculados pelo número de Fourier, conforme Equação 2.18, sendo recomendado o tempo de $F_o = 5$ para poços profundos (*boreholes*) atingir o estado estacionário (LI & LAI, 2015). Porém, para as estacas de maior diâmetro, maior amplitude de tempos é necessário para atingir o estado estacionário (LOVERIDGE & POWRIE, 2014).

$$F_o = \frac{\alpha_g t}{r_b^2} \quad (2.18)$$

Em abordagens de projeto de sistemas trocadores de calor verticais em circuito fechado em estado estacionário de transferência de calor, normalmente assume-se que a mudança de temperatura entre o fluido nos tubos e a borda do trocador de calor (ΔT)

pode ser calculada com base na resistência do elemento trocador de calor (R_b), conforme equação 2.19.

$$R_b = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.19)$$

Na equação q corresponde à taxa de calor injetada por unidade de comprimento da estaca (W/m). A resistência térmica da estaca (R_b) pode ser representada por equações analíticas que consideram dois fenômenos de transferência de calor (condução e convecção), conforme indicado na Equação 2.20.

$$R_b = R_{pcond} + R_{pconvec} + R_c \quad (2.20)$$

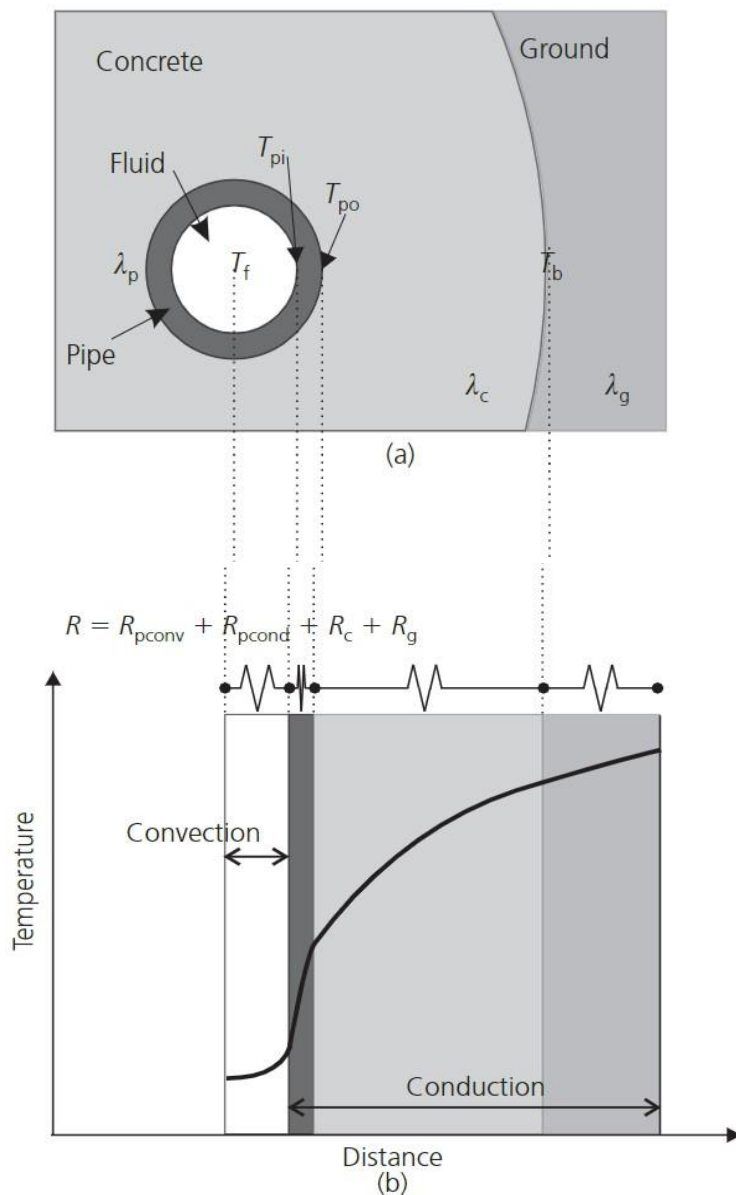
Nesta equação o subscrito p refere-se ao tubo (*pipe*) e c se refere ao concreto. Conforme apresentado na Equação 2.21 as resistências $R_{p,conv}$ e $R_{p,cond}$

$$R_p = R_{pcond} + R_{pconvec} \quad (2.21)$$

A resistência térmica devido à convecção $R_{p,conv}$ pode ser calculada pela Equação 2.22 apresentada abaixo. Na equação, n corresponde ao número de tubos instalados na estaca, r_i ao diâmetro interno dos tubos (PEAD) e h_i corresponde ao coeficiente de transferência de calor por convecção.

$$R_{p\ conv} = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} \quad (2.22)$$

Figura 2. 22- Transferência de calor em estaca: (a) plano com os elementos do sistema (fluido, tubo PEAD, estaca e solo); (b) diferenças de temperatura e resistências dos elementos.



Fonte: Loveridge e Powrie (2011)

O coeficiente de transferência de calor por convecção h_i pode ser calculado pela expressão de Dittus-Bolter para o regime turbulento utilizando-se o número de Nusselt nos cálculos (Equação 2.23).

$$h_i = \frac{Nu \lambda_{fluido}}{2r_i} = \frac{0.023 Re^{0.8} Pr^{0.35} \lambda_{fluido}}{2r_i} \quad (2.23)$$

A resistência térmica devido à condução $R_{p,cond}$ pode ser determinada pela Equação

2.24 apresentada abaixo. Na equação n corresponde ao número de tubos PEAD na estaca.

$$R_{p\ cond} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2n\pi\lambda_p} \quad (2.24)$$

Na Tabela 2.3 são apresentados valores típicos de resistência térmica medidos para diferentes tipos de estacas usadas como trocadores de calor. Os valores de resistência térmica das estacas apresentadas (R_b) variaram de 2.5 a 0.11 m°C/W, sendo o valor de 0,11 obtido para a resistência térmica da estaca tubular metálica preenchida com argamassa com configuração em U simples.

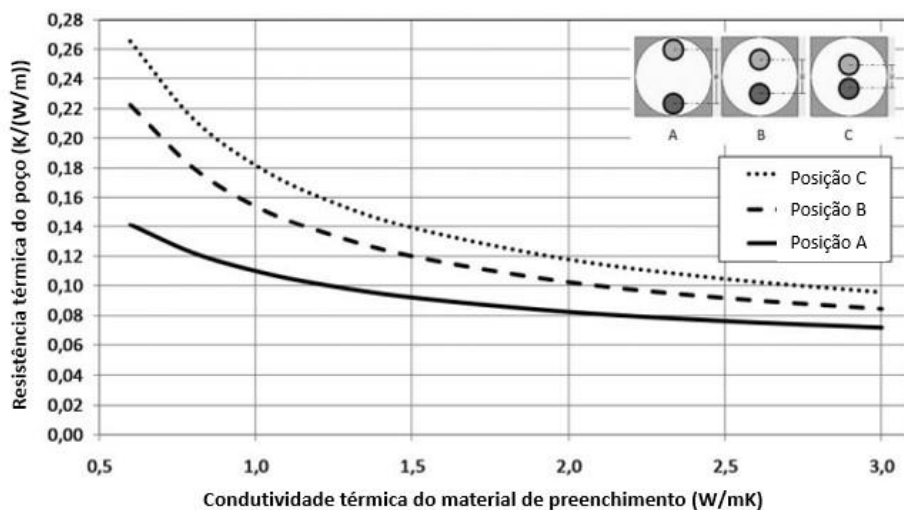
Tabela 2.3- Valores típicos de resistência térmica de estacas trocadora de calor

Diâmetro da estaca (m)	Tipo de estaca	Configuração dos tubos	Resistência térmica (m°C/w)	Fonte
0.3	Hélice Contínua	U-Simples	0.22	Wood et al., (2010)
0.6	Escavada	U-Simples	0.25	Gao et al., (2008)
0.6		Duplo U	0.15-0.20	
0.6		Triplo U	0.125-0.15	
0.27	Tubular metálica	U- Simples	0.17	Lennon et al. (2008)
0.244	cravada	U- Simples	0.11	

Fonte: Adaptada Loveridge (2012)

Algumas lições do estudo de poços para troca térmica, são utilizadas em estacas trocadora de calor para compreender o seu comportamento. Claesson & Göran Hellström (2011) avaliaram os efeitos da condutividade térmica do preenchimento de poços profundos e o efeito do espaçamento dos tubos em PEAD com configuração em U simples na resistência térmica (R_b). Os resultados são apresentados na Figura 2.23 e mostram que quando os tubos em PEAD estão mais próximos da parede/solo, menor será a influência da condutividade térmica do material de preenchimento nos resultados da resistência térmica.

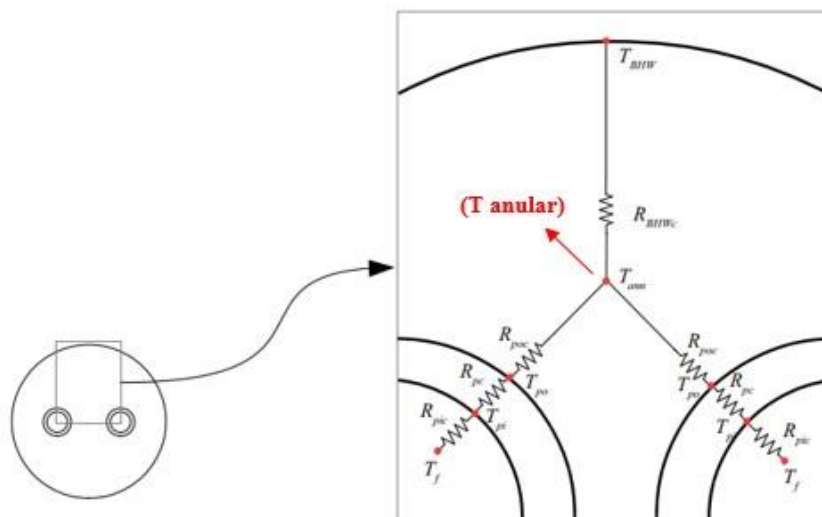
Figura 2. 23- Resistência térmica do poço (*borehole*) R_b com configuração e U simples para diferentes espaçamentos entre os tubos (posições A, B e C) e diferentes valores de condutividade térmica do material de preenchimento



Fonte: Adaptada de Claesson & Göran Hellström (2011)

Em países escandinavos é comum o preenchimento natural de poços profundos (*boreholes*) com água subterrânea. Alguns estudos têm sugerido que a convecção natural da água aumenta a transferência de calor na região anular, indicada na Figura 2. 24. O efeito da convecção contribui com a redução da resistência térmica efetiva dos poços e está diretamente associado à taxa de calor injetada (JAVED E& SPITLER, 2016; GUSTAFSSON & WESTERLUND et al., 2011; GUSTAFSSON & GEHLIN, 2008; LIEBEL et al., 2012).

Figura 2. 24- Seção transversal de um poço (*borehole*) preenchido com água, temperatura anular (T_{ann}) e resistências parciais do sistema



Fonte: Adaptado de Javed e Spitler (2016)

2.5.3. Comportamento termomecânico de estacas trocadoras de calor

As fundações profundas de um edifício desempenham a função de transferência das cargas mecânicas das estruturas para o solo de suporte. O carregamento axial aplicado concentra-se no topo das estacas e decresce com a profundidade, sendo absorvido pelo atrito lateral entre o solo e a estaca. Parte do carregamento que não foi absorvido pelo atrito ao longo do comprimento da estaca é absorvido pela ponta.

Quando os elementos de fundações são usados para troca de calor com o solo, a fundação passa a transferir além das cargas mecânicas, as cargas térmicas ao solo no entorno. Conseqüentemente, os carregamentos térmicos nas fundações provocam modificações das propriedades mecânicas dos materiais e alterações volumétricas internas, afetando em particular a resistência e a deformabilidade dos elementos estruturais (SYNTEC, 2017).

Segundo Burlon et al., (2013) quando uma estaca carregada é utilizada como elemento trocador de calor, a deformação total mobilizada será a soma das parcelas de deformação devido ao carregamento térmico e mecânico da estaca. A deformação mecânica ocorre devido a aplicação de um carregamento no topo da estaca e pode ser determinada pela Equação 2.25.

$$P = EA\epsilon_m \quad (2.25)$$

O comportamento das estacas geotérmicas pode ser modelado considerando o princípio geral da transferência de carga das estacas, pela decomposição da deformação total em duas partes: uma parte mecânica ϵ_m e uma parte térmica ϵ_t (Equação 2.26).

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_t \quad (2.26)$$

Nesta equação assume-se o comportamento termo-elástico do material da estaca, com evolução homogênea da temperatura. A deformação térmica pode ser calculada pela Equação 2.27 em que α_t corresponde ao coeficiente de dilatação/contração térmica e ΔT a variação de temperatura.

$$\epsilon_t = \alpha_t \cdot \Delta T \quad (2.27)$$

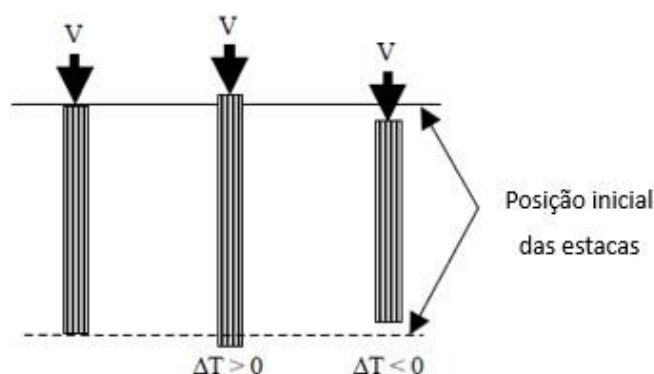
Alguns trabalhos como o de Brandl (1998), Laloui et al. (2006), Bourne-Webb et al. (2009), Amatya et al. (2012), Habert et al. (2012), Burlon et al. (2013) e Suryatriyastuti et al. (2012) realizaram análises do comportamento termomecânico de estacas trocadoras de calor em escala real.

As deformações térmicas na estaca dependem das interações entre o solo e a estaca e da existência ou não de restrições das suas extremidades (cabeça e ponta). Quando a estaca é solicitada termicamente, tensões axiais são geradas ao longo da fundação. Segundo Suryatriyastuti, Mroueh e Burlon (2012), a carga térmica em uma estaca trocadora de calor está associada à resposta mecânica deste tipo de fundação, e ao estado de deformação inicial dos materiais envolvidos (concreto e solo).

Durante o aquecimento e o resfriamento das edificações, ocorre respectivamente a contração e expansão do material das estacas, alterando as condições de interação soloestrutura (Figura 2.25). É importante conhecer estes efeitos para o correto dimensionamento das estacas trocadoras de calor.

Apesar da utilização de sistemas geotérmicos acoplados em elementos de fundação ser consagrada em diversos países europeus, pouco se conhece sobre o comportamento termomecânico das estacas (BURLON et al., (2013). De acordo como Knellwolf et al (2011), ainda existe uma carência de métodos para cálculo e dimensionamento de estacas geotérmicas. Por este motivo, o projeto das fundações geotérmicas geralmente é conservador, com fatores de segurança elevados, ou baseados em considerações empíricas.

Figura 2. 25- Efeito da temperatura nas estacas de energia submetidas ao aquecimento ($\Delta T > 0$) e resfriamento ($\Delta T < 0$)



Fonte: Burlon et al., (2013)

De acordo com Suryatriyastuti et al (2013), no inverno, o fluido utilizado para troca térmica sai da bomba de calor e é injetado na estaca com temperatura entre 0 e 5 °C, provocando o resfriamento das estacas e conseqüentemente a sua contração, enquanto que no verão as temperaturas do fluido são maiores, variando entre 30 e 40 °C, causando o aquecimento das estacas e a dilatação, considerando que os elementos estão com o topo livre (Figura 2. 25).

Amatya et al. (2012) analisaram o comportamento termomecânico combinado de três estacas com sistemas geotérmicos instaladas nas cidades europeias: Londres, Lausanne e Bad Schallerbach, e os resultados obtidos foram semelhantes aos de Burlan et al., (2013). Os autores propuseram um modelo aproximado da mudança do comportamento da carga axial ao longo da estaca, e o perfil do atrito lateral durante o aquecimento e o resfriamento das estacas. A Figura 2. 27 apresenta os diagramas termomecânicos propostos pelos autores para diferentes condições aquecimento e resfriamento das estacas e em seguida apresentaram a combinação destes efeitos térmicos com o carregamento mecânico aplicado (Figura 2. 27). Os resultados encontrados pelos autores

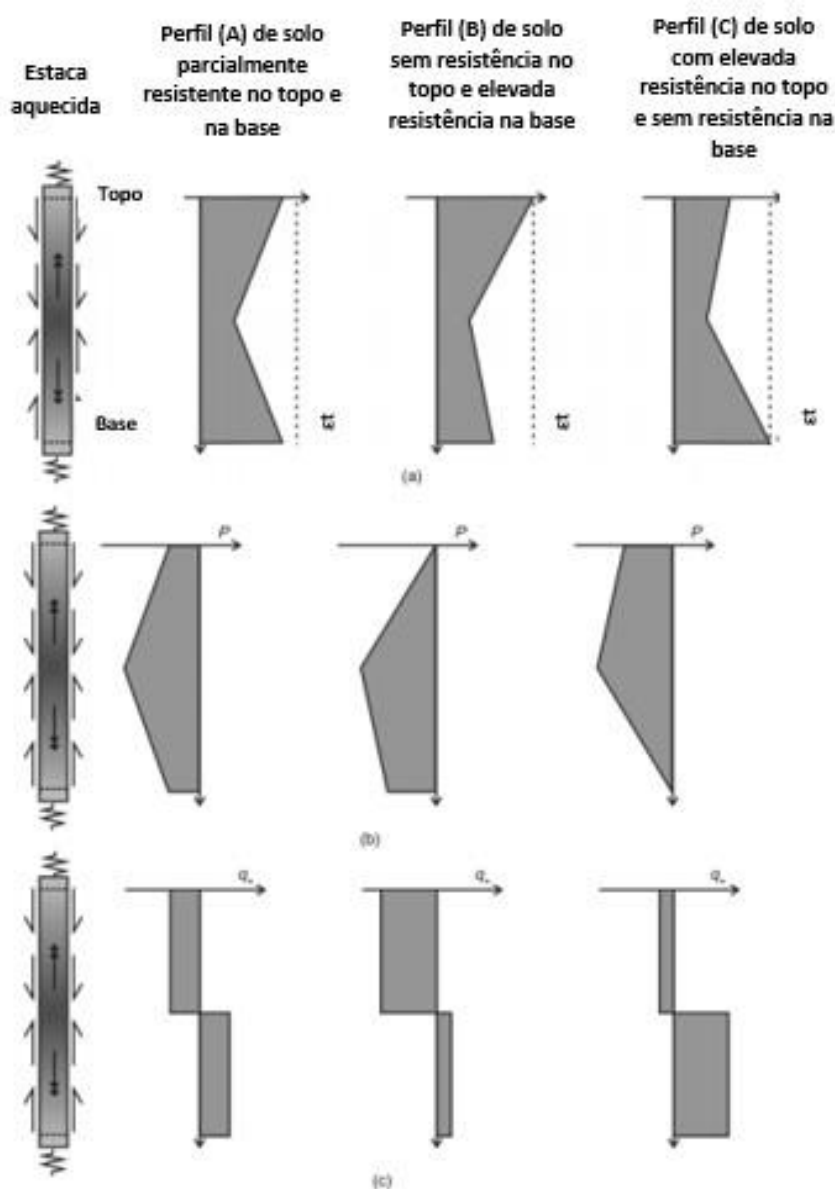
Quando a estaca está sujeita a ciclos de calor, ocorre a sua expansão, porém, existem restrições laterais do solo no entorno da estaca, e as deformações ocorrem principalmente na direção axial (Amatya et al., 2012). Considerando que o topo e a base das estacas estão livres para movimentação, e que a resistência por atrito lateral é constante ao longo da profundidade, como resultado tem-se uma deformação total ϵ mínima no meio da estaca, e máxima nas extremidades, como ilustra a Figura 2. 26. A deformação tende a diminuir a medida que aumenta a resistência por atrito entre o solo e a estaca, que depende de uma série de fatores como: tipo de solo, granulometria, modo de instalação das estacas, resistência do solo e magnitude do carregamento térmico inserido.

Na Figura 2. 27 são apresentados os diagramas de distribuição somente da carga axial, da carga axial e deformações apenas para o aquecimento, apenas para o resfriamento, e são apresentados os efeitos combinados do carregamento térmico e mecânico considerando o topo sem restrição (AMATYA et al., 2012).

Se houver resistência ao movimento de expansão da estaca quando aquecida, tanto na interface solo-estaca quanto nas extremidades, não haverá variação das suas dimensões, porém será gerado um carregamento térmico de compressão na direção axial da estaca (BOURNE-WEBB et al., 2009). Como consequência, a carga axial total na

estaca será maior do que a carga mecânica aplicada, com uma maior solicitação da ponta da estaca (SURYATRIYASTUTI, et al., 2012). Quando a estaca é resfriada, ocorrerá a sua contração, gerando tensões axiais negativas (de tração) (AMATYA et al., 2012). O atrito lateral mobilizado na estaca será positivo do meio para o topo da estaca, e negativo do meio para a base.

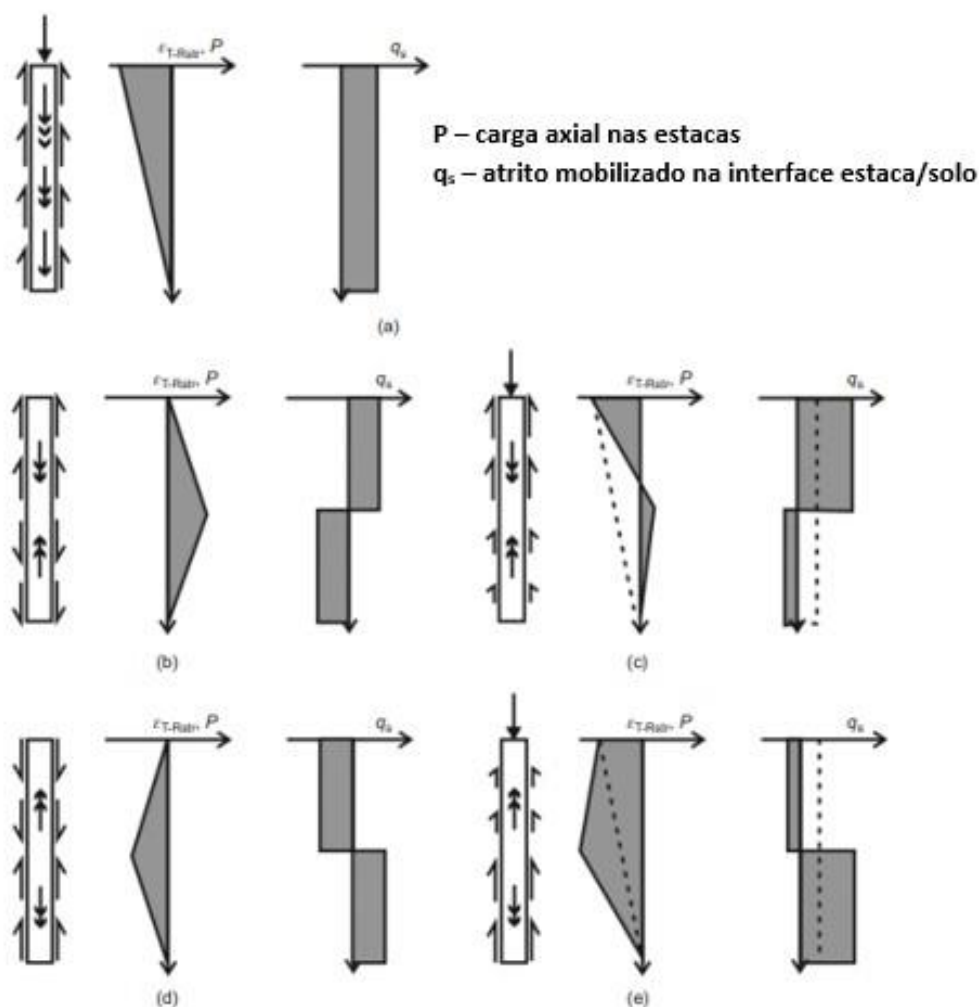
Figura 2. 26- Efeito do carregamento térmico das estacas durante o resfriamento da edificação para diferentes tipos de solo: (a) perfil da deformação térmica axial ϵ , (b) perfil da carga axial P , (c) atrito lateral solo/estaca mobilizado.



Fonte: Amatya et al., (2012)

Bourlon et al. (2013) avaliaram de forma teórica e numérica o comportamento das estacas geotérmicas para o resfriamento e aquecimento, considerando duas condições de contorno extremas para a estaca, topo livre (com rigidez igual a 0) e topo fixo, restringindo o movimento (com rigidez infinita). Os resultados obtidos pelos autores são semelhantes aos obtidos experimentalmente por Amatya et al., 2012.

Figura 2.27- Resposta da estaca ao carregamento termomecânico: (a) Somente carregamento, (b) resfriamento, (c) Carregamento e resfriamento combinados, (d) Aquecimento, (e) Carregamento e aquecimento combinados.



Fonte: Amatya et al., (2012)

Para o topo livre, considerando as estacas usadas para o resfriamento da edificação, ocorre uma redução das forças axiais e um recalque adicional no topo da estaca. Devido a contração do material da estaca, o atrito lateral aumenta na parte superior e diminui na parte inferior. Quando a estaca é usada para resfriar o ambiente, tem-se o aquecimento dos elementos de fundação, provocando a dilatação e resultando

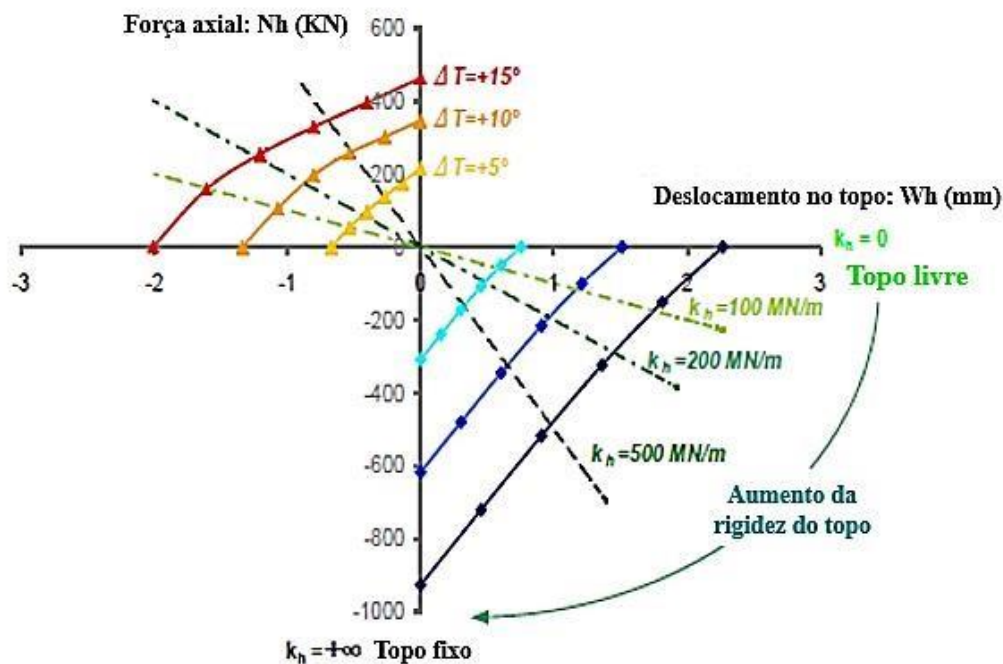
na elevação do topo da estaca, no aumento da força normal na sua seção e na redução do atrito lateral na parte superior e aumento na parte inferior.

Para o topo livre, considerando as estacas usadas para o resfriamento da edificação, ocorre uma redução das forças axiais e um recalque adicional no topo da estaca. Devido a contração do material da estaca, o atrito lateral aumenta na parte superior e diminui na parte inferior. Quando a estaca é usada para resfriar o ambiente, tem-se o aquecimento dos elementos de fundação, provocando a dilatação e resultando na elevação do topo da estaca, no aumento da força normal na sua seção e na redução do atrito lateral na parte superior e aumento na parte inferior.

Para as estacas usadas para o aquecimento, considerando o topo fixo, ocorrerá uma redução da força normal, do atrito lateral e da resistência de ponta devido à contração das estacas. Já para as estacas usadas para o resfriamento, considerando o topo fixo, haverá uma força axial adicional na estaca, o aumento do atrito lateral e da resistência de ponta devido à tentativa de expansão das estacas (BURLON et al., 2013). Na Figura 2.28 é apresentado um esquema do comportamento geral encontrado pelos autores para as estacas trocadoras de calor com o solo, considerando os diferentes tipos de rigidez no topo da estaca e os diferentes tipos de utilização do sistema.

Ainda segundo os mesmos autores, a rigidez real no topo da estaca corresponde a um caso intermediário entre livre e fixo, sendo um parâmetro complexo de ser estimado e dependente da configuração geométrica do edifício, da rigidez da laje de fundação, e da interação entre as estacas de fundação da obra.

Figura 2.28- Comportamento geral de uma estaca trocadora de calor



Fonte: Adaptado Burlon et al., (2013)

2.6. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS DO SOLO E DA ESTACA

O projeto de geoestruturas ligadas a bomba de calor requerem o conhecimento de uma série de parâmetros, porém as propriedades térmicas e geológicas do terreno são de extrema importância. A condutividade térmica do solo pode ser determinada de forma direta, por meio de ensaios de campo e ensaios em laboratório, ou de forma indireta por meio de equações empíricas e semi-empíricas.

Apesar dos ensaios em laboratório serem rápidos, de fácil execução, e terem custos reduzidos, seus resultados não consideram as características específicas do local como a heterogeneidade do terreno, a presença do fluxo de água do lençol, e o efeito de escala, que interferem diretamente nos resultados de condutividade térmica do terreno (VIEIRA et al., 2017). Segundo Low (2016), os valores de condutividade térmica encontrados pelos ensaios de laboratório são geralmente inferiores aos valores encontrados pelo ensaio de campo.

O ensaio de campo para determinar as propriedades térmicas do solo e da estaca tradicionalmente utilizado é o TRT (*Thermal Response Test*). Neste capítulo será

apresentada a teoria e a análise básica dos dados do TRT, bem como as incertezas associadas à medição dos principais parâmetros térmicos.

2.6.1. Teste de resposta térmica (TRT)

O TRT (Thermal Response Test) é um ensaio experimental executado em campo regularmente utilizado para estimar propriedades como a condutividade térmica do solo (λ_s) e resistência térmica do poço ou da estaca (R_b), necessárias para a elaboração de projetos de geotermia (Raymond et al., 2011).

Mogensen (1983) foi o primeiro a apresentar a ideia do ensaio TRT, em seguida, Eklöf e Gehlin (1996) introduziram a metodologia de teste comumente utilizada na estimativa da condutividade térmica do solo. A principal função do TRT é contribuir com a caracterização do potencial geotérmico do local para avaliar o projeto energético de geoestruturas geotérmicas.

A execução do teste pode ser feita de duas formas: injetando ou extraíndo calor e são executados de acordo com a finalidade com que se deseja utilizar as estruturas trocadoras de calor. Durante o ensaio é medida a resposta do solo devido à perturbação forçada pela inserção ou extração de energia térmica no furo (CEN/TC 341 N525, 2011).

Os ensaios podem ser executados nas próprias estacas da obra ou podem ser feitos em poços perfurados até a profundidade aonde se deseja instalar as estruturas trocadoras de calor de modo que sejam o mais similar possível dos elementos trocadores de calor que desejase construir. De acordo com Loveridge et al. (2014), apesar da orientação internacional de utilizar furos com diâmetro máximo de 6 pol (152 mm) para a execução do ensaio, tem se tornado comum aplicar o teste diretamente nas estacas trocadoras de calor.

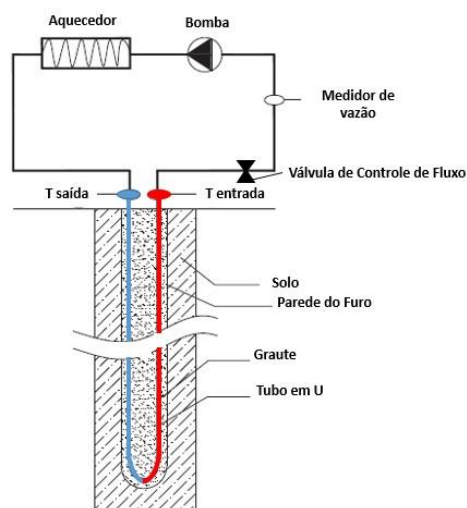
Em Syntec (2017) recomenda-se que os ensaios TRT sejam realizados em estacas com diâmetro de no máximo 300 mm. Como os ensaios são analisados na fase estacionária de transferência de calor, estacas com AR (relação entre a profundidade e o diâmetro da estaca) baixos, ou seja, com diâmetros altos e comprimentos menores, levaram mais tempo para atingir o estado estacionário, resultando em ensaios mais longos. As desvantagens são: ensaios longos são mais caros para execução, e os resultados são mais susceptíveis às interferências externas (MARAGNA & LOVERIDGE, 2021).

2.6.2. Procedimento do ensaio

Para execução do ensaio, os tubos de polietileno inseridos na estaca devem ser conectados ao aquecedor e uma bomba que faz com que o fluido, geralmente água, circule pela tubulação dentro da estaca em circuito fechado. O aquecedor tem a função transferir energia térmica ao fluido circulante, pela aplicação de uma potência constante de aquecimento. Para ensaios executados em regime de aquecimento recomenda-se que uma potência entre 40 a 80 W seja aplicada por metro de estaca (CEN/TC 341 N525, 2011).

Antes de iniciar o ensaio é necessário determinar a temperatura média natural do terreno que pode ser determinada de duas formas: 1) pelo método da circulação do fluido e equilíbrio da temperatura, ou 2) pelos dados de temperatura no interior da estaca. Como nem sempre a estaca é instrumentada com sensores ao longo da profundidade, a circulação do fluido é o método mais comum. A circulação do fluido é mantida por cerca de 10 a 20 minutos para que o fluido entre em equilíbrio térmico com o subsolo. Durante este período são registrados os valores das temperaturas de entrada e saída e a vazão. Quando os valores das temperaturas de entrada e saída assumem valores praticamente constantes, esta temperatura corresponde a temperatura média do subsolo. As temperaturas de entrada e saída medidas durante essa fase inicial tenderão a assumir um valor constante, sendo igual à temperatura média natural do subsolo (até a profundidade investigada).

Figura 2. 29- Configuração típica do ensaio TRT – injeção de calor no solo



Fonte: Adaptado Zhang et al. (2014)

Durante o ensaio são medidas as temperaturas de entrada e saída do fluido de troca térmica, a variação da temperatura ambiente, e a vazão de circulação durante todo o ensaio, como indicado na Figura 2.29. Com os dados, calcula-se a real potência injetada pela Equação 2.27.

$$Q = m.c_g.(T_{out} - T_{in}) \quad (2.27)$$

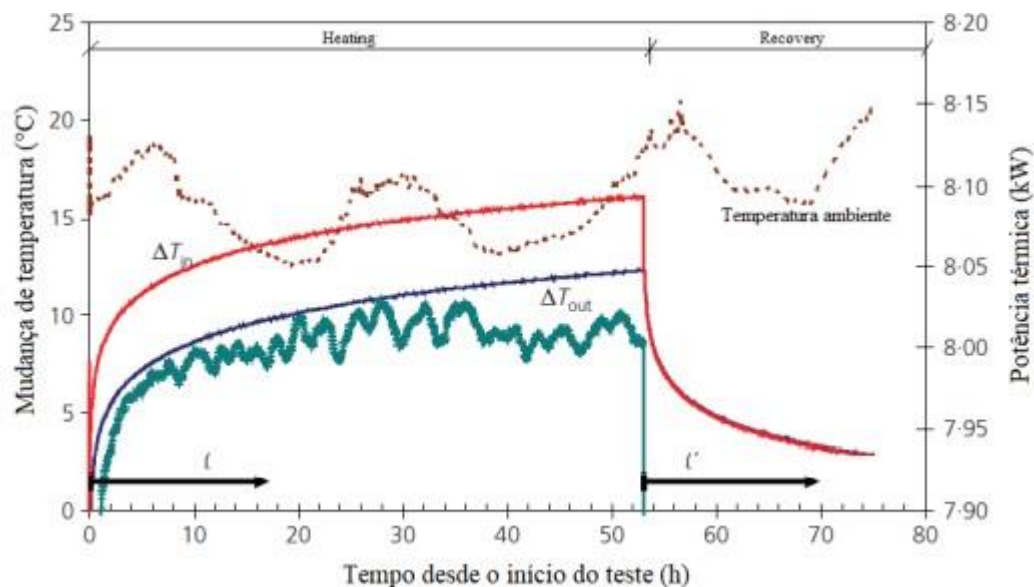
Nesta equação Q a fluxo de calor real calculado com os dados do ensaio (W), m é a vazão mássica do fluido condutor de calor (kg/s), c_g é a capacidade térmica específica do fluido condutor de calor (J/kg K), $T_{out}-T_{in}$ corresponde a variação de temperatura de entrada e saída do fluido nas estacas.

A variação de temperatura observada durante o ensaio é ajustada por modelo matemático para determinar as propriedades do solo (condutividade térmica) e da estaca (resistência térmica). Segundo as recomendações em CEN/TC 341 N525, 2011, antes do início do ensaio deverão ser aguardados pelo menos 5 dias (em solos aonde é prevista uma condutividade térmica elevada), ou 3 dias (para solos com baixa condutividade térmica) após a execução e o preenchimento da estaca para que haja a estabilização da temperatura.

Na norma europeia (CEN/TC 341N525 2011), o tempo de duração mínimo para a execução do ensaio TRT é de 48 horas. Porém, a duração do ensaio não é um consenso na literatura. Raymond et al. (2011) recomenda que ensaios com injeção constante de calor devem durar de 30 a 60 horas. Para Austin III et al., (2000) o ensaio TRT deve ter duração de 50 h. Gehlin (1998) sugere que a duração mínima do ensaio TRT seja de 60h. A Figura 2.30 ilustra os resultados típicos de um ensaio TRT.

Seguindo as recomendações do Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011) o equipamento utilizado no ensaio de resposta térmica deve ser capaz de manter o fluxo da água em regime turbulento e fornecer uma taxa de calor constante apropriada. Para determinar o regime de fluxo calcula-se o número de Reynolds (R_e). Se este for inferior a 2300, o fluxo está em regime laminar, e se for superior a 4000, o fluxo é turbulento.

Figura 2. 30- Resultado típico de ensaio de troca térmica TRT



Fonte: Adaptada Loveridge et al., (2012)

Uma etapa complementar que pode ser realizada no término da fase de aquecimento do ensaio TRT é a etapa conhecida como “recovery” ou recuperação térmica natural (Figura 2.30). Nesta etapa a circulação do fluido é mantida dentro da estaca/poço, porém, o aquecimento pela injeção de uma taxa de calor Q é desligado. Deste modo, pela circulação do fluido, ocorre a recuperação térmica natural da temperatura da estaca que tenta a se equilibrar novamente com a temperatura inicial do solo. Nesta etapa, as temperaturas de entrada e saída da água na estaca continuam sendo monitoradas, assim como a vazão de circulação do fluido.

2.6.3. Análise dos resultados pelos métodos analíticos

Os resultados obtidos no ensaio TRT podem ser interpretados por modelos analíticos ou numéricos. Os modelos analíticos mais utilizados para determinar os parâmetros do são apresentados neste trabalho.

2.6.3.1. Teoria da fonte linear infinita (ILSM)

De acordo com o Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011) uma das ferramentas para determinar os parâmetros do ensaio TRT é pela aproximação simplificada com base na teoria da fonte linear, sendo a mais utilizada devido a sua simplicidade e rapidez de

análise. A aplicação deste método é muito popular na Europa, porém nos Estados Unidos utiliza-se com mais frequência a teoria da fonte cilíndrica (GEHLIN, 2002).

O teorema da fonte linear considera o poço ou estaca como uma fonte de calor linear uniforme e infinita, com taxa de injeção de calor constante q (W/m), em meio isotrópico e homogêneo. As mudanças de temperatura no solo ΔT_g (°C) com o tempo t (s), devido ao fluxo de calor aplicado durante o ensaio TRT podem ser determinadas pela Equação 2.28 (CARSLAW E JAEGER, 1959 apud LOVERIDGE, 2012).

$$\Delta T_g(r_i, t) = \frac{q_t}{4\pi\lambda_g} \int_{\frac{r_i^2}{4\alpha_g t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q_t}{4\pi\lambda_g} E_i \left(\frac{r_i^2}{4\alpha_g t} \right) = \quad (2.28)$$

Nesta equação:

- q_t – é a taxa de troca de calor por comprimento do furo/estaca (W/m),
- λ – condutividade térmica do solo (W/mK),
- E_i – é a função exponencial integral,
- α – é a difusividade térmica do solo (m²/s),
- t – é o tempo de duração do ensaio,
- r_i – é a distância radial entre a fonte de calor e o ponto de análise (m), γ – é a constante de Euler (igual a 0,5772).

Durante o ensaio, a energia térmica não é aplicada diretamente no solo, o fluido condutor que circula no interior no poço/estaca é que transfere o calor. Os resultados neste modelo são analisados considerando o estado estacionário de transferência de calor, e que o valor da resistência térmica da estaca é constante (Equações 2.29).

$$\Delta T_f = qR_b + \Delta T_g \quad (2.29)$$

Nestas equações ΔT_f é a variação da temperatura do fluido circulante, ΔT_g é a variação da temperatura do solo e r_b é o raio do poço ou da estaca trocadora de calor com o solo (m).

Na Equação 2.30 a variação da temperatura do fluido é simplificada para uma relação log-linear. Para que a equação possa ser aplicada alguns autores recomendam descartar as primeiras horas do ensaio TRT uma vez que há um acréscimo elevado da temperatura neste trecho, sendo a transferência de calor dominada pelo regime

transiente. Na prática comum, o período inicial desprezado t corresponde ao tempo calculado para $Fo = 5$ (Eskilson, 1987), conforme Equação (2.31).

$$\Delta T_f = qR_b + \frac{qt}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (2.30)$$

$$t > 5r_b^2 / \alpha_g \quad (2.31)$$

Na equação α_g é a difusidade térmica do solo ($\alpha_g = \frac{\lambda_g}{\rho c_p}$, onde ρc_p é a capacidade térmica volumétrica do solo), r_b é o raio da estaca (ou poço) e t é o tempo após a início do processo de aquecimento.

A partir da Equação 2.30 e considerando o estado estacionário transferência de calor, o gradiente do gráfico que relaciona a evolução da temperatura média do fluido condutor e o logaritmo natural do tempo do ensaio TRT, indica a condutividade térmica efetiva do subsolo ($\lambda_{g \text{ eff}}$) pela equação 2.32. Esta equação corresponde ao ILSM-Simplificado.

$$\lambda_g = \frac{Q}{4\pi m H} \quad (2.32)$$

Na equação m é o gradiente linear entre a temperatura média do fluido com o logaritmo do tempo, Q é a taxa de injeção de calor e H é o comprimento do poço/estaca. A resistência térmica da estaca R_b pode ser estimada a partir do intercepto no espaço \ln , pela Equação 2.33 (Banks, 2008).

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[\frac{T(t_{1hr}) - T_0}{m} - \ln \left(\frac{4\alpha_g t_{1hr}}{\gamma r_b^2} \right) \right] \quad (2.33)$$

De acordo com Loveridge (2012), o método da fonte linear é adequado para analisar os ensaios de TRT realizados em poços para troca térmica. Porém, quando os ensaios TRT são executados em estacas, que possuem profundidades inferiores e diâmetros superiores, a teoria da fonte linear pode apresentar algumas falhas pelas simplificações. Loveridge (2012) recomenda utilizar esta teoria para interpretação dos

resultados para estacas com diâmetro de até 300 mm e para estacas com diâmetros superiores a autora recomenda ensaios mais longos para que seja atingido o estado estacionário de transferência de calor.

Low (2016) também apresenta outra limitação do método da fonte linear. Segundo a autora o fluxo de calor q (W/m) é considerado constante nas equações. Porém, este parâmetro varia durante a execução do ensaio. Além disso o calor do ambiente pode ser transferido aos tubos de entrada e saída, podendo ocorrer perda e ganho de energia induzindo a erros de leitura.

Além disso, segundo Low (2016), o solo é não homogêneo e apresenta variações da condutividade térmica ao longo da profundidade. Apesar do teste de resposta térmica considerar um único valor da condutividade térmica do solo, nem sempre se obtém a média para as diferentes camadas existentes.

2.6.3.2. ILSM (Recovery)

A condutividade térmica do solo pode ser determinada pela fase de recuperação térmica natural ou *recovery*. Os dados de temperatura obtidos durante esta fase do teste podem igualmente ser usados para determinar a condutividade térmica do solo (Loveridge et al., 2013). Neste caso, assim como pelo método ISLM-Simplificado, é necessário traçar o gráfico de gradiente da temperatura do fluido pelo $\ln(t/t')$, onde t' é o tempo inicial da fase de recuperação térmica. A condutividade térmica do solo neste caso é calculada pela Equação 2.34.

$$\Delta T_f \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left(\frac{t}{t'} \right) \right\} \quad (2.34)$$

A grande vantagem de analisar esta fase do ensaio é que a condutividade térmica do solo é determinada excluindo-se os efeitos da resistência térmica da estaca (R_b).

2.6.3.3. Teoria da fonte cilíndrica

O teorema da fonte cilíndrica foi primeiramente proposto por Carslaw e Jaeger (1947). Este teorema se assemelha ao da fonte linear, porém neste caso, a fonte de calor é considerada cilíndrica oca, infinita, inserida em solo isotrópico e homogêneo, com

fluxo de calor constante no entorno do cilindro em direção ao solo. A solução da teoria da fonte cilíndrica é apresentada nas Equações 2.35 e 2.36.

$$\Delta T_g = T_{(r,t)} - T_0 = \frac{q_g}{\lambda s L} G(z, p) \quad (2.35)$$

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{j_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} [J_0(p\beta)Y_1(\beta) - J_1(\beta)Y_0(p\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (2.36)$$

Nestas equações $T_{(r,t)}$ corresponde a temperatura a uma distância r do cilindro em um tempo t , T_0 é a temperatura inicial na parede do cilindro, ΔT_g é a variação da temperatura do solo, q_g é o fluxo de calor, λ a condutividade térmica do solo, e L o comprimento do cilindro.

A função analítica da teoria da fonte cilíndrica é complexa de ser solucionada. Neste contexto, Bernier (2001) propôs uma versão simplificada para facilitar a aplicação do método. O modelo supõe uma fonte de calor cilíndrica oca, da qual todo o calor flui para o seu entorno (Equação 2.37).

$$\Delta T_g = \frac{q}{\lambda} 10^{[-0.89129 + 0.36081 \log Fo - 0.05508 \log^2 Fo + 0.00359617 \log^3 Fo]} \quad (2.37)$$

Nesta equação ΔT_g é a variação da temperatura na interface do poço, F_0 corresponde ao número de Fourier ($\alpha t / r b^2$) em que α é a difusividade térmica do solo (m^2/s), t o tempo (s), e r_0 o raio do cilindro (m).

Man et al., (2010) propôs um novo modelo de fonte cilíndrica sólida simplificado. Neste modelo a cavidade cilíndrica considerada preenchida com o mesmo meio homogêneo do domínio do poço/estaca, chamado modelo de fonte de calor cilíndrica “sólida”, SCSM. Neste modelo, o solo é considerado um meio infinito homogêneo com temperatura inicial uniforme, no entanto, assume que o calor pode fluir para dentro da superfície da fonte de calor para o aterro da pilha, bem como para o solo. O modelo é apresentado nas equações abaixo.

A Equação 2.38 mostra a expressão para estimar o aumento de temperatura na fonte de calor (Θ_c) para $R = 1$ ($R =$ raio da estaca/interface). A equação 2.39 ilustra a forma normalizada considerando a temperatura normalizada (Φ) e o número de Fourier

(F_0), para uma taxa de injeção de calor q (W/m) constante. Recomenda-se que os dados sejam analisados para $F_0=5$, eliminando uma parte inicial dos dados.

$$\Theta_c = \frac{q}{\lambda_g} \cdot G(F_0) \quad (2.38)$$

$$\Phi = G(F_0) \quad (2.39)$$

Man et al. (2010) propôs uma expressão empírica simplificada mostrada na Equação 2.40 para a temperatura normalizada (Φ):

$$\ln(\Phi) = -2.321016 + 0.499615 \cdot [\ln(F_0)] - 0.027243 \cdot [\ln(F_0)]^2 - 0.00525 \cdot [\ln(F_0)]^3 + 0.000264311 [\ln(F_0)]^4 + 0.00006873912 [\ln(F_0)]^5 \quad (2.40)$$

2.6.3.4. Método semi-empírico G- Function

A solução analítica semi empírica G-Function proposta por Loveridge e Powrie (2013) é uma atualização da proposta apresentada por Eskilson (1987). Nesta solução as geometrias típicas das estacas trocadoras de calor são consideradas bem como o efeito transiente da troca de calor na estaca. Isto é possível devido a separação das funções de variação da temperatura do solo e do concreto. Três elementos devem ser considerados para o cálculo da condutividade térmica do solo (λ_s), conforme apresentado na Equação 2.41.

$$\Delta T_f = qR_p + qR_c G_c + \frac{q}{2\pi\lambda_g} G_g \quad (2.41)$$

Na equação q é a taxa de calor (W/m), R_p é a resistência dos tubos em PEAD (incluindo o efeito do fluido), G_c é a G-Function do concreto e G_g é a G-Function do solo no entorno da estaca. A resistência térmica dos tubos R_p consiste no somatório das resistências $R_{p,cond}$ e $R_{p,conv}$ apresentadas nas pelas Equações 2.22 e 2.24.

Neste modelo, para estimar a resistência térmica da estaca (R_b) é necessário somar a resistência térmica do concreto (R_c) e a resistência térmica do tubo (R_p). As funções empíricas G_c e G_g (G-Functions) foram desenvolvidas por derivações numéricas, considerando diferentes configurações dos tubos (tubos centralizados ou

próximos às bordas das estacas), diâmetros de estacas variando de 300 a 1200 mm e diferentes valores de AR (que é a relação entre o comprimento da estaca e o diâmetro).

A vantagem deste método é que foi desenvolvido para ser aplicado em estacas, considerando os elevados diâmetros quando comparados com os métodos tradicionalmente utilizados em poços (boreholes). Outra vantagem é que o modelo considera o efeito transiente da variação das temperaturas nas estacas. Como o modelo considera o efeito transiente da transferência de calor, todos os dados do ensaio podem ser analisados.

De modo a abranger a maior quantidade de casos, Loveridge e Powrie (2013) propuseram soluções considerando um limite inferior e superior combinados de acordo com as circunstâncias da estaca analisada.

A G-function do solo G_g é apresentada na Equação 2.42 e os ajustes podem ser feitos para o limite superior (coeficientes da Tabela 2. 4) e inferior (coeficientes da Tabela 2. 5). No limite inferior G_g é igual a zero para $F_o < 0.1$. Para o limite superior G_g é considerado igual a zero para $F_o < 0.25$.

$$G_g = a[\ln(F_o)]^7 + b[\ln(F_o)]^6 + c[\ln(F_o)]^5 + d[\ln(F_o)]^4 + e[\ln(F_o)]^3 + f[\ln(F_o)]^2 + g[\ln(F_o)]h \quad (2.42)$$

Tabela 2. 4-A.1 -Parâmetros de ajuste de curva para G_g l-imite superior para $0,1 < F_o < 100.000$

	AR = 15	AR = 25	AR = 33	AR = 50
<i>a</i>	-4.837×10^{-7}	-3.796×10^{-7}	-2.192×10^{-7}	-5.142×10^{-8}
<i>b</i>	6.597×10^{-6}	6.441×10^{-6}	4.311×10^{-6}	8.756×10^{-7}
<i>c</i>	6.592×10^{-5}	4.129×10^{-5}	2.939×10^{-5}	3.233×10^{-5}
<i>d</i>	-8.843×10^{-4}	-8.687×10^{-4}	-7.328×10^{-4}	-5.292×10^{-4}
<i>e</i>	-4.678×10^{-3}	-3.276×10^{-3}	-2.647×10^{-3}	-2.79×10^{-3}
<i>f</i>	0.03975	0.04415	0.0443	0.04284
<i>g</i>	0.3018	0.3071	0.3076	0.3144
<i>h</i>	0.5715	0.5819	0.5861	0.597
Sum of square errors	4.755×10^{-3}	1.963×10^{-3}	4.36×10^{-3}	3.988×10^{-3}
Coefficient of determination (R^2)	0.99993	0.99998	0.99996	0.99997

Fonte: Loveridge e Powrie, 2013

Tabela 2. 5- A.2- Parâmetros de ajuste para G_g - limite inferior para $0,25 < F_o < 100.000$

	AR = 15	AR = 25	AR = 33	AR = 50
<i>a</i>	-4.837×10^{-7}	-3.796×10^{-7}	-2.192×10^{-7}	-5.142×10^{-8}
<i>b</i>	6.597×10^{-6}	6.441×10^{-6}	4.311×10^{-6}	8.756×10^{-7}
<i>c</i>	6.592×10^{-5}	4.129×10^{-5}	2.939×10^{-5}	3.233×10^{-5}
<i>d</i>	-8.843×10^{-4}	-8.687×10^{-4}	-7.328×10^{-4}	-5.292×10^{-4}
<i>e</i>	-4.678×10^{-3}	-3.276×10^{-3}	-2.647×10^{-3}	-2.79×10^{-3}
<i>f</i>	0.03975	0.04415	0.0443	0.04284
<i>g</i>	0.3018	0.3071	0.3076	0.3144
<i>h</i>	0.5715	0.5819	0.5861	0.597
Sum of square errors	4.755×10^{-3}	1.963×10^{-3}	4.36×10^{-3}	3.988×10^{-3}
Coefficient of determination (R^2)	0.99993	0.99998	0.99996	0.99997

Fonte: Loveridge e Powrie, 2013

A G-function da estaca G_c é apresentada na Equação 2.43. Os coeficientes da equação são apresentados na Tabela 2.6 e escolhidos para o limite superior, e o limite inferior. Para $F_o > 10$ G_c deve ser igual a 1e para $F_o < 0.01$ G_c deve ser igual a 0.

$$G_c = a[\ln(F_o)]^6 + b[\ln(F_o)]^5 + c[\ln(F_o)]^4 + d[\ln(F_o)]^3 + e[\ln(F_o)]^2 + f\ln(F_o) + g \quad (2.43)$$

Tabela 2. 6- Parâmetros de ajuste para G_g - limite superior para $0,1 < F_o < 100.000$

	Central pipes		Pipes near edge	
	Lower bound	Upper bound	Lower bound	Upper bound
a	-1.005×10^{-4}	3.552×10^{-5}	-1.438×10^{-5}	-2.991×10^{-5}
b	-2.335×10^{-4}	6.017×10^{-5}	1.276×10^{-5}	-8.037×10^{-6}
c	0.003037	-6.033×10^{-4}	9.534×10^{-4}	8.612×10^{-4}
d	0.001803	0.001301	1.307×10^{-4}	-0.001126
e	-0.04339	-0.00744	-0.02446	-0.01086
f	0.1029	0.02559	0.07569	0.04785
g	0.9095	0.9694	0.921	0.939
Sum of square errors	5.11×10^{-4}	4.28×10^{-5}	9.28×10^{-4}	8.96×10^{-5}
Coefficient of determination (R^2)	0.99993	0.99995	0.99979	0.99990

Fonte: Loveridge e Powrie, 2013

2.6.3.5. Multipole Model

O modelo analítico Multipolo (*Multipole Model*) é um algoritmo complexo para estimar a resistência térmica para qualquer configuração de tubos em um poço, (BENNET et al., 1987). O modelo assume que cada tubo é uma fonte de calor linear ou um multipolo. Para resolver o problema de transferência de calor em estado estacionário é feita a superposição dos efeitos para determinar o fluxo de calor de cada tubo (JAVED E SPITLER, 2016). O modelo multipolo é considerado um método preciso para calcular a resistência térmica do poço (*boreholes*) quando comparado com a análise numérica, como mostram Lamarche et al. (2010), Lião et al. (2013) e Go et al (2014).

A resistência do poço para multipolos de primeira ordem pode ser calculada pela Equação 2.44, que é uma expressão relativamente simples e pode ser aplicada para o caso de sistemas de dois tubos (Hellstrom, 1991).

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda_c} \left[\ln\left(\frac{r_b}{r_o}\right) + \ln\left(\frac{r_b}{s}\right) + \sigma \ln\left[\frac{r_b^4}{r_b^4 - \left(\frac{s}{2}\right)^4}\right] \right] + \frac{1}{2} R_p \quad (2.44)$$

Na equação, $\sigma = \frac{\lambda_c - \lambda_g}{\lambda_c + \lambda_g}$ and $\frac{1}{2}R_p = R_{p\ convc} + R_{p\ cond}$ (Equação 2.22 e 2.24).

Na Equação 2.44 R_b é a resistência térmica do poço, λ_c é a condutividade térmica do material de preenchimento do poço ou estaca, r_b e r_o são respectivamente o raio do poço e o raio externo do tubo PEAD, e s é o espaçamento entre os tubos PEAD.

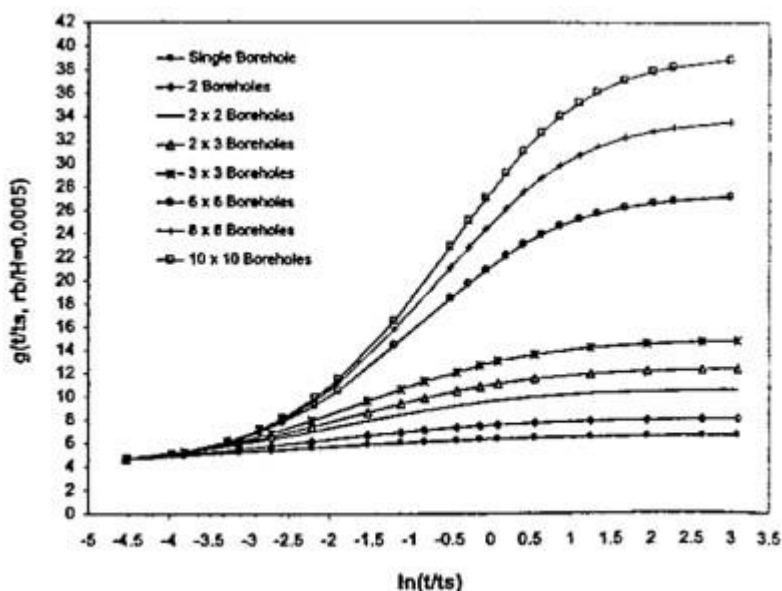
2.6.4. Métodos Numéricos

Os modelos numéricos têm se tornado cada dia mais comuns nas análises de transferência de calor de estacas termoativas. As principais vantagens dos modelos numéricos com relação aos métodos analíticos é a possibilidade de considerar efeitos espaciais e temporais como por exemplo: efeito do fluxo de água do lençol na transferência de calor, estratigrafia e heterogeneidade do terreno, diferentes geometrias das estacas.

Porém, os programas para análises de troca térmica geralmente apresentam custos elevados e para concepção dos modelos são necessários dados para calibração, sendo consumido um tempo maior para análise.

Eskilson (1986) foi um dos pioneiros e desenvolveram um modelo 3D para simular os efeitos de troca térmica de um poço. Os resultados foram utilizados para simular a distribuição de temperatura no solo para uma série de trocadores de calor pelo método da superposição de efeitos (SBM – Superposition borehole model). Esta abordagem é muitas vezes referida como modelo de Eskilson, Figura 2.31.

Figura 2.31- G-Function para diferentes configurações de poços



Fonte: Bidarmaghz (2014)

Em 1996 o modelo da superposição desenvolvido foi integrado em um software comercial TRNSYS, que após o acoplamento foi nomeado TRNSBM. Este programa foi utilizado por Thorton et al. (1997) que desenvolveu um modelo numérico mais detalhado considerando os componentes de um sistema GSHP.

Shonder e Beck (1999) desenvolveram um modelo numérico unidimensional (1D) para poços (boreholes) pelo método de diferenças finitas (FD). O modelo foi utilizado para estimativa de parâmetros e térmicas de um TRT de curta duração. Os autores simularam as temperaturas de entrada e saída e fluxos em um cilindro e mostraram que o modelo pode ser utilizado mesmo para tempos curtos. Neste caso, os dados iniciais de ensaios TRT podem ser usados, o que é uma vantagem em comparação com o método analíticos que precisam de resultados de ensaios mais longos para serem aplicados.

Gehlin (2002) também desenvolveu um modelo unidimensional (1D) por diferenças finitas para analisar poços (boreholes). Os resultados deste modelo numérico apresentaram valores ligeiramente maiores para a condutividade térmica do solo e R_b quando comparados com o modelo analítico da fonte linear (ILSM).

Wagner et al. (2012) estudaram os efeitos da variação da posição e espaçamentos entre os tubos em forma de U de poços (boreholes). Além disso, os autores também analisaram diferentes gradientes geotérmicos (ou seja, distribuições térmicas iniciais

não uniformes), e os efeitos da dispersão térmica. Os resultados mostraram que a variação do espaçamento dos tubos e diferentes gradientes geotérmicos típicos têm apenas efeitos <10% nos resultados para avaliação de λ_g e R_b . No entanto, o efeito do fluxo do lençol ter um impacto mais significativo na avaliação do R_b .

Bidarmaghz (2014) desenvolveu um modelo numérico em 3D no programa COMSOL Multiphysics para simular a transferência de calor em estacas para escalas de tempo de curto e longo prazo (25 anos). Além disso, a autora também fez análises paramétricas para avaliar diferentes fatores de projeto. Pelas análises a autora concluiu que desprezar os efeitos da recarga/descarga térmica da superfície do solo devido à temperatura ambiente em longo prazo pode levar prejudicar o correto dimensionamento do sistema (comprimento e número de trocadores de calor).

Quando a transferência de calor, que é um fenômeno tridimensional, é simulada por modelos em 2D, simplificações são assumidas. Nestes modelos, o gradiente geotérmico no solo é desprezado e uma seção transversal horizontal 2D é considerada. Nestes modelos, o efeito de limite de superfície é negligenciado pois assume-se que a seção transversal é estendida ao infinito.

A limitação da simplificação para o modelo em 2D é que a transferência de calor para o só ocorre através dos limites laterais no trocador de calor, o que leva a uma possível superestimação da interação entre os trocadores de calor e o solo (TEZA et al., 2012, LOVERIDGE et al., 2012). A circulação e a transferência de calor do fluido nos tubos não são capturadas com precisão em muitos dos modelos apresentados.

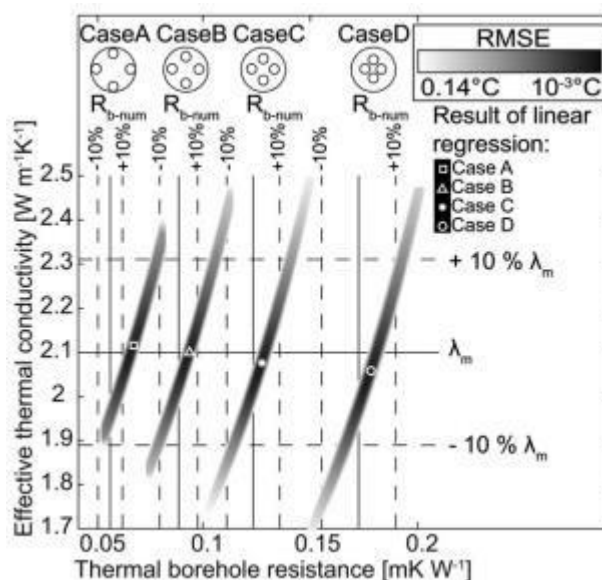
Abordagens numéricas em 3D estão se tornando cada vez mais frequentes para analisar o desempenho térmico de estacas trocadoras de calor, tanto em regime de transferência transiente e quanto em estado estacionário o que possibilita analisar o desempenho térmico em condições de curto prazo e longo prazo. Porém, algumas simulações demandam grandes recursos computacionais (BIDARMAGHZ, 2014 e CECINATO & LOVERIDGE, 2015, FERRANTELLI et al., 2019).

2.6.5. Colinearidade entre os parâmetros R_b e λ_g

Por meio de análises numéricas Wagner et al. (2012) identificou a existência de colinearidade entre os valores de condutividade térmica do solo (λ_s) e resistência térmica da estaca (R_b). Os resultados mostram que, dado um nível de tolerância em termos de

RMSE, mais de um par de valores se ajustam aos resultados experimentais do ensaio TRT como ilustram as Figura 2.32 e Figura 2.33.

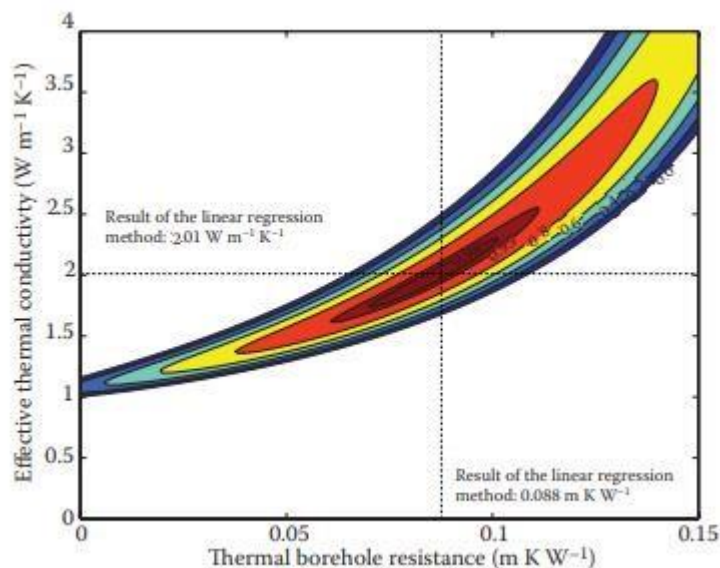
Figura 2. 32- Resultados do ajuste de parâmetros (λ_s e R_b) para quatro espaçamentos entre tubos testados (Caso A, B, C, e D)



Na prática, devido a erros e incertezas nas medidas do ensaio TRT, um intervalo de tolerância é frequentemente recomendável. No entanto, o TRT pode não fornecer os valores específicos dos parâmetros, mas sim pares de parâmetros correlacionados. De acordo com Marcotte e Pasquier (2008), a influência dos parâmetros na resposta térmica real dos trocadores de calor geotérmicos é contrabalançada. Javed et al., (2011) recomenda sempre usar os pares de valores estimados pelos resultados do TRT.

Abordagens analíticas, semi-analíticas e numéricas podem ser utilizadas para estimar a resistência térmica de trocadores de calor geotérmicos e podem ser consideradas para verificar validade dos parâmetros estimados através dos resultados de TRTs. Portanto, recomenda-se que mais um método seja utilizado para analisar os resultados (VIEIRA et al., 2017).

Figura 2. 33- Exemplo da técnica para estimativa de parâmetros para a avaliação do resistência térmica de borehole e a condutividades térmicas efetivas do solo.



Fonte: Wagner (2010)

2.6.6. Incertezas do ensaio TRT

Apesar do ensaio TRT ser o mais adequado para determinar os parâmetros térmicos do solo e da estaca, é importante conhecer as fontes de incertezas e o nível de confiança nos resultados. De acordo com Signorelli et al. (2007), erros acumulados pela análise da fonte linear (ILSM) pode facilmente resultar em um erro de 10% na estimativa dos parâmetros.

Banks (2008) destaca três principais fontes de incerteza do ensaio TRT:

- i) Incertezas dos dados medidos durante o ensaio (temperaturas);
- ii) Incertezas dos dados utilizados para análise, como por exemplo a adoção do valor de S_{cv} (capacidade térmica volumétrica do solo) que pode variar entre 10 e 20%;
- iii) Incertezas da aproximação linear pelos dados simplificados pelo modelo linear.

Sabe-se que em campo fatores como fluxo de água subterrânea, estratigrafia do terreno, e influência de fatores externos como efeitos da temperatura ambiente nos resultados também contribuem com os resultados de condutividade térmica obtidos nos ensaios TRT e podem contribuir como fontes de incertezas.

Gehlin (1998) mostra que o fluxo de água do lençol pelas fraturas da rocha ou o aumento do fluxo de água do lençol devido ao derretimento da neve, levam a um aumento nos valores esperados de condutividade térmica obtida pelo ensaio TRT. Chiasson et al., (2000) demonstraram, por meio de análise numérica, o efeito significativo do fluxo de água subterrânea nos valores de condutividade térmica do solo para solos com alta condutividade hidráulica.

Neste sentido, Loveridge et al. (2013) recomendam que análises dinâmicas dos resultados sejam conduzidas, para diferentes t_{\min} de descarte do ensaio, como uma forma de identificar possíveis interferências nos resultados dos ensaios TRT,

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais e numéricos adotados para o desenvolvimento deste trabalho, sendo estruturado na seguinte ordem:

- i. Apresentação do projeto do edifício CICS Living Lab, ii. Investigação e caracterização geotécnica do terreno, iii. Modelagem física em laboratório para avaliar a resposta térmica de diferentes materiais de preenchimento das estacas tubulares a serem testadas em campo,
- iv. Instalação das fundações trocadoras de calor, desenvolvimento e montagem dos tubos trocadores nas estacas,
- v. Montagem e execução dos ensaios de resposta térmica (TRT) em campo, vi. Montagem e execução das provas de carga, vii. Montagem e execução de ensaio de carregamento termomecânico nas fundações trocadoras de calor.

3.1. EDIFÍCIO CICS Living Lab

No campus da USP de São Paulo, nas proximidades do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, está em construção um edifício nomeado CICS (Centro de Inovação em Construção Sustentável), onde serão testadas, em condições e escalas reais, diferentes soluções de materiais e sistemas construtivos que promovam a sustentabilidade e inovação na área da Construção Civil.

O CICS é considerado um “*Living Lab*” e permite que diferentes soluções sejam avaliadas em operação antes de serem introduzidas no mercado, reduzindo dessa forma os riscos associados à sua implantação e permitindo um melhor conhecimento de cada solução. As figuras 3.1 e 3.2 indicam respectivamente o layout do edifício e o local aonde será construído o CICS (S 32°33’14”, W 46°43’52’’).

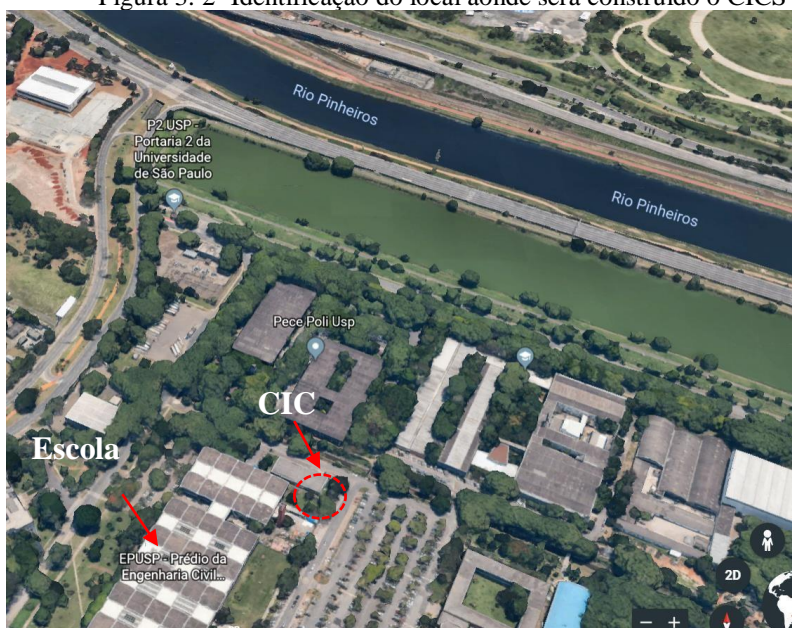
Como fundação do edifício serão utilizadas estacas trocadoras de calor com solo para auxiliar na sua climatização. Deste modo, esta é uma grande oportunidade para avaliar, pela primeira vez no Brasil, o desempenho das estacas trocadoras de calor com solo em situação real de operação. A sua utilização será predominantemente para o resfriamento do edifício, podendo ser utilizada para o aquecimento do edifício e aquecimento de água, principalmente nos meses de junho e julho em que há uma queda considerável da temperatura na cidade de São Paulo.

Figura 3. 1– Layout do edifício CICS



Fonte: <http://cics.prp.usp.br/cics-living-lab/>

Figura 3. 2- Identificação do local aonde será construído o CICS



Fonte: Adaptada Google Earth

O edifício do CICS Living Lab será constituído por 3 módulos principais. O primeiro deles já existente, atualmente utilizado como laboratório de materiais de construção, será totalmente adaptado para se testar novas tecnologias. O segundo, terá três pavimentos, onde serão instalados laboratório de pesquisas, salas de reunião e espaços multiuso para exposição e recepção de visitantes. O terceiro módulo do prédio consiste em um hall de escadas, com três lances, que fará a união entre os módulos, e onde haverá o acesso ao edifício (Figura 3.1).

A fundação dos novos módulos do CICS é composta por estacas do tipo hélice contínua e estacas tubulares metálicas. Em todas as estacas foram instalados tubos trocadores de calor em PEAD, por onde circulará água para a troca de calor com o solo,

e estes tubos serão conectados à uma bomba de calor, que garantirá a climatização de parte do edifício por meio do uso da energia geotérmica superficial disponível no terreno. No total 13 estacas são do tipo hélice contínua, com diâmetro de 700 mm e comprimentos de 15 e 16 m no módulo 2, e 8 estacas do tipo tubular metálica, com diâmetro externo de 244 mm, espessura de 10 mm e comprimento de 20 m, no módulo 3, correspondente ao hall de escadas.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SUBSOLO DO CICS

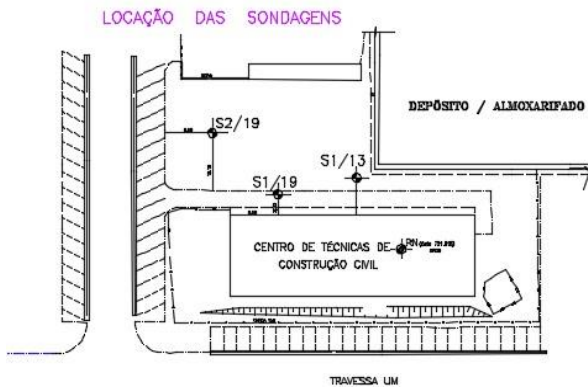
3.2.1. Sondagem SPT

Na área do CICS, para investigação preliminar do solo, foram executados 3 furos de sondagens SPT até a profundidade de 20 m. A Figura 3.3 apresenta a locação das três sondagens realizadas no entorno do prédio existente do CICS. O perfil representativo do subsolo, com os resultados de N_{SPT} e a posição do lençol freático estão apresentados na Figura 3.4 sendo que a sondagem S1 é a mais representativa do local aonde serão construídos os prédios do CICS. Os ensaios foram realizados em novembro de 2013 e os resultados das demais sondagens SPT estão apresentados no ANEXO A deste trabalho.

O perfil do solo é constituído predominantemente por areia com granulação variada argilosa, medianamente compacta a compacta, cinza, com espessura de aproximadamente 18 m.

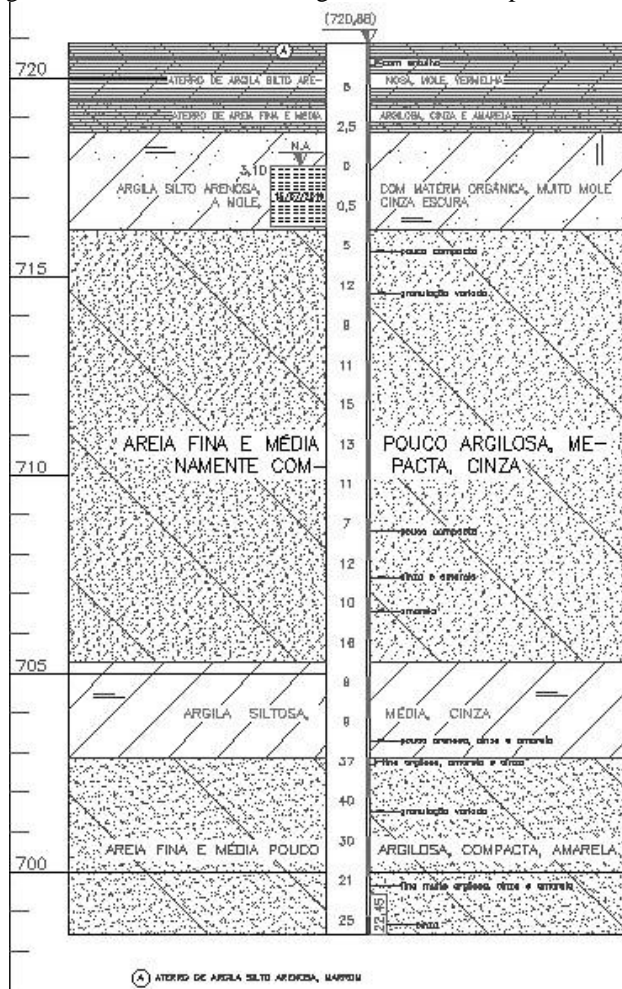
As duas camadas subjacentes são compostas por argila orgânica, com 1,5 m de espessura, e uma camada de aterro com espessura de um pouco mais de 2,0 m. O lençol freático estava a profundidade de 3,0 m para as três sondagens na época em que foram executadas, sendo o perfil constituído por solo saturado.

Figura 3.3- Localização das sondagens na área do CICS



Fonte: Adaptada do relatório de sondagem

Figura 3.4- Resultado da sondagem SPT S2 com perfil do subsolo do CICS



Fonte: Relatório de sondagem ENGESOLOS (25/07/2019)

3.2.2. Condições Hidrogeológicas

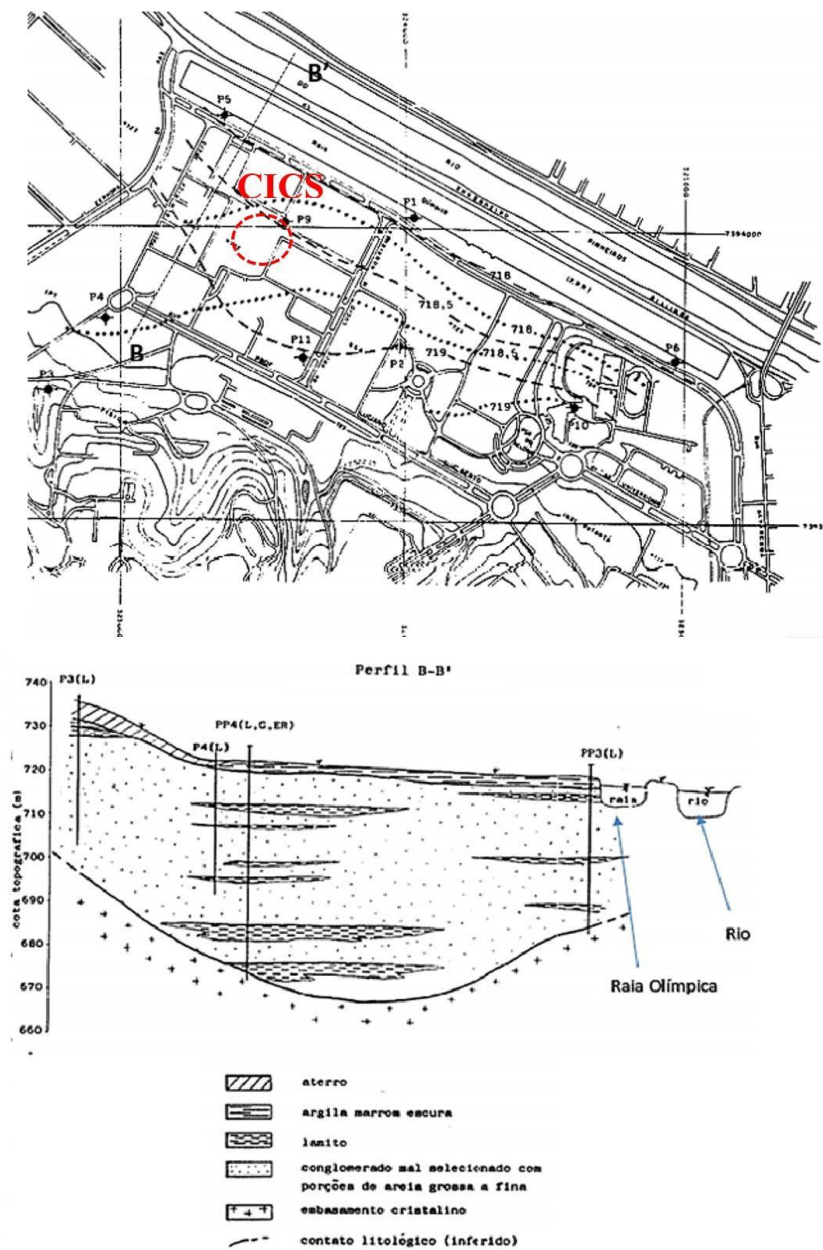
Devido à proximidade do local do CICS com o Rio Pinheiros acreditava-se que poderia haver fluxo de água subterrânea nas camadas de areia saturada, que é uma condição que interfere diretamente no desempenho térmico das fundações trocadoras de calor. Iritani (1993) realizou estudos no campus da USP nas proximidades na raia Olímpica e da Escola Politécnica, e por meio poços de monitoramento identificou fluxo de água em sentido ao rio Pinheiros conforme apresentado na Figura 3.5. Também se apresenta na mesma figura o perfil estratigráfico encontrado pela autora que contribui para o entendimento da caracterização do terreno composto por conglomerados de areia fina a média intercalada por lentes de argila.

Neste contexto foram realizados ensaios na área do CICS ensaios *Slug* e *Bail Tests* para determinar a condutividade hidráulica das camadas mais permeáveis do solo e permitir a análise da velocidade de fluxo da água subterrânea, executados em agosto de 2019. Para a execução dos ensaios de condutividade hidráulica foram perfurados 3 poços de monitoramento (PMs). A posição relativa dos poços é indicada na Figura 3.6. A direção do fluxo e as equipotenciais foram obtidas com o auxílio de três poços de monitoramento em arranjo triangular.

Antes da perfuração dos poços de monitoramento, foi perfurado um poço para amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para identificar a camada mais permeável do terreno. A apresenta o perfil estratigráfico identificado no poço PM01.

Com base no perfil estratigráfico do poço PM01, foi observado que as camadas mais permeáveis estariam entre as profundidades de 5 a 6 m, devido a presença de pedregulhos. Portanto, os outros três poços foram executados com as seções filtrantes posicionadas nesta camada.

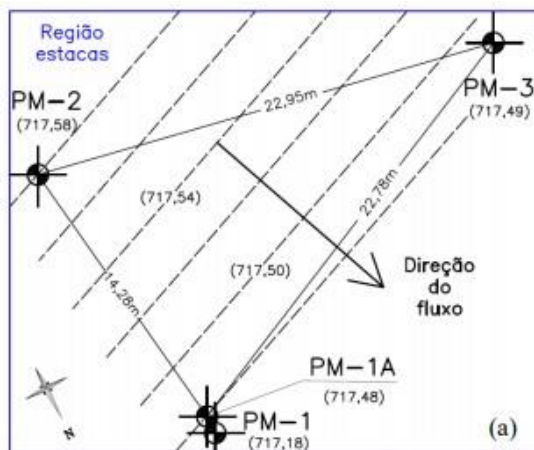
Figura 3.5- Direção do fluxo de água subterrânea e corte com perfil geológico do terreno nas proximidades do CICS



Fonte: Adaptada Iritani (1993)

Os resultados dos ensaios foram analisados em Pessin (2021), sendo estimado um gradiente hidráulico de 7×10^{-3} m/m.

Figura 3.6- Posição relativa dos poços de monitoramento



Fonte: Adaptada de Pessin (2022)

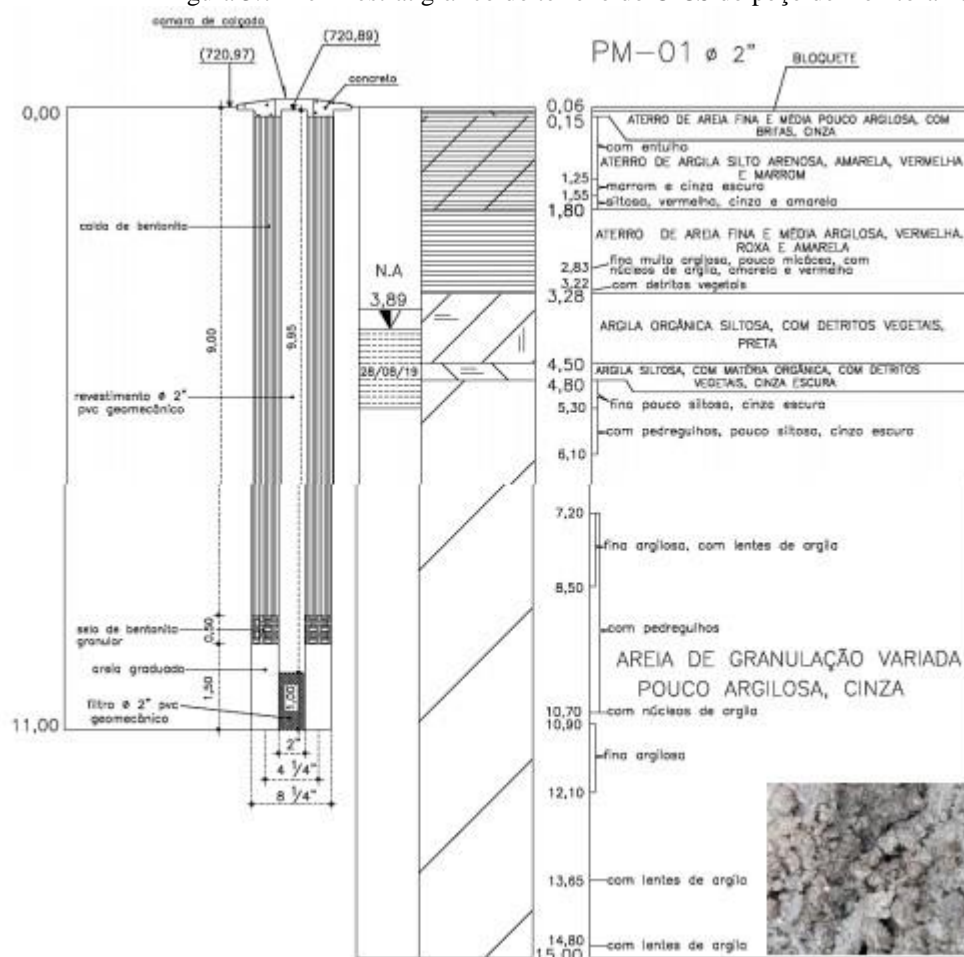
Considerando o gradiente hidráulico obtido em campo de 7×10^{-3} m/m e os resultados dos ensaios slug e bail tests, foram determinados por Pessin (2021) os valores de condutividade hidráulica e velocidade do fluxo de percolação apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Condutividade hidráulica e velocidade de fluxo obtidas pelo ensaio de campo

POÇO	PM01	PM02	PM03
k (m/s)	8,5E-05	3,0E-04	1,8E-04
vs (m/s)	1,5E-06	5,3E-06	3,1E-06

Fonte: Adaptada de Pessin (2021)

Figura 3.7- Perfil estratigráfico do terreno do CICS do poço de monitoramento PM1



Fonte: Relatório de ensaios

Os resultados obtidos para as camadas ensaiadas indicam uma maior velocidade de fluxo da ordem de 0,05 a 0,2 m/dia para a camada de areia uniforme entre 5 e 6 m de profundidade. Para a camada de areia menos permeável entre 10 e 11 m de profundidade foi verificado a velocidade de $3,3 \times 10^{-4}$ m/dia.

O fluxo de água subterrânea auxilia na recuperação térmica natural do solo. De acordo com Fromentin e Pahud (1997), velocidades de fluxo entre 0,5 a 1,0 m/dia seriam suficientes para contribuir com a dissipação do calor transferido, diminuindo o armazenamento de calor no solo. Deste modo, pelos resultados de velocidade encontrados em campo, não se espera grandes contribuições do efeito da advecção pelo fluxo da água do lençol na recuperação térmica do solo.

3.3. MODELO FÍSICO EM LABORATÓRIO

3.3.1. Descrição do modelo

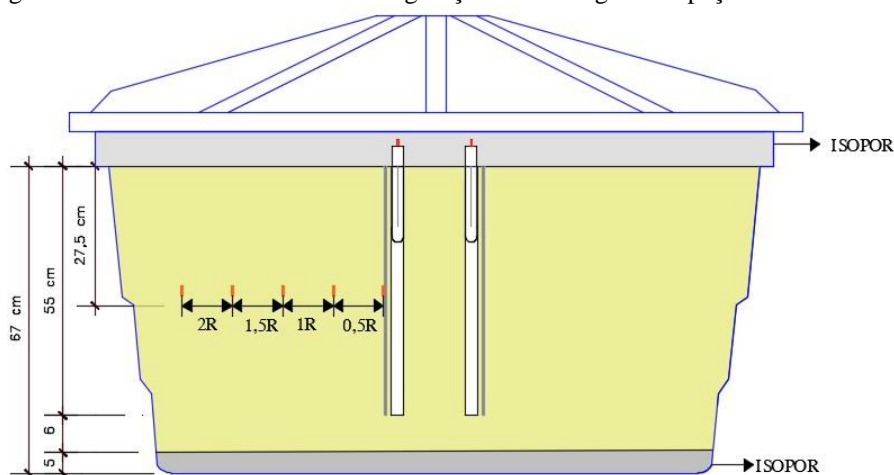
Antes da execução das fundações por estacas trocadora de calor no CICS, testes de troca térmica preliminares foram executados em modelo físico em laboratório em caixa de areia a fim de avaliar o comportamento térmico de uma seção de estaca tubular metálica preenchida com diferentes materiais.

A estaca tubular metálica, quando utilizada como estaca trocadora de calor com o solo, possui grande vantagem em relação aos outros tipos de estaca devido a facilidade para montagem das tubulações de geotermia, que são inseridas na fundação após a sua instalação, reduzindo dessa forma os riscos de danificar o sistema instalado. Porém, o ar dentro da estaca é um isolante térmico, sendo necessário o preenchimento do interior da estaca com algum material para melhorar a eficiência na troca de calor com o solo circundante.

Neste sentido, os materiais de preenchimento avaliados nesta tese foram escolhidos considerando-se a facilidade de encontrá-los em canteiros de obra e os custos adicionais à fundação, optando-se por materiais de baixo custo, e que fossem bons condutores térmicos. Os materiais escolhidos para os testes como preenchimento foram: areia, concreto magro, concreto magro com fibras metálicas e água. Como o terreno do CICS é saturado, a ideia de utilizar a água seria pensando no preenchimento natural da estaca pela água do lençol freático do terreno. Para fins de comparação dos resultados de desempenho térmico das estacas metálicas tubulares também foi ensaiada uma estaca circular de concreto.

Os ensaios em modelo físico foram realizados no laboratório do departamento de Geotecnia da EESC de modo a simular os efeitos da transferência de calor para analisar os diferentes materiais de preenchimento. Para isto, foi utilizada uma caixa d'água circular, com capacidade de 1 m³, com diâmetro médio de 1,25 m e altura de 0,67 m. No centro da caixa foi instalada a estaca teste de aço, aberta nas duas extremidades, com 0,22 m de diâmetro, sendo o diâmetro da caixa 5,6 vezes maior do que o diâmetro da estaca (Figura 3.8).

Figura 3. 8- Corte da caixa com a configuração da montagem e espaçamentos dos sensores de temperatura



Fonte: Autora

Com este ensaio pretendeu-se simular a troca de calor em uma seção transversal da estaca em profundidade qualquer no campo, uma vez que a transferência de calor ocorre predominantemente na direção radial, sendo considerada constante na direção vertical para ensaios de curta duração. Camadas de isopores com espessura de 5 cm foram colocadas no topo e na base da caixa para prevenir que houvesse fluxo de calor na direção vertical, e de modo a garantir o isolamento térmico da caixa. Desta forma, a transferência de calor foi transformada em uma análise bidimensional.

3.3.2. Execução das estacas

Primeiramente duas seções de estacas metálicas foram preenchidas com concreto e concreto com fibras de aço, e uma seção de estaca de concreto foi moldada em laboratório. Para as estacas metálicas foram utilizados tubos de aço com 220 mm de diâmetro, 10 mm de espessura, e altura de 55 cm aberto nas duas extremidades. Para moldar a estaca de concreto foi utilizado um tubo DEFOFO DN 250 mm bipartido, com diâmetro interno de 210 mm, e altura de 55 cm.

Para que a troca térmica fosse realizada foram instalados paralelamente dois tubos de PEAD no interior da estaca, com comprimento de 0,60 m, diâmetro nominal interno de 26 mm e 3 mm de espessura, posicionados nas estacas de modo a simular o arranjo em simples U. Uma das extremidades dos tubos PEAD foi tampada com CAP de PVC para que o tubo pudesse ser preenchido com água (fluido responsável pela troca térmica). Espaçadores plásticos foram acoplados aos tubos de modo que a distância de

15 cm entre os centros dos tubos permanecesse fixa. A instalação destes tubos foi feita de forma que os tubos ficassem o mais próximo possível da extremidade da estaca, otimizando a troca térmica entre a estaca e o solo. O processo de montagem das estacas é apresentado na Figura 3.9.

Como o preenchimento das estacas tubulares metálicas não tem finalidade estrutural, mas apenas de promover melhor troca térmica com o solo, foi utilizado concreto magro, e concreto magro com fibras, com baixo teor de cimento e elevado relação água/cimento. Na Tabela 3.2 são apresentados os traços dos concretos utilizados com a relação em volume entre cimento, areia e brita 1, e a relação água/cimento. Na mesma tabela também é apresentado o traço usado para a estaca de concreto, sendo utilizado traço com resistência de 35 MPa que é a resistência geralmente usada em fundações por estacas.

Tabela 3.2- Traço dos concretos utilizados nos ensaios

ESTACA	TRAÇO	FIBRAS (Kg/m³)	FATOR A/C
Estaca tubular metálica com concreto magro	1:3:6	-	0,75
Estaca tubular metálica com concreto magro e fibras metálicas	1:3:6	25	0,75
Estaca de concreto	1:2:2,5	-	0,55

Fonte: Autora

As fibras metálicas usadas são da marca Dramix com diâmetro de 0,62 mm e comprimento de 30 mm ilustradas na Figura 3.10. Este material foi incorporado no concreto para o preenchimento das estacas pois acredita-se que devido a sua composição este material traria benefícios elevando a condutividade térmica do concreto e conseqüentemente melhorando a troca térmica com o solo.

Quanto às estacas preenchida com areia e água foi utilizado um tubo metálico vazio internamente com as mesmas dimensões e características do tubo das estacas de concreto, porém o preenchimento das estacas foi realizado durante a montagem da caixa.

Figura 3.9- Montagem das estacas para os modelos físicos



Fonte: Autora

Figura 3. 10- Fibras metálicas misturados com o concreto



Fonte: Autora

3.3.3. Caracterização da areia

O preenchimento da caixa foi feito com areia média, disposta de forma com que a compactação relativa do material fosse de aproximadamente 90%. Ensaios de caracterização da areia foram necessários para determinar a massa de solo necessária para compactar cada camada de solo.

Para caracterização da areia, ensaios como granulometria por peneiramento (NBR 6502/95), massa específica dos sólidos (NBR 6508/84), e índice de vazios

máximo (NBR 12004/90) e mínimo (NBR 12051/91) foram realizados, seguindo as recomendações das Normas da ABNT. Os resultados obtidos nos ensaios estão resumidos na Tabela 3.3 e a curva granulométrica está apresentada na Figura 3.11. Pelos resultados obtidos no ensaio de granulometria, a areia usada no preenchimento da caixa pode ser caracterizada como muito uniforme, com coeficiente de não uniformidade (C_{nu}) de 3,75 e bem graduada, com coeficiente de curvatura (C_c) de 1,20, conforme apresentado na Figura 3.11.

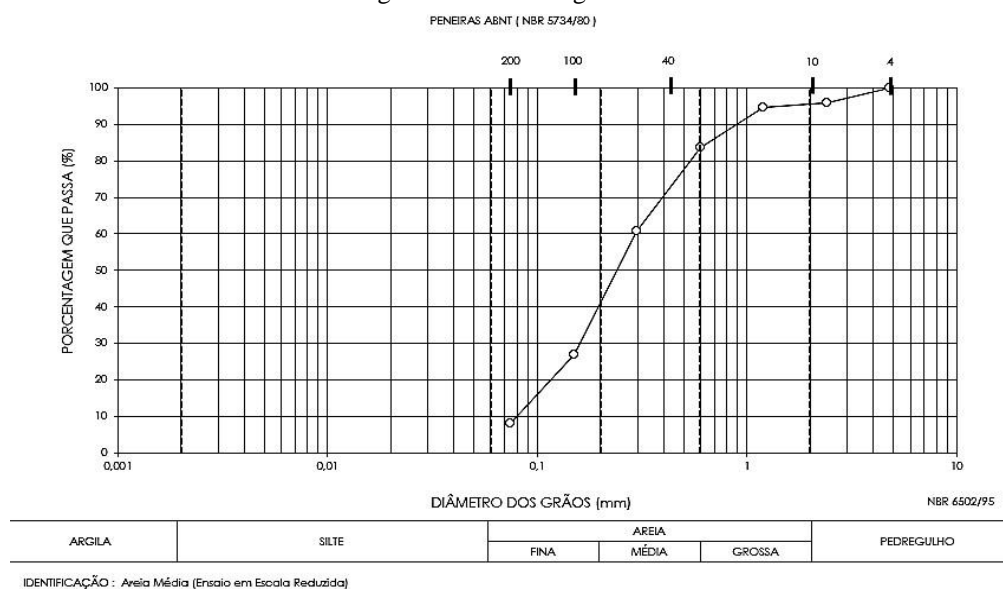
Tabela 3. 3- Caracterização da areia

Propriedades da areia	Valor
Massa específica dos sólidos (g/cm^3)	2,66
Massa esp. ap. seca máx (g/cm^3)	1,72
Índice de vazios máximo ($e_{máx}$)	0,67
Índice de vazios mínimo ($e_{mín}$)	0,54

Fonte: Autora

Pelos resultados obtidos no ensaio de granulometria a areia usada no preenchimento da caixa pode ser caracterizada como muito uniforme, com coeficiente de não uniformidade (C_{nu}) de 3,75 e bem graduada, apresentando coeficiente de curvatura (C_c) de 1,20.

Figura 3. 11- Curva granulométrica da areia



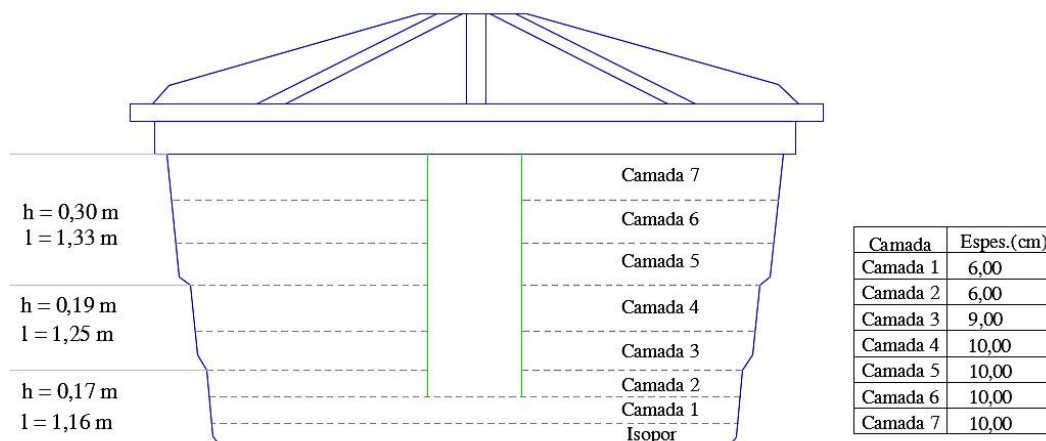
Fonte: Autora

3.3.4. Montagem e execução do ensaio

Os ensaios foram realizados para simular a troca de calor das estacas instaladas em areia seca e em areia saturada. A Figura 3.12 ilustra a divisão interna da caixa para o seu preenchimento com areia, adotando-se 7 camadas, com espessura variando de 6 a 10 cm. O material foi previamente seco em estufa antes da montagem. Primeiramente foi colocada a placa de isopor, em seguida foi feita a primeira camada de areia, com altura de 6 cm. Posteriormente, a estaca foi posicionada no centro caixa e o preenchimento em camadas continuado até atingir a 4ª camada. Nesta camada foram inseridos os sensores de temperatura tipo PT 100 (termoresistivos) para analisar a transferência de calor entre a estaca e o solo (Figura 3.8).

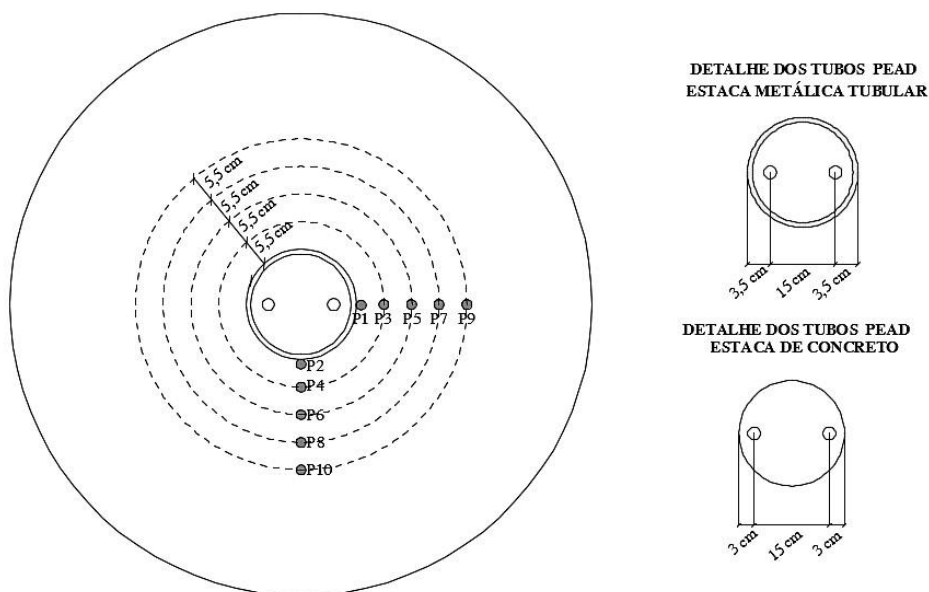
Os sensores PT 100 utilizados são classe B, com invólucro em inox 304, permitindo leitura de temperatura na faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. No total 11 sensores de temperatura foram utilizados nos ensaios, sendo 10 instalados na areia no entorno da estaca e 1 sensor para medir a variação da temperatura ambiente para avaliar possíveis interferências da temperatura ambiente nos dados dos ensaios. Para analisar a distribuição da temperatura do entorno da estaca foram consideradas duas direções de instalação dos sensores de temperatura, a primeira delas ao longo do diâmetro (0°) que passa pelo eixo que atravessa os tubos trocadores de calor (P1, P3, P5, P7,P9), e a outra perpendicular à esta direção (90°), como indicado na Figura 3.13. Os sensores foram instalados na interface entre o solo e a estaca, e à $0,5R$, $1R$, $1,5R$, e $2R$ da interface da estaca, sendo R o raio da estaca analisada.

Figura 3. 12- Separação da caixa em camadas para o preenchimento com areia



Fonte: Autora

Figura 3. 13- Posição dos sensores de temperatura PT100 no entorno da estaca e detalhe dos espaçamentos entre os tubos PEAD para as estacas metálicas e estaca de concreto



Fonte: Autora

Os tubos PEAD foram preenchidos com água, e em cada um deles foi instalado um aquecedor de aquário ilustrado na Figura 3.14, com regulador de temperatura e termostato, de modo a aquecer a água no interior dos tubos sendo esta temperatura mantida constante durante todo o ensaio. O aquecedor foi previamente calibrado em laboratório utilizando-se uma proveta preenchida com água e um termômetro. O aquecedor foi imergido na água e ligado para temperatura máxima de aquecimento. Verificou-se a estabilidade da temperatura com o tempo, sendo que a temperatura constante obtida para o limite máximo do sensor foi de 32°C.

Como a temperatura nos dois tubos preenchidos com água é constante e igual a 32°C, e a estaca é simétrica, é razoável assumir que a distribuição de temperatura no entorno da estaca também é simétrica.

Figura 3. 14– Aquecedor com termostato utilizado no ensaio



Fonte: Autora

Todas as etapas de montagem dos ensaios são apresentadas na Figura 3.15, desde o preenchimento com a areia, instalação do tubo, dos sensores PT 100, dos tubos PEAD, preenchimento da estaca com o material em análise e finalização do preenchimento da caixa com areia. Após a montagem dos ensaios aguardou-se o período de 24h para que houvesse o equilíbrio da temperatura entre os materiais no interior da caixa.

Figura 3. 15 - Etapas de montagem e execução do ensaio E1



Fonte: Autora

Figura 3. 16- Etapas de montagem do ensaio em areia saturada



Fonte: Autor

Como comentado anteriormente, duas condições de subsolo no entorno das estacas foram simuladas nos modelos físicos: areia seca e areia saturada, sendo no total

realizados 9 ensaios. Apenas a estaca metálica preenchida com água foi analisada somente na condição de areia saturada. A Tabela 3.4 apresenta a relação dos ensaios executados.

No ensaio conduzido na estaca preenchida com água (E SAT-P5), ao invés de medir a temperatura ambiente durante o ensaio, o sensor de temperatura PT-100 foi colocado no centro da estaca na seção em que a variação da temperatura radial da estaca foi analisada.

Tabela 3. 4- Relação dos ensaios realizados em laboratório

Ensaio	Estaca	Condição da areia na caixa	Material de preenchimento da estaca
ES-P1	Metálica	Seca	Concreto magro
ES-P2	Metálica	Seca	Concreto com fibras metálicas
ES-P3	Metálica	Seca	Areia
ES-P4	Concreto	Seca	-
E SAT-P1	Metálica	Saturada	Concreto magro
E SAT-P2	Metálica	Saturada	Concreto com fibras metálicas
E SAT-P3	Metálica	Saturada	Areia
E SAT-P4	Concreto	Saturada	-
E SAT-P5	Metálica	Saturada	Água

Fonte: Autora

Nos ensaios na condição de areia saturada, foi executada uma camada drenante de brita no fundo da caixa, com altura de 6 cm logo acima do isopor de modo que esta camada ficasse no mesmo nível do flange de entrada de água instalado no fundo da caixa. Acima desta camada foi colocada uma manta de geotêxtil não tecido de modo a separar a brita e a areia usada para preencher a caixa. Após a montagem do ensaio, a mangueira de entrada de água, juntamente com o registro para abertura e fechamento, foi conectada no flange da caixa conforme ilustrado na Figura 3.16. O ensaio foi saturado por capilaridade de modo que uma lâmina de água se formasse na superfície da caixa. A entrada de água foi desligada e um período de 24 h foi necessário para que houvesse o equilíbrio da temperatura da estaca e da areia antes do início do ensaio térmico. Antes das montagens dos ensaios saturados, toda a areia foi previamente seca em estufa.

Todos os ensaios em areia seca foram executados em duas fases principais, de carregamento térmico com duração de 4 dias (96 horas) mantendo os aquecedores ligados, e de resfriamento com duração de 2 dias (48 horas) sendo os aquecedores desligados e o sistema estaca/solo resfriado naturalmente. Para os ensaios em areia saturada, foi realizada a fase de aquecimento com duração de 4 dias (96 horas), e o resfriamento foi executado apenas para as estacas de concreto (P4) e para a estaca metálica preenchida com água (P5), com duração de 2 dias (48 horas).

Os tempos de carregamento térmico e resfriamento foram adotados com base no tempo geralmente recomendado para execução do ensaio TRT, que varia entre 30 e 60 h (Laloui e Loria, 2019), de modo que a transmissão de calor entre o fluido aquecido nos tubos e a areia no entorno da estaca atingisse o estado estacionário (*steady state*).

Os primeiros testes foram realizados em sala não climatizada. Porém, devido à limitação da temperatura máxima dos aquecedores utilizados ($\sim 32^{\circ}\text{C}$) e as elevadas temperaturas ambiente atingidas durante os testes, optou-se por transferir o equipamento de ensaio para sala climatizada com ar condicionado, sendo necessário repetir os primeiros testes efetuados. Durante os ensaios, a temperatura da sala foi mantida constante ($\sim 23^{\circ}\text{C}$).

Para leitura dos sensores PT 100 e aquisição automática dos dados de temperatura ao longo do ensaio, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, o ADS 2000IP, da marca Lynx Tecnologia. Este sistema é formado por duas placas condicionadoras de sinais, uma do tipo AI 2160, com 16 canais de entrada, e outra AI 2161, com 8 canais de entrada, e também por uma placa controladora composta por conversor A/D. A taxa de aquisição utilizada nos ensaios foi de 0,5 Hz, com 1 leitura a cada 2 segundos.

O controlador ADS 2000 utiliza um circuito interno projetado para diversas aplicações como, por exemplo, leitura de circuitos em $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ de ponte com *strain gauges*, PT 100, acelerômetros piezoelétricos e piezoresistivos, célula de carga, torque e pressão. Para cada tipo de sensor analisado, é necessário configurar a placa condicionadora.

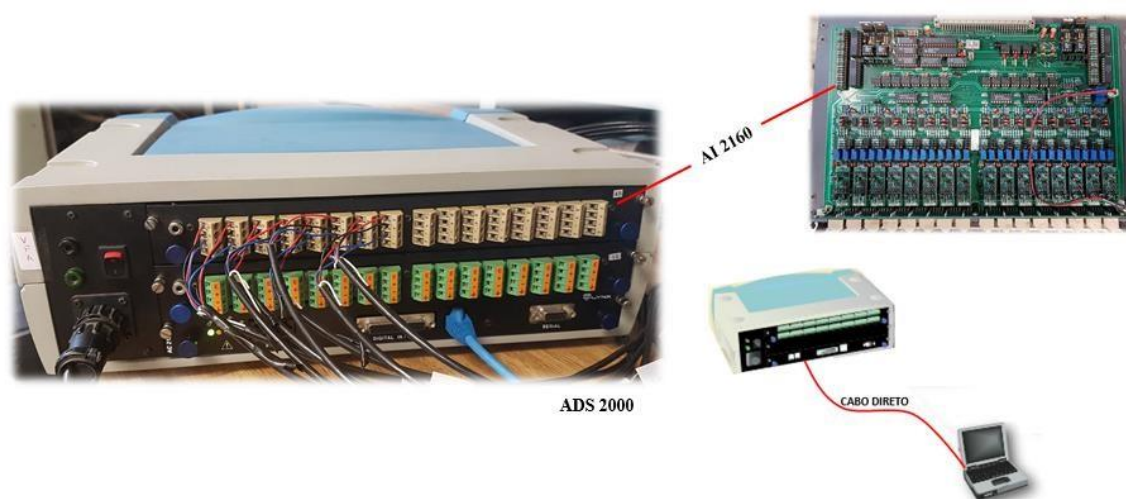
Neste ensaio, a placa utilizada foi a AI 2160 sendo necessário configurar cada um dos canais de entrada por meio de *jumpers*, ligados de forma a permitir a leitura de sensores termoresistivos do tipo PT 100. Na placa condicionadora também foi configurado o ganho para 600, utilizando *jumpers*, definido de acordo com a faixa de temperatura lida pelos sensores durante o ensaio.

Para alimentar os sensores, é necessário configurar a tensão desejada, sendo adotada uma tensão de 5,0 V para os ensaios. Na

Figura 3.17 estão apresentados o sistema de aquisição ADS 2000 e a placa AI 2160 utilizados.

Para coleta e análise dos dados, foram utilizados respectivamente os softwares *Aqdados* e *AqAnalysis*, ambos fornecidos pela empresa Lynx, na versão 7.0. O controlador do ADS 2000 é conectado ao computador por meio de um cabo de rede e uma *hardkey* com interface paralela (usada para impressora) para permitir o acesso ao software de aquisição e análise dos dados.

Figura 3. 17- Sistema de aquisição de dados- ADS 2000



Fonte: Autora

Os sensores PT 100 utilizados seguem a Norma DIN EN 60 751, que referencia valores de resistência elétrica (Ω) com temperatura ($^{\circ}\text{C}$). A calibração dos canais para a leitura dos sensores de temperatura foi realizada por meio de “calibração por resistência”. Para isto, a Lynx forneceu um jogo com dois calibres montados e prontos para uso, ilustrados na Figura 3.18, considerando um intervalo de temperaturas que abrangesse os valores que seriam medidos durante o ensaio.

Um deles possui resistência de 105 Ω , correspondente à uma temperatura de 13 $^{\circ}\text{C}$, e o outro possui resistência de 120 Ω , correspondente à uma temperatura de 51 $^{\circ}\text{C}$. Após realizar as configurações necessárias na placa, escolher o tipo de sensor instalado e selecionar a unidade de medida de temperatura, foi feita a calibração de cada canal do sistema de aquisição no programa *Aqdados*, pela opção de calibração por regressão linear.

Figura 3. 18- Resistências usadas para calibração do PT100



Fonte: Autora

O menu *Aferir* do programa *Aqdados* possui os comandos de auxílio para a determinação dos limites de fundo de escala do canal de entrada analógica selecionado. O comando *Aferição por regressão linear* foi escolhido, sendo removida a calibração existente, e em seguida, foi conectada a resistência de menor valor na entrada do canal a ser calibrado, de forma semelhante à montagem do PT 100. No valor de engenharia foi inserida a resistência conhecida em ohm, e após clicar no botão “ler A/D” foi determinada a tensão (V), para a resistência inserida, sendo um dos limites da regressão, como ilustrado na Figura 3.19. O mesmo foi feito para a resistência de maior valor, determinando-se o limite superior da regressão.

Figura 3. 19- Tela do Aqdados para calibração por regressão linear



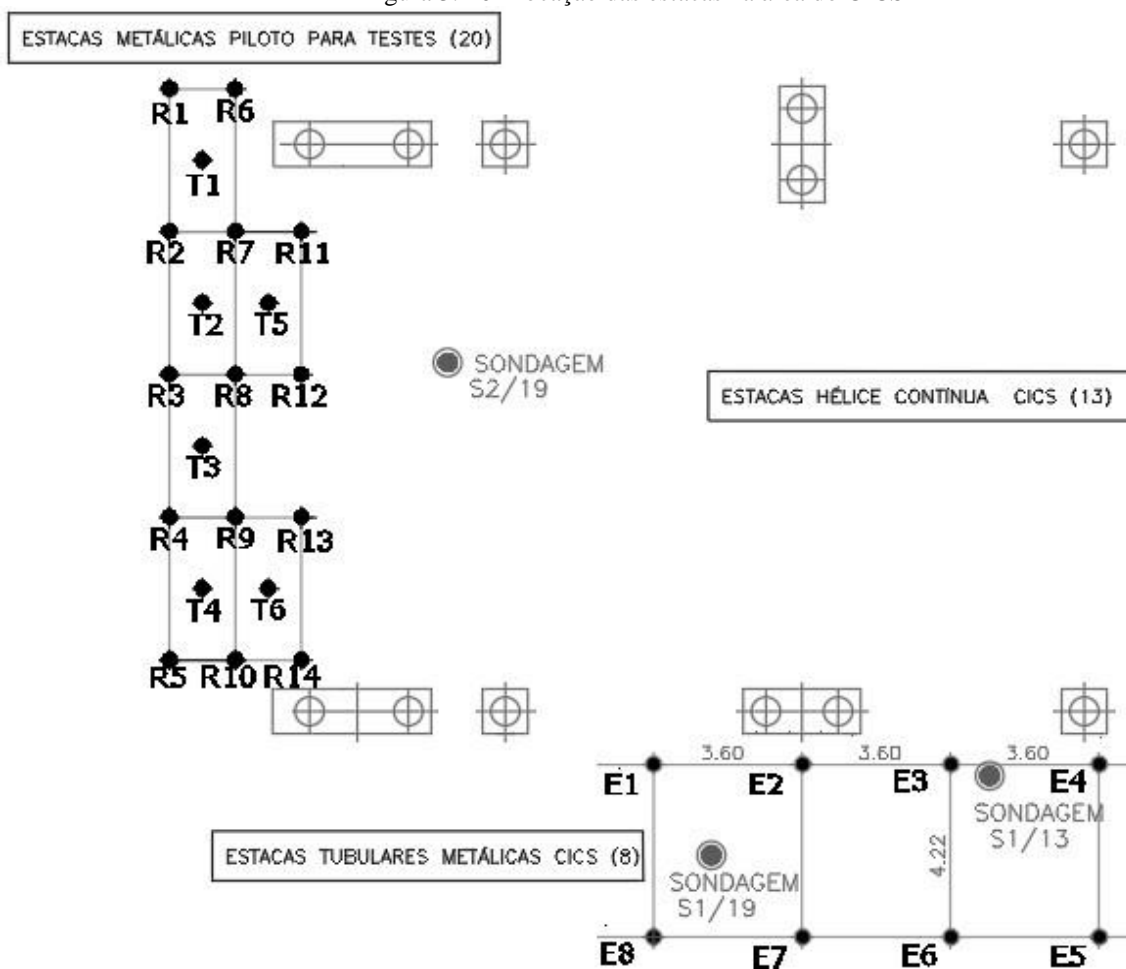
Fonte: Autora

3.4. FUNDAÇÕES EM ESTACAS TROCADORAS DE CALOR DO CICS

3.4.1. Projeto estrutural e instalação das estacas

O projeto estrutural das fundações dos novos módulos do CICS é composto por estacas do tipo hélice contínua e estacas tubulares metálicas, conforme indicado na Figura 3.20. No total foram 12 estacas do tipo hélice contínua, com diâmetro de 70 cm e comprimento de variando entre 15 e 16 m e 8 estacas do tipo tubulares metálicas, com diâmetro externo de 24,4 cm, espessura de 10 mm e comprimento de 20 m.

Figura 3. 20- Localização das estacas na área do CICS



Fonte: Autora

No terreno do CICS, próximo às estacas do prédio, foram instaladas 20 estacas piloto para a realização de ensaios de carregamento mecânicos e térmicos, sendo a localização destas estacas teste apresentada na Figura 3.20. Todas as estacas foram cravadas no terreno do CICS por um bate estaca hidráulico sobre esteira, com martelo de 5 toneladas modelo CZM EM 5000 HH, fornecido pela empresa Stack Engenharia (Figura 3.21). O equipamento permite o controle da altura de queda do martelo durante a cravação.

Figura 3. 21- Equipamento tipo bate estaca usado para cravação das estacas metálicas do CICS



Fonte: Autora

Figura 3. 22 – Solda com eletrodo revestido utilizada na emenda dos tubos metálicos



Fonte: Autora com imagem adaptada do manual técnico Estacas Tubulares Tuper com Conexão Rápida (2020)

Os tubos fornecidos pela TUPER tinham comprimentos de 12 e 6 m. As 8 estacas do prédio do CICS (E1 – E8) foram cravadas até atingir os 20 m de profundidade com ponta fechada para que em toda a extensão da estaca pudesse ser instalado o sistema de geotermia. Para todas as estacas foi utilizada a mesma sequência de tubos para a cravação, sendo: o primeiro tubo com 12,08 m (ponta fechada), o segundo tubo com 2,00 m e o terceiro com 6,02 m. A emenda dos tubos foi feita com solda eletrodo

revestido e 3 talas metálicas diametralmente espaçadas, conforme apresentado na Figura 3.22. A seleção dos tubos para cravação foi feita de acordo com a disponibilidade dos tubos e de modo que a emenda entre os tubos não ficasse próxima à superfície do terreno.

Também fez parte do escopo desta pesquisa, devido a parceria estabelecida entre a Universidade de São Paulo e a empresa TUPER, que forneceu todo o material destinado a execução e instrumentação das estacas metálicas, testar em campo o comportamento mecânico de uma nova proposta de emenda por luva de pressão interna desenvolvida recentemente pela empresa, de modo a agilizar o processo executivo das estacas, garantindo a integridade na transmissão dos esforços de compressão, eliminando a necessidade do equipamento de solda durante a cravação.

O sistema de emenda, apresentado na Figura 3.23, foi testado nas estacas piloto T3, T4 e T6 e as demais estacas foram emendadas com solda com eletrodo revestido e três talas conforme apresentado na Figura 3.22. Para instalação das luvas de conexão rápida em campo primeiramente deve ser feito o posicionamento e alinhamento da mesma no topo da estaca, em seguida, o acoplamento entre os tubos é feito pelo próprio martelo vibratório utilizado para cravação. Em campo foi observado para as estacas testadas que com menos de 5 golpes as bordas da estaca já estavam praticamente conectadas, conforme apresentado na Figura 3.23 C.

Figura 3. 23- Luva de conexão rápida para emenda das estacas tubulares (A- Imagem das Luvas e apresentação do mecanismo de funcionamento, B – posição inicial em campo e C – posição final em campo)



Fonte: Autora com imagem adaptada do manual técnico Estacas Tubulares Tuper com Conexão Rápida (2020)

Para analisar o desempenho das estacas com o novo tipo de emenda foram realizados ensaios de prova de carga dinâmica com energia crescente durante a cravação nas estacas e ensaios de prova de carga estática nas estacas emendadas com a luva e com a solda (tradicionalmente utilizada), de modo que os resultados pudessem ser comparados.

Destas 20 estacas piloto, 6 foram ensaiadas por meio de provas de carga estática (estacas T1 a T6) e 14 foram instaladas para compor o sistema de reação dos ensaios (R1 a R14). Dois tipos de estacas foram ensaiados: (1) estacas tubulares fabricadas pela Tuper S/A com diâmetro de 244 mm e 339 mm (estacas T2 a T6) e (2) perfil metálico HP 310 x 93 (estaca T1) que possui a mesma quantidade de aço por metro que a estacas T2 e T3. Na Tabela 3.5 são apresentados os dados das estacas metálicas piloto para testes instaladas no CICS.

Como o foco desta tese é uso de estacas tubulares trocadoras de calor no prédio do CICS, serão apresentados respectivamente no item 3.4 e capítulo 5 deste trabalho a montagem dos ensaios de prova de carga e os resultados obtidos para as estacas 244 mm com ponta fechada. Porém, outras análises realizadas com base nos resultados das provas de carga podem ser consultadas em Murari et al., (2022) e no manual técnico Estacas Tubulares Tuper com Conexão Rápida (2020).

Tabela 3. 5– Dados das estacas metálicas piloto do CICS

Estaca	Diâmetro externo (mm)	Ponta	Tipo de emenda	Comprimento cravado (m)	Comprimento de plug (embuchamento) (m)
R1	244	Aberta	Solda	24,50	13,50
R2	244	Aberta	Solda	23,65	10,65
R3	244	Aberta	Solda	22,90	8,30
R4	244	Aberta	Solda	24,50	10,17
R5	244	Fechada	Solda	22,75	0,00
R6	244	Aberta	Solda	24,50	14,20
R7	244	Aberta	Solda	24,72	9,65
R8	244	Aberta	Solda	24,76	13,29
R9	244	Aberta	Solda	24,80	12,71
R10	244	Fechada	Solda	22,81	0,00
R11	244	Aberta	Solda	23,15	12,13
R12	244	Aberta	Solda	23,00	12,40
R13	244	Aberta	Solda	23,40	14,10
R14	244	Fechada	Solda	23,00	0,00
T1	Perfil HP 310 X 93	-	Soldada	23,00	-
T2	339	Aberta	Soldada	23,00	13,00
T3	339	Fechada	Luva Tuper	17,95	0
T4	244	Aberta	Luva tuper	25,10	11,95
T5	244	Fechada	Soldada	23,00	0
T6	244	Fechada	Luva Tuper	23,50	0

Fonte: Autora

3.4.2. Projeto de estaca tubular metálica para uso de energia geotérmica superficial

Todas as estacas metálicas do CICS serão utilizadas como elementos trocadores de calor com o solo para fins de climatização de ambientes. Esta troca de calor é feita por meio da circulação de um fluido trocador, neste caso a água, que de acordo com a utilização do sistema pode ser aquecido ou resfriado pelo solo.

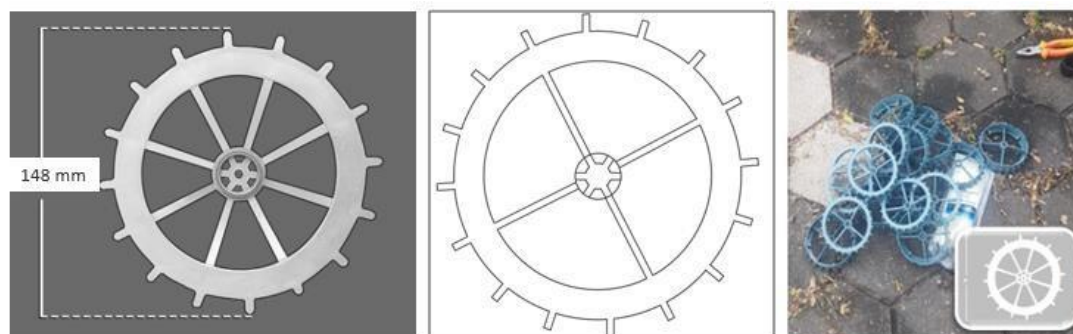
Para que o fluido possa circular pelas estacas são inseridos tubos no seu interior sendo geralmente utilizado o tubo de polietileno de alta densidade (PEAD). Antes da montagem das estacas em campo, protótipos de montagem foram testados até a definição do projeto final do sistema de geotermia das estacas. No caso das estacas

tubulares metálicas do CICS, por apresentar pequeno diâmetro, foi escolhida a configuração em U simples, com um único *loop*. O tubo PEAD adotado para o sistema foi o de 32 mm, com espessura de 3 mm seguindo as recomendações encontradas na literatura (Syntec, 2017; EN ISO 17628, 2015).

Como as estacas metálicas não possuem armadura, e os tubos de aço são emendados em campo, a opção seria a instalação do sistema de geotermia após a cravação da estaca. Para isto, era necessário um arranjo em que os tubos permanecessem espaçados ao longo da profundidade da estaca, e tivessem uma certa rigidez que permitisse a sua instalação de forma manual em de 20 m de profundidade.

Para isto, diversos espaçadores plásticos utilizados na construção civil foram doados pela Espaferro para testes. O espaçador que garantiu a maior rigidez e o maior espaçamento entre os tubos, de modo que os tubos ficassem mais próximos à parede da estaca, foi o modelo apresentado na Figura 3.24, com diâmetro externo de 148 mm.

Figura 3. 24-Espaçadores plástico adotado para montagem do sistema de geotermia das estacas metálicas



Fonte: adaptada <http://espaferro.com.br/espacador-gabarito-gabr/>

Algumas adaptações foram feitas buscando adequar o espaçador à finalidade proposta. Como o processo construtivo da estaca envolve primeiramente a sua cravação, em seguida a instalação dos tubos de geotermia e posteriormente o seu preenchimento, 4 hastes foram removidas para todos os espaçadores de modo a evitar que materiais pudessem ficar presos nas hastes durante o preenchimento, conforme indicado na Figura 3.24. Os espaçadores foram colocados com abraçadeiras plásticas a cada 30 cm como ilustrado na Figura 3.25.

Para montagem do *loop* foram utilizados dois adaptadores para tubo PEAD com diâmetro de 32 mm e saída roscável, dois cotovelos e um toco em PVC da linha aquatherm, resistente a altas temperaturas Figura 3.25 A.

Figura 3. 25–Protótipo da estaca trocadora de calor A –em laboratório e B- em campo



Fonte: Autora

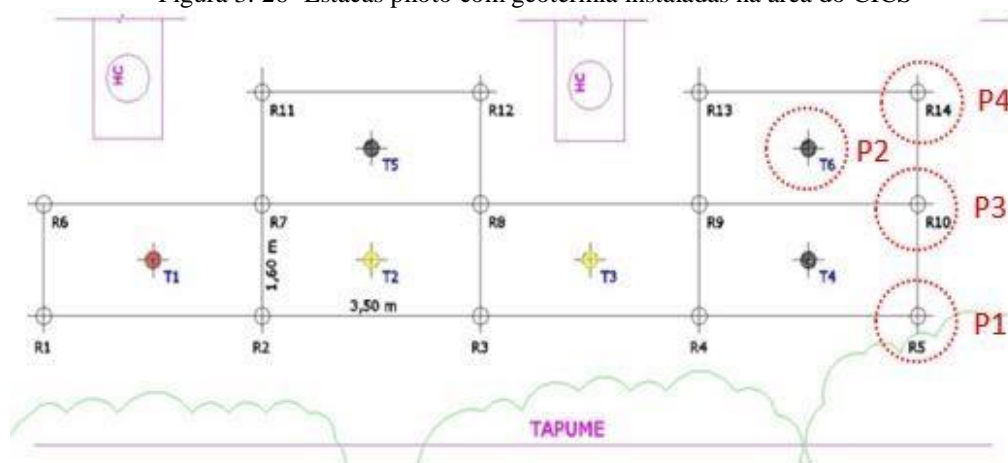
Além disso, para instalação dos sensores nas estacas alguns testes de montagem foram feitos em laboratório optando-se pela instalação de uma barra central de 10 mm, sendo necessário perfurar o centro dos espaçadores. Após as definições em laboratório, um protótipo da montagem com a barra para instrumentação foi testado em campo, conforme ilustrado na Figura 3.25 B. As nervuras das barras garantiram boa aderência aos espaçadores, de modo que a barra não se movimentasse no centro dos espaçadores

3.4.3. Montagem do sistema de geotermia e instrumentação das estacas em campo

3.4.3.1. Estacas Piloto

O sistema de geotermia das estacas metálicas foi montado com configuração em U simples, conforme protótipo apresentado, para ser instalado ao longo de toda a profundidade de quatro estacas piloto (P1, P2, P3 e P4) para testes, circuladas em vermelho na Figura 3.26.

Figura 3. 26- Estacas piloto com geotermia instaladas na área do CICS



Fonte: Autora

No caso das estacas tubulares metálicas é necessário preenche-las com algum material para melhorar o seu desempenho na troca de calor, uma vez que o ar não é um bom condutor térmico. Em campo, foram testados quatro preenchimentos diferentes nas estacas piloto (cravadas com ponta fechada), semelhantes aos testados inicialmente em laboratório, sendo: areia, argamassa com baixo teor de cimento, argamassa com fibras metálicas, e água. As características das estacas piloto e os materiais de preenchimento adotados para cada estaca são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3. 6- Estacas piloto com geotermia e materiais de preenchimento adotados

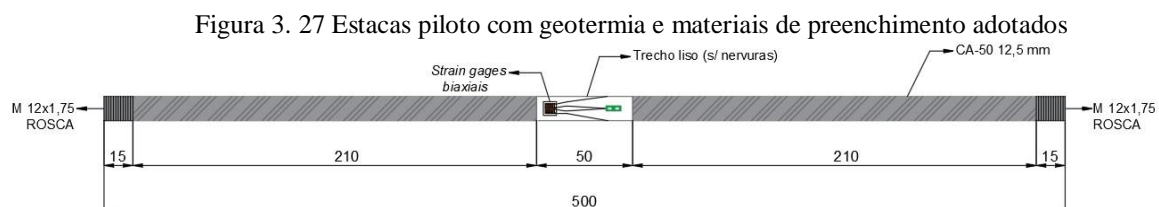
Estaca piloto	Ponta	Diâmetro (mm)	Profundidade (m)	Material de preenchimento
P1	Fechada	244	22,75	Areia
P2	Fechada	244	22,80	Argamassa e fibras metálicas
P3	Fechada	244	23,50	Argamassa
P4	Fechada	244	23,00	Água

Fonte: Autora

As estacas piloto foram instrumentadas com sensores de temperatura instalados ao longo da profundidade no centro da estaca. Os sensores utilizados são termoresistores PT100 da marca Salcas, com classe de leitura A e temperatura de trabalho de 0 a 100°C, com precisão de leitura de $\pm 0,15$ a 0°C e $\pm 0,35$ a 100°C.

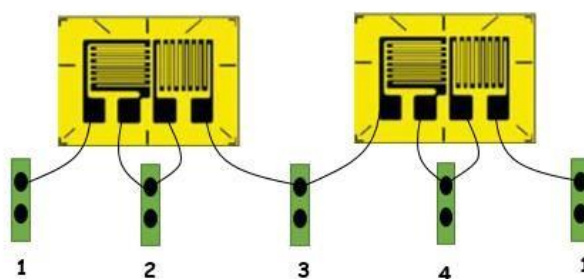
Para monitorar as tensões atuantes ao longo do comprimento da fundação, causadas tanto por carregamentos térmicos como mecânicos, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência *strain gauges* em barras previamente montada em

laboratório. As barras utilizadas para instrumentação são de aço CA-50 com 12,5 mm e comprimento de 500 mm. Os extensômetros utilizados são biaxiais (com dois elementos a 90°), fabricados pela empresa Excel Sensores, autocompensados para aço e com resistência de 350 Ω . No centro das barras foram removidas as ranhuras em um trecho de 50 mm, e a este trecho foi lixado com lixa grossa e fina de modo que a superfície ficasse completamente lisa para colar os sensores, Figura 3.27.



Antes da colagem dos sensores, o local foi previamente limpo com álcool isopropílico e gaze até remover toda impureza na superfície da barra. Em cada barra foram colados dois sensores biaxiais, diametralmente opostos, de modo que o circuito fosse ligado em ponte de Wheatstone (ponte completa) de modo que as deformações fossem medidas sem interferência da variação de temperatura das barras. O esquema de ligação dos sensores biaxiais em ponte completa é apresentado na Figura 3.28.

Figura 3.28– Configuração da ponte de wheatstone com os sensores biaxiais nas barras instrumentadas



Após a colagem dos sensores foi feita a impermeabilização com resina epóxi e os sensores foram calibrados para verificação do seu funcionamento após a colagem. Para isto foram realizados testes de tração nas barras utilizando-se macaco hidráulico, cilindro metálico, célula de carga, sistema de aquisição de dados, conforme ilustrado na Figura 3.29.

Figura 3. 29– Montagem do ensaio de calibração das barras instrumentadas



Fonte: Autora

Depois de verificado que os sensores estavam funcionando corretamente foi necessário fazer uma proteção mecânica no local aonde os extensômetros foram colados. Para isto foi utilizado um molde de tubo de PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ com CAP colado na ponta de modo que passasse pela barra instrumentada. Os moldes foram preenchidos com resina ScotchcastMR para isolamento elétrico da marca 3M. A Figura 3.30 ilustra a proteção mecânica das barras sendo confeccionadas 20 barras no total.

Figura 3. 30– Proteção mecânica das barras instrumentadas com strain gauges



Fonte: Autora

Após a montagem dos sensores de instrumentação, as estruturas montadas com os tubos PEAD foram instaladas nas quatro estacas piloto até atingir o fundo das estacas. Apesar do longo comprimento da estrutura, foi possível que a instalação do sistema fosse feita manualmente dentro das estacas, conforme apresentado na Figura 3. 31. Conforme

ilustrado na Figura, os tubos PEAD ficaram bem próximos da parede do tubo das estacas.

Figura 3. 31-Instalação dos tubos de geotermia nas estacas metálicas



Fonte: Autora

O preenchimento das estacas foi feito logo após a instalação dos tubos de geotermia. A Figura 3.32 ilustra os materiais utilizados para o preenchimento das quatro estacas piloto. A estaca R05 foi preenchida com areia grossa composta principalmente por quartzo, sendo posteriormente saturada após a sua instalação. O preenchimento da estaca P2 foi feito com argamassa usinada, fornecida pela Intercement. O traço da argamassa é apresentado na Tabela 3.7.

Figura 3. 32- Preenchimentos das estacas piloto com diferentes materiais
(1-areia, 2- fibras metálicas adicionadas à argamassa usinada, 3- argamassa usinada e 4- água)



Fonte: Autora

Tabela 3. 7– Traço da argamassa para o volume de 1m³

Material	Quantidade
Cimento CPV-ARI-RS	200 kg
Areia Fina	973 kg
Areia Industrial	654 kg
Masterpolyheed 30W	1,4 Litros
Água	300 Litros

Fonte: Dados da Nota Fiscal emitida pela Intercement

Para a estaca R10, foi utilizada a mesma argamassa da estaca P2, porém foram adicionadas 30 kg de fibra de aço da marca Dramix com diâmetro de 0,62 mm e comprimento de 30 mm para cada 1m³ de argamassa, ilustrada na Figura 3.6, sendo a mesma fibra de aço utilizada nos modelos físicos em laboratório

Os sensores de temperatura e tensão axial foram instalados em barra de aço CA-50 de 12,5 mm instalada no centro dos espaçadores. As posições dos sensores nas estacas piloto foram definidas com base nos dados de estratigrafia do terreno obtidos nas sondagens SPT. Os sensores foram distribuídos ao longo da estaca em diferentes camadas de modo que fosse possível analisar os efeitos da variação de condutividade térmica de cada camada do solo e os efeitos da temperatura ao longo das estacas. As principais camadas do terreno estão a 3,5 m composta por argila mole, a 9,5 m areia mais permeável, a 17,5m lente de argila, e na Figura 3.35 são apresentados os níveis aonde foram instalados os sensores de temperatura e tensão axial ao longo das estacas piloto.

Todas as estacas ensaiadas foram instrumentadas com sensores de temperatura ao longo da profundidade, fixados em uma barra central com abraçadeiras plásticas conforme apresentado na Figura 3.33. Na estaca preenchida com água foi inserida uma barra CA-50 de 12,5 mm adicional em uma das extremidades do espaçador, radialmente espaçada da barra central, para instalação dos sensores de temperatura mais próximos à parede da estaca. Os sensores próximos à parede da estaca foram adicionados para possibilitar a análise das correntes de convecção geradas devido ao gradiente de temperatura da água dentro da estaca. Na Figura 3.34 é apresentada a montagem dos sensores para a estaca preenchida com água.

Figura 3.33 – Instalação dos sensores nas estacas piloto do CICS



Fonte: Autora

Figura 3.34- Instalação dos sensores nas estacas preenchida com água



Fonte: Autora

As barras instrumentadas com sensores de tensão foram instaladas na estaca preenchida com argamassa P2 por ser o material de preenchimento adotado nas estacas do prédio do CICS (E1-E8). As barras instrumentadas com *strain gauges* foram instaladas nos mesmos níveis dos sensores de temperatura e de acordo com a variação da estratigrafia do terreno. Além destes sensores, para maior aprofundamento do comportamento desta estaca, na seção a 12,5 m que corresponde meio da estaca foram instalados sensores de temperatura na borda e nos tubos de circulação do fluido trocador de calor conforme indicado na Figura 3.35.

Figura 3. 35– Posição dos sensores ao longo das estacas e estratigrafia do terreno do CICS

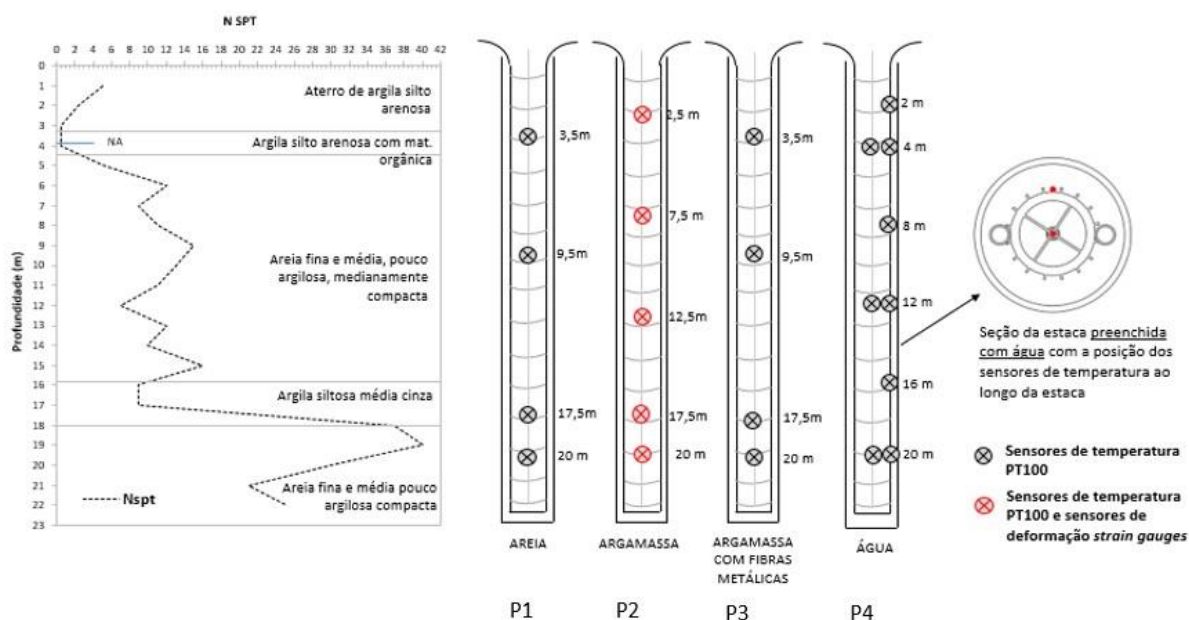
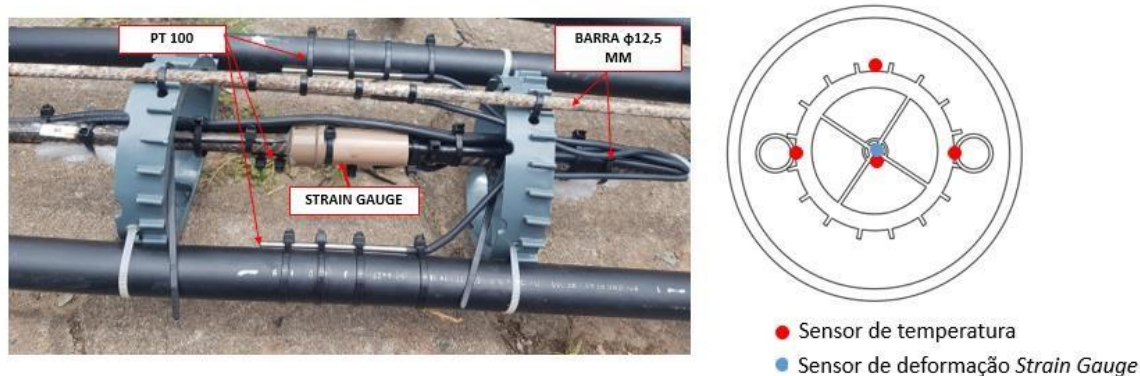


Figura 3. 36– Seção da estaca preenchida com argamassa à 12,5 m de profundidade instrumentada com sensores de temperatura e deformação



3.4.3.2. Estacas da fundação do prédio do CICS

Para as 8 estacas tubulares metálicas do edifício CICS (E1 – E8), cravadas à percussão com ponta fechada até a profundidade de 20 m, foram montados os tubos de geotermia em configuração U simples, conforme protótipo, para ser inseridos ao longo de toda a profundidade das estacas.

O projeto do CICS prevê a instrumentação de todas as estacas do prédio ao longo da profundidade com sensores de temperatura PT 100 de modo que haja pelo menos um sensor nas diferentes camadas de solo. As profundidades definidas para os sensores são:

a 3,5 m (camada de argila orgânica), 9,5 m (camada de areia) e 17,5 m (lente de argila entre as camadas de areia).

As estacas E8 e E2 serão instrumentadas ao longo da profundidade com barras instrumentadas com *strain gauges* às profundidades de 2,5 m, 7,5m, 12,5 m e 20 m. A instrumentação da estaca E2 foi escolhida por estar em uma região aonde haverá a interferência do bloco de estacas das estacas hélice contínua, sendo a posição mais desfavorável para as estacas metálicas aonde haverá esforços axiais adicionais na estaca devido ao efeito do carregamento térmico. Já a estaca E8 foi escolhida por estar mais distante das demais estacas, sendo a sua posição mais favorável à troca de calor com o solo.

O preenchimento das estacas do prédio do CICS será efetuado com argamassa. Todo o sistema de geotermia das estacas e as barras instrumentadas com strain gauge foram montadas. Porém, devido às restrições da pandemia, a obra foi paralisada interrompendo a finalização da montagem e preenchimento das estacas metálicas do prédio do CICS.

3.5. ENSAIOS NAS FUNDAÇÕES POR ESTACAS METÁLICAS DO CICS

3.5.1. Ensaios Mecânicos

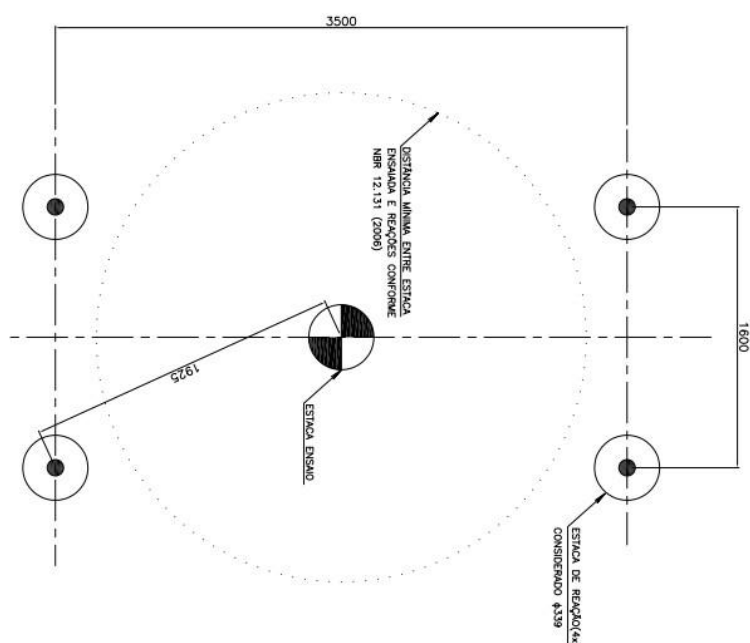
Na estaca P2 foi realizada primeiramente uma prova de carga estática (PCE) não instrumentada para analisar o comportamento carga x deslocamento da fundação. A estaca possui as mesmas características das estacas do prédio do CICS, com diâmetro de 244 mm, cravada com ponta fechada, e preenchimento com argamassa.

O ensaio foi executado até a carga máxima de 2750 kN, sendo adotada como 1,65 vezes a carga admissível de catálogo da estaca, que corresponde a tensão de escoamento do aço das estacas tubulares. Este ensaio foi executado logo após a instalação da estaca, portanto sem o preenchimento com argamassa e sem instrumentação.

O sistema de reação do ensaio foi executado por meio de vigas fixadas em estacas de reação. Quatro estacas tubulares metálicas, com diâmetro externo de 244 mm, foram utilizadas como reação dos ensaios. A estaca ensaiada foi centralizada entre as estacas de reação, conforme indicado na planta de locação apresentada na Figura 3.37.

Quatro barras de ancoragem modelo DW ST 95/105 40 mm da empresa Protendidos Dywidag foram utilizadas para conexão das vigas às estacas de reação para aplicação de cargas no ensaio. A conexão entre as barras de ancoragem e as estacas de reação foi realizada por meio de um sistema composto por 10 barras roscadas (aço SAE 1045 - ϕ 345 X 2.1/2") soldadas em cada estaca e uma chapa de aço com 340 mm de diâmetro presa à estaca por 10 porcas, conforme apresentado na Figura 3.38. Nesta chapa de aço foi instalada a barra Dywidag utilizando 2 porcas sextavadas DW 40 70 x 120 MM da Protendidos Dywidag. A capacidade de carga do sistema de reação do ensaio foi calculada para suportar ensaios de prova de carga com carregamentos de até 5000 kN.

Figura 3. 37– Planta com locação das estacas metálicas para os ensaios de prova de carga estática



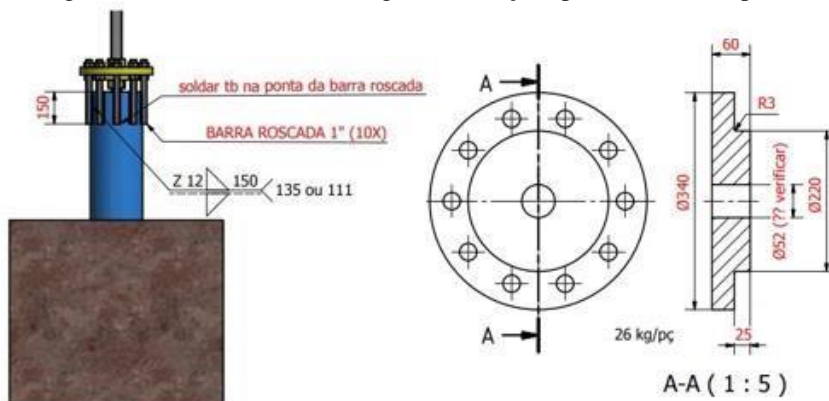
Fonte: autora

Para aplicação de carga foi utilizado o conjunto macaco hidráulico (Potenmaq) e bomba hidráulica elétrica com capacidade para 5000 kN. Uma célula de carga com capacidade de 5000 kN foi utilizada para medir a carga aplicada durante no topo da estaca durante o ensaio. Quatro lvdt's indutivos da marca Kyowa Eletronic Instruments (modelo DLT-50AS e capacidade de 50 mm) foram fixados por bases magnéticas da empresa Mitutoyo em um perfil I com 4,5 m de comprimento usado como viga de referência para monitorar o deslocamento do topo da estaca durante o ensaio.

A célula de carga foi previamente calibrada em laboratório do IPT até a capacidade máxima de 5000 kN. Os LVDTs também foram calibrados antes dos ensaios de prova de carga.

As medidas de carga aplicada e deslocamento da cabeça da estaca foram registradas pela célula de carga e por quatro lvdts. Esses valores foram registrados pelo sistema de aquisição de dados modelo PMX 455 da HBM. Os valores de deslocamento apresentados nos resultados das provas de carga foram obtidos pela média dos valores medidos pelos quatro lvdts.

Figura 3. 38- Sistema de ancoragem das reações para o ensaio de prova de carga estática



Fonte: Adaptada do projeto para estacas de reação desenvolvido pela Tuper

Figura 3. 39– Montagem do ensaio e equipamentos utilizados na prova de carga estática



Fonte: Autora

O ensaio foi executado de acordo com a norma NBR 12131/2006, obedecendo os critérios de carregamento, descarregamento e estabilização dos recalques. Porém, ao finalizar o estágio de carregamento, a carga não foi mantida por 12 horas como especificado nesta norma.

O carregamento da estaca foi conduzido em 10 estágios iguais e sucessivos, sendo a carga mantida até atingir a estabilização dos recalques, de modo que a diferença entre as últimas leituras de deslocamento seja igual ou inferior a 5% do deslocamento obtido no estágio. Logo após a estabilização dos recalques no último estágio de carregamento, foi iniciado o descarregamento da estaca em 4 estágios iguais e sucessivos.

Com base nos dados obtidos neste ensaio foi determinada a curva carga x recalque para se estimar a carga máxima de ruptura (ELU).

3.5.2. Ensaio térmico (Thermal Response Test)

O ensaio de resposta térmica TRT foi utilizado nesta pesquisa para avaliar qual dos 4 materiais de preenchimentos das estacas piloto em campo proporcionaria maior eficiência térmica para estacas tubulares trocadora de calor. Os testes foram executados nas estacas R5, R10, T6 e R14, instaladas com a ponta fechada e preenchidas com areia, argamassa com fibras metálicas, argamassa e água respectivamente. Os objetivos dos ensaios foram também determinar a condutividade térmica do solo, e avaliar a

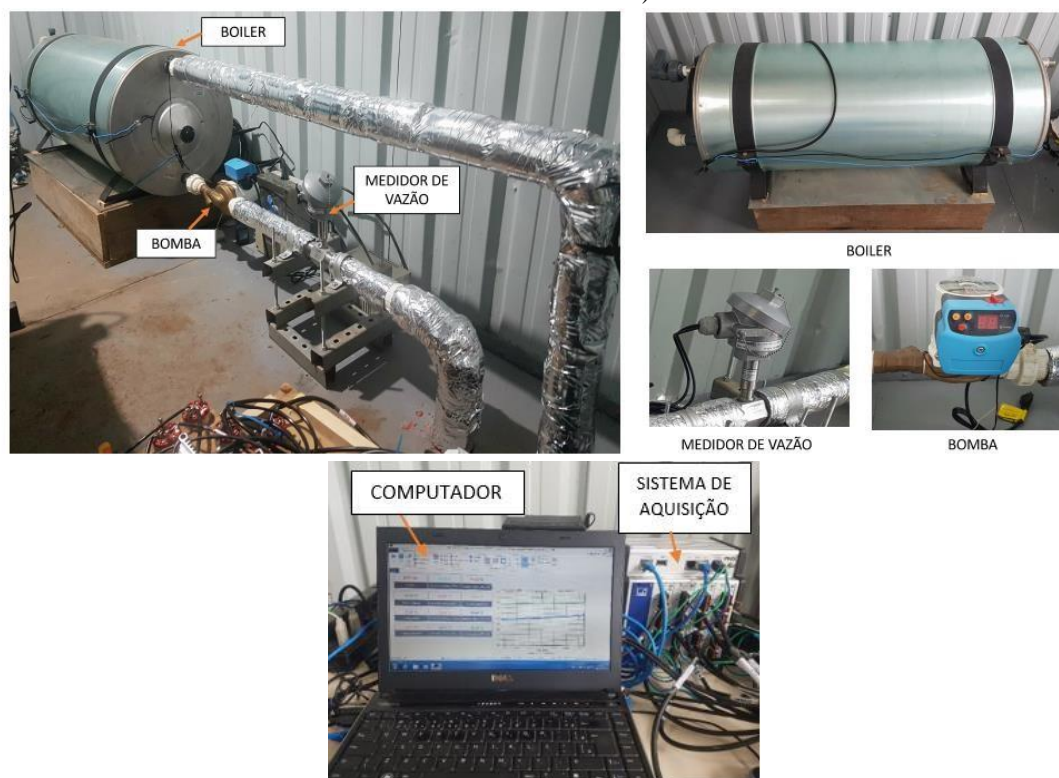
transferência de calor dos diferentes materiais de preenchimento por meio das resistências térmicas de cada estaca.

Como procedimento dos ensaios, foi aplicado um fluxo de calor constante, por meio da circulação de um fluido (água da rede) aquecido nos tubos PEAD no interior da estaca. Os equipamentos utilizados nos ensaios foram primeiramente montados por Bandeira Neto (2015), com adaptações realizadas posteriormente por Moraes (2019) de acordo com as recomendações técnicas apresentadas em CEN (2011) e CEN (2015).

Para os ensaios foi utilizado um boiler térmico com capacidade de armazenamento de 100 litros, uma minibomba modelo TP 40 Thermo G3 da marca Komeco de baixa vazão para circulação da água pelos tubos inseridos nas estacas. A vazão de circulação do fluido foi medida por meio de um medidor de vazão tipo turbina modelo SVTL 1”, produzido pela Contech. Três sensores de temperatura PT100 Classe A da marca Salcas, e um sistema de aquisição de dados modelo PMX, fabricado pela HBM, foram utilizados para leitura dos valores de temperatura e vazão durante o ensaio. A aquisição dos dados de temperatura e vazão durante o ensaio foram realizadas por meio o software CatmanEasy 4.5, também desenvolvido pela HBM. Na Figura 3.40 são apresentados os equipamentos usados nos ensaios.

O boiler usado como reservatório possui conexões para duas resistências elétricas independentes. Para o aquecimento da água foram utilizadas uma resistência de 1000 watts e uma de 500 W de forma a fornecer uma potência de aquecimento constante de 1500 watts (~ 75 W/m de estaca).

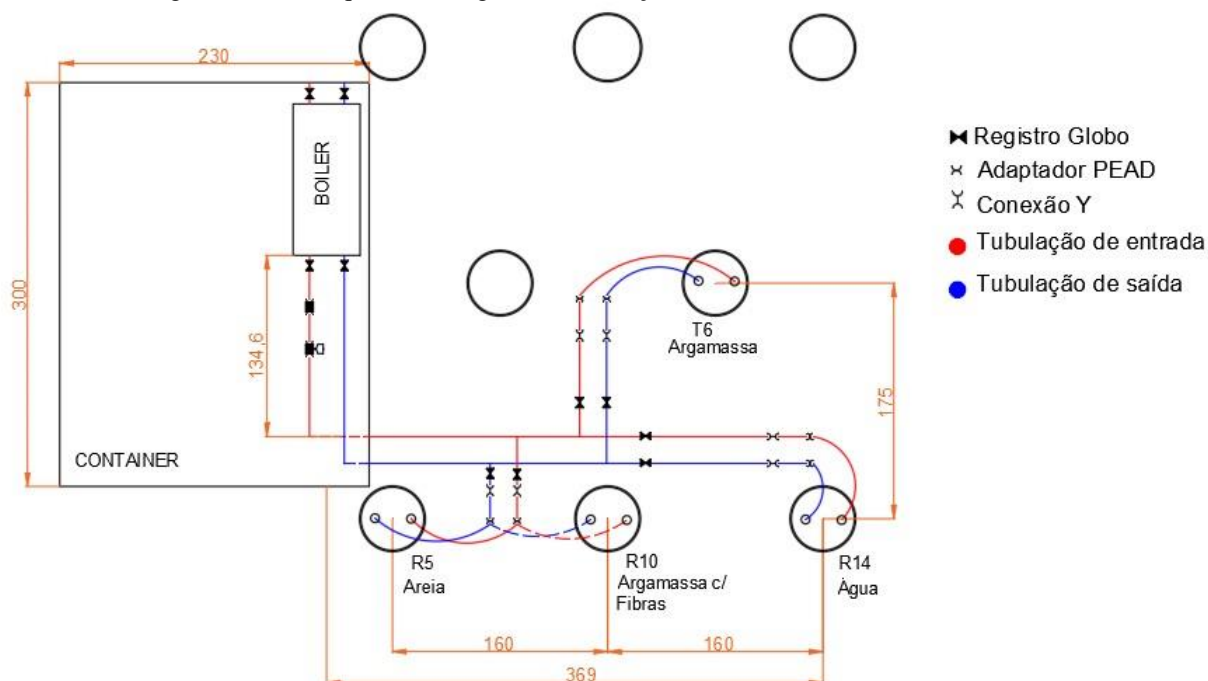
Figura 3. 40– Equipamentos usados no ensaio TRT (boiler, bomba, medidor de vazão e sistema de aquisição de dados PMX)



Fonte: Autora

Os equipamentos foram instalados dentro de um container acomodado próximo às estacas, e foram montadas as tubulações para interligar o reservatório térmico aos tubos de PEAD das estacas. O croqui com a montagem das tubulações de entrada e saída do fluido circulante em cada estaca ensaiada é apresentado na Figura 3.41. A estaca mais distante do reservatório de água é a R14, preenchida com água, sendo extensão da tubulação de 4,6 m de comprimento.

Figura 3. 41– Croqui da montagem das tubulações de entrada e saída do fluido circulante



Fonte: Autora

A tubulação para circulação do fluido trocador de calor foi isolada termicamente para evitar que houvesse influência dos efeitos da variação da temperatura ambiente e radiação solar nos resultados do ensaio. Para o isolamento térmico dos tubos foi utilizada primeiramente uma camada com lã de vidro. Em seguida, foi instalado um tubo isolante elastomérico com 19 mm de espessura, e fita aluminizada para refletir a radiação solar. A Figura 3.42 ilustra as fases construtivas para o isolamento térmico das tubulações.

A bomba usada para circulação da água possui três potências de operação sendo que as vazões medidas para as três potências variaram de 10 l/min, 19 l/min e 25 l/min. A bomba foi mantida na posição 1 durante os ensaios, com vazão de circulação de aproximadamente ~9 a 10 l/min.

Durante o ensaio é importante que a o fluxo de água seja mantido em regime turbulento de modo a aumentar o coeficiente de troca térmica. A vazão mínima calculada para que o fluido entre em regime turbulento foi de 2,62 l/min, portanto a vazão do fluido nos ensaios deverá ser superior a este valor calculado. Porém, quanto menor for a vazão dentro desta faixa, maior será a variação da temperatura de entrada e saída do fluido dentro da estaca. Por este motivo, foi adotada a menor vazão de circulação do fluido permitida pela bomba.

Figura 3. 42- Revestimento usado para o isolamento térmico das tubulações



Fonte: Autora

Para medir a temperatura do fluido na tubulação foram usados dois sensores de temperatura PT100 instalados na entrada e na saída da estaca. Para isto uma conexão do tipo Y (TÊ a 45°) foi colocada na entrada e saída dos tubos PEAD das estacas, de forma que a ponta dos sensores tivesse contato com a água. Para vedar o sensor foi confeccionado um adaptador em PVC com rosca semelhante à do sensor, de modo que os sensores fossem instalados sem que houvesse vazamentos e influência da temperatura ambiente. A temperatura ambiente também foi monitorada durante o ensaio por sensor de temperatura PT100 instalado na parte externa do container.

A fase de aquecimento dos ensaios teve duração mínima de 72h (3 dias) de forma a garantir que o estado estacionário de transferência de calor entre o fluido, estaca e o solo fosse atingido. Também foi monitorada a fase de resfriamento natural da estaca, chamada de *recovery*, em que a circulação do fluido é mantida, porém o aquecimento por meio das resistências térmicas é desligado. A grande vantagem desta fase é a determinação da condutividade térmica do solo sem a influência da variação da taxa de calor.

Na Tabela 3.8 são apresentadas as durações e as fases de cada um dos 4 ensaios executados. Para o ensaio na estaca R10, preenchida com argamassa e fibras metálicas, houve um problema no sensor de temperatura de saída da estaca e optou-se por continuar o ensaio e estender a fase de aquecimento por um período mais longo de 90 horas. Neste ensaio, o tempo da fase de resfriamento foi mais curto, mantida por 24 horas. Para o

ensaio na estaca R14 preenchida com água, não foi realizada a fase de resfriamento da estaca, somente a de aquecimento.

Tabela 3.8- Duração e fases dos ensaios TRT nas estacas piloto

Estaca	Preenchimento	Data do ensaio	Vazão média (l/min)	Aquecimento (h)	Recovery (h)
P1	Areia	17 dez 2019	10,51	72	48
P2	Argamassa e fibras metálicas	02 jan 2020	9,35	90	24
P3	Argamassa	08 out 2020	9,84	72	48
P4	Água	14 out 2020	10,03	72	-

Fonte: Autora

Antes de iniciar o ensaio foi determinada a temperatura média do solo pela média das temperaturas dos sensores instalados ao longo das estacas. Também foi feita a circulação do fluido no interior da estaca por aproximadamente 1 hora de modo que a temperatura do fluido entrasse em equilíbrio com o solo, atingindo valores próximos à temperatura média dos sensores nas estacas.

Vale ressaltar neste trabalho as principais dificuldades enfrentadas na realização dos ensaios:

- Quedas de energia para manutenção de rede elétrica da universidade interromperam dois ensaios em andamento que tiveram que ser refeitos;
- Interferência da temperatura ambiente nos sensores de temperatura de entrada e saída do fluido;
- Nos intervalos entre os ensaios ocorreram problemas nos equipamentos principalmente nas resistências do boiler e no medidor de vazão;
- Alguns sensores apresentaram problemas devido à longa exposição das fiações ao ambiente externo, ou falhas na instalação;
- Situação de pandemia no país que dificultou a realização dos ensaios e a utilização dos laboratórios para caracterização mais detalhada dos materiais de preenchimento das estacas.

Alguns dos problemas apresentados como influência da temperatura ambiente e queda de energia impactaram nos resultados obtidos e alguns dos ensaios tiveram que ser refeitos.

3.5.3. Ensaio termomecânico

Como as fundações por estacas trocadoras de calor possuem a dupla função de suportar as cargas do prédio e realizar as trocas térmicas com o solo, é imprescindível o conhecimento das interferências do carregamento térmico no comportamento mecânico das fundações. Para isto, foi realizado um ensaio termomecânico em campo na estaca T6 preenchida com argamassa. Esta estaca foi escolhida por ter o mesmo preenchimento das estacas do prédio do CICS.

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram os mesmos das provas de carga estáticas (PCE) e dos ensaios de troca térmica TRT. Com as vigas, sistema de reação e conjunto macaco-bomba e utilizando o mesmo sistema de aquecimento e monitoramento do ensaio TRT, foi montado o ensaio termomecânico conforme ilustrado na Figura 3.43.

O procedimento de execução do ensaio consistiu na execução de uma prova de carga estática com carregamento até a carga de serviço. Após a estabilização dos recalques, iniciou-se o carregamento térmico da estaca com taxa de aquecimento constante do fluido trocador de calor.

A estaca foi carregada até a carga de serviço (ELS) definida como 1220 kN (0,45 vezes a carga de ruptura). O carregamento foi feito em 5 estágios de 244 toneladas, até atingir 1220 kN, seguindo os critérios de estabilização dos recalques previstos na norma NBR12131/2006. Após a estabilização, a carga foi mantida constante e iniciou-se o aquecimento da estaca por um período de 24 horas de modo que a temperatura de entrada atingisse o valor de 35°C que é aproximadamente a temperatura de entrada do fluido nas estacas prevista para o prédio do CICS.

As tensões axiais adicionais geradas devido ao aquecimento da estaca carregada mecanicamente foram analisadas em seis níveis diferentes (referência – sem contato com o solo, 2,5 m, 7,5m, 12,5m, 17,5m e 20m) por meio das barras instrumentadas com *strain gauges* inseridas na estaca. Finalizada a fase de aquecimento de 24 horas, o aquecedor foi desligado e iniciou-se a fase de resfriamento natural mantendo-se a circulação de água e as cargas de serviços atuantes no topo da estaca por 20 horas.

Na fase de resfriamento foi observada a variação das tensões axiais ao longo da profundidade e o deslocamento do topo da estaca. O ensaio teve duração total de 48,5 horas sendo necessário o monitoramento contínuo e acionamento da bomba do macaco

hidráulico para que a carga de serviço fosse mantida constante no topo da estaca. Neste ensaio pretende-se simular o carregamento de serviço do edifício, por isso a carga foi mantida constante. A Tabela 3.9 resume as principais informações do ensaio termomecânico.

Após a finalização do ensaio termomecânico, a estaca foi descarregada em 4 estágios iguais e sucessivos semelhante ao procedimento utilizados nas provas de carga estáticas, seguindo os critérios da NBR 12131/2006.

Tabela 3. 9- Dados do ensaio termomecânico

Estaca	Preenchimento	Data do ensaio	Carga (kN)	Vazão média (l/min)	Aquecimento (h)	Recovery (h)
T6	Argamassa	08 jan 2020	1225	10,34	24	20

Fonte: Autora

Figura 3. 43- Montagem do ensaio termomecânico na estaca T6



Fonte: Autora

3.6. MODELAGEM NUMÉRICA DOS ENSAIOS TRT

Nesta pesquisa foram desenvolvidos modelos numéricos usando o software COMSOL *Multiphysics* (Versão 5.4) para melhor compreensão da transferência de calor entre as fundações por estacas trocadoras de calor preenchidas com diferentes materiais e o solo. Os modelos numéricos foram calibrados com os resultados dos ensaios de troca térmica TRT executados em campo.

Para as estacas preenchidas com areia, argamassa e argamassa com fibras metálicas, foi desenvolvido um modelo em 2D que simula uma seção da estaca. Devido

ao efeito da convecção natural desenvolvida no interior da estaca preenchida com água, foi necessário desenvolver um modelo tridimensional.

Nesta seção os modelos em 2D e 3D serão brevemente explicados, assim como as aplicações e limitações de cada modelo.

3.6.1. Desenvolvimento de modelo em 2D

O modelo numérico bidimensional (2D) foi desenvolvido neste trabalho para investigar a transferência de calor de diferentes cenários de preenchimento das estacas tubulares metálicas. A simplificação para uma análise bidimensional é justificada pela curta duração do ensaio de troca térmica TRT, com 72 horas, utilizado para validação do modelo. O programa utilizado foi o COMSOL *Multiphysics*, através do módulo *heat transfer* em regime transiente, que permite analisar a transferência de calor em sólidos por meio da solução da equação de difusão de Fourier (Equação 3.1).

$$q = -k\nabla T \quad (3.1)$$

Nesta equação k (W/mK) corresponde a condutividade térmica do material e T (K) a temperatura.

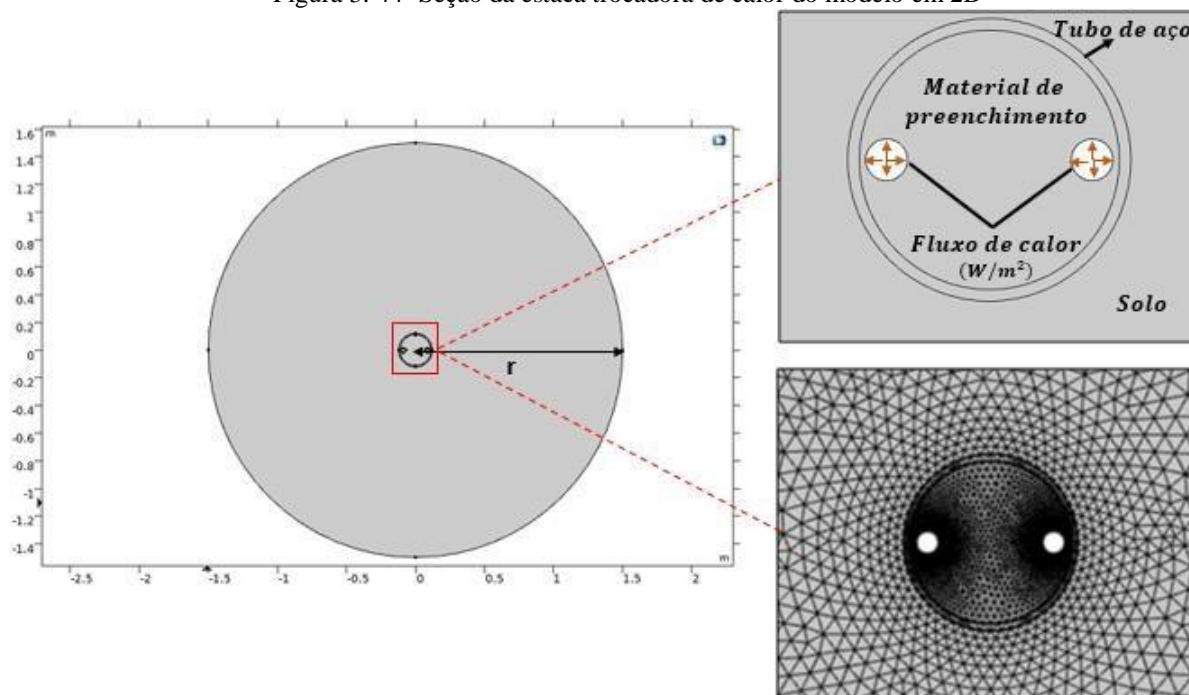
Os domínios considerados na análise foram o solo (supostamente homogêneo ao longo da profundidade da estaca), a estaca tubular de aço, e o material de preenchimento da estaca. Os tubos em PEAD e o fluido de transporte de calor não foram modelados. Esta abordagem numérica permitiu determinar a resistência térmica da estaca (R_b) que é a combinação da resistência térmica do material de preenchimento da estaca e a resistência do tubo de aço.

A geometria do modelo foi definida de acordo com as dimensões das estacas piloto ensaiadas em campo, com tubo de aço com diâmetro de 244 mm, espessura de 10 mm, tubos em PEAD com diâmetro externo de 32 mm, com espaçamento entre eixos de 177 mm. A Figura 3.44 ilustra a seção da estaca avaliada no modelo em 2D.

As análises numéricas em 2D foram realizadas com os dados experimentais dos ensaios de resposta térmica das estacas metálicas preenchidas com argamassa, argamassa com fibras metálicas e areia. Para analisar numericamente os resultados do ensaio na estaca metálica preenchida com água, foi necessário desenvolver um modelo em 3D pois os efeitos da convecção na água ocorrem ao longo da profundidade da

estaca, interferindo na transferência de calor radial. O modelo em 3D será apresentado no item 3.5.2 deste trabalho.

Figura 3. 44- Seção da estaca trocadora de calor do modelo em 2D



Fonte: Autora

3.6.1.1. Parâmetros de entrada

Como parâmetro de entrada do modelo, foi calculado o fluxo de calor com os resultados do ensaio TRT pela equação:

$$Q = m.c_g.(T_{out} - T_{in}) \quad (3.2)$$

Nesta equação Q a fluxo de calor real calculado com os dados do ensaio (W), m é a vazão mássica do fluido condutor de calor (kg/s), c_g é a capacidade térmica específica do fluido condutor de calor (J/kg K), $T_{out}-T_{in}$ corresponde a variação de temperatura de entrada e saída do fluído nas estacas.

No modelo em 2D o fluxo de calor obtido pelos ensaios TRT foi distribuído na interface entre os tubos PEAD e o material de preenchimento (Figura 3.44) em W/m^2 , sendo necessário dividir o fluxo pelo comprimento dos dois tubos da estaca, conforme equação abaixo. No modelo 2D foi considerada a flutuação do fluxo de calor durante o

ensaio, sendo que os valores de q (W/m²) foram calculados a cada 10 segundos e inseridos no modelo.

$$q = \frac{Q}{n\pi L d_o} \quad (3.3)$$

Na equação n corresponde ao número de tubos PEAD nas estaca, L ao comprimento de cada estaca, d_o ao diâmetro externo do tubo PEAD.

Como simplificação do modelo, foi considerado que as temperaturas iniciais de todos os domínios fossem iguais, em equilíbrio térmico, e os resultados das análises fossem obtidos em termos de variação de temperatura.

Elementos triangulares foram considerados na malha do modelo, sendo realizado o estudo de refinamento de malha, de modo que o número de elementos não influenciasse nos resultados de variação da temperatura. Foram considerados elementos como tamanho máximo de 13 mm no contorno da estaca e tamanho mínimo de 2 mm no contorno dos tubos PEAD, que correspondem a malha utilizada em experiências anteriores em modelos 2D (LOVERIDGE e POWRIE, 2013). Pela análise de sensibilidade da malha adotou-se a malha com 61.114 elementos após verificar que mais elementos (em diferentes arranjos) não traziam benefícios aos resultados.

Quanto ao domínio adotado para o solo, pelos testes realizados, chegou-se ao valor de 3,0 m em que se obteve uma boa temperatura de contorno, o que significa que os efeitos do aquecimento da estaca não atingiram a distância de 3,0 m do centro da estaca para o tempo de ensaio analisado.

Os parâmetros iniciais de entrada de cada material foram obtidos a partir dos resultados das soluções analíticas (ILSM, FCSM) e da revisão da literatura (HAHN & ÖZISIK, 2012; HAMDHAN e CLARK, 2010; KIM et al., 2017 e REES et al., 2000). Os parâmetros de entrada inicialmente adotados em cada análise são apresentados na Tabela 3.10, sendo necessários no modelo os valores de condutividade térmica, densidade e calor específico de cada material.

A condutividade térmica do material de preenchimento utilizado como valor de entrada foi primeiramente calculada pelo multipole model proposto por (HELLSTROM, 1991) considerando a resistência térmica da estaca obtida a partir do modelo ILSM. Porém, uma análise paramétrica foi realizada para determinar os valores de condutividade térmica do material de preenchimento da estaca e do solo com melhor

ajuste com os resultados de campo em termos de variação da temperatura na interface da estaca e dos tubos PEAD, como apresentado no próximo item 3.5.1.2.

Tabela 3. 10– Parâmetros iniciais adotados nos modelos numéricos em 2D

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico (J/KgK)	Densidade (kg/m3)	Fonte
Solo	2.6	1597	2000	Modelos analíticos/ Terzaghi et al., (1996)
Aço	54	465	7833	Hahn e Özisik (2012)
Areia	1.3	1483	2000	Multipole Model / Terzaghi et al., (1996)/ Hamdham e Clarke, 2010
Argamassa	2.8	990	2000	Multipole Model / Kim et al., 2017
Argamassa e fibras metálicas	4	990	2000	Multipole Model / Kim et al., 2017

Fonte: Autora

3.6.1.2. Análise paramétrica

Nos modelos em 2D foi realizada análise paramétrica para encontrar os melhores pares de valores de condutividade térmica do solo (λ_g) e do material de preenchimento (λ_c), que possui correlação com a resistência térmica da estaca. Mais de um par de valores podem corresponder aos parâmetros de melhor ajuste com os resultados experimentais (MARCOTTE & PASQUIER, 2008; LOVERIDGE et al., 2017). No entanto, como há um bom número de testes, é possível comparar os resultados e verificar a validade dos valores encontrados.

Os resultados obtidos para cada análise foram avaliados pelo cálculo do erro quadrático médio (RMSE) com os resultados experimentais. Foram necessárias mais de 50 interações para encontrar as soluções mais adequadas, sendo que para cada interação o tempo de computação foi de aproximadamente 7 horas, usando um computador desktop com processador de 4,9 GHz e 32 GB de RAM. Como resultado das análises numéricas foram determinadas as temperaturas nas bordas dos tubos PEAD e na borda da estaca.

A resistência térmica do tubo (R_p) associa as resistências do fluido circulante e do material do tubo para uma unidade de tubo, e o cálculo consiste na soma das parcelas de convecção e condução conforme equação abaixo:

$$T_p = T_f - q \cdot R_p \quad (3.4)$$

A resistência térmica do tubo (R_p) associa as resistências do fluido circulante e do material do tubo para uma unidade de tubo, e o cálculo consiste na soma das parcelas de convecção e condução conforme equação abaixo:

$$R_p = R_{p\ conv} + R_{p\ cond} \quad (3.5)$$

Os valores é $R_{p\ conv}$ que é a resistência a convecção, foi calculado pela equação:

$$R_{p\ conv} = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} \quad (3.6)$$

Em que n é o número de tubos ao longo das estacas trocadoras de calor, no caso das estacas piloto do CICS são 2 tubos, r_i é o raio interno do tubo PEAD, e h_i é o número de Nusselt. Para fluxo de água em regime turbulento, o número de Nusselt pode ser calculador pela equação de Dittus-Boelter apresentada a seguir:

$$h_i = \frac{N_u \lambda_{fluido}}{2r_i} = \frac{0.023.R_e^{0.8} P_r^{0.35} \lambda_{fluido}}{2r_i} \quad (3.7)$$

Para calcular os números de Reynolds e Prandtl foram utilizados os valores da velocidade média do fluxo de água no interior dos tubos de cada ensaio. A resistência a condução dos tubos $R_{p\ cond}$ foi calculada pela seguinte equação:

$$R_{p\ cond} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2n\pi\lambda_{tubo}} \quad (3.8)$$

Na equação r_o e r_i correspondem respectivamente aos valores do diâmetro externo e interno do tubo PEAD, n o número de tubos PEAD no interior da estaca, e λ_{tubo} a condutividade térmica do material do tubo. Calculado o valor de R_p , foi determinada a temperatura na borda do tubo PEAD para os dados experimentais. Estes dados foram comparados com os valores obtidos no modelo numérico para o cálculo do RMSE em termos de ΔT sendo o T_o a temperatura média inicial dos sensores no interior das estacas.

Com os resultados da análise que forneceu o menor RMSE, foi determinada a resistência térmica da estaca R_c . O cálculo foi feito pela equação 3.7 em que ΔT corresponde à variação da temperatura entre a borda da estaca e a borda do tubo PEAD e q é o fluxo de calor médio (W/m) dos ensaios TRT.

$$\Delta T = q \cdot R_c \quad (3.7)$$

O comportamento térmico dos diferentes materiais de preenchimento foi avaliado pelos valores da resistência térmica calculadas pelos resultados dos modelos numéricos.

3.6.2. Desenvolvimento de modelo em 3D

Para a estaca preenchida com água a condutividade térmica do solo e a resistência térmica da estaca são afetadas pelo efeito da convecção. Neste caso, os métodos analíticos como ILSM, SCSM e G-Function não são apropriados e o efeito da convecção é refletido no aumento das condutividades térmicas do solo.

Para simular o efeito de convecção gerados na estaca preenchida com água foi desenvolvido um modelo tridimensional utilizando-se o programa COMSOL *Multiphysics*. As transferências de calor por condução no solo, na estaca metálica e nos tubos PEAD foram simuladas neste modelo, bem como a transferência de calor por condução-convecção na água dentro da estaca e no fluido transportador de calor dentro dos tubos. Dois módulos do pacote COMSOL foram usados neste modelo, o *heat transfer* e o *fluid flow*.

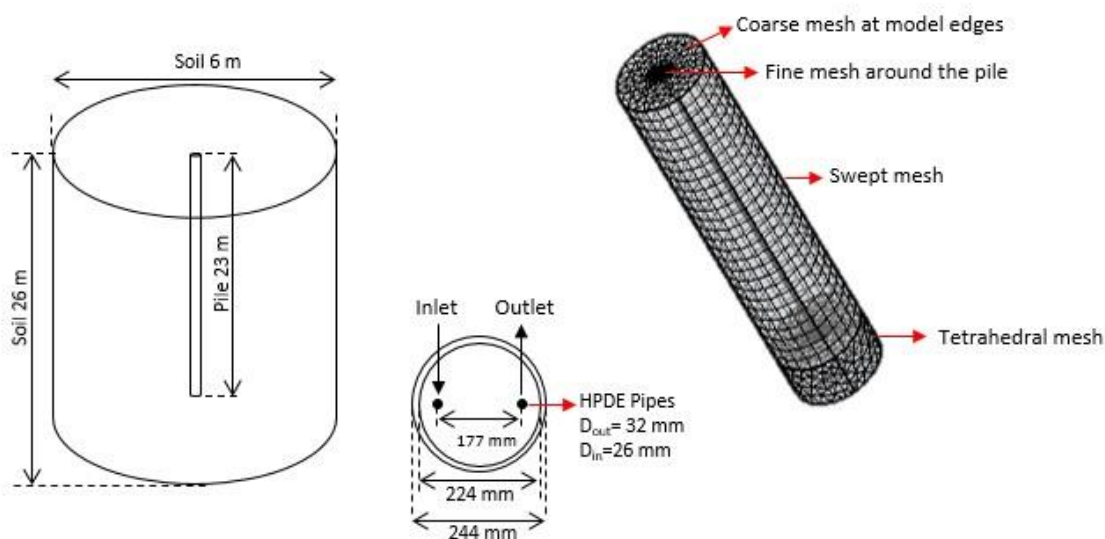
No modelo em 3D todos os domínios foram considerados na análise, o solo, estaca tubular de aço, a água como material de preenchimento, os tubos de PEAD no interior das estacas, e o fluido transportador pelo calor.

A geometria do modelo foi definida de acordo com as dimensões das estacas piloto ensaiadas em campo, com tubo de aço com diâmetro de 244 mm, espessura de 10 mm, tubos em PEAD com diâmetro externo de 32 mm e espessura de 3 mm, com espaçamento entre eixos de 177 mm. Os tubos em PEAD foram modelados com geometria em U-simples, sendo a configuração adotada nos ensaios de campo.

O raio adotado para o domínio do solo foi de 3 metros, sendo o mesmo dos modelos 2D, pois verificou-se que para o tempo dos ensaios TRT não houve variação da temperatura no contorno do domínio. Os mesmos 3 metros foram adotados na direção vertical, abaixo da ponta da estaca de 23 metros, resultando no comprimento de 26 metros para o domínio do solo. A análise numérica foi realizada para o tempo de 72

horas, com mesma duração do ensaio TRT, e os resultados foram analisados a cada 30 segundos.

Figura 3. 45- Geometria e malha do modelo 3D desenvolvido



Fonte: Autora com imagens adaptados do programa COMSOL *Multiphysics*

A concepção do modelo numérico foi dividida em três etapas principais:

- Modelagem do fluxo de água dentro dos tubos PEAD em regime estacionário;
- Modelagem da transferência de calor em regime transiente, considerando o efeito da convecção no fluido condutor e condução entre os demais materiais;
- Modelagem do efeito da convecção na água usada no preenchimento da estaca.

Como resultado do modelo foram analisadas as temperaturas de saída e as temperaturas dos sensores inseridos dentro da estaca e comparadas com os dados experimentais obtidos em campo.

3.6.2.1. Fluxo de água nos tubos

Para modelar o fluxo turbulento do fluido condutor nos tubos foi utilizado o módulo *fluid flow*, pelo modelo de turbulência *k-ε model*, sendo o fluxo adotado como constante durante o ensaio, em estado estacionário.

Como condição de contorno do tubo de entrada da água, foi considerada a vazão média obtida nos ensaios TRT em campo de 10.22 l/min. No modelo, o fluxo é reduzido

para uma representação simplificada em 1D, justificada devido à considerável esbelteza dos tubos no modelo. Essa simplificação evita malhas ainda mais refinadas para simular a seção transversal dos tubos (ALBERDI-PAGOLA et al., 2018).

No caso de estacas trocadoras de calor, o fluido circulante é considerado como um fluido incompressível e newtoniano em que as tensões viscosas em todos os pontos são proporcionais às tensões locais (BIDARMAGHZ, 2014).

O escoamento do fluido dentro dos tubos PEAD foi simulado pelo modelo de atrito de Churchill para o cálculo do efeito de convecção interna. Neste caso, torna-se necessário adotar a pressão atmosférica de referência no tubo de saída para fins de convecção forçada como condição de contorno.

3.6.2.2. Transferência de calor

A transferência de calor entre os domínios analisados ocorre devido ao diferencial de temperatura, gerando um fluxo de calor. A temperatura representa a quantidade de energia térmica de um meio e o fluxo representa o movimento de energia devido ao gradiente de temperatura. O mecanismo de transferência de calor em estacas trocadoras geralmente ocorre por dois modos distintos: condução e convecção (KREITH et al., 2010 e INCROPERA et al., 2011).

A transferência de calor por condução, em regime transiente, é calculada pela equação de Fourier, apresentada na Equação 3.1. No problema modelado, a condução de calor ocorre nos domínios do solo, da estaca tubular metálica e nos tubos PEAD e é simulada pelo módulo *heat transfer* nos domínios sólidos. Para solução da equação é necessário estabelecer uma temperatura inicial T_0 como condição de contorno. No modelo, foi adotada a temperatura média inicial medida nos sensores instalados na estaca antes do ensaio TRT de 23,8 °C.

A transferência de calor combinada por condução e convecção no modelo ocorre no fluido condutor de calor que circula pelos tubos PEAD e é calculada pela Equação 3.8.

$$\rho_m C_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_m C_{p,m} u \nabla T = \nabla(k_m \nabla T) + Q \quad (3.8)$$

Na equação ρ_m é a densidade do meio (fluido ou sólido) em kg/m^3 , u é a velocidade do fluido em m/s , k_m é a condutividade térmica do meio em W/mK , $C_{p,m}$ é o calor específico do meio em J/KgK e Q corresponde à fonte de calor externa em W/m^3 . Nota-se que a velocidade do fluido em regime turbulento, modelada pelo *fluid flow* é considerada na transferência de calor por convecção.

No modelo desenvolvido foi utilizada a simplificação do COMSOL com elementos em 1D para modelar o fluxo da água e a transferência de calor no interior dos tubos PEAD. Para isso foi utilizado o módulo *heat transfer in pipes*. O acoplamento ao modelo de transferência de calor em 3D foi feito por meio da temperatura calculada na parede dos tubos (COMSOL, 2018). As equações utilizadas para a transferência de calor nos tubos e cálculo da temperatura nas paredes do tubo são respectivamente as Equações 3.9 e 3.10.

$$\rho_w A C_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w A C_{p,w} v \nabla T = \nabla (A k_w \nabla T) + f_D \frac{\rho_w A}{2 d_n} |v| v^2 + Q_v + Q_{wall} \quad (3.9)$$

Q_{wall} corresponde ao calor transferido pela parede dos tubos, e pode ser estimado pela equação abaixo.

$$Q_{wall} = \frac{2\pi}{r_i \left[\text{Nu} \left(\frac{k_p}{d_n} \right) + \frac{\ln(r_o/r_i)}{k_p} \right]} (T_{w2} - T) \quad (3.10)$$

Na equação r_o e r_i são respectivamente o diâmetro externo e diâmetro interno do tubo PEAD, em m , k é a condutividade térmica do tubo em W/mK , T_{w2} é a temperatura do lado externo do tubo e Nu é o número de Nusselt que depende do regime de escoamento, neste caso turbulento. Todas as equações apresentadas foram solucionadas pelo método dos elementos finitos implementadas no programa COMSOL Multiphysics.

Os parâmetros adotados para cada material no modelo em 3D são apresentados na Tabela 3.11. Nesta análise todos os materiais têm suas propriedades térmicas bem definidas, podendo ser encontradas na literatura. Para o solo, foi adotada a condutividade térmica obtida pelos métodos analíticos aplicados na análise dos ensaios TRT realizados nesta pesquisa.

Tabela 3. 11- Parâmetros dos materiais adotados no modelo 3D

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico (J/KgK)	Densidade (kg/m3)	Fonte
Solo	2.6	1597	2000	Modelos analíticos/ Terzaghi et al., (1996)
Aço	54	465	7833	Hahn e Özisik (2012)
Água	0.6	4186	1000	Rees et al. (2000)
Tubo PEAD	0.385	-	-	Cecinato e Loveridge (2015)

Fonte: Autora

3.6.2.3. Convecção natural dentro da estaca

Para modelar a convecção natural da água usada como preenchimento da estaca foi necessário adotar um regime de escoamento em fluídos e um acoplamento multifísico *Non Isothermal Flow*. Existem dois regimes de escoamento em fluídos, escoamento laminar e turbulento, sendo necessário avaliar qual é o regime mais adequada para a convecção gerada no interior da estaca. Ambos os modelos comparam o campo de velocidade e de temperatura no interior da estaca.

O primeiro passo foi estabelecer um modelo de convecção para avaliar se o escoamento permanece laminar ou se torna turbulento antes de iniciar a análise. O regime de escoamento é definido pelos números adimensionais de Grashof e Rayleigh. Neste foi calculado o número de Grashof pela Equação 3.11 apresentada abaixo. Para o cálculo foram consideradas as propriedades termofísicas da água a 24°C apresentadas na Tabela 3.2, que corresponde a temperatura próxima a temperatura inicial do modelo. Na equação ρ é a massa específica do fluído em kg/m³, g é a aceleração da gravidade em m/s², α_p é o coeficiente de expansão térmica em K⁻¹, μ é a viscosidade cinemática em m²/s. A variação da temperatura ΔT corresponde à diferença entre a temperatura no interior da estaca no final do ensaio TRT e a temperatura inicial antes do ensaio. L corresponde ao comprimento característico, sendo definido como a altura da estaca de 23 metros (SPITLER et al.,2016).

$$G_r = \frac{\rho^2 g \alpha_p}{\mu^2} \Delta T L^3 \quad (3.11)$$

$$R_a = \frac{\rho^2 g \alpha_p c_p}{\mu k} \Delta T L^3 \quad (3.12)$$

Tabela 3. 12 -Propriedades termomecânicas da água a 24 °C

Parâmetro	Descrição	Valor
ρ	Massa específica (kg/m ³)	997
μ	Viscosidade dinâmica (N.s/m ²)	8,90x10 ⁻⁴
α_p	Coef. de expansão térmica (K ⁻¹)	0,247x10 ⁻³
k	Condutividade térmica (W/mK)	0,607
C_p	Calor específico (kJ/kgK)	4180

Fontes: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/8151869/LOQ4086/Tabela_Propriedades.pdf

Neste trabalho também foi calculado pela Equação 3.12 o número de Rayleigh para verificar o tipo de escoamento devido ao efeito da convecção na água dentro da estaca. Os parâmetros termofísicos utilizados nos cálculos são apresentados na Tabela 3.2.

Se as forças de convecção são significativas quando comparadas com as forças viscosas, o regime é turbulento, caso contrário é laminar. A transição entre os dois regimes é indicada pela ordem dos números de Grashof e Rayleigh sendo o limite igual a 10⁹.

Os números foram determinados inicialmente considerando-se o diâmetro do cilindro como direção principal conforme adotado em alguns estudos como Cao et al. (2022), Hadjadj et al., (1999) e Spiltler et al. (2016). Desta forma, o fluxo foi modelado como laminar.

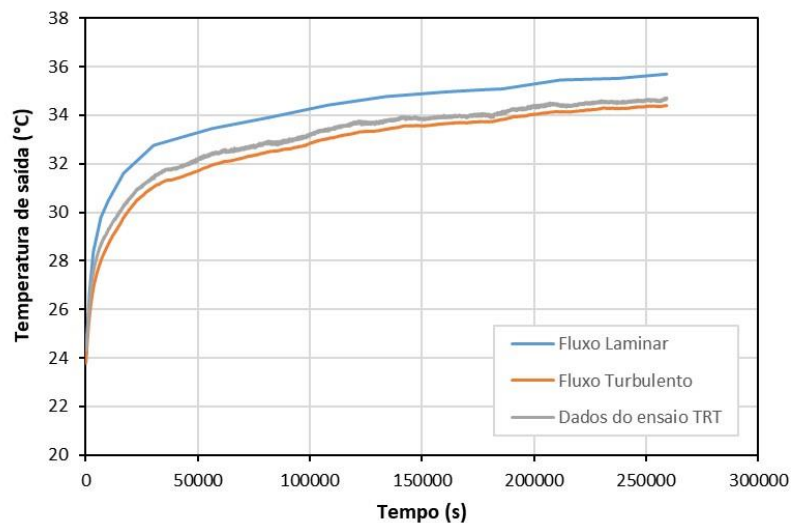
Para validar o modelo, a evolução da temperatura de saída a partir da análise numérica foi comparada com as medidas experimentais, conforme mostrado na Figura 3.46. Os resultados não se ajustaram aos dados experimentais como esperado, sendo o RMSE entre os resultados de 1,05.

Hadjadj et al. (1999) mostraram por investigação numérica que o número de Nusselt aumenta com o número de Rayleigh e com o AR (*aspect ratio*) que é a razão entre a altura e o diâmetro do cilindro. Neste trabalho, os números adimensionais foram calculados considerando a altura do cilindro como direção principal. Arshad et al. (2011) correlacionaram os números de Nusselt e Rayleigh por meio de testes experimentais e dimensionaram os parâmetros adimensionais para a altura do cilindro.

Nesse contexto, a análise numérica foi refeita considerando a altura do cilindro como direção principal. Os números calculados foram superiores a 10^9 que é o valor crítico para o escoamento turbulento. Portanto, para modelar a convecção natural, foi utilizado o modelo turbulento k- ϵ . Os fluxos em regime turbulento são calculados pela equação de ReynoldsAveraged Navier-Stokes (RANS), adicionando-se as duas variáveis k e ϵ , que são respectivamente a energia cinética devido à turbulência e ϵ a taxa de dissipação da energia de turbulência. O fluido foi considerado como fracamente compressível de modo que houvesse a variações da densidade em função da temperatura.

A evolução da temperatura do tubo de saída determinada pela análise numérica foi comparada com os dados experimentais conforme mostrado na Figura 3.46. O modelo turbulento apresentou melhor ajuste com os dados experimentais, com RMSE de 0,20.

Figura 3. 46- Comparação entre resultados experimentais de campo e numéricos da evolução da temperatura de saída para escoamento laminar e turbulento



Fonte: Autora

3.6.2.4. Condições de contorno

Para resolver os sistemas de equações, valores iniciais e condições de contorno devem ser atribuídos. As condições de contorno adotadas incluem:

- Velocidade da água nula aplicada nas paredes do tubo PEAD, o que significa que o fluido na parede do tubo não está se movendo;

- Pressão atmosférica de referência definida do tubo de saída para que o efeito da convecção forçada seja considerado;
- Isolamento térmico do domínio do solo e das duas superfícies no topo e na base do modelo. Nesta condição, o efeito da recarga térmica devido à irradiação solar na superfície do solo foi negligenciado;
- Temperatura inicial dos domínios definida como a mesma temperatura de equilíbrio do solo encontrada pelos sensores instalados nas estacas, igual a 23,8°C.

Para modelar o aquecimento da água com fluxo em circuito fechado existem duas formas de inserir os dados experimentais do ensaio TRT:

- i. Impor as temperaturas de entrada iguais às temperaturas medidas em campo;
- ii. Definir a temperatura de entrada como função da taxa de calor do ensaio TRT (q em W/m) acoplando os dados da temperatura de saída média ao longo do tempo.

Neste trabalho foram verificadas vantagens e desvantagens na aplicação das duas formas de se considerar o aquecimento das estacas. Na primeira opção (i) a temperatura de entrada sofre influência da temperatura ambiente durante o ensaio, e este efeito é automaticamente computado no modelo. Porém a limitação é que o modelo só é válido para o tempo em que se tem dados de variação da temperatura de entrada. Na segunda opção apresentada (ii) sabe-se que a potência de aquecimento varia ao longo do ensaio, e neste caso ela é considerada como constante. Nas análises foi considerada como condição de contorno a primeira opção (i), sendo definido a temperatura de entrada a cada 2 segundos. Esta análise foi a que apresentou melhores ajustes com os dados experimentais.

Para simular o efeito da convecção natural da água usada como preenchimento da estaca, é necessário configurar as condições de contorno do escoamento, apresentadas na sequência:

- Foi considerada a força da gravidade aplicada na superfície do fluido em contato com o ambiente para que haja a convecção natural;

- O fluido foi considerado como fracamente compressível de modo que a densidade da água variasse em função da temperatura;
- Definir a pressão em pelo menos um ponto do modelo, sendo considerada a pressão igual a zero na superfície do líquido.

3.6.2.5. Análise da malha

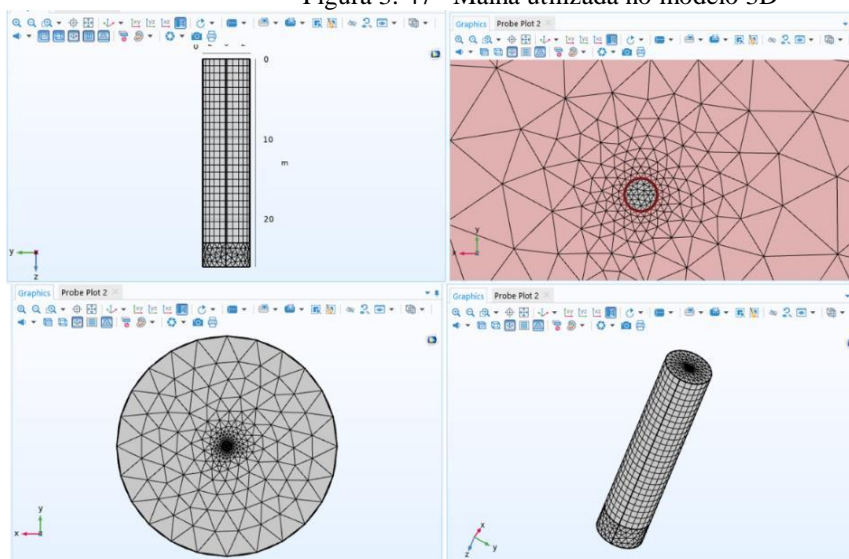
Após fazer todos os acoplamentos necessários e definir as condições de contorno do modelo foi feito o teste de refinamento da malha de modo a analisar o impacto da malha nos resultados. Devido às limitações da memória do computador, buscou-se uma malha mais otimizada para a geometria do modelo. Em geometrias esbeltas pode-se utilizar malhas do tipo *Swept* que proporcionam um melhor aproveitamento dos recursos computacionais, gerando bons resultados, com quantidades menores de elementos.

No modelo em estudo foi adotada a malha do tipo *swept* com elementos triangulares em malha extrafina, ao longo do comprimento da estaca, até a profundidade de 23 metros, conforme apresentado na Figura 3.47. Para os 3 metros abaixo da estaca foi utilizada malha do tipo tetraédrica grosseira (*coarse*).

O estudo do refinamento da malha foi realizado buscando otimizar a precisão dos resultados e os recursos computacionais disponíveis. O refinamento da malha foi feito principalmente na região dos tubos e da estaca sendo os locais com maior variação das temperaturas, e há o efeito da convecção. A malha final adotada no modelo possui um total de 21.851 elementos.

A Figura 3.47 apresenta a malha utilizada no modelo em 3D sendo o tamanho dos elementos no domínio da água de preenchimento da estaca com 3.8 mm.

Figura 3. 47– Malha utilizada no modelo 3D



Fonte: Imagens obtidas pelo programa COMSOL Multiphysics

3.6.2.6. Validação do modelo

A validação do modelo numérico em 3D desenvolvido neste trabalho foi realizada pela comparação entre resultados numéricos e os dados experimentais. Para isso, no modelo numérico, foram determinadas a variação da temperatura da água na saída da estaca e as temperaturas em todos os pontos onde os sensores de temperatura PT-100 foram instalados dentro da estaca. Também foram determinadas as temperaturas na parede da estaca metálica. Para cada ponto analisado foi determinado o erro quadrático médio (RMSE) entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

3.6.2.7. Resistência térmica

A resistência térmica da estaca preenchida com água pelo modelo numérico em 3D foi determinada da mesma forma que nos modelos em 2D, utilizando-se a Equação 3.7. Pelos valores médios das temperaturas na borda da estaca metálica e da temperatura no fluído obtidos numericamente, para uma taxa de calor constante aplicada no ensaio experimental q (W/m), foi determinada a resistência térmica da estaca preenchida com água para o modelo em 3D.

4. MODELO FÍSICO DE SEÇÃO DE ESTACA TROCADORA DE CALOR

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios conduzidos em laboratório para avaliar o comportamento térmico de estacas tubulares metálicas com diferentes materiais de preenchimento com tubos PEAD na configuração em U simples. Estes ensaios foram realizados para orientar na definição dos materiais a serem testados como preenchimento nas estacas tubulares do CICS posteriormente.

Os ensaios executados permitem simular uma seção planar das estacas trocadoras de calor, a uma profundidade específica, e podem ser estendidos para todo o comprimento da estaca uma vez que a transferência de calor ocorre principalmente na direção radial da estaca (KRAMER et al., 2015 e AKROUCH et al., 2016).

Os ensaios foram executados em um tanque preenchido com areia nas condições seca (ES) e saturada (ESAT), em estaca tubular metálica preenchida com diferentes materiais: areia, concreto magro, concreto magro com fibras metálicas e água, sendo o ensaio na estaca preenchida com água conduzido somente na condição de areia saturada. Para fins de comparação dos resultados, foram realizados ensaios em estaca de concreto na condição seca e saturada, com diâmetro semelhante à estaca tubular metálica. Pelos resultados de variação da temperatura na interface e no entorno das estacas é possível avaliar, de forma qualitativa, o desempenho da troca térmica dos diferentes materiais testados.

4.1. ENSAIOS EM CAIXA COM AREIA SECA

Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios conduzidos nas estacas em areia seca, resumidos na Tabela 4.1. Primeiramente as estacas foram aquecidas mantendo-se a temperatura da água dos tubos PEAD a 32°C, por 96 horas (4 dias). Em seguida, os aquecedores foram desligados e a estaca foi resfriada naturalmente. Nesta segunda fase do ensaio, as temperaturas foram registradas por um período de 48 horas (2 dias).

Mesmo que os ensaios tenham sido executados em sala climatizada, a temperatura inicial da areia da caixa não foi a mesma para todos os ensaios. Portanto,

optou-se por avaliar os resultados em termos de variação da temperatura ΔT ($^{\circ}\text{C}$) ao longo do tempo.

Durante os ensaios, o ar condicionado foi mantido ligado proporcionando uma temperatura ambiente de aproximadamente 23°C , sendo registradas oscilações de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$.

As respostas de temperatura nas estacas não se mostraram afetadas pela temperatura ambiente ao longo do ensaio, o que reflete a eficácia do isolamento térmico utilizado na caixa de ensaio.

Tabela 4. 1- Ensaios conduzidos em tanque com areia seca (ES)

Ensaio	Estaca	Preenchimento	T inicial da areia ($^{\circ}\text{C}$)	Aquecimento	Resfriamento
ES – P1	Metálica	Concreto Magro	22,04	96 horas	48 horas
ES – P2	Metálica	Concreto Magro e fibras metálicas	24,00	96 horas	48 horas
ES – P3	Metálica	Areia	22,90	96 horas	48 horas
ES – P4	Concreto	-	23,90	96 horas	48 horas

Fonte: Autora

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentadas as variações das temperaturas durante a fase de aquecimento das estacas registradas pelos sensores PT-100 instalados nas posições 0R, que corresponde a interface estaca-areia, 0.5R, 1R, 1.5R e 2R, sendo R o raio da estaca. Os sensores foram instalados nestas posições em duas direções: a 0° que corresponde à mesma direção do alinhamento dos tubos PEAD, e 90° deste alinhamento.

Comparando-se os resultados nota-se que para ambas as direções analisadas houve a redução da temperatura com o aumento da distância das estacas. Para a maior distância analisada (2R), após 96 horas de aquecimento, o aumento de temperatura variou de 1,0 a $3,2^{\circ}\text{C}$ (nos ensaios ES-P3 e ES-P1, respectivamente). Os maiores resultados de variação da temperatura no solo, tanto à distância 0R (face externa da estaca) quanto à 2R significam maior fluxo de calor, e, portanto, menor resistência térmica da estaca.

Além disso, os elevados valores de acréscimo de temperatura no solo no entorno da estaca também estão associados à baixa condutividade térmica da areia seca, que dificulta a transferência de calor para maiores distâncias no solo. O aumento da

temperatura no solo no entorno da estaca é inversamente proporcional a sua condutividade térmica, como mostra a equação abaixo para $R = 1$ (onde R é o raio da estaca):

$$\Theta_c = \frac{q}{k} \cdot G(F_o) \quad (4.1)$$

Na equação, Θ_c é a variação da temperatura na interface da estaca, q é a taxa de calor, k é a condutividade térmica do solo e $G(F_o)$ é a função que representa a variação de temperatura adimensional.

Os resultados mostram que a distribuição da temperatura no entorno das estacas não é uniforme ao longo da circunferência. Os resultados a 0° e a 90° indicam que existe uma variação para as estacas com configuração U simples com tubos mais próximos à borda das estacas, resultando em contorno da temperatura com distribuição com formato oval, como também verificado por Vella et al. (2020). A Tabela 4.2 traz um resumo do aumento da temperatura na interface das estacas a 0° e a 90° após 96 horas de aquecimento. Quanto maior a diferença entre as temperaturas na interface das estacas nas duas direções analisadas, mais ovalar é o formato da distribuição da temperatura no interior da estaca.

Figura 4.1– Resultado do ensaio ES-P1 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com concreto magro)

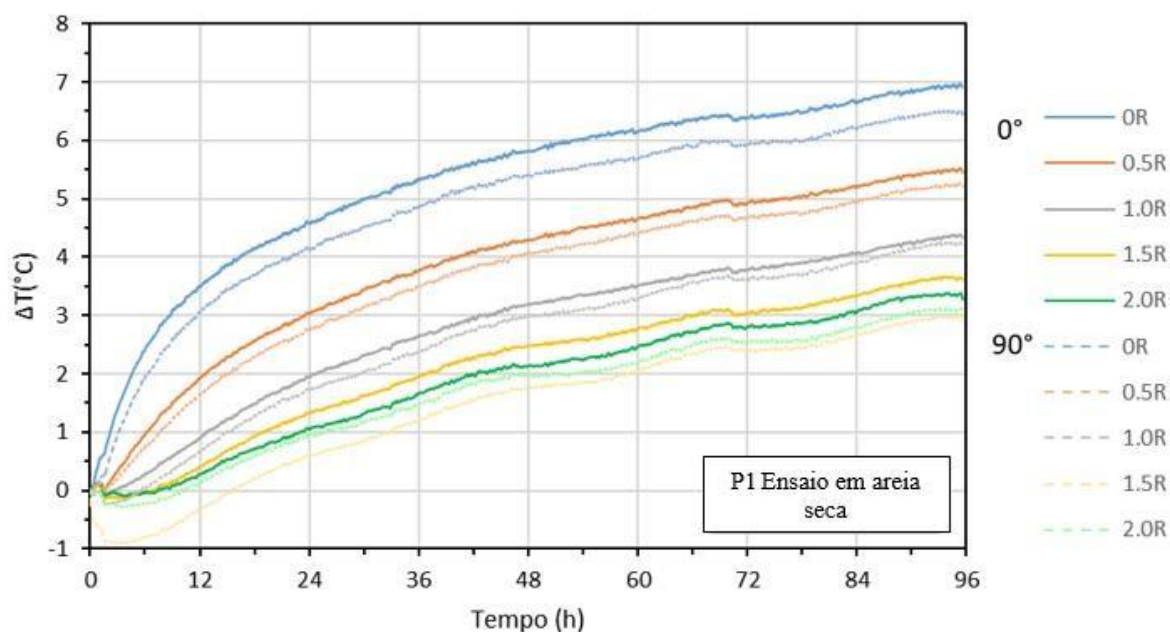


Figura 4.2- Resultado do ensaio ES-P2 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com concreto magro e fibras metálicas)

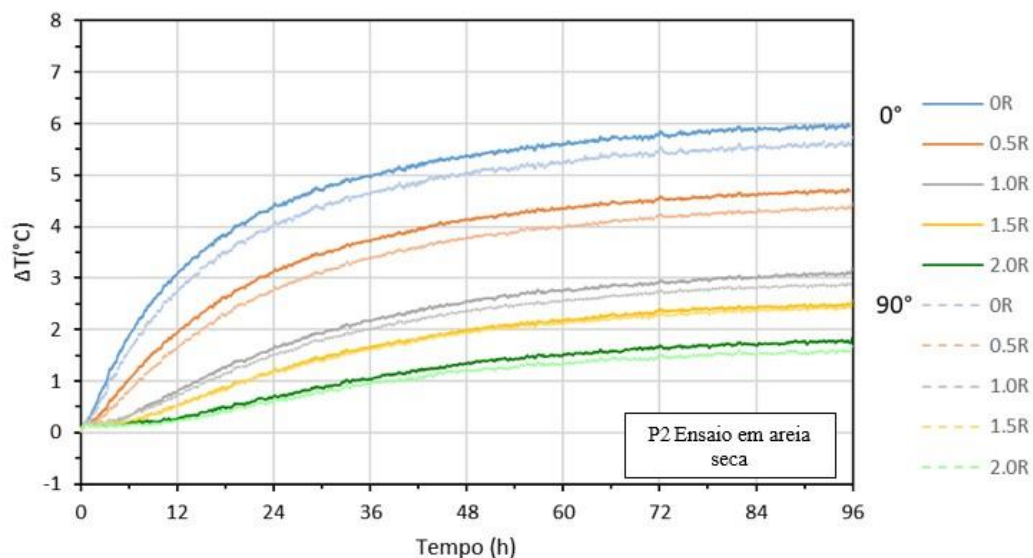
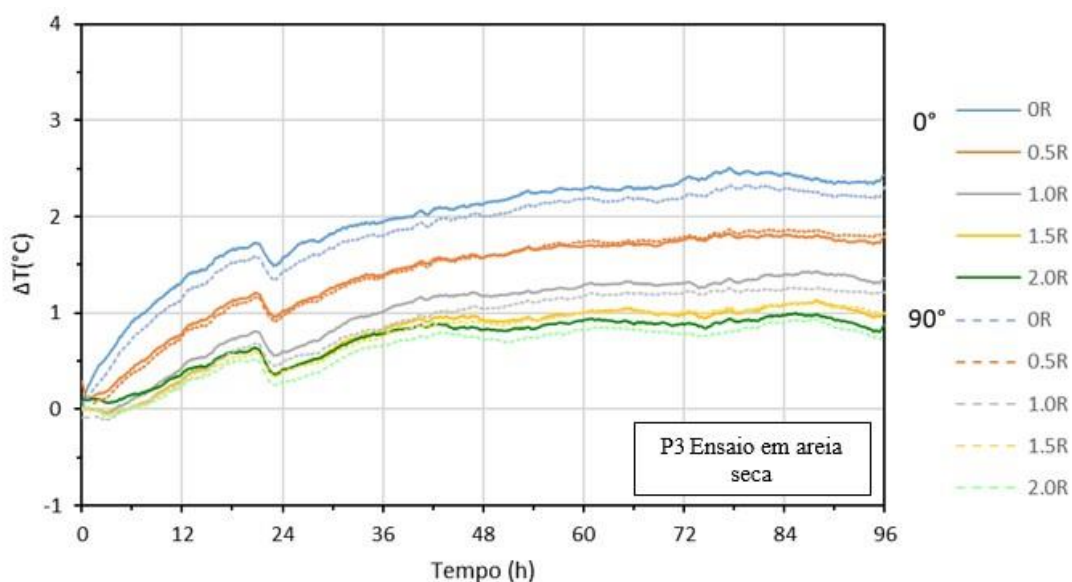


Figura 4.3 Resultado do ensaio ES-P3 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com areia)

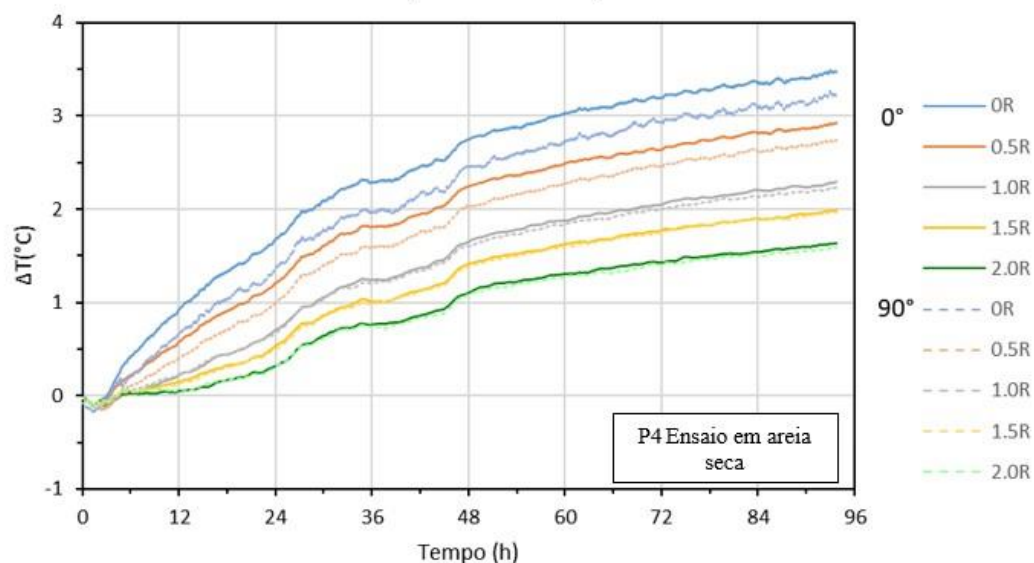


Os resultados de variação da temperatura na interface da estaca metálica com areia (P3) e estaca de concreto (P4) para as duas direções analisadas (0° e 90°) indicam menores variações e conseqüentemente o aquecimento mais uniforme da estaca, com distribuição da temperatura no interior da estaca mais circular.

Para as distâncias 0.5R e 1R observa-se também que há uma variação da temperatura a 0° e a 90°. Porém, para as distâncias 1.5R e 2R essa diferença tende a

diminuir, como mostra a Tabela 4.2 e a Figura 4.7, e a distribuição de temperatura passa a ter formato mais uniforme e com geometria circular.

Figura 4. 4- Resultado do ensaio ES-P4 para a fase de aquecimento da estaca (estaca de concreto)



Fonte: Autor

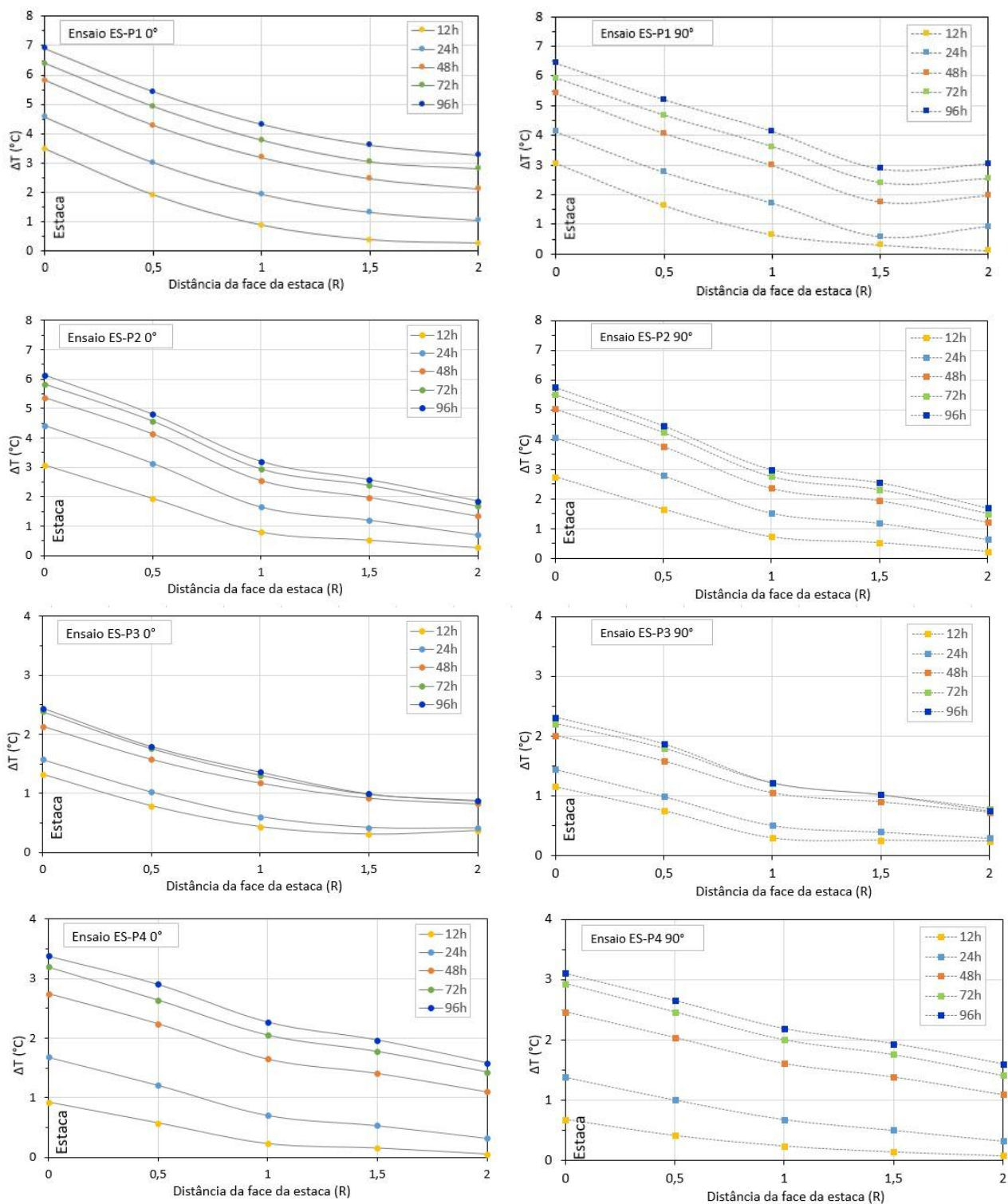
Na Figura 4.5 são apresentados os resultados da evolução da temperatura dos sensores nas posições analisadas para 12h, 24h, 72h e 96h após o início do aquecimento das estacas. Os gráficos mostram uma maior variação das temperaturas nas primeiras 12 horas de ensaio. Entre 72h e 96h nota-se que não houve um aumento significativo das temperaturas o que indica que a transferência de calor está em regime estacionário.

Tabela 4. 2– Variação da temperatura na interface das estacas ensaiadas em areia seca nas direções a 0° e a 90° do alinhamento dos tubos após 96 horas de aquecimento

Estaca	ΔT Interface 0° (°C)	ΔT interface 90° (°C)	$(\Delta T 0^\circ - \Delta T 90^\circ)$		$(\Delta T 0^\circ - \Delta T 90^\circ)$	
			Interface (°C)	$\Delta T 2R 0^\circ$ (°C)	$\Delta T 2R 90^\circ$ (°C)	2R (°C)
P1	6.91	6.44	0.47	3.27	3.02	0.25
P2	6.14	5.75	0.39	1.85	1.69	0.16
P3	2.44	2.31	0.13	0.87	0.74	0.13
P4	3.38	3.1	0.28	1.58	1.60	-0.02

Fonte: Autora

Figura 4. 5- Evolução da temperatura dos sensores nas duas direções analisadas 0° e 90° para os tempos 12h, 24h, 48h, 72h e 96h de aquecimento em arida seca

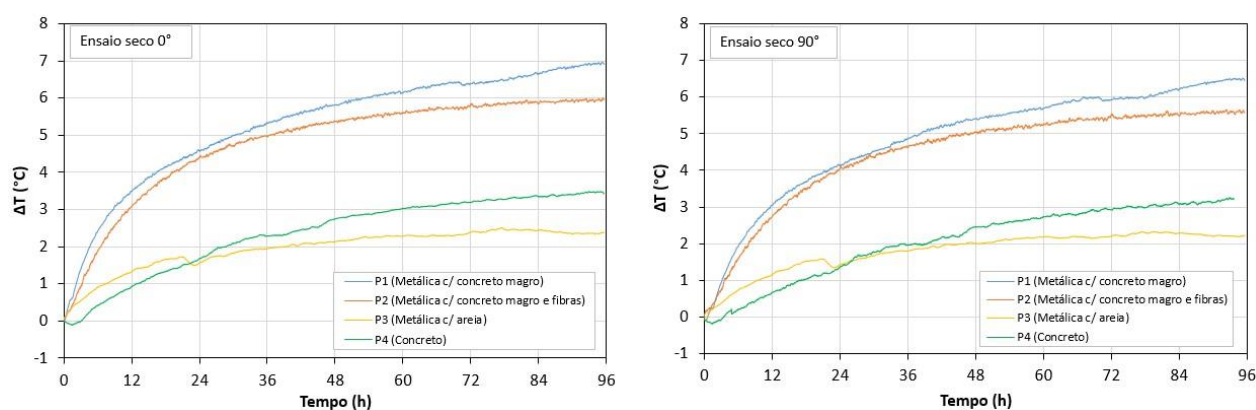


Fonte: Autora

Os resultados da variação da temperatura na interface das quatro estacas analisadas nas direções a 0° e a 90° do alinhamento dos tubos PEAD foram agrupados em um único gráfico apresentado na Figura 4.6.

Observa-se que a estaca metálica preenchida com concreto magro (P1) foi a que apresentou os maiores valores de variação de temperatura na interface, seguida da estaca metálica preenchida com concreto magro e fibras metálicas (P2), posteriormente da estaca de concreto (P4) e os menores valores de variação da temperatura na interface encontrados para estaca metálica preenchida com a mesma areia seca (P3).

Figura 4. 6– Gráfico da variação da temperatura x tempo na interface das estacas analisadas a 0° e a 90



Fonte: Autora

Os resultados dos ensaios permitem avaliar de forma qualitativa os materiais de preenchimento testados. O melhor material para o preenchimento da estaca metálica está associado àquele que fornece a menor resistência térmica para transferência de calor entre o fluído aquecido e a areia da caixa. Para avaliar os resultados, foi utilizada abaixo em que T_f (°C) corresponde a temperatura da água, T_b (°C) é a temperatura na interface da estaca, q é a taxa de calor injetado (W/m), e R_b é a resistência térmica da estaca.

$$T_f - T_b = q \cdot R_b \quad (4.2)$$

Para todos os ensaios a temperatura do fluído foi mantida constante e igual a 32°C por meio de termostato. No entanto, não foram medidos os valores de taxa de calor injetado para que esta temperatura fosse mantida em cada ensaio. O valor de q é variável durante o ensaio, e a sua variação depende da resistência térmica do material de preenchimento.

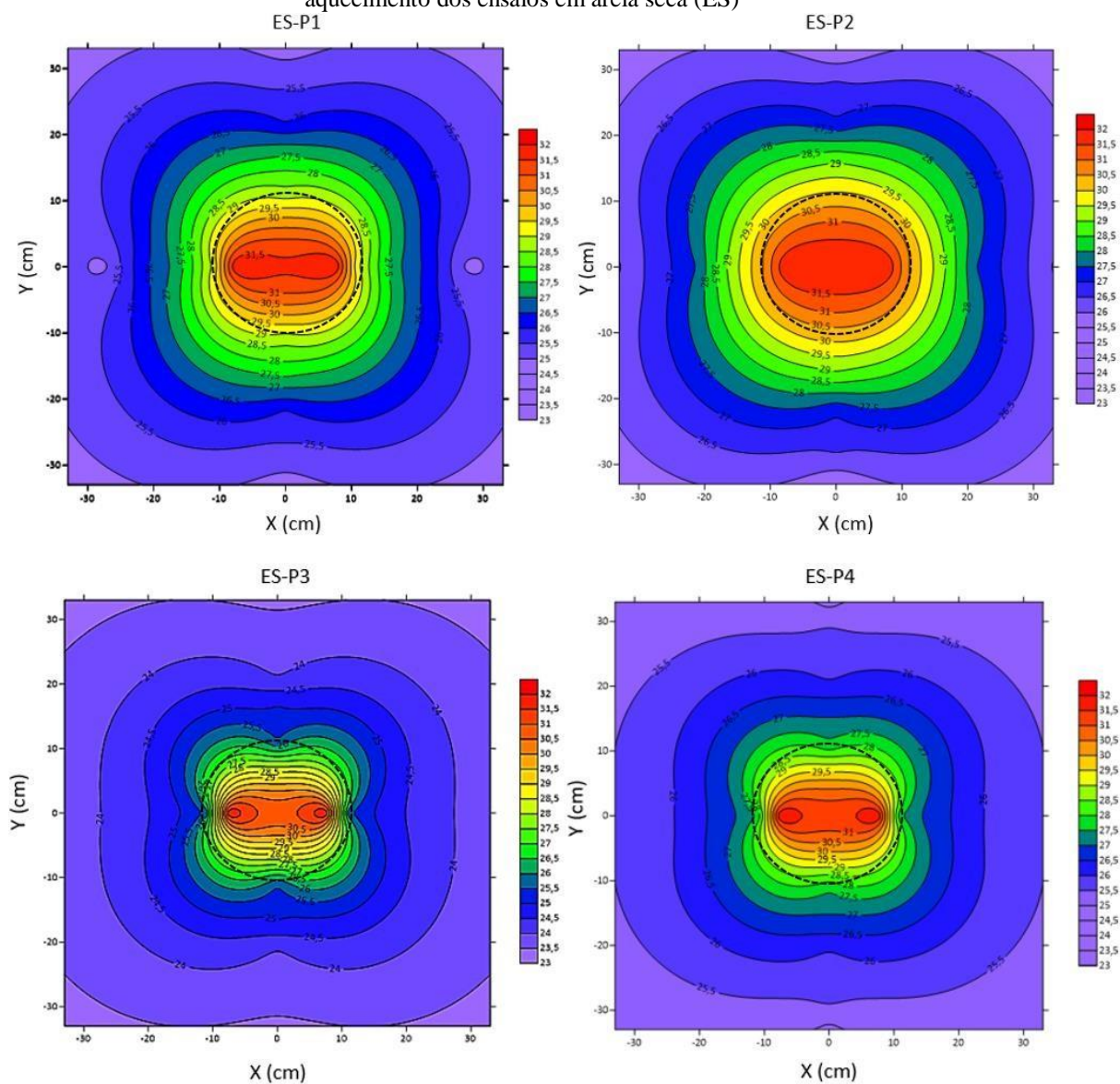
Nos casos em que o preenchimento da estaca foi feito com material de menor condutividade térmica (caso da areia seca por exemplo) o aquecedor precisou injetar menos vezes mais calor no sistema para manter a água a 32°C, pois areia seca ‘reteve’ mais calor dentro da estaca por mais tempo. Do mesmo modo, para os casos P1 e P2 (material de preenchimento de maior condutividade) provavelmente foi necessário injetar calor mais vezes ao longo do tempo de ensaio para manter os 32°C na água dos tubos.

Portanto, pela equação acima, além da diferença entre T_f e T_b serem menores para as estacas P1 e P2, os valores de q (desconhecidos) são maiores para estas estacas do que nas outras (P3 e P4), o que diminuiria ainda mais os valores de R_b das estacas P1 e P2 e aumentaria ainda mais a diferença em relação aos valores R_b das estacas P3 e P4.

Esses resultados indicam que a resistência térmica da solução de estaca em tubo de aço preenchido com concreto (seco) com ou sem fibra metálica (estacas P1 e P2) foi menor do que para os casos de tubo de aço preenchido com areia seca (P3) e a de concreto seco (P4). Os resultados também mostram que a resistência térmica da estaca de concreto seco é ainda um pouco menor do que a de um tubo de aço preenchido com areia seca.

Os resultados absolutos das temperaturas medidas no entorno das estacas ao término da fase de aquecimento dos ensaios em areia seca foram plotados em gráficos de contorno das temperaturas utilizando-se o programa Surfer que possibilita a interpolação dos dados medidos em laboratório. Na Figura 4.7 são apresentados os gráficos com os contornos das temperaturas medidos em laboratório até a distância 2R a face da estaca (33cm). Para elaboração dos gráficos foi considerado simetria na distribuição das temperaturas no entorno das estacas em relação aos eixos X e Y.

Figura 4. 7– Contornos das temperaturas no entorno das estacas P1, P2, P3 e P4 no final da fase de aquecimento dos ensaios em areia seca (ES)

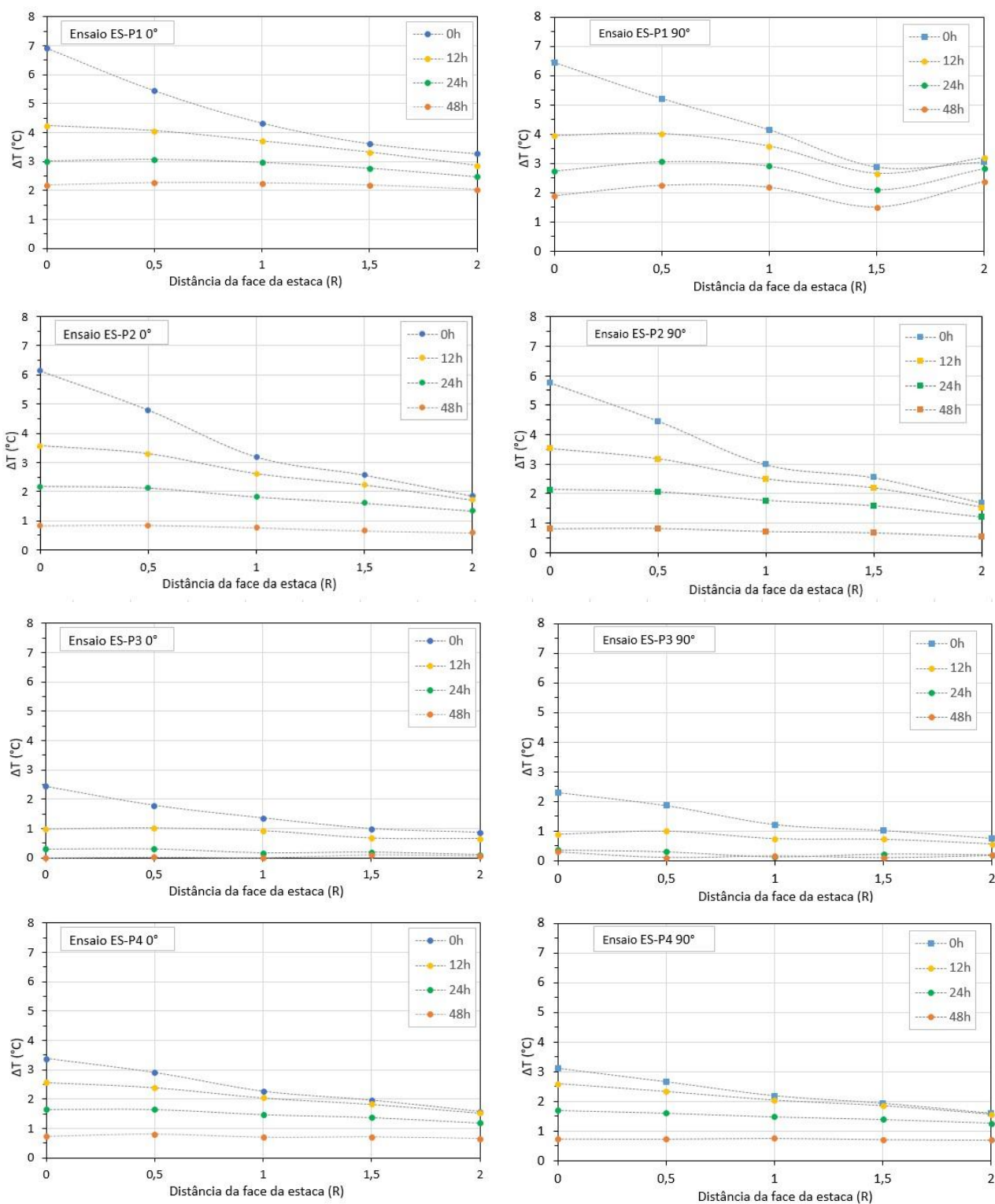


Fonte: Autora

Os contornos de temperatura apresentados confirmam a distribuição não uniforme no solo próximo a face externa das estacas e em seu interior. Pelos resultados observa-se que para as estacas P1 e P2 houve a interação térmica entre os tubos PEAD e o maior aquecimento do centro da estaca.

Na Figura 4.8 são apresentados os resultados da variação radial da temperatura nas duas direções analisadas para a fase de resfriamento dos ensaios.

Figura 4. 8- Variação da temperatura radial no entorno da estaca para a fase de resfriamento dos ensaios



Fonte: Autora

O resfriamento das estacas teve duração de 48 horas para todos os ensaios, sendo desligados os aquecedores e medida a recuperação térmica ao longo do tempo. Nos gráficos são apresentados os resultados da variação da temperatura imediatamente após

desligar os aquecedores e após 12 horas, 24 horas e 48 horas. Nota-se que após 48 horas a temperatura da areia foi praticamente recuperada nos casos em que a temperatura do solo aumentou menos. No caso do ensaio na estaca P1, no qual ocorreu maior aumento da temperatura do solo, seria preciso mais tempo de resfriamento para retornar a temperatura inicial. No entanto, a queda de temperatura dentro das estacas preenchidas com material menos condutivo é mais lenta (calor fica armazenado por mais tempo), afetando a queda na temperatura no solo em seu entorno.

4.2. ENSAIOS EM CAIXA COM AREIA SATURADA

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios conduzidos em caixa com areia saturada, resumidos na Tabela 4.3. Os ensaios foram executados em sala climatizada e a temperatura foi mantida constante em torno de 20°C, com exceção do ensaio E SAT P2 na estaca metálica preenchida com concreto e fibras metálicas em que a temperatura da sala foi mantida a 22 °C por problemas no ar condicionado.

Os ensaios foram conduzidos em duas fases principais: a primeira consistiu no aquecimento das estacas por 96 horas, e a segunda no resfriamento das estacas, sendo as temperaturas medidas durante 48 horas. O resfriamento foi executado nas estacas P4 e P5, conforme indicado na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3- Ensaio conduzidos em tanque com areia saturada (E SAT)

Ensaio	Estaca	Preenchimento	T inicial da areia (°C)	Aquecimento	Resfriamento
E SAT – P1	Metálica	Concreto Magro	19,35	96 horas	-
E SAT – P2	Metálica	Concreto Magro e fibras metálicas	22,03	96 horas	-
E SAT – P3	Metálica	Areia	20,40	96 horas	-
E SAT – P4	Concreto	-	19,15	96 horas	48 horas
E SAT – P5	Metálica	Água	19,53	96 horas	48 horas

Fonte: Autora

Durante os ensaios dois sensores de temperatura apresentaram problemas nas leituras e optou-se por descartar os dados destes sensores. Abaixo são apresentadas as posições destes sensores descartados:

- Ensaio E SAT-P1 – sensores nas posições 0.5R e 1.5R a 0°;
- Ensaio E SAT –P2 – sensores nas posições 1R a 0°;
- Ensaio E SAT – P3- sensores nas posições 0.5R e 1.5R a 0°;
- Ensaio E SAT – P4 – sensores nas posições 0.5 e 1.5R a 0°;
- Ensaio E SAT – P5 – sensor na posição 0,5R a 0°.

Nas Figuras 4.9 a 4.12 são apresentados os resultados da fase de aquecimento das estacas em areia saturada, sendo plotada a variação da temperatura dos sensores PT-100 instalados nas posições 0R, 0.5R, 1R, 1.5R e 2R nas duas direções analisadas, 0° e 90°.

Comparando-se os resultados obtidos para as estacas P1 e P2 foi observado que as variações da temperatura ao longo do tempo no ensaio na estaca P2 estavam abaixo do esperado quando comparadas com as variações na estaca P1, que tiveram resultados aproximados no ensaio em areia seca. Provavelmente ocorreu algum problema com os aquecedores que não aqueceram a água como desejado. Portanto, estes resultados da estaca P2 (estaca metálica preenchida com concreto magro e fibras metálicas) foram descartados nas análises.

Somente no ensaio executado na estaca metálica preenchida com água (P5) foi instalado um sensor de temperatura no centro da estaca, na mesma profundidade em que a seção da estaca e do solo em seu entorno foi analisada, sendo os dados de variação da temperatura deste sensor apresentados na Figura 4.12

Figura 4.9- Resultado do ensaio E SAT-P1 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com concreto magro)

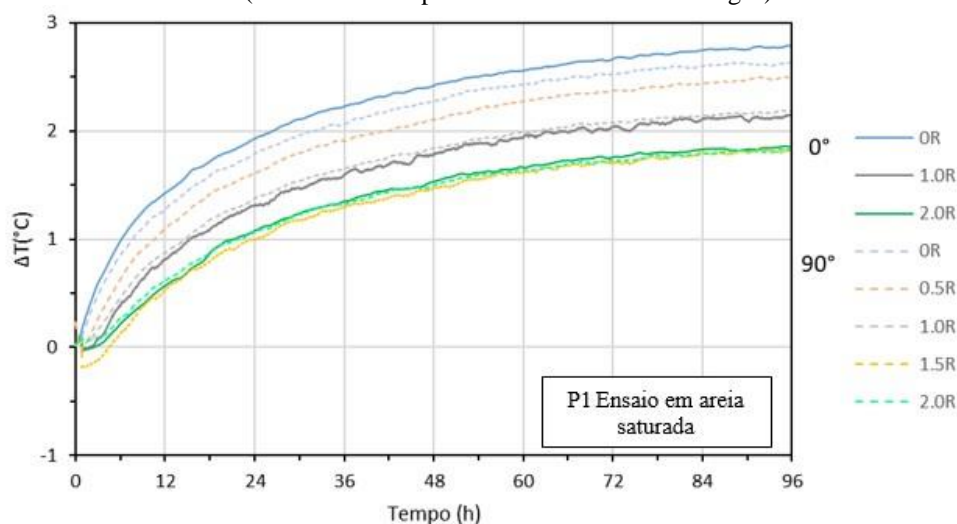
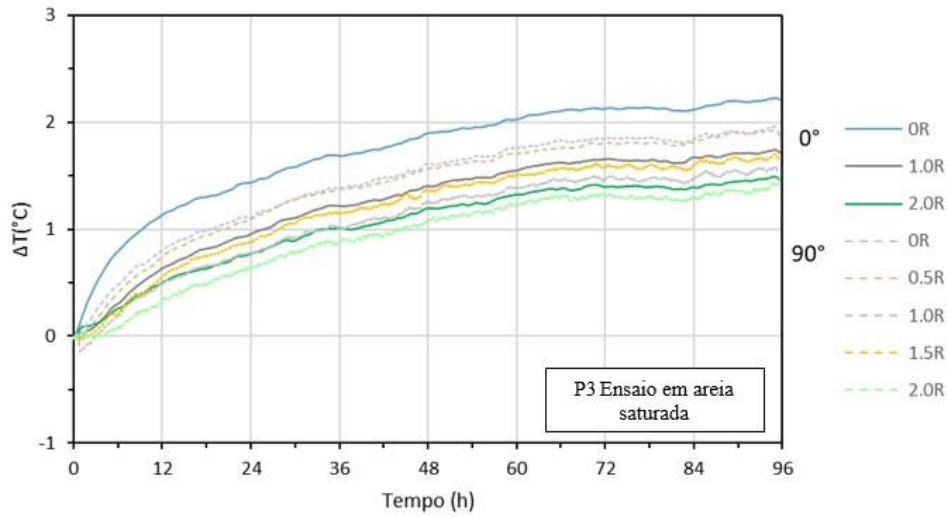
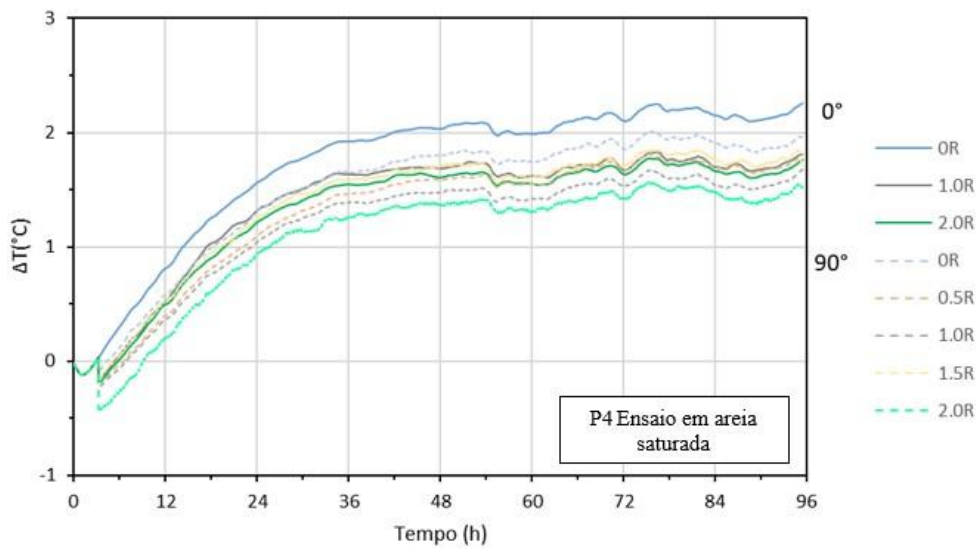


Figura 4. 10- Resultado do ensaio E SAT-P3 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com areia)



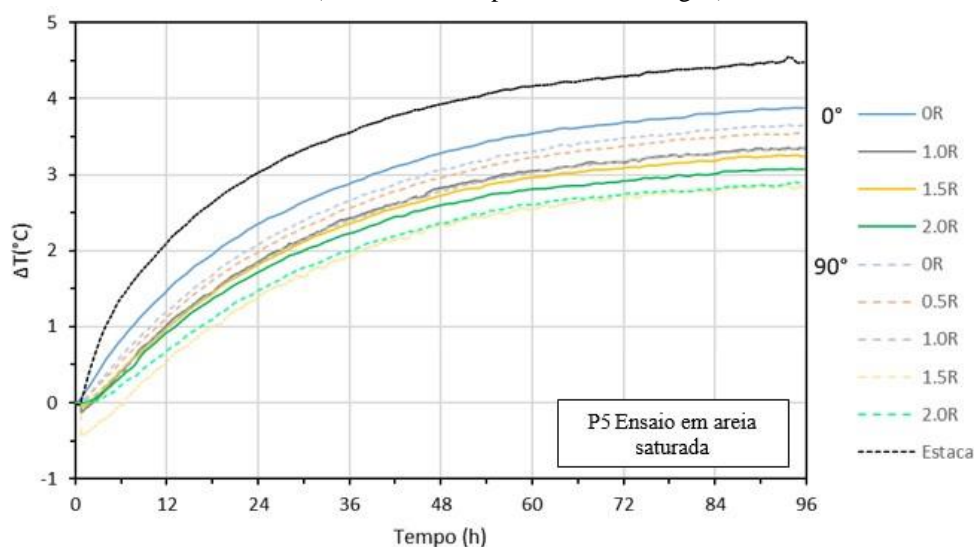
Fonte: Autora

Figura 4. 11- Resultado do ensaio E SAT-P4 para a fase de aquecimento da estaca (estaca de concreto)



Fonte: Autora

Figura 4. 12- Resultado do ensaio E SAT-P4 para a fase de aquecimento da estaca (estaca metálica preenchida com água)



Fonte: Autora

A Tabela 4.4 traz um resumo das temperaturas na interface das estacas nas duas direções analisadas após 96 horas de aquecimento. Observa-se que a diferença entre os valores das temperaturas na interface das estacas a 0° e a 90° diminuíram com a saturação da areia, exceto para a estaca P3. Isso se justifica pelo aumento da condutividade térmica da areia de preenchimento da estaca (saturada) e da areia da caixa quando saturadas.

Como esperado, as temperaturas registradas no entorno das estacas diminuíram à medida que se distancia das estacas e as temperaturas ficam mais uniformes, como pode ser confirmado pelas temperaturas a 0° e a 90° nas posições 1.5R e 2R.

Tabela 4. 4- Variação da temperatura na interface das estacas nas direções a 0° e a 90° após 96 horas de aquecimento em areia seca

Estaca	ΔT Interface 0° (°C)	ΔT Interface 90° (°C)	$(\Delta T 0^\circ - 90^\circ)$ Interface (°C)			
			$\Delta T 2R 0^\circ$ (°C)	$\Delta T 2R 90^\circ$ (°C)	$(\Delta T 0^\circ - 90^\circ)$ 2R (°C)	
P1	2,82	2,64	0,18	1.85	1.81	0.04
P3	2,21	1,87	0,34	1.45	1.37	0.08
P4	2,27	1,97	0,29	1.76	1.51	0.25
P5	3,87	3,65	0,21	3.07	2.87	0.20

Fonte: Autora

Os resultados da variação da temperatura na interface das quatro estacas nas direções 0° e a 90° do alinhamento dos tubos PEAD foram agrupados e apresentados na

Figura 4.13. No final do aquecimento, a estaca metálica preenchida com água (P5) proporcionou maior aumento da temperatura na interface da estaca, com variação de $3,87^{\circ}\text{C}$ a 0° e $3,65^{\circ}\text{C}$ a 90° . Em seguida, a estaca P1 foi a que apresentou o maior incremento de temperatura na interface da estaca com variações de $2,82^{\circ}\text{C}$ a 0° e $2,64$ a 90° . Além disso, como mostra a Figura 4.13, a capacidade de transferência de calor para o solo de uma estaca de aço preenchida com areia saturada (P3) e de uma estaca de concreto saturado (P4) é similar.

Considerando a mesma interpretação para determinar o melhor material de preenchimento adotada na análise dos ensaios em areia seca, pode-se concluir que a estaca P5 foi a que apresentou menor resistência térmica, ou seja, a maior transferência do calor para o solo. A redução das temperaturas obtidas no entorno da estaca nos ensaios em areia saturada se justifica pela maior condutividade térmica da areia saturada em relação a areia seca. A condutividade térmica da areia pode variar de $0,3 \text{ W/mK}$ a $0,4 \text{ W/mK}$ na condição seca e de $1,7 - 3,2 \text{ W/mK}$ na condição saturada (LALOU e LORIA, 2020).

A resistência térmica da estaca está diretamente associada à condutividade térmica do material da estaca (EROL E FRAÇOIS, 2014). Na Tabela 4.5 são apresentados os valores encontrados na literatura para os materiais usados no preenchimento das estacas.

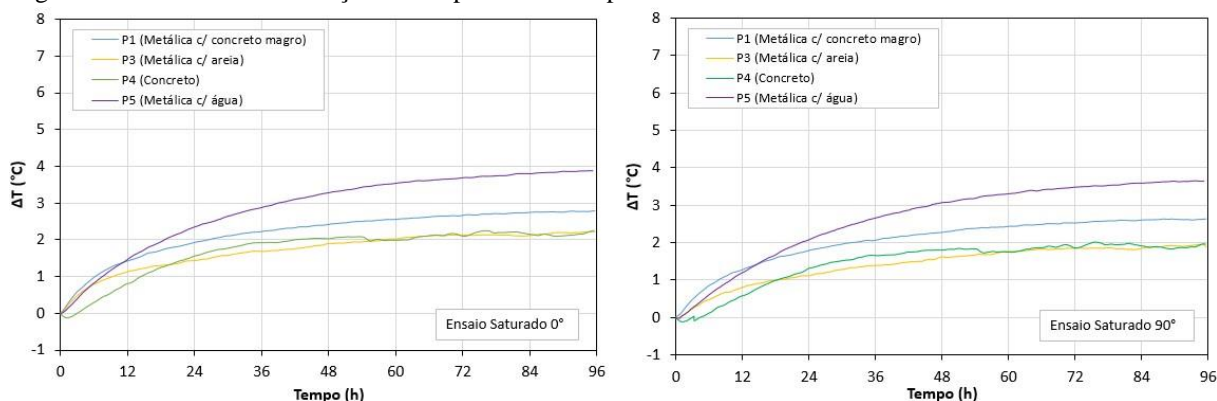
Apesar da água não ter a maior condutividade térmica, a estaca P5 foi a que apresentou a menor resistência térmica. O resultado se justifica devido aos efeitos combinados da condução e convecção na transferência de calor ocorrida neste ensaio. A convecção da água depende diretamente da taxa de calor inserida e do gradiente de temperatura no seu interior da estaca, tornando o problema uma análise tridimensional. Mesmo para o ensaio em pequena escala, nota-se a ocorrência da convecção natural na água utilizada no preenchimento da estaca. Ensaios de campo e de laboratório conduzidos por Kjellson e Hellstron (1997) e Spitler et al., (2016) mostram que existe o efeito escala na convecção natural, o que limita a extrapolação dos resultados. Porém, apesar da limitação, os resultados permitem verificar a significativa contribuição deste efeito na transferência de calor, discutido em detalhes no capítulo 5.

Tabela 4. 5 -Condutividade térmica dos materiais encontrada em literatura

Materiais	Condutividade térmica (W/mK)
Concreto saturado	1.4-3.6
Água	0.6
Areia saturada	1.7-3.2
Aço	~54

Fonte: Loveridge e Powrie, 2013 e Laloui e Loria, 2020

Figura 4. 13- Gráfico da variação da temperatura x tempo na interface das estacas analisadas a 0° e a 90°



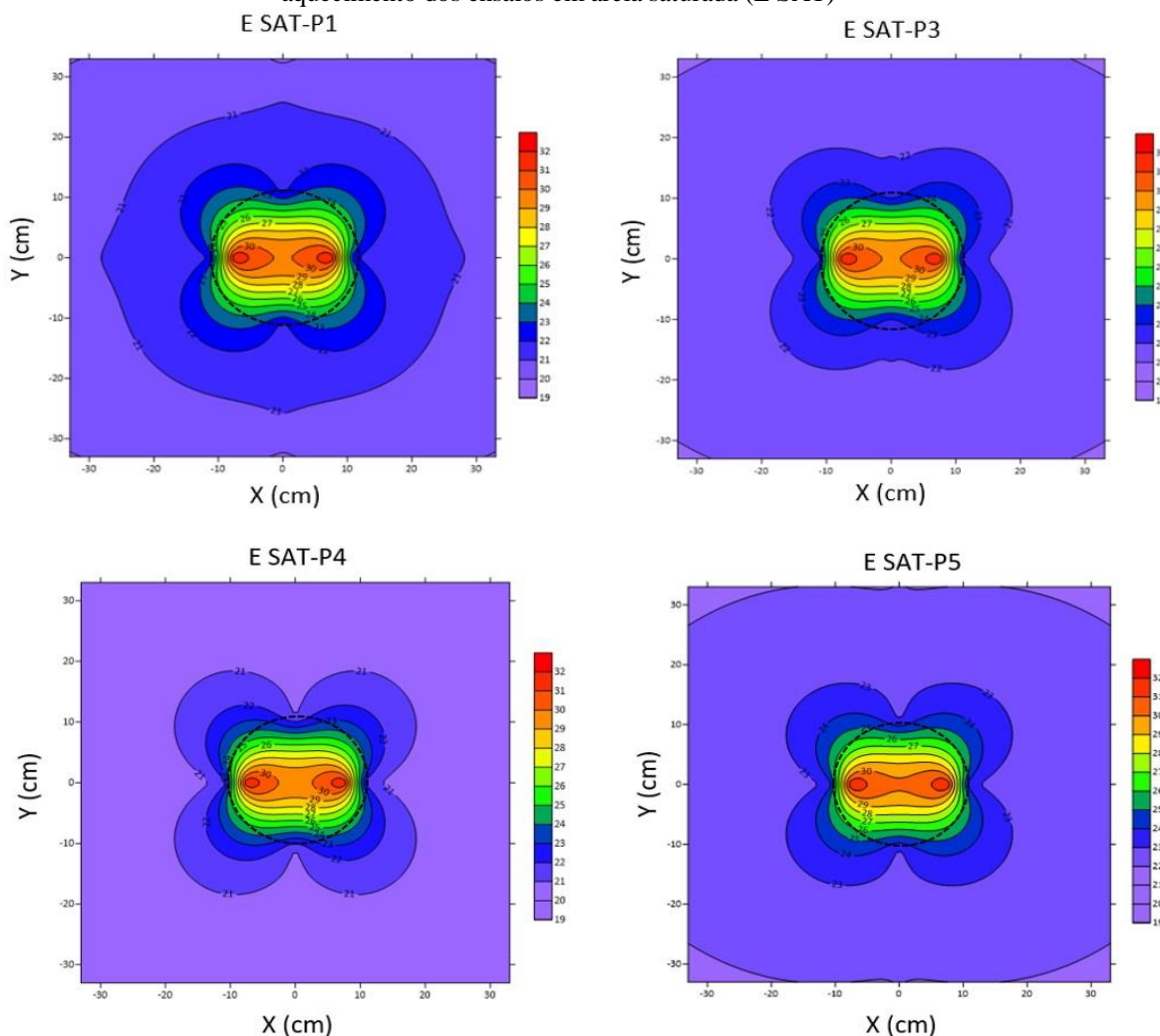
Fonte: Autora

Na Figura 4.15 apresenta-se a variação radial da temperatura em todas as posições analisadas a 0° e a 90° após 12h, 24h, 48h, 72h e 96h de aquecimento das estacas. Observa-se que os maiores incrementos de temperatura ocorreram no início do ensaio, 12 horas após o aquecimento, e que as curvas após 72 horas e 96 horas praticamente não apresentaram variação, o que confirma o efeito estacionário da transferência de calor.

Os resultados absolutos das temperaturas medidas no entorno das estacas ao término da fase de aquecimento dos ensaios em areia saturada foram plotados utilizando o programa Surfer que possibilita, através da interpolação dos dados medidos, a elaboração dos gráficos de contornos das temperaturas. Na Figura 4.14 são apresentados os gráficos com os contornos das temperaturas medidos em laboratório até a distância 2R a face da estaca (33cm).

Para elaboração dos gráficos foi considerado que a distribuição das temperaturas no entorno das estacas é simétrica em relação aos eixos X e Y.

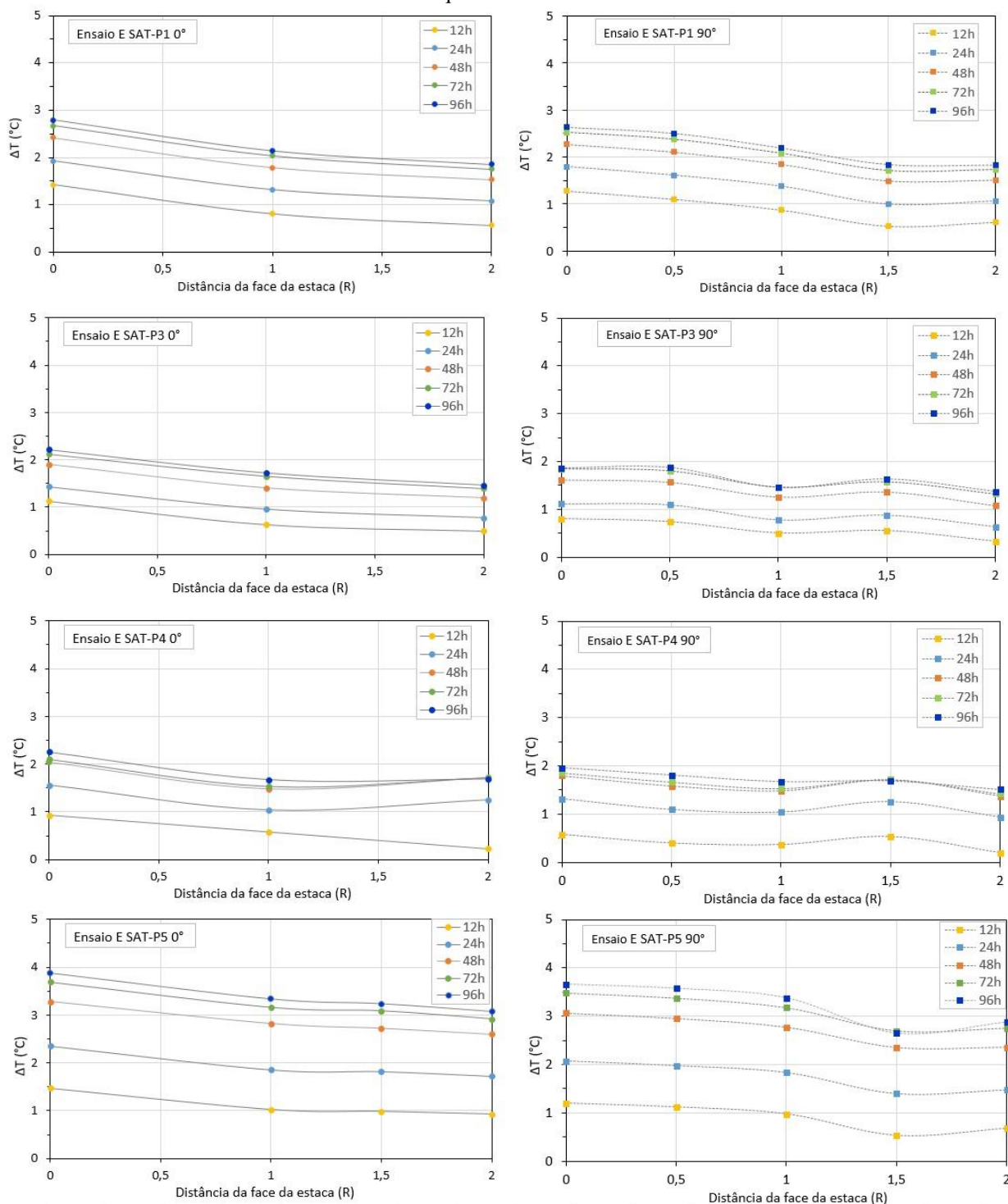
Figura 4. 14- Contornos das temperaturas no entorno das estacas P1, P3, P4 e P5 no final da fase de aquecimento dos ensaios em areia saturada (E SAT)



Fonte: Autora

Pelos resultados apresentados na Figura 4.14 nota-se que em todas as estacas com configuração em U simples, a distribuição da temperatura da estaca em areia saturada também não é uniforme no contorno e dentro da estaca, com contornos de temperatura com formato oval. Para as estacas P1, P3 e P4 nota-se dois contornos independentes em volta dos tubos PEAD sendo as temperaturas nestes contornos superiores à temperatura no centro da estaca. Para a estaca P5 observa-se que houve troca de calor entre os tubos PEAD, resultando no aquecimento do centro da estaca em igual proporção da região próxima aos tubos.

Figura 4. 15– Variação da temperatura nas posições analisadas durante a fase de aquecimento para 12h, 24h, 48h, 72h e 96h de aquecimento em areia saturada

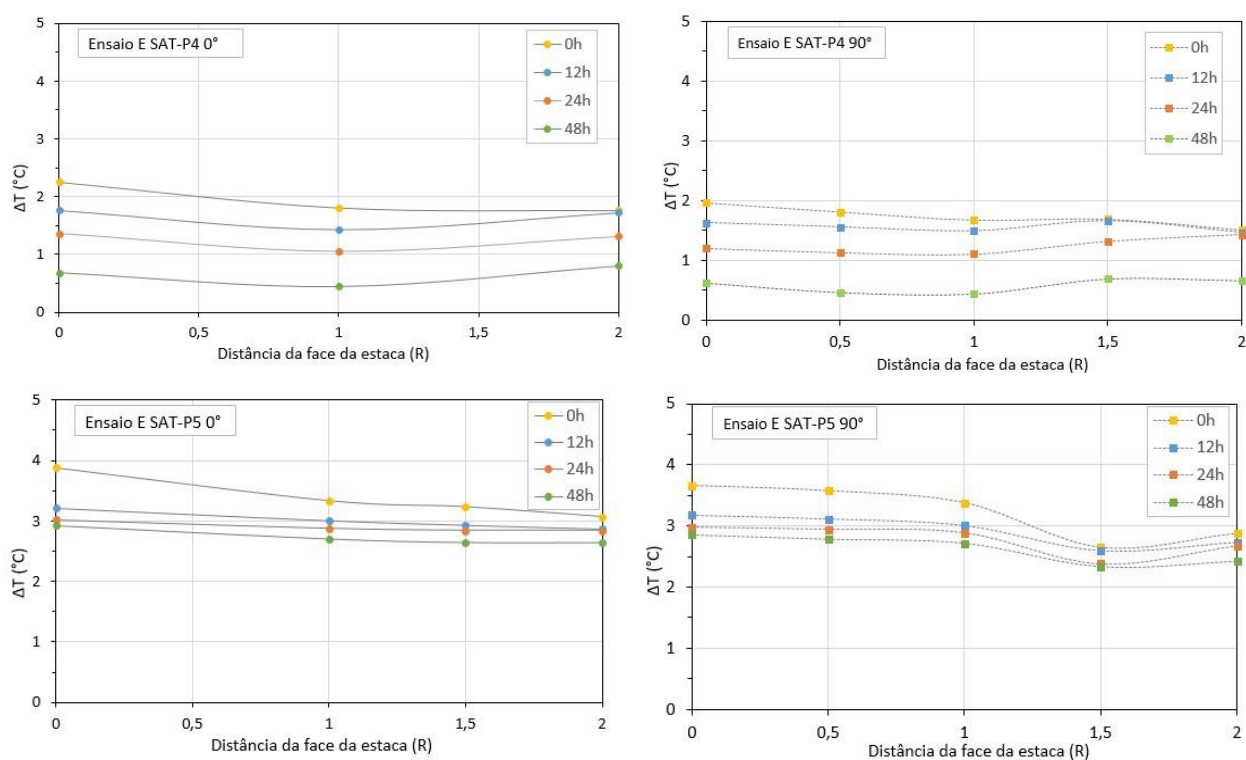


Fonte: Autora

O resfriamento do solo no entorno da estaca foi observado após o aquecimento das estacas P4 e P5, sendo que esta fase do ensaio consiste em desligar os aquecedores e monitorar o resfriamento da areia naturalmente durante 48 horas. Pelos resultados nota-se que após 48 horas a areia saturada no entorno da estaca P4 resfriou mais

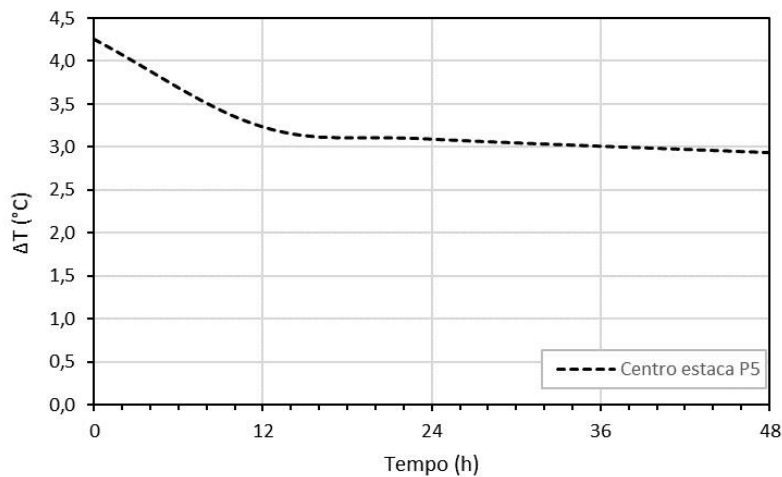
rapidamente do que para a estaca P5 (preenchida com água). Durante a fase de resfriamento, a variação da temperatura no centro da estaca P5 foi analisada e os resultados são apresentados na Figura 4.17. Observa-se que após desligar os aquecedores a água que preenche a estaca resfriou nas primeiras 24 horas, porém após este tempo a temperatura da água se manteve praticamente constante, com variação de 3°C, até as 48 horas de ensaio. A menor redução da temperatura da água na fase de resfriamento pode ser justificada pelo maior valor do calor específico da água com relação ao concreto e a areia.

Figura 4. 16– Resultados da fase de resfriamento dos ensaios nas estacas P4 e P5 em areia saturada



Fonte: Autora

Figura 4. 17 -Variação da temperatura do sensor no centro da estaca P5 durante a fase de resfriamento



Fonte: Autora

4.3. ESTIMATIVA DE TAXA DE CALOR NO ENSAIO

O modelo físico da caixa tem por função simular uma seção transversal de uma estaca trocadora de calor uma vez que as extremidades da caixa foram isoladas de forma que a transferência de calor ocorresse na direção radial da estaca. Neste sentido o modelo da fonte cilíndrica foi aplicado para estimar a taxa de calor injetada em cada ensaio através da Equação 4.3 apresentada abaixo. A equação se refere ao modelo da fonte cilíndrica sólida (SCSM) simplificado proposto por Man et al., (2010).

$$\theta = \frac{q}{k} \cdot G(F_o) \quad (4.3)$$

$$\theta = G(F_o) \quad (4.4)$$

$$\ln\theta = -2.321016 + 0.499615 \cdot [\ln(F_o)] - 0.027243 \cdot [\ln(F_o)]^2 - 0.00525 \cdot [\ln(F_o)]^3 + 0.000264311 [\ln(F_o)]^4 + 0.00006873912 [\ln(F_o)]^5 \quad (4.5)$$

Neste modelo, para o cálculo da taxa de calor, é necessário conhecer os valores de condutividade térmica do solo e a sua difusividade térmica para o cálculo do número de Fourier (F_o). Para possibilitar a análise foram adotados os valores de condutividade térmica da literatura para areia nas condições seca e saturada. Para areia seca, foram adotados os valores de 0,3 W/mK para a condutividade térmica e difusividade térmica de $3 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Para areia saturada foi adotada condutividade térmica de 2,4 W/mK e

difusividade térmica de $1,04 \cdot 10^{-6}$ m/s. Os valores foram extraídos de Laloui e Loria (2020).

De posse das taxas de calor injetadas em cada ensaio, foram calculadas as resistências térmicas das estacas preenchidas com os diferentes materiais testados e da estaca de concreto pela Equação 4.6.

$$R_b = \frac{(T_f - T_i)}{q} \quad (4.6)$$

As aproximações realizadas nesta pesquisa possuem suas limitações pois na realidade sabe-se que, apesar do modelo simular a seção transversal da estaca, na realidade sabe-se que a estaca é curta e que o modelo pode não representar corretamente os resultados. Porém, para fins de comparação, os resultados são úteis e contribuem na compreensão das diferenças de troca térmica dos materiais testados.

Nos próximos itens são apresentados os resultados para os ensaios em areia seca e em areia saturada.

4.3.1. Resultados ensaios em areia seca

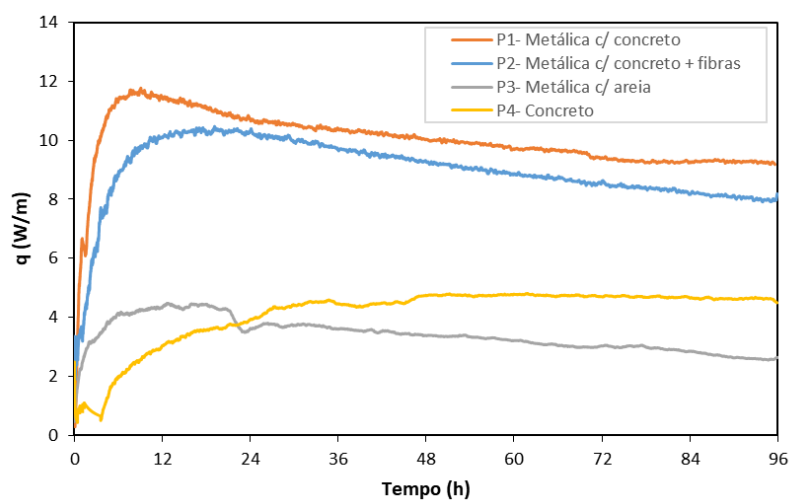
A Figura 4.18 indica a taxa de calor calculada para os ensaios conduzidos em caixa preenchida com areia seca. Pelos resultados nota-se que as taxas de calor calculadas foram maiores para as estacas P1 e P2. Isto ocorre pois, como as estacas transferiram melhor o calor para o solo, o termostato utilizado para o aquecimento da água mantida a 32°C foi ligado mais vezes, injetando mais calor na estaca. No caso das estacas P3 e P4, com elas retiveram maior calor, para manter a temperatura do fluido a 32°C, foi necessário injetar menor quantidade de calor.

Para o cálculo da taxa de calor, considera-se a variação da temperatura na interface da estaca. Pela Figura 4.18 observa-se que as estacas P1, P2 e P3 atingiram as maiores taxas de calor para menores intervalos de tempo. Este efeito pode ser atribuído ao tubo de aço em volta da estaca, uma vez que este efeito não ocorre na estaca P4 (de concreto).

As resistências térmicas de cada estaca (R_b) foram estimadas pela Equação 4.6 ao término do ensaio, após 96 horas, e são apresentadas na Tabela 4.6. Os valores das

resistências foram normalizados com relação com ensaios da estaca P1 (estaca metálica preenchida com argamassa) para fins de comparação entre os resultados.

Figura 4.18– Taxa de calor calculada para os ensaios em areia seca



Fonte: Autora

Pelos resultados de resistência térmica calculados, nota-se que a estaca P2 (metálica preenchida com argamassa e fibras metálicas) foi o preenchimento que conferiu menor resistência térmica à estaca, seguido pela argamassa sem adição de fibras, estaca P1. As estacas P4 e P3 apresentaram maiores valores de resistência térmica, sendo a areia seca a pior condição de preenchimento quando comparada às demais.

Tabela 4.6- Resistências térmicas calculadas para o ensaio em areia seca

Ensaio	R_b 96 h (mK/W)	$R_b/R_b(P1)$
ES - P1	0.37	1.0
ES - P2	0.22	0.6
ES - P3	2.52	6.8
ES - P4	1.05	2.8

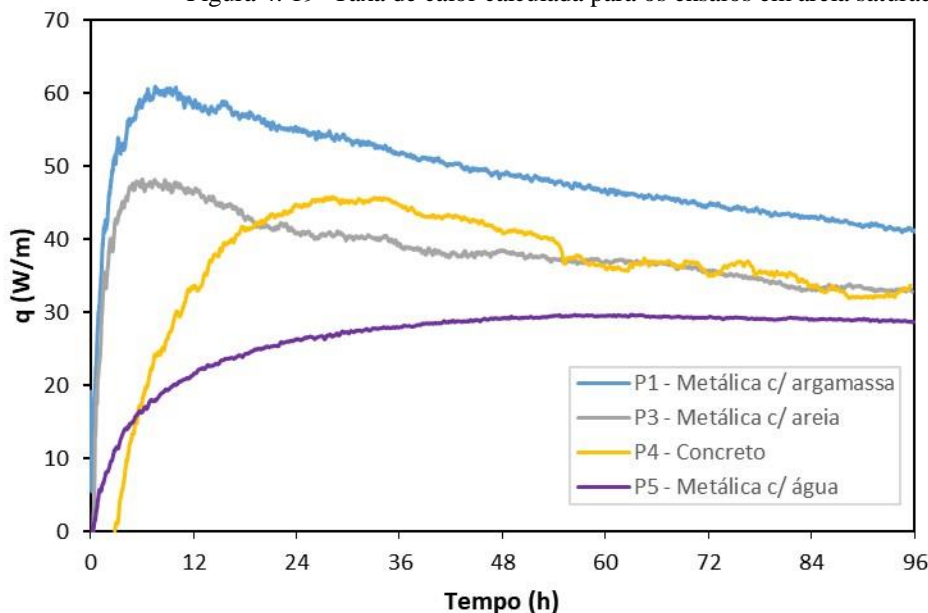
Fonte: Autora

4.3.2. Resultados ensaios em areia saturada

Os resultados das taxas de calor calculadas para os ensaios em areia saturada são apresentados na Figura 4.19. Pelos resultados nota-se que as taxas de calor calculadas para a os ensaios na condição saturada foram bem superiores às taxas calculadas na condição seca, devido ao aumento da condutividade térmica da areia.

Pelas curvas na Figura 4.19 é possível notar uma grande melhora dos resultados na estaca P3 (metálica preenchida com areia) devido ao aumento da condutividade térmica da areia de preenchimento da estaca na condição saturada.

Figura 4. 19- Taxa de calor calculada para os ensaios em areia saturada



Fonte: Autora

As resistências térmicas de cada estaca (R_b) foram estimadas pela Equação 4.6 ao término do ensaio, após 96 horas, e são apresentadas na Tabela 4.7. Os valores das resistências foram normalizados com relação com ensaios da estaca P1 (estaca metálica preenchida com argamassa) para fins de comparação entre os resultados.

Pela Tabela 4.7 observa-se uma menor variação entre os resultados de resistência térmica calculados. Nota-se que as estacas P3 e P4 apresentaram significativa redução da resistência térmica devido à saturação dos materiais da estaca.

Os resultados da estaca P5 indicam a ocorrência do efeito da convecção na água no interior da estaca uma vez que a condutividade da água é de 0,60 W/mK e os resultados são bem próximos aos encontrados para areia saturada e concreto que possuem condutividades térmicas superiores. Porém, como a estaca do ensaio é curta, os efeitos da convecção dos modelos não refletem a condição real uma vez que o efeito da convecção é tridimensional.

Tabela 4.7- Resistências térmicas calculadas para o ensaio em areia saturada

Ensaio	R_b 96 h (mK/W)	R_b/R_b(P1)
E SAT - P1	0.24	1.00
E SAT - P3	0.29	1.21
E SAT - P4	0.31	1.29
E SAT - P5	0.30	1.25

Fonte: Autora

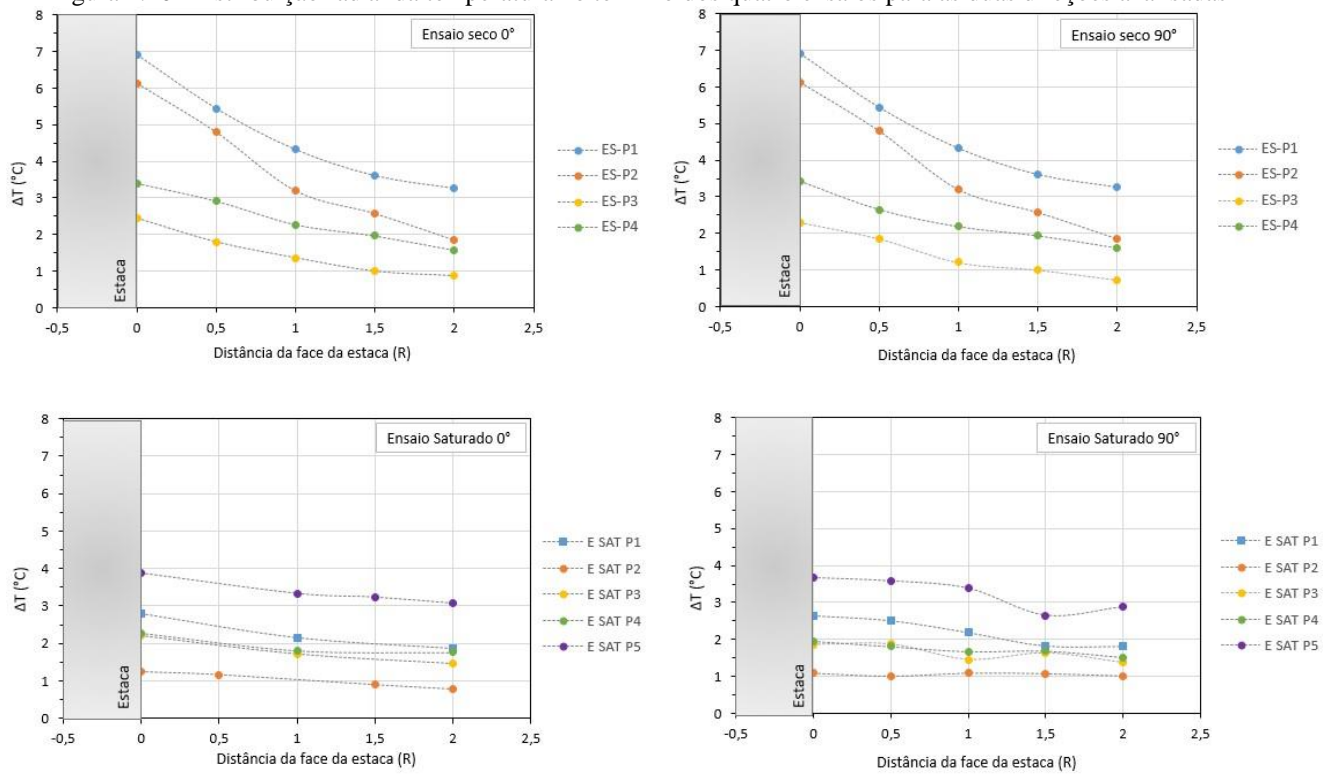
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM AREIA SECA E SATURADA

Comparando-se os resultados dos ensaios executados em areia seca e saturada nota-se que as variações das temperaturas no entorno das estacas preenchidas com os mesmos materiais foram menores nos ensaios saturados devido ao aumento da condutividade da areia quando saturada. Além disso, as diferenças entre as temperaturas nas posições 0R e 2R dentro do solo saturado é muito menor comparado ao caso de solo seco. Isso ocorre porque devido a maior condutividade térmica o calor não fica retido próximo à estaca.

Percebe-se também que nos ensaios saturados há uma maior uniformidade da temperatura nas bordas das estacas, ou seja, uma menor variação entre as temperaturas a 0° e a 90°. Na Figura 4.20 são apresentadas as variações das temperaturas no entorno das estacas ensaiadas em areia seca e saturada para as duas direções analisadas, 0 e 90°.

Menores gradientes térmicos são mais favoráveis ao comportamento das estacas trocadoras de calor pois o menor aquecimento da estaca reflete em menores variações no estado de tensões em seu interior, provocando menores interferências no comportamento termo-mecânico.

Figura 4.20- Distribuição radial da temperatura no término dos quatro ensaios para as duas direções analisadas



Fonte: Autora

5. EFEITO DE DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO NO DESEMPENHO TÉRMICOS DAS ESTACAS – ENSAIOS EM CAMPO

Para aumentar a eficiência térmica das fundações por estacas tubulares metálicas, utilizadas como trocadores de calor com o solo, foram testados diferentes materiais de preenchimento em campo por meio de ensaios de resposta térmica (TRT). Os testes foram realizados em quatro estacas piloto (P1, P2, P3 e P4) instaladas no mesmo terreno em que o prédio CICS será construído.

Os materiais de preenchimento utilizados foram areia, argamassa, argamassa com fibras metálicas e água. As estacas piloto possuem diâmetro de 244 mm, espessura de 10 mm, e foram instaladas com a ponta fechada, de modo que os tubos de geotermia fossem instalados ao longo de toda a profundidade com configuração em U simples.

Todas as estacas testadas foram instrumentadas com sensores de temperatura ao longo da profundidade para avaliar o comportamento térmico nas diferentes camadas de solo atravessadas, conforme relatado no item 3.4.1 deste trabalho. Na Tabela 5.1 são apresentadas as características das estacas testadas, os preenchimentos, e os níveis aonde foram instalados os sensores.

A instrumentação para medir a temperatura foi instalada no centro das estacas, sendo que para o caso da estaca preenchida com água foram utilizados sensores adicionais, instalados próximos à borda das estacas, para analisar o efeito das correntes de convecção na água quando aquecida.

Tabela 5. 1- Características das estacas piloto ensaiadas

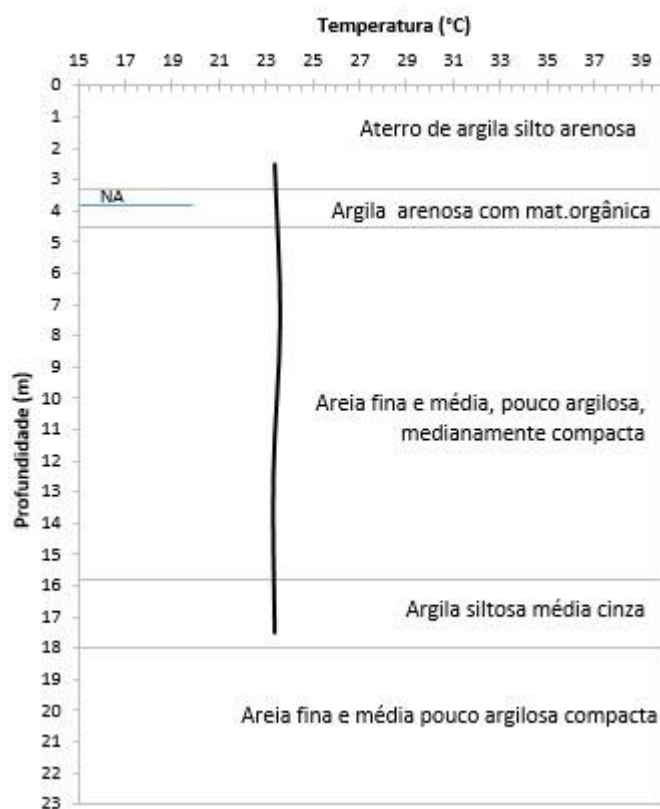
Ensaio	Estaca	Material	L(m)	Níveis dos sensores PT100 (m)
TRT-1	P1	Areia	22,75	Centro: 3,5m, 9,5m, 17,5, 20m
TRT-2	P2	Argamassa	23,00	Centro: 2,5m, 7,5m, 12,5m, 17,5m 19,5m
TRT-3	P3	Argamassa com fibras metálicas	22,81	Centro: 3,5m, 9,5m 17,5, 20m Centro: 4m, 12m, 20m
TRT-4	P4	Água	23,00	Borda: 2m, 4m, 8m, 12m, 16m, 20m

Fonte: Autora

Antes de iniciar os ensaios TRT, foram medidas as temperaturas dos sensores nas estacas, que estavam em equilíbrio térmico com o solo, para diferentes meses entre os anos de

2019 e 2020. Resultados de medidas de temperatura feitas em dezembro de 2019 até a profundidade de 17,5 metros, são apresentados na Figura 5.1. Para profundidades abaixo de 3 m nota-se que a temperatura permanece relativamente constante ao longo da profundidade, com valor médio próximo a 23.5°C.

Figura 5.1– Perfil de temperatura do subsolo do terreno do CICS



Fonte: Autora

5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS TRT

Nesta seção são apresentados os resultados dos quatro ensaios TRT nas estacas piloto em campo. Os ensaios foram executados com o aquecimento das estacas a uma taxa de calor constante aplicada por meio do fluído circulante. A duração da fase de aquecimento foi igual ou superior a 72 horas, de modo a atingir o estado estacionário de transferência de calor. Em três ensaios (TRT-1, TRT-2 e TRT-3) também foi executada a fase de resfriamento, com duração de 24 horas após o término da fase de aquecimento, desligando os aquecedores e mantendo-se a circulação do fluído.

A vazão média de circulação do fluído durante os ensaios variou de 9,35 a 10,51 l/s, e a potência nominal aplicada para aquecimento do fluído foi de 1,5Kw. Com os

dados registrados durante o ensaio, foi possível calcular, pela equação abaixo, a taxa de calor injetada no solo durante cada ensaio, conforme recomendado por Banks (2008).

$$Q = \dot{m}c_g\Delta T = \dot{m}c_g(T_i - T_o) \quad 5.1$$

Nesta equação \dot{m} é a vazão mássica do fluido em (kg/s), c_g é a capacidade térmica do fluido circulante (J/kgK), e ΔT é a variação entre a temperatura de entrada e saída do fluido. Os valores médios de Q (W) calculados estão apresentados na Tabela 5.2, juntamente com a temperatura média inicial do solo, a vazão média do fluido e a variação entre a temperatura de entrada e saída de cada ensaio.

Tabela 5.2- Dados dos quatro ensaios TRT executados nas estacas piloto

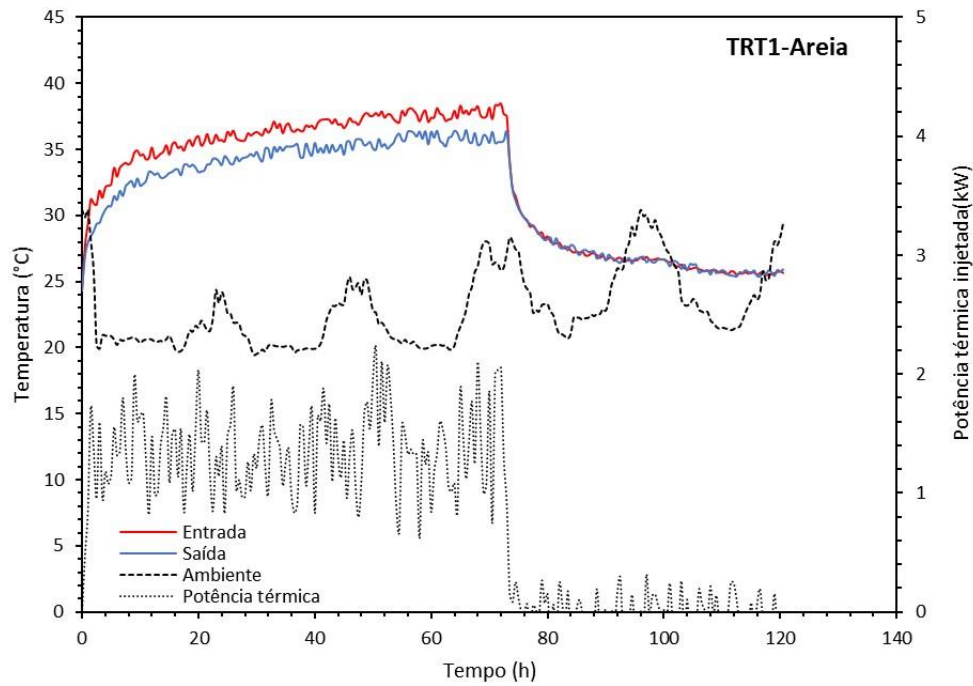
TESTE	Estaca Preenchida com	Calor injetado (W)	Taxa de calor por metro de estaca (W/m)	Temperatura Inicial do solo (°C)	ΔT (Tin-Tout) (°C)	Vazão do fluido (l/min)
TRT-1	areia	1414	58.2	24,30	2,18	10,51
TRT-2	argamassa	1423	59.8	23,78	2,00	9,83
TRT-3	argam.+fibra	1521	63.0	24,14	2,01	9,35
TRT-4	água	1437	60.4	23,80	1,97	10,03

Fonte: Autora

Antes do início dos ensaios manteve-se a circulação da água pelos tubos até que a temperatura de entrada e saída fossem aproximadamente iguais à temperatura média dos sensores instalados na estaca. As temperaturas médias iniciais encontradas em cada ensaio são apresentadas na Tabela 5.2, sendo aproximadamente iguais a 24°C.

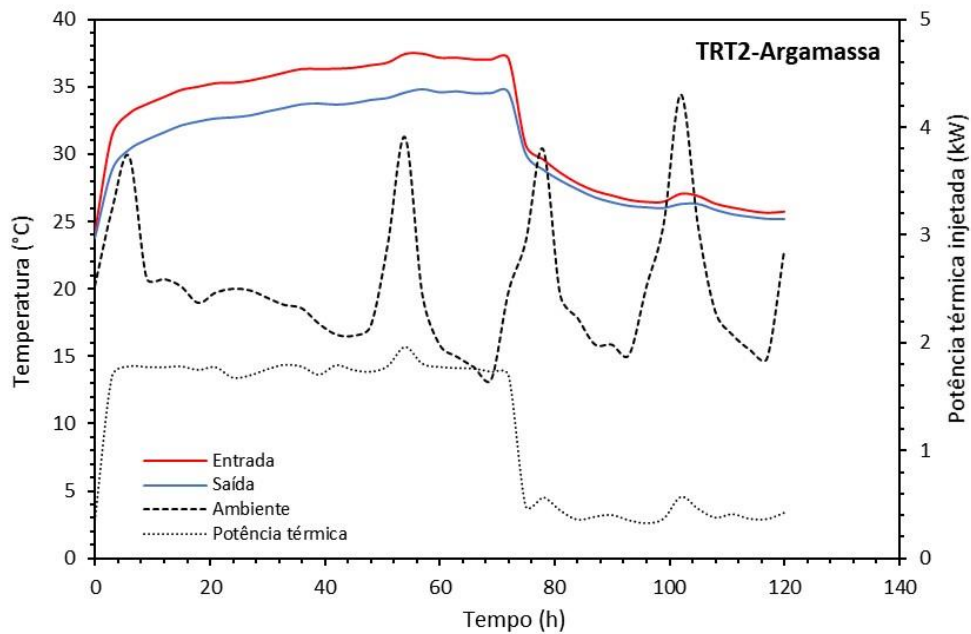
Os resultados dos ensaios TRT são apresentados nas Figura 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 que mostram a variação da temperatura de entrada e saída do fluido, temperatura ambiente e potência térmica injetada no solo durante as fases de aquecimento e resfriamento.

Figura 5.2- Resultado do TRT-1: estaca metálica preenchida com areia



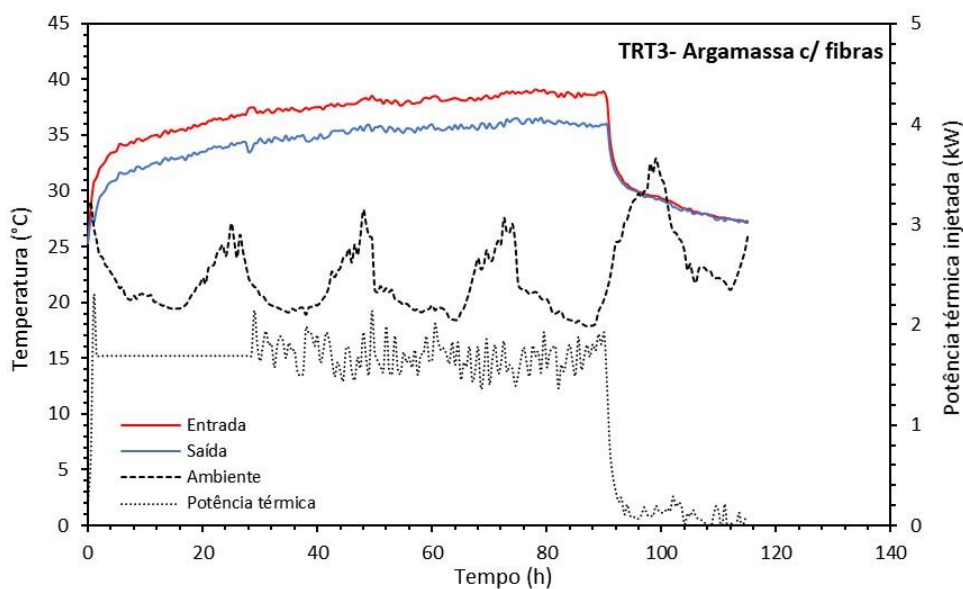
Fonte: Autora

Figura 5.3- Resultado do TRT-2: estaca metálica preenchida com argamassa



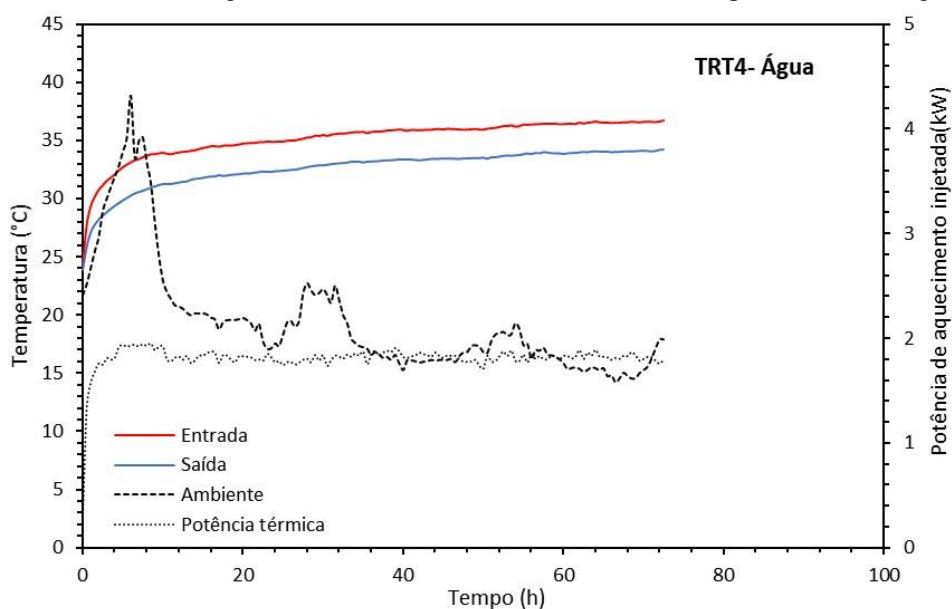
Fonte: Autora

Figura 5.4- Resultado do TRT-3: estaca metálica preenchida com argamassa e fibras metálicas



Fonte: Autora

Figura 5.5- Resultado do TRT-4: estaca metálica preenchida com água



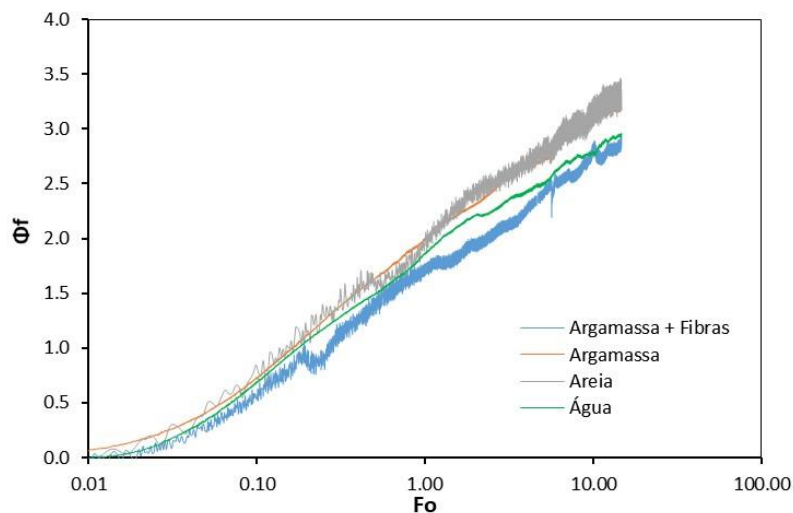
Fonte: Autora

No início do ensaio TRT-3, nas primeiras 28 horas de ensaio, houve um problema com a leitura do sensor que media a temperatura de saída da água da estaca. O mesmo foi substituído, e optou-se por continuar o ensaio e estender a sua duração de 72 horas (como os demais ensaios) para 90 horas, de modo a ter mais dados para análise. Os dados da temperatura de saída foram recalculados para este trecho, pela equação 5.1, adotando-se a potência térmica média. As variações entre

a temperatura de entrada e saída dos ensaios foi de aproximadamente 2°C no término da fase de aquecimento dos ensaios, sendo os resultados de cada ensaio apresentados na Tabela 5.2.

Com base nos resultados dos ensaios TRTs foi feita a comparação em termos de parâmetros normalizados para a variação da temperatura do fluido ($\Phi_f = 2\pi\lambda g\Delta T_f / q$) e tempo ($Fo = \alpha g t / rb^2$). Os resultados são apresentados na Figura 5.6.

Figura 5.6– Variação normalizada da temperatura do fluido durante os TRTs



Fonte: Autora

A inclinação das curvas apresentadas na Figura 5.6 é controlada pela resistência térmica da estaca e pelas propriedades térmicas do solo, que é a mesma para todas as estacas. O trecho inicial das curvas é semelhante para todos os casos testados, e após aproximadamente 60 minutos, a taxa de aumento de Φ_f é reduzida para a estaca preenchida com argamassa e fibras metálicas, provavelmente devido à maior condutividade térmica do material (menor resistência térmica) em comparação com os demais. Além disso, a taxa de aumento da temperatura também diminui gradualmente para a estaca preenchida com água.

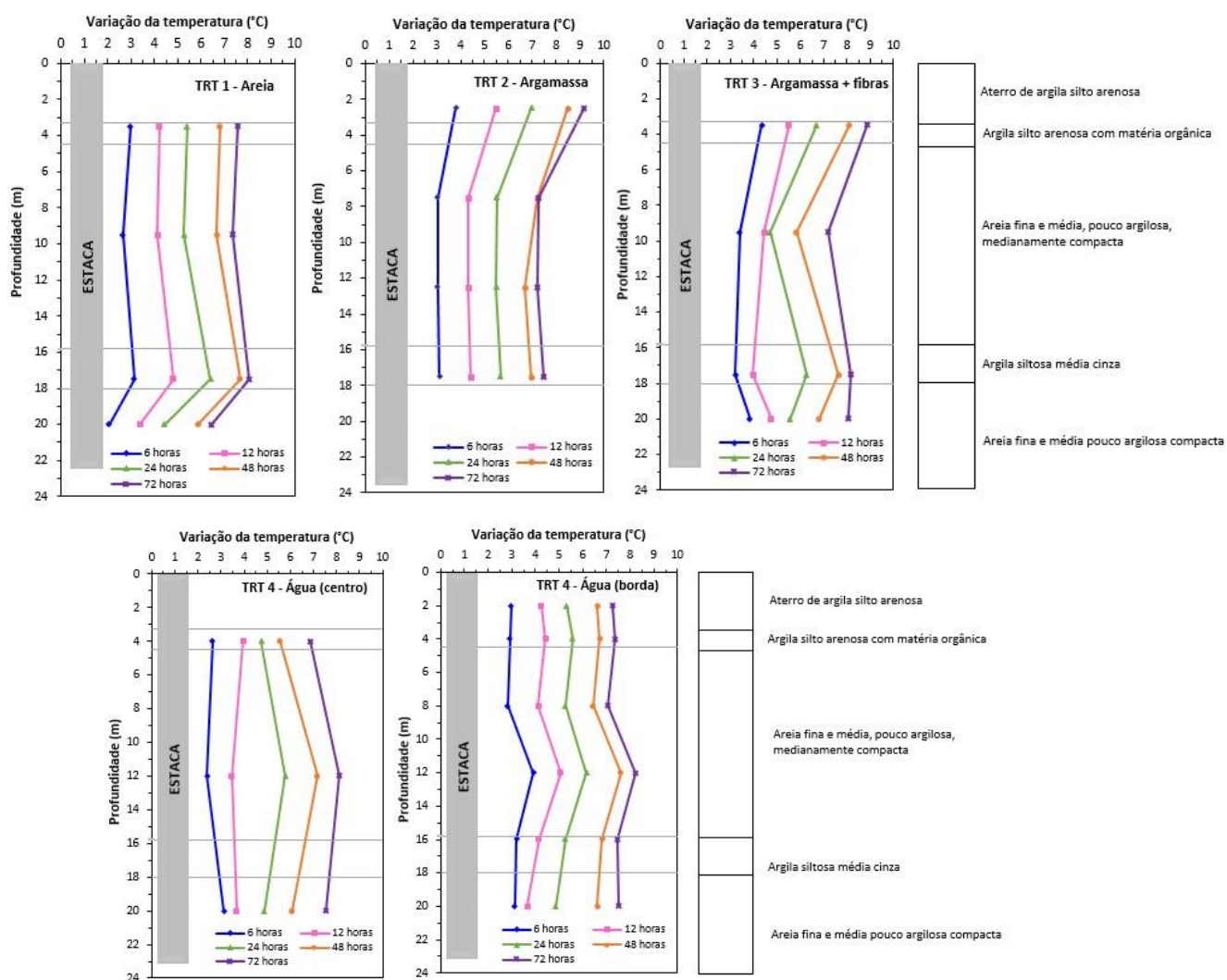
Possivelmente, essa redução foi resultado do efeito da convecção gerado no interior da estaca na região anelar, diminuindo o valor da resistência térmica. Os resultados das estacas preenchidas com areia saturada e argamassa são muito semelhantes, indicando desempenho térmico equivalentes.

Na Figura 5.7 são apresentados os perfis de temperatura durante os quatro ensaios TRT para diferentes intervalos de tempo após o início do ensaio (6h, 12h, 24h,

48h e 72h). Apesar dos métodos de interpretação dos ensaios se basearem em solos homogêneos e isotrópicos para as análises, sabe-se que em campo não é isso que ocorre.

Pelos resultados nas estacas preenchidas com areia, argamassa e argamassa com fibras nota-se maiores temperaturas nas camadas argilosas do perfil do terreno pois as argilas possuem menores valores de condutividade térmica, conseqüentemente ocorre uma menor transferência de calor, sendo este armazenado nas estacas. Já os sensores posicionados na camada de areia saturada indicaram exatamente o oposto, com menores valores de incremento de temperatura com o tempo pois as camadas de areia possuem maiores condutividades térmicas.

Figura 5. 7– Perfil da temperatura das estacas em diferentes tempos durante o ensaio TRT: 6h, 12h, 24h, 48h e 72h.



Fonte: Autora

Para a estaca preenchida com água foram analisadas duas posições para os sensores de temperatura, no centro e próximo à borda. Nota-se que as maiores variações de temperatura ocorreram a 12 metros (no centro da estaca), com variações de 8 °C para ambas as posições, sendo os sensores posicionados na camada de areia. O efeito do tipo de solo na temperatura ao longo do comprimento da estaca, observado nos outros ensaios, não foi notado no caso da estaca preenchida com água, devido a ocorrência de convecção no seu interior, detalhada mais adiante neste capítulo. Por esta razão, a região central da estaca apresentou maiores temperaturas.

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRT

Através dos ensaios de troca térmica (TRTs) é possível determinar a condutividade térmica média do solo, até a profundidade ensaiada, e a resistência térmica da estaca para os diferentes materiais de preenchimento testados. Para análise dos resultados foram utilizados os métodos analíticos clássicos, métodos empíricos, cálculo da eficiência térmica e análises numéricas em 2D e 3D que serão discutidos abaixo. Os diferentes materiais testados no preenchimento das estacas podem influenciar no valor da resistência térmica das estacas, sendo este o parâmetro adotado para análise dos resultados.

5.2.1. Métodos Analíticos

5.2.1.1. Modelo da fonte linear infinita (ILSM)

Para análise dos resultados foi adotado o método analítico da fonte linear infinita (ILSM). Este modelo é o mais utilizado para analisar a resposta térmica dos trocadores de calor com o solo devido à sua simplicidade. O processo de condução de calor no solo é simplificado em uma análise em 1D e a teoria do modelo é baseada em uma fonte de calor linear infinita, com fluxo de calor constante (q), em regime estacionário de transferência de calor (Ingersoll et al., 1954; Carslaw e Jaeger, 1959). Como resultado, é possível estimar as mudanças de temperatura do solo (ΔT_g), devido à potência térmica injetada ao longo do comprimento da estaca q (W/m) durante o teste TRT.

Os resultados foram analisados pela equação completa baseada em integral exponencial em que os parâmetros λ_g e R_b são obtidos simultaneamente, e pelo modelo

simplificado em que a integral exponencial é aproximada para uma relação log-linear. Nesse sentido, foi desenvolvido um código para calcular a solução analítica completa.

Para ambas as análises foi calculado o t_{\min} sendo este o tempo a partir do qual os dados foram analisados, sendo a parte inicial do ensaio desprezada. Para o cálculo do t_{\min} foi considerado $F_0=5$ de modo que a transferência de calor estivesse em regime estacionário. Para estimar o limite de tempo inferior, é necessário assumir a difusividade térmica do solo (α_g).

A difusividade térmica do solo (α) estimada foi de $8,14 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, e o t_{\min} calculado foi de 25 horas. A estimativa da difusividade térmica do solo foi obtida pela Equação 5.2, onde C_g e C_w são respectivamente a capacidade térmica do solo e da água. Para a capacidade térmica do solo foi adotado o valor de $C_g = 1000 \text{ Ws/kgK}$ e para a água $C_w = 4186 \text{ J/kgK}$, propostos por Brandl (2006), sendo m a massa em kg. O teor de umidade considerado para o cálculo das massas foi de 23% e foi estimado com base nos resultados da sondagem SPT.

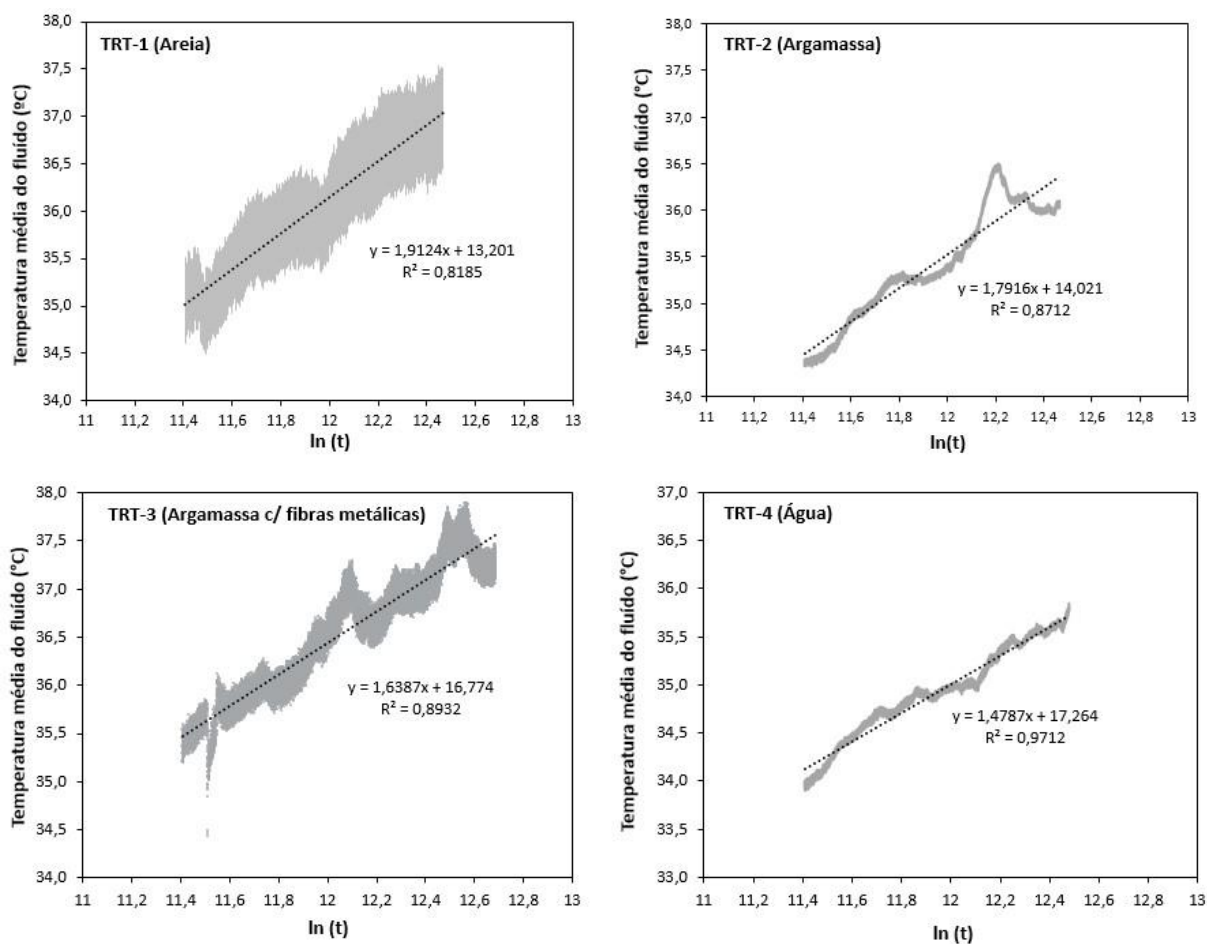
$$S_{cv} = (m_{\text{solo}} \cdot C_g + m_{\text{água}} \cdot C_w) \quad 5.2$$

A condutividade térmica efetiva do solo (λ_{eff}), para profundidade de aproximadamente 23 metros, foi primeiramente calculada pelo método ILSM Simplificado pela Equação 5.3. Para isto foram plotados os dados de variação da temperatura média do fluido pelo logaritmo do tempo sendo m o coeficiente angular obtido no gráfico. Na Equação 5.3 Q é a potência de aquecimento calculada pela Equação 5.1, L é o comprimento da estaca.

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{Q}{4\pi L m} \quad 5.3$$

Nota-se que a relação entre estes dados é praticamente linear. Portanto, foi determinado o coeficiente angular do ajuste linear dos dados, excluindo os as primeiras 25 horas do ensaio. Na Figura 5.8 são apresentados os ajustes lineares para os quatro ensaios executados. Com os valores do coeficiente angular, e potência térmica injetada média, foi calculada a condutividade térmica efetiva do solo.

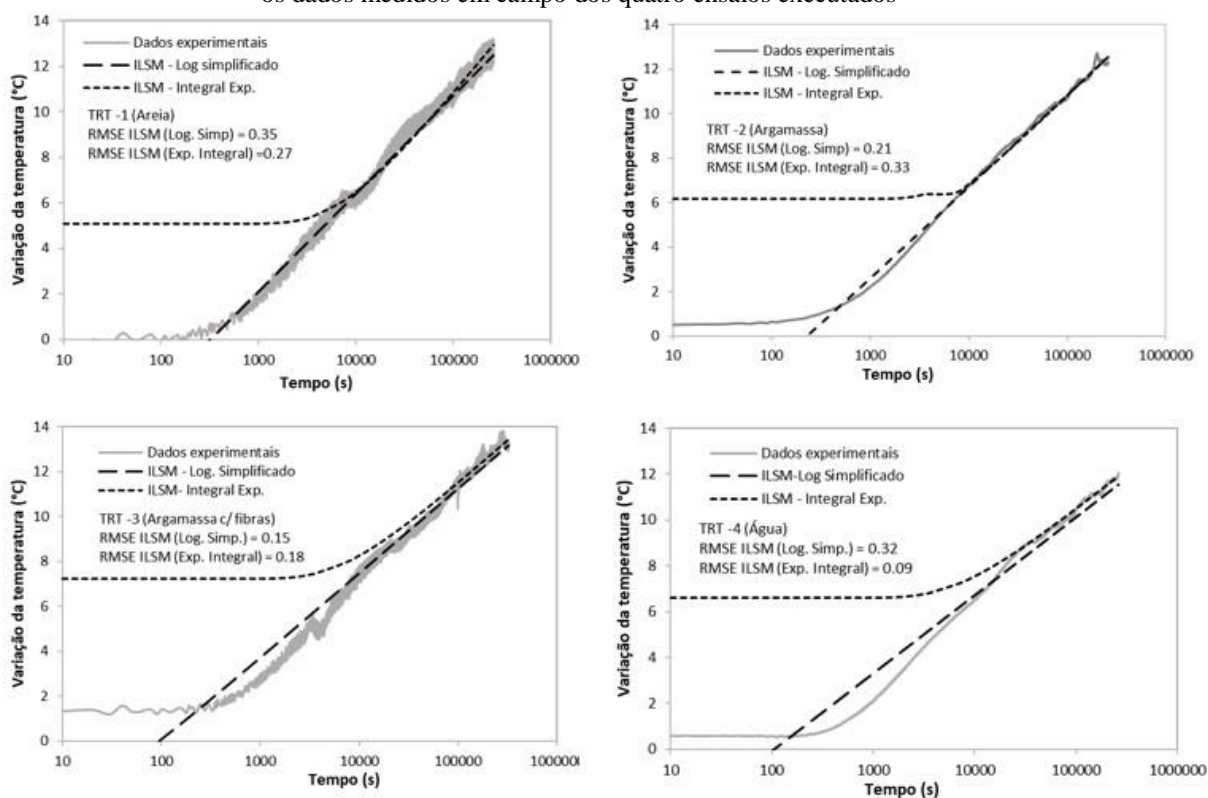
Figura 5.8- Relação entre o aumento da temperatura média do fluido e o logaritmo natural do tempo dos quatro ensaios executados



Fonte: Autora

A vantagem de ter mais de um ensaio executado no mesmo local é a possibilidade de comparar e avaliar os valores de condutividade térmica do solo obtidos uma vez que existem fontes de incertezas associadas aos dados dos ensaios e aos valores assumidos para os cálculos (Banks, 2008).

Figura 5.9– Ajuste visual dos modelos analíticos ILSM-Simplificado e ILSM-Integral exponencial com os dados medidos em campo dos quatro ensaios executados



Fonte: Autora

A resistência térmica das estacas (R_b) foi estimada pelo modelo ILSM simplificado através do intercepto da aproximação linear no eixo da temperatura, pela Equação 5.4

(BANKS, 2012)

Os pares de valores de λs e R_b obtidos para cada ensaio são apresentados na Tabela 5.3. Os resultados encontrados pelo modelo simplificado foram plotados em termos de variação da temperatura ao longo do tempo, e foram comparados com os dados coletados em campo. A comparação foi feita através do cálculo do erro quadrático médio (RMSE), excluindo as primeiras 25 horas do ensaio. A Figura 5.9 mostra o ajuste visual das duas curvas (modelo analítico e dados de campo).

$$R_b = \frac{\text{Intercepto}}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[2.303 \log_{10} \left(\frac{4\lambda}{r_b^2 S_{vc}} \right) - 0.5772 \right] \quad 5.4$$

A versão completa do modelo analítico ILSM-Integral Exponencial também foi aplicada para determinar os pares de valores de λs e R_b de cada ensaio. Para isso, um código foi desenvolvido para calcular a integral exponencial apresentada na Equação

5.5 de modo a determinar os dois valores simultaneamente. Nos cálculos foram desconsiderados os dados de ensaio das primeiras 25 horas. Na Tabela 5.3 são apresentados os pares de valores encontrados para os quatro ensaios analisados.

$$\Delta T_g(r_i, t) = \frac{q_t}{4\pi\lambda_g} E_i\left(\frac{r_i^2}{4\alpha_g t}\right) \quad (5.5)$$

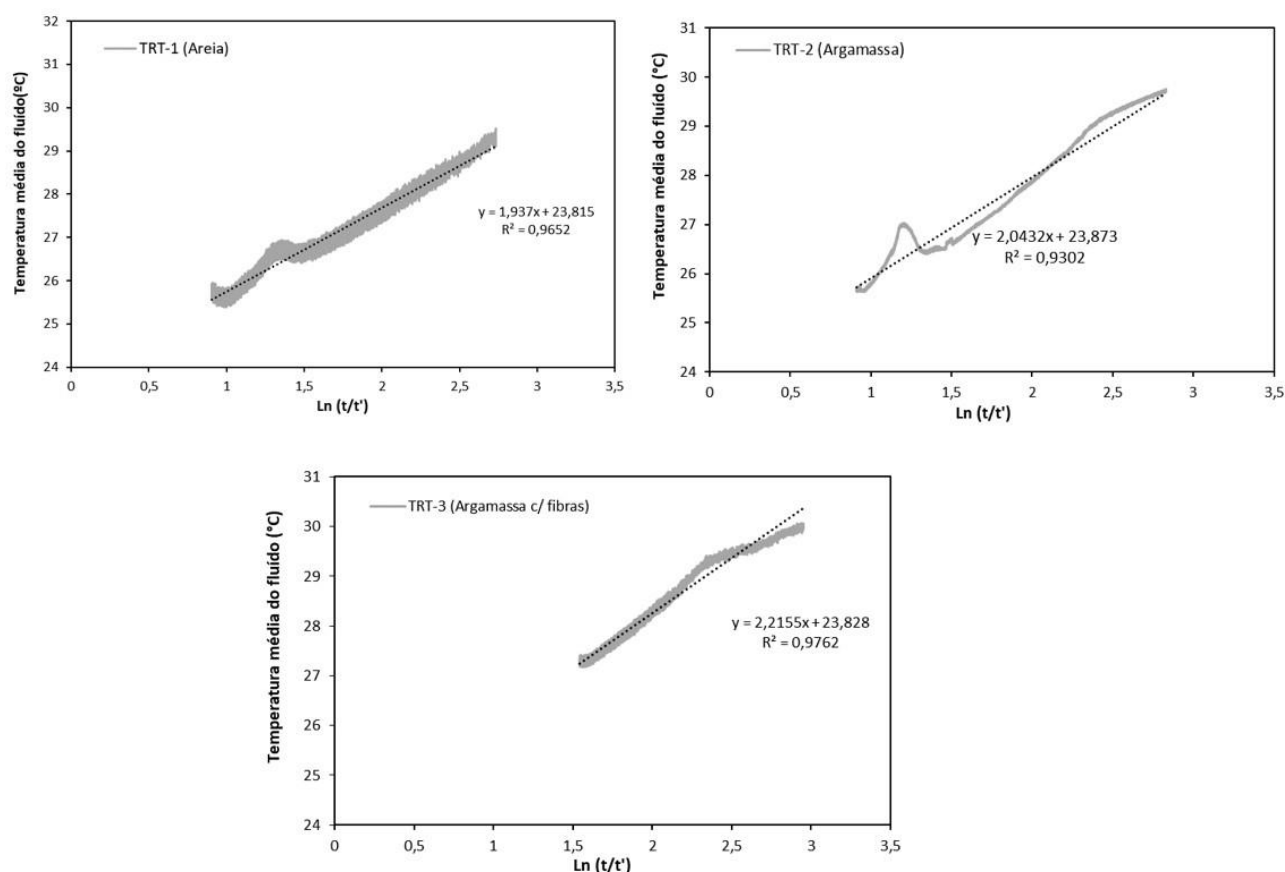
De posse dos valores de λ_s e R_b determinados pela integral exponencial do ILSM, também foram plotadas as curvas de variação da temperatura ao longo do tempo. As curvas foram comparadas com os dados experimentais, sendo calculado o valor do erro quadrático médio (RMSE) de cada ensaio, plotadas na Figura 5.9.

A condutividade térmica do solo também foi determinada pela fase de recuperação térmica (*recovery*) na qual o aquecimento é desligado e a circulação do fluido é mantida. A fase de resfriamento foi executada em todos os testes, exceto para o TRT-4. A Figura 5.9 ilustra o ajuste linear para os dados do gradiente de temperatura *versus* $\ln(t/t')$ para o cálculo da condutividade térmica pela Equação 5.6.

$$\Delta T_f \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{t}{t'}\right) \right] \quad (5.6)$$

A grande vantagem de utilizar o método de *recovery* para a determinação da condutividade térmica do solo é eliminar a dependência do valor da resistência térmica da estaca nos resultados. Para a fase de recuperação térmica foram desconsiderados os dados das primeiras 5 horas após o início do resfriamento natural pois obteve-se melhores ajustes lineares. Na Tabela 5.3 são apresentadas as condutividades térmicas do solo para os ensaios analisados. Na mesma tabela são apresentados os erros quadráticos médios (RMSE) da variação da temperatura *versus* tempo calculada pela equação do *recovery*, com os dados de condutividade térmica determinados excluindo as 5 primeiras horas, com os dados experimentais de cada ensaio.

Figura 5. 10- Ajustes lineares para a fase de recuperação térmica (recovery) desconsiderando as primeiras 5 horas do ensaio



Fonte: Autora

A interpretação dos resultados baseada em um único valor de condutividade térmica do solo e resistência térmica da estaca, para um tempo mínimo de descarte (t_{\min}), pode não ser suficiente para identificar a interferência de fatores externos nos resultados durante o ensaio como:

- Influência da temperatura ambiente nos resultados devido a ineficiência do isolamento térmico, ou grande extensão da tubulação do ensaio exposta ao ambiente;
- Efeitos do fluxo de água subterrânea;
- Instabilidade e flutuação do calor injetado nas estacas, q (W/m).

Tabela 5.3– Valores de condutividade térmica do solo, resistência térmica da estaca e erro quadrático médio (RMSE) entre os métodos analíticos e os dados medidos em campo

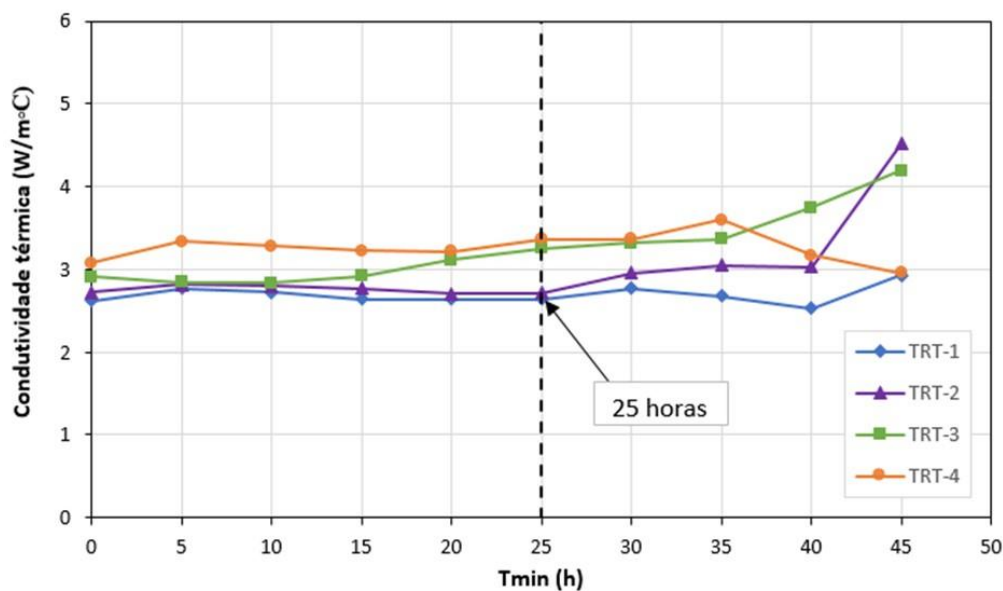
Teste/Método	λ_{solo} (W/m°C)	R_b (m°C/W)	RMSE
TRT- 1 Areia			
ILSM - Log Simplificado	2.64	0.096	0.35
ILSM –Integral Exp.	2.51	0.094	0.31
ILSM -Recovery ¹	2.60	-	0.36
TRT- 2 Argamassa			
ILSM - Log Simplificado	2.71	0.103	0.21
ILSM –Integral Exp.	2.63	0.101	0.33
ILSM -Recovery ¹	2.36	-	0.28
TRT- 3 Argamassa com Fibras			
ILSM - Log Simplificado	3.25	0.106	0.15
ILSM –Integral Exp.	3.17	0.108	0.22
ILSM -Recovery ¹	2.39	-	0.40
TRT- 4 Água			
ILSM - Log Simplificado	3.36	0.102	0.32
ILSM –Integral Exp.	3.26	0.105	0.09

¹ Análise realizada com descarte das primeiras 5 horas de ensaio

Fonte: Autora

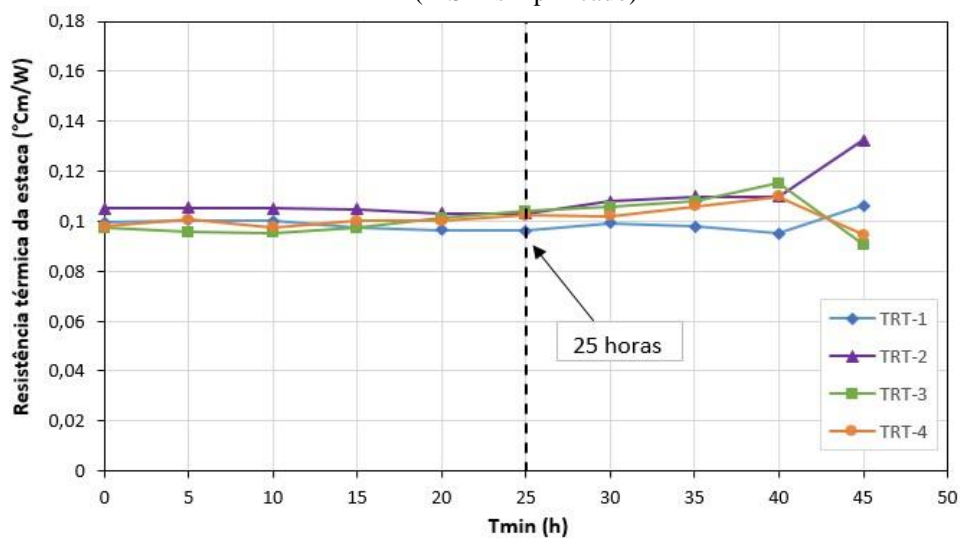
Nesta pesquisa também foi feita a análise dinâmica dos resultados pelo ILSM Simplificado, para diferentes intervalos de tempo de início da análise (t_{\min}) até 45 horas, apresentadas na Figura 5.11 e Figura 5.12. Essa análise permite avaliar se há variação dos parâmetros estimados (λ_s e R_b) com o tempo devido às interferências externas, e as incertezas associadas à estimativa de um único valor, sendo recomendada em vários trabalhos como Sanner et al. (2005), Loveridge et al. (2013), Choi & Ooka (2015) e Jensen-Page et al. (2019).

Figura 5.11- Variação da condutividade térmica das estacas para diferentes valores de t_{\min} (ILSM-simplificado)



Os resultados das Figura 5.11 e Figura 5.12 mostram que no início as curva apresentam-se estáveis, com grandes variações no final quando t_{\min} aumenta. Isto acontece, pois, a parcela de dados para análise diminui, sendo os resultados mais sensíveis aos efeitos externos como variação da potência de aquecimento e interferências da temperatura ambiente. A vantagem de ter mais de um ensaio executado no mesmo terreno é a possibilidade de comparação dos resultados para conclusão do valor de condutividade mais apropriado.

Figura 5.12- Variação da resistência térmica das estacas para diferentes valores de t_{\min} (ILSM-simplificado)



Nota-se uma boa concordância para os valores de condutividade térmica do solo obtidos nos ensaios TRT-1 e TRT-2. No caso do ensaio TRT-4, o aumento da condutividade térmica do solo se deve aos efeitos combinados da condução/convecção que ocorrem no interior da estaca. Quanto aos resultados do ensaio TRT-3 observa-se uma tendência de aumento dos valores de condutividade térmica do solo para t_{\min} superiores a 10 horas. Além disso, os valores absolutos de variação da temperatura reduzem no final do ensaio, se tornando mais sensíveis às variações externas (Jensen-Page et al., 2019). Os resultados indicam que houve interferência dos efeitos da temperatura ambiente, refletida no aumento da taxa de calor real injetada, que foi superior à potência nominal do boiler, devido à incidência solar nos tubos externos conectados à estaca.

Quanto aos valores de resistência térmica encontrados na análise dinâmica pelo ILSM observa-se que mesmo variando os materiais de preenchimento, que possuem condutividade térmica diferentes (λ_g), não houve mudança significativa nos valores das resistências (R_b).

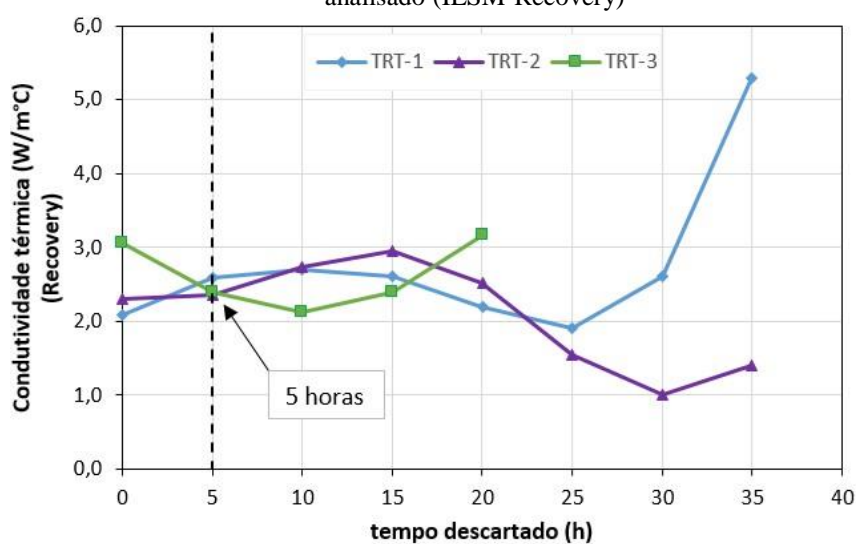
Javed e Spitler (2017) analisaram diferentes modelos teóricos para o cálculo da resistência térmica de poços (*boreholes*), variando a posição dos tubos PEAD, a condutividade térmica do material da estaca, e o diâmetro do poço. Os resultados para o poço com diâmetro de 288 mm (próximos ao diâmetro das estacas), e configuração com tubos próximos à parede mostram que as maiores variações da resistência térmica (R_b) ocorreram para condutividades térmicas do material da estaca (λ_g) entre 0,6 e 1,2 W/m°C. Porém, para condutividades térmicas do material da estaca superiores, de 1,2 a 3,6 W/m°C, as reduções da resistência térmica não foram significativas.

Os resultados das análises dinâmica obtidos pelo ILSM para a resistência térmica da estaca apresentam uma semelhança com as análises teóricas realizadas por Javed e Spitler (2017). Os valores de resistência térmica para as estacas preenchidas com diferentes materiais, analisadas para diferentes t_{\min} , foram muito próximos variando de 0,096 m°C/W (TRT-1) a 0,103 m°C/W (TRT-2). Os resultados podem ser justificados pela posição dos tubos PEAD estarem próximos à parede da estaca que é o parâmetro que mais influenciou as análises apresentadas por Javed e Spitler (2017).

A análise dinâmica também foi realizada com os dados da fase de recuperação térmica (*recovery*) para o cálculo da condutividade térmica do solo. Foram considerados diferentes tempos de início do ensaio (t_{\min}), sendo descartados os dados antes daquele

tempo. Para o ensaio TRT-1 e TRT-2 as análises foram conduzidas até 35 horas pois a fase de resfriamento dos ensaios foi mais longa, com 48 horas de duração. Para o ensaio TRT-3 a análise dinâmica foi feita até 20 horas, pois o resfriamento foi mais curto, com duração de 24 horas. Os resultados são apresentados na Figura 5.13. Os valores de condutividade térmica encontrados nos três ensaios variaram de 2,36 a 2,60 W/m°C. Foi considerando o tempo de descarte de 5 horas devido à maior proximidade entre os três resultados.

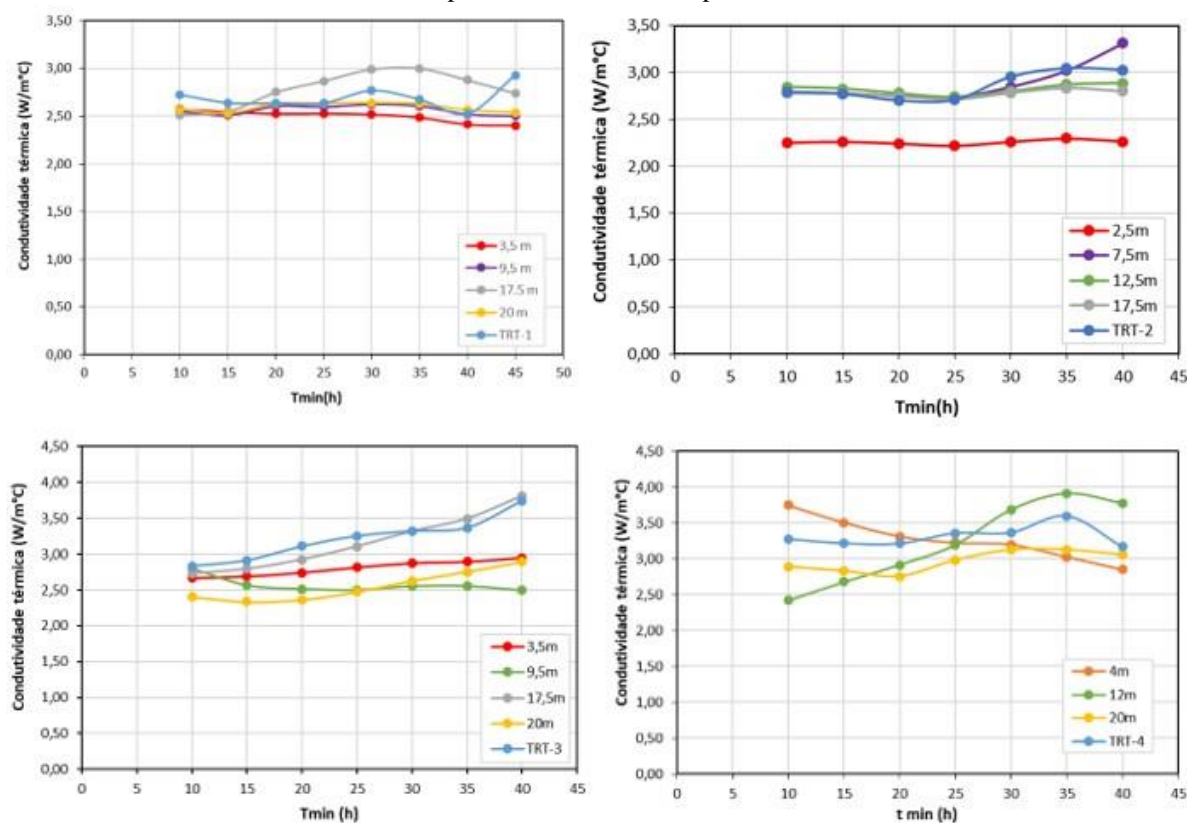
Figura 5.13- Variação da condutividade térmica das estacas para diferentes intervalos de tempo analisado (ILSM-Recovery)



Fonte: Autora

Para complementar as análises, com os dados de variação da temperatura dos sensores instalados no centro das estacas, foram calculadas as condutividades térmicas de cada camada pelo método ILSM-Simplificado para diferentes tempos de início (t_{min}). Os resultados da análise dinâmica são apresentados na Figura 5.14 e na Figura 5.15 é apresentado o perfil do solo e a variação das condutividades encontradas em cada profundidade para os ensaios TRT1, TRT-2 e TRT-3. Nessa última análise, não foram consideradas as condutividades encontradas no ensaio TRT-4 por terem sido majorados devido aos efeitos combinados da condução/convecção.

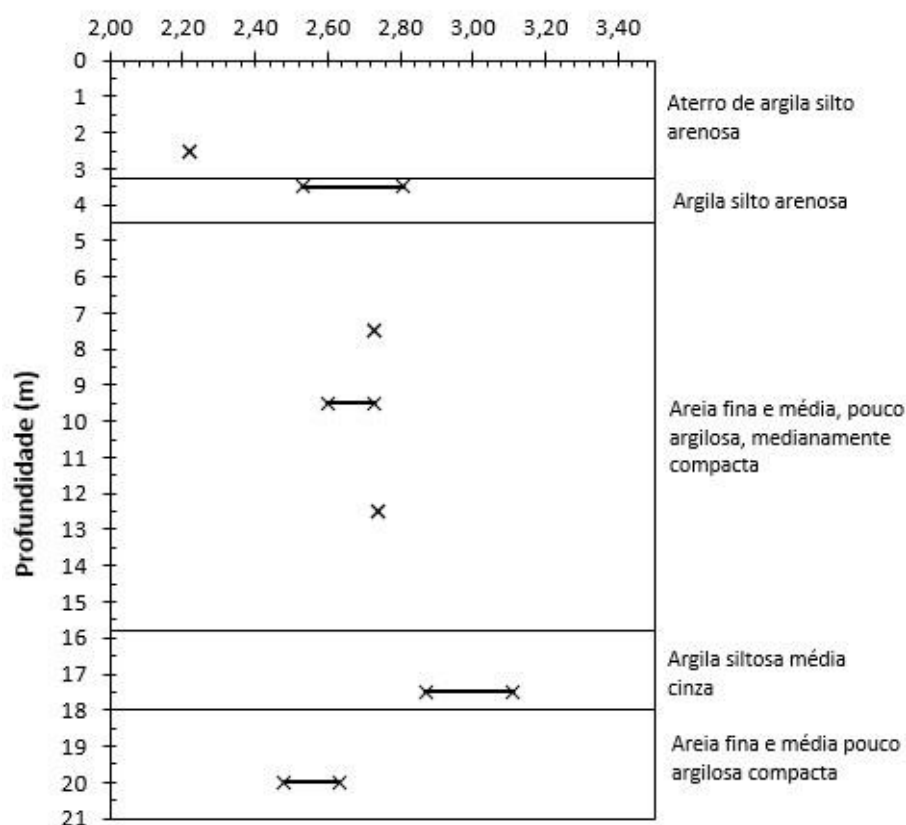
Figura 5.14- Variação da condutividade térmica com o tempo para as diferentes camadas do solo calculada pelo método ILSM-Simplificado



Fonte: Autora

Pelos resultados nota-se que as maiores condutividades foram obtidas à profundidade de 17,5 metros e os menores valores para as camadas próximas à superfície do terreno. Para o ensaio TRT-4, comparando-se os resultados de condutividade térmica das camadas com os demais ensaios, nota-se a significativa influência dos efeitos da convecção nos resultados principalmente para a camada a 12 metros (localizada no meio da estaca). Na Figura 5.7 foi apresentado que os maiores acréscimos de temperatura no decorrer do ensaio ocorreram na profundidade a 12 metros. Conseqüentemente, como a convecção depende da variação de temperatura, os maiores efeitos ocorreram à mesma profundidade, resultando no acréscimo da condutividade na análise dinâmica apresentada.

Figura 5.15– Perfil do solo com os dados de condutividade térmica determinados para cada camada pelo método ILSM-Simplificado para o T_{\min} de 25 horas
Condutividade térmica do solo (W/m°C)



Fonte: Autora

5.2.1.2. Modelo da fonte cilíndrica sólida (SCSM)

O método analítico da fonte cilíndrica sólida também foi adotado para analisar os dados dos ensaios TRT, pela simplificação proposta por Man et al. (2010), Equação 5.9. Este modelo é bem similar ao ILSM, porém, a grande diferença entre eles, é que considera o efeito não somente do diâmetro da estaca, mas também do material de preenchimento sendo homogêneo e com propriedades térmicas idênticas às do solo. Neste sentido, o modelo a fonte cilíndrica é o que mais se aproxima da realidade das estacas.

$$\theta_c = \frac{q}{\lambda_g} \cdot G(Fo) \quad (5.7)$$

$$\Phi = G(Fo) \quad (5.8)$$

$$\ln(\Phi) = -2.321016 + 0.499615 \cdot [\ln(F_0)] - 0.027243 \cdot [\ln(F_0)]^2 - 0.00525 \cdot [\ln(F_0)]^3 + 0.000264311 [\ln(F_0)]^4 + 0.00006873912 [\ln(F_0)]^5 \quad (5.9)$$

Nas análises foi considerado F_0 igual a 5, portanto T_{\min} de 25 horas, sendo os dados anteriores a este tempo descartados para calcular a condutividade térmica do solo e resistência térmica da estaca. Os cálculos foram feitos utilizando-se a ferramenta *solver* do Excel, de modo a minimizar o erro quadrático médio (RMSE) entre os dados experimentais e os calculados pelo modelo, variando a condutividade térmica do solo e a resistência térmica da estaca. Os resultados de cada ensaio são apresentados na Tabela 5.4, bem como os valores do erro (RMSE) encontrados. Na Figura 5.16 são apresentadas as curvas obtidas com os resultados do modelo analítico e os dados experimentais. Observa-se que o modelo analítico apresenta bom ajuste para os dados finais do ensaio, uma vez que foram determinados para t_{\min} igual a 25 horas.

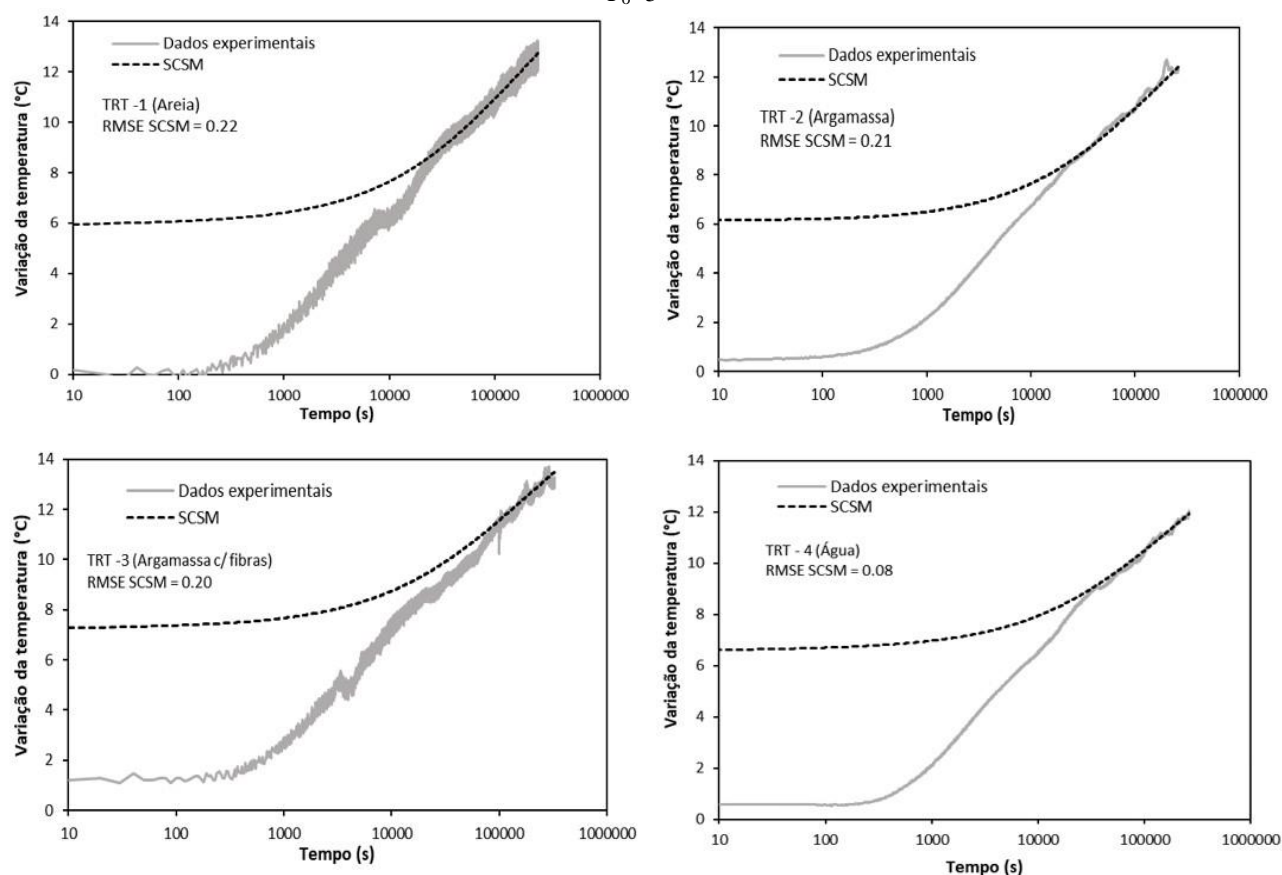
Os pares de valores λ_s e R_b de cada ensaio calculados pelo modelo cilíndrico sólido (SCSM) foram bastante similares aos calculados pelo modelo linear (ILSM). Como verificado por Loveridge & Powrie (2013), os resultados para estacas com pequeno diâmetro estão entre os encontrados pelo modelo da fonte linear e o modelo da fonte cilíndrica, sendo mais próximos aos modelos cilíndricos quando os tubos estão próximos à parede da estaca.

Tabela 5. 4- Condutividade térmica do solo e resistência térmica determinada pelo modelo da fonte cilíndrica sólida (SCSM)

Teste/Método	λ_{solo} (W/mK)	R_b (mK/W)	RMSE
TRT- 1 Areia SCSM	2.58	0.095	0.22
TRT- 2 Argamassa SCSM	2.70	0.099	0.21
TRT- 3 Argamassa com Fibras SCSM	3.24	0.108	0.20
TRT- 4 Água SCSM	3.35	0.105	0.08

Fonte: Autora

Figura 5.16– Ajuste visual do modelo analítico SCSM proposto por Man et al., (2010) e dos dados experimentais para $F_o=5$



Fonte: Autora

5.2.1.3. Modelo empírico G-Function

O modelo empírico G-Function, proposto por Loveridge e Powrie (2013), também foi utilizado nas análises dos ensaios TRT. Este modelo foi desenvolvido para ser aplicado em estacas, devido às limitações dos outros modelos (JENSEN-PAGE et al., 2019). A transferência de calor em regime transiente e o armazenamento do calor dentro da estaca são considerados nos cálculos, conforme indicado na Equação 5.10, sendo a grande contribuição do modelo.

Nas análises, foi considerada a solução para o limite inferior devido ao melhor ajuste com os resultados experimentais, sendo o limite inferior mais adequado para estacas com menores diâmetros (LOVERIDGE E POWRIE, 2013). Apesar da relação entre o comprimento e o diâmetro das estacas (AR) ensaiadas serem iguais a ~ 90 , os parâmetros de ajuste propostos vão somente até $AR=50$, sendo estes valores considerados nas análises.

O modelo permite calcular a resistência térmica do concreto R_c e a condutividade térmica do solo (λ_s). Neste caso é necessário calcular separadamente a resistência dos tubos e do fluido circulante (R_p), pela Equação 5.10, e somar com R_c para comparar com os resultados da resistência térmica da estaca (R_b) obtido nos outros modelos.

$$\Delta T_f = qR_p + qR_c G_c + \frac{q}{2\pi\lambda_g} G_g \quad (5.10)$$

Os cálculos foram feitos utilizando-se a ferramenta *solver* do Excel, sendo os parâmetros λ_s e R_c determinados para os menores valores de erro quadrático médio (RMSE) entre as variações de temperatura calculadas e os dados experimentais medidos em campo.

Nesta análise foram considerados todos os dados experimentais. Os resultados de λ_s e R_b e RMSE obtidos pelo modelo empírico são apresentados na Tabela 5.5 para os quatro ensaios analisados.

Tabela 5.5- Condutividade térmica do solo e resistência térmica determinada pelo modelo semi-empírico G-Function proposto por Loveridge e Powrie (2013)

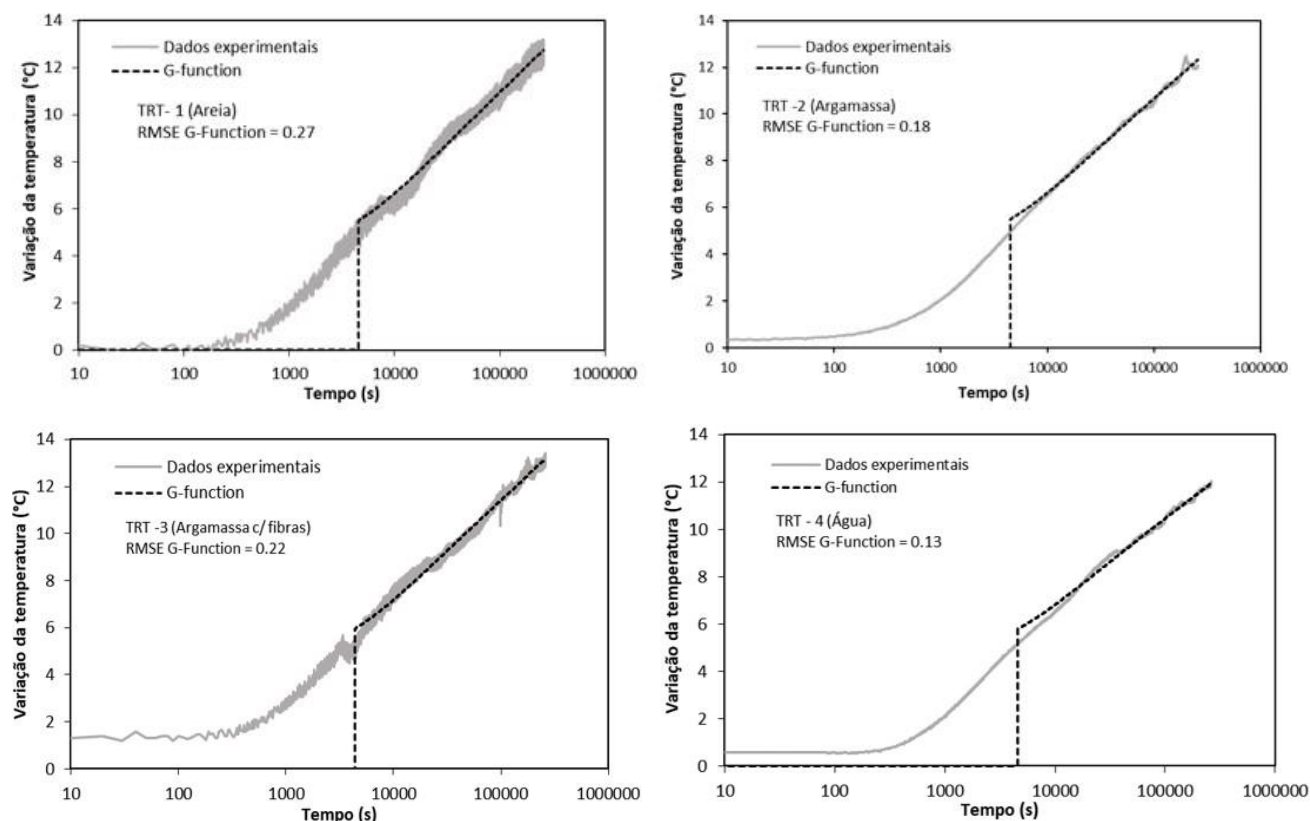
Teste/Método	λ_{solo} (W/m°C)	R_b (m°C/W)	RMSE
TRT- 1 Areia			
G-Function	2.58	0.103	0.27
TRT- 2 Argamassa			
G-Function	2.72	0.110	0.18
TRT- 3 Argamassa com Fibras			
G-Function	2.83	0.104	0.22
TRT- 4 Água			
G-Function	3.15	0.107	0.12

Fonte: Autora

Após calcular os parâmetros de melhor ajuste, as variações da temperatura ao longo do tempo foram calculadas pelo modelo, e comparada com as variações de temperatura medidas em campo (Figura 5.17). Pelas curvas nota-se um bom ajuste para os dados de início do ensaio. Este resultado se justifica, pois, o modelo separa a parcela

de transferência de calor no solo e na estaca, e considera o efeito transiente da transferência de calor na estaca no início do ensaio.

Figura 5.17 - Ajuste visual do modelo empírico G-Function e os dados experimentais



Fonte: Autora

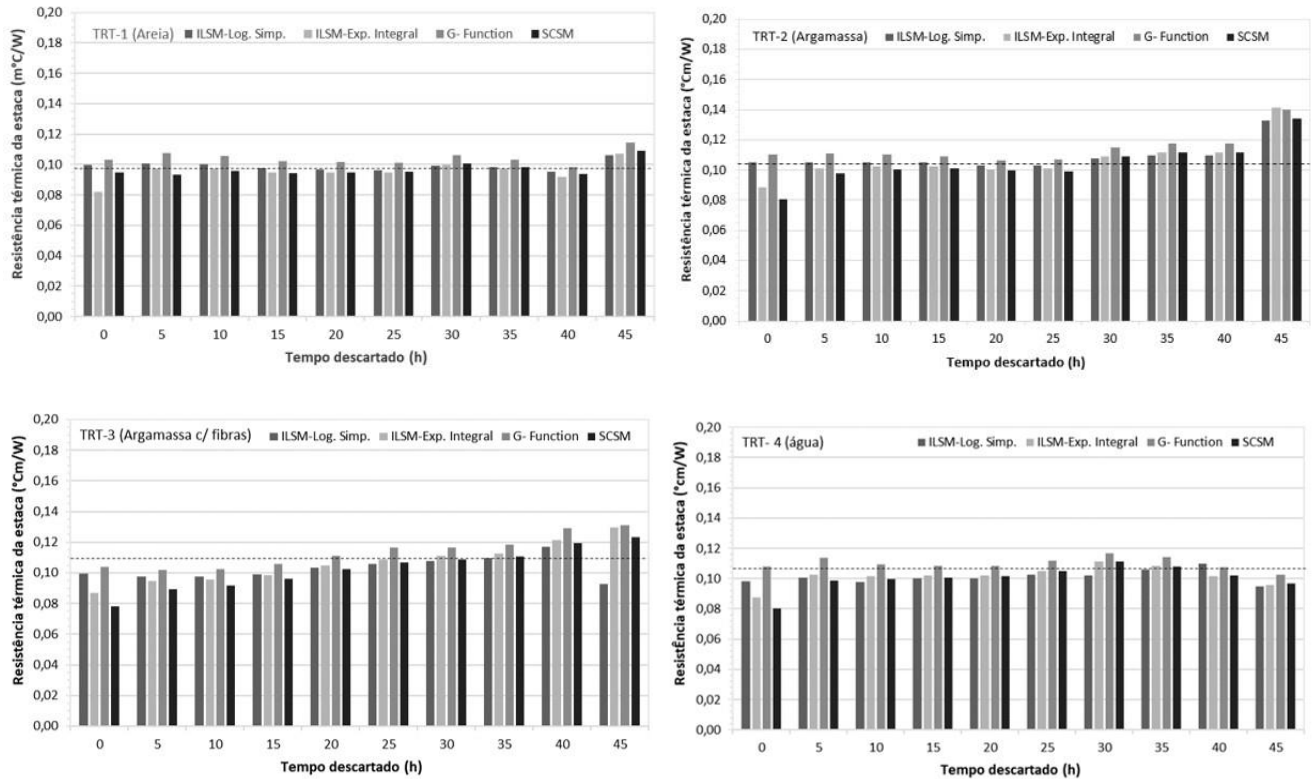
5.2.1.4. Análise dos métodos analíticos

Os diferentes materiais de preenchimento das estacas trocadoras de calor podem influenciar nos valores de resistência térmica das estacas. Para análise dos ensaios TRT e determinação dos pares de valores λ_s e R_b foram adotadas 2 variações do modelo ILSM: ILSMSimplificado pelo ajuste linear, modelo completo pelo cálculo a Integral Exponencial, e também a fase de *recovery*. Além deste método, os resultados também foram analisados pelo SCSM, e pelo G-Function.

Os modelos analíticos foram analisados para dez períodos diferentes do ensaio, variando o T_{\min} (número de Fourier), em intervalos de 5 em 5 horas. A análise foi iniciada para o tempo 0, sendo considerados todos os dados do ensaio, até 45 horas, em os dados antes deste tempo foram desprezados. O objetivo desta análise é comparar os métodos, e analisar os resultados para diferentes número de Fourier. Os tempos de início antes do período de 25 horas (F_{05}) correspondem à fase do ensaio em que o estado

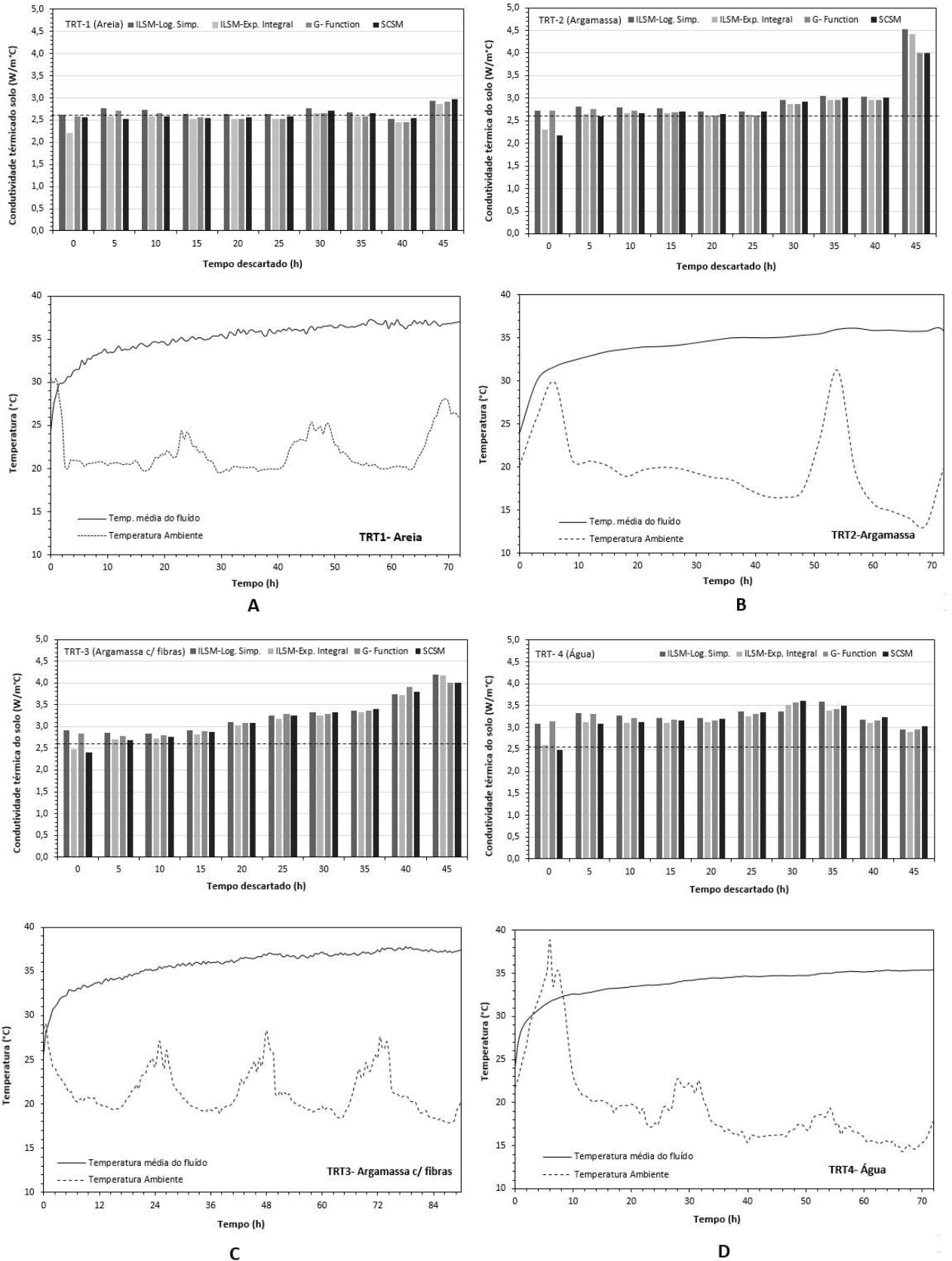
estacionário de transferência de calor não foi atingido. Os resultados obtidos para a condutividade térmica do solo são apresentados na Figura 5.19 e os resultados da resistência térmica da estaca são apresentados na Figura 5.18.

Figura 5.18- Análise dinâmica da resistência térmica das estacas obtidas pelos modelos analíticos para os ensaios: TRT-1 (Areia), TRT-2 (Argamassa), TRT-3 (Argamassa com fibras) e TRT-4 (Água)



Fonte: Autora

Figura 5.19– Análise dinâmica da condutividade térmica do solo obtidas pelos modelos analíticos para os ensaios: A – TRT-1 (Areia), B – TRT-2 (Argamassa), C – TRT-3 (Argamassa com fibras) e D -TRT-4 (Água). Comparação com a variação da temperatura ambiente no decorrer do ensaio



Fonte: Autora

Na análise dinâmica dos valores de condutividade térmica calculados pelos métodos analíticos foi fixado o valor intermediário $2,60 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para a condutividade térmica do terreno do CICS, com base nos resultados obtidos pelos métodos analíticos, que variou de $2,5$ a $2,7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Nota-se, que após 25 horas, os resultados apresentaram maiores variações para todos os métodos analisados. Comprando os resultados da análise dinâmica com a variação da temperatura ambiente durante os ensaios, após 24 horas, observa-se a ocorrência de picos de variação da temperatura ambiente, que refletiram em variações dos valores de condutividade calculados após este período.

Nos resultados do ensaio TRT-3 observa-se que em todos os métodos analíticos houve o aumento da condutividade com o tempo, que como já discutido, pode ter relação com os picos de temperatura ambiente, variação da potência de aquecimento do fluido circulante ocorridos durante o ensaio. Ambos os casos provocam alterações dos ajustes dos modelos analíticos devido às oscilações refletidas na curva de aquecimento das estacas. Quanto ao ensaio TRT-4, o efeito combinado da convecção/convecção no interior da estaca aumentou em 20% o valor da condutividade térmica do solo, considerando a média dos valores de condutividade térmica do solo calculados pelos métodos analíticos, igual a $3,28 \text{ W/m}^\circ\text{C}$,

Para os resultados de resistência térmica das estacas, foi fixado nos gráficos (Figura 5.18) o valor médio das resistências térmicas calculadas pelos métodos analíticos para T_{\min} de 25 horas ($F_{0,5}$), apresentados na Tabela 5.6. Nota-se em todos os ensaios que o G-Function é o modelo mais conservador para o cálculo das resistências, com maiores valores. Os modelos ILSM e SCSM apresentam boa concordância nos resultados da resistência térmica, sendo o modelo SCSM mais conservador em alguns casos.

Pelos resultados da análise dinâmica dos ensaios, nota-se uma maior variação dos resultados com relação ao valor médio fixado para os períodos de início da análise e valores superiores a 25 horas. Como já justificado anteriormente, para os períodos com maiores valores de T_{\min} , uma maior quantidade de dados é descartada da análise, sendo os dados mais susceptíveis aos efeitos de variações externas. Além disso, no término dos ensaios o acréscimo de temperatura com o tempo é mais baixo, o que fortalece ainda mais a hipótese das interferências externas. Para os períodos de início, regime estacionário de transferência de calor não foi atingido, resultando em variações dos resultados da resistência térmica da estaca.

Os resultados das resistências calculadas pelos métodos analíticos para os diferentes materiais de preenchimento são muito próximos, o que dificulta na escolha no melhor material para o preenchimento da estaca. Neste sentido, os custos e a economia de cada material também foram considerados. Para auxiliar nas análises, foi calculada a variação da temperatura do fluido e do solo para um período de 30 anos, pelo ISLM (Equação 5.11) considerando a taxa de aquecimento de 35 W/m (valores típicos aplicados em estaca SIA, 2005 apud LOVERIDGE et al., 2012), e solo com condutividade de 2,60 W/m°C e α de $8,17 \cdot 10^{-7}$ m/s. Na Figura 5.20 são apresentadas as curvas com a variação das temperaturas.

$$\Delta T = q \cdot Rb + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (5.11)$$

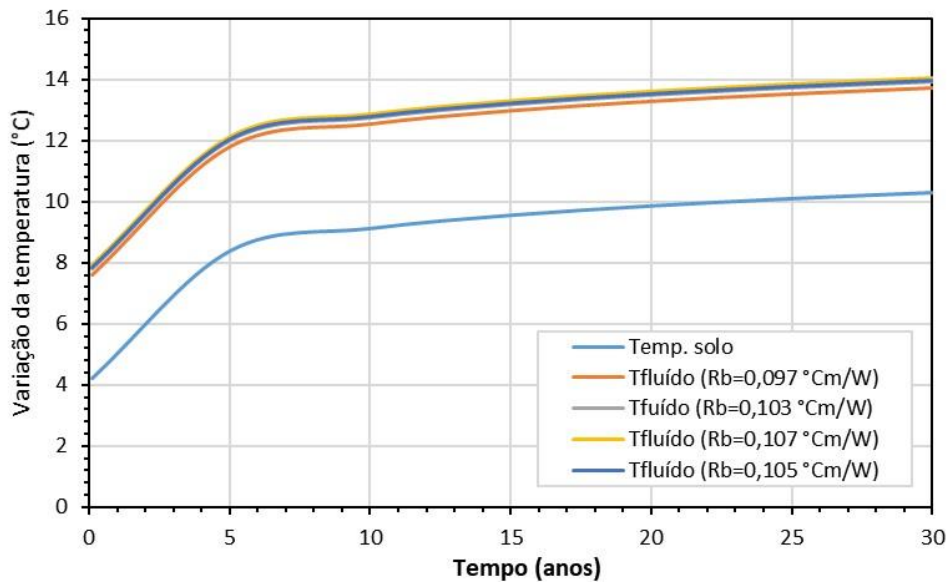
Os resultados mostram que os valores da resistência térmica, pela análise teórica, para os diferentes preenchimentos testados, não influenciaram nos resultados para análise a longo prazo.

Tabela 5.6– Valores médios das resistências térmicas obtidas pelos métodos analíticos para T_{\min} de 25 horas

Ensaio	Rb médio (°Cm/W)
TRT-1	0,097
TRT-2	0,103
TRT-3	0,107
TRT-4	0,105

Fonte: Autora

Figura 5.20- Variação da temperatura do fluido e temperatura do solo em 30 anos para os diferentes valores de resistência térmica calculados para os diferentes materiais de preenchimento



Fonte: Autora

5.2.2. Cálculo da eficiência

A eficiência térmica dos diferentes materiais de preenchimento das estacas foi analisada neste trabalho para comparar os resultados em termos de capacidade de troca de calor de com solo. Para isso, foi adotada a equação proposta por Park et al., (2015) para o cálculo da eficiência de troca térmica (eff) que relaciona a potência térmica injetada Q (W), calculada pela Equação 5.1., com o $slope$ e o comprimento da estaca, conforme indicado na Equação 5.12. O $slope$ corresponde ao coeficiente angular da relação entre a variação da temperatura média do fluido, e o logaritmo natural do tempo. Para o cálculo da eficiência térmica foram utilizados os resultados dos ensaios TRT.

$$eff = \frac{Q}{slope \cdot L} \quad (5.12)$$

O $slope$ corresponde ao mesmo coeficiente angular utilizado nos cálculos do ILSMSimplificado, apresentados na Tabela 5.7. Maiores valores de $slope$ implicam em menores transferências de calor entre a estaca e o solo no entorno, resultando em menores valores de eficiência térmica. Na Tabela 5.7 são apresentados os dados para o cálculo e os valores da eficiência térmica de cada ensaio.

Tabela 5. 7- Eficiência térmica das estacas preenchidas com diferentes materiais

Ensaio	Q (W)	slope	L (m)	eff
TRT-1	1414	1,91	22,75	32,50
TRT-2	1423	1,79	23,00	34,53
TRT-3	1521	1,64	22,81	40,69
TRT-4	1437	1,48	23,00	42,25

Fonte: Autora

Os resultados de *eff* mostram que a estaca preenchida com água (TRT-4) foi a que apresentou maiores valores de eficiência térmica devido à maior transferência de calor do fluido para o solo, seguidas pela estaca de argamassa com fibras metálicas (TRT-3), argamassa (TRT-2), e areia (TRT-1). Os resultados de eficiência térmica calculados convergem com os resultados obtidos nos modelos físicos.

5.2.3. Análise numérica em 2D

Para contribuir com as análises realizadas pelos métodos analíticos do complexo mecanismo da transferência de calor entre as estacas preenchidas com diferentes materiais e o solo, foram desenvolvidos modelos em 2D no programa COMSOL *Multiphysics*. No modelo foi simulada uma seção transversal da estaca, o que se justifica para análises com curta duração (~72 horas). Os resultados obtidos foram estendidos para toda a extensão da estaca.

Sabe-se que mais de uma combinação de valores de condutividade térmica do solo (λ_s) e resistência térmica das estacas (R_b) se ajustam aos dados experimentais dos ensaios TRTs (MARCOTTE E PASQUIER, 2008, LOVERIDGE et al., 2017). Neste trabalho, foi realizada análise paramétrica, variando-se os valores de condutividade térmica do solo e do material de preenchimento da estaca (que possui correlação com o valor da resistência térmica da estaca), de forma a encontrar o menor valor do erro quadrático médio (RMSE) entre os dados experimentais e os dados numéricos. Para isso, foram analisadas as temperaturas no entorno dos tubos PEAD, descontando-se a resistência térmica R_p devido aos efeitos combinados de convecção e condução térmica da água no interior dos tubos, e a condução nos tubos PEAD, como apresentado no item 3.5.2 deste trabalho.

Na Tabela 5.8 são apresentados os parâmetros adotados no modelo em 2D para a estaca tubular metálica, e foram mantidos fixos durante toda análise. Na Tabela 5.9

são apresentados os pares de condutividade térmica dos materiais de preenchimento das estacas analisados e condutividade térmica do solo que melhor se ajustaram aos resultados experimentais. Nesta mesma tabela também são apresentados os erros quadráticos médios (RMSE) de cada análise.

Tabela 5.8– Parâmetros adotados para a estaca de metálica de aço nas análises numéricas em 2D

Material	Condutividade térmica (W/m°C)	Calor específico (J/Kg°C)	Densidade (kg/m3)
Aço	54	465	7833

Fonte: Hahn e Özisik (2012)

Tabela 5.9- Melhores parâmetros de ajuste obtidos pela análise numérica em 2D

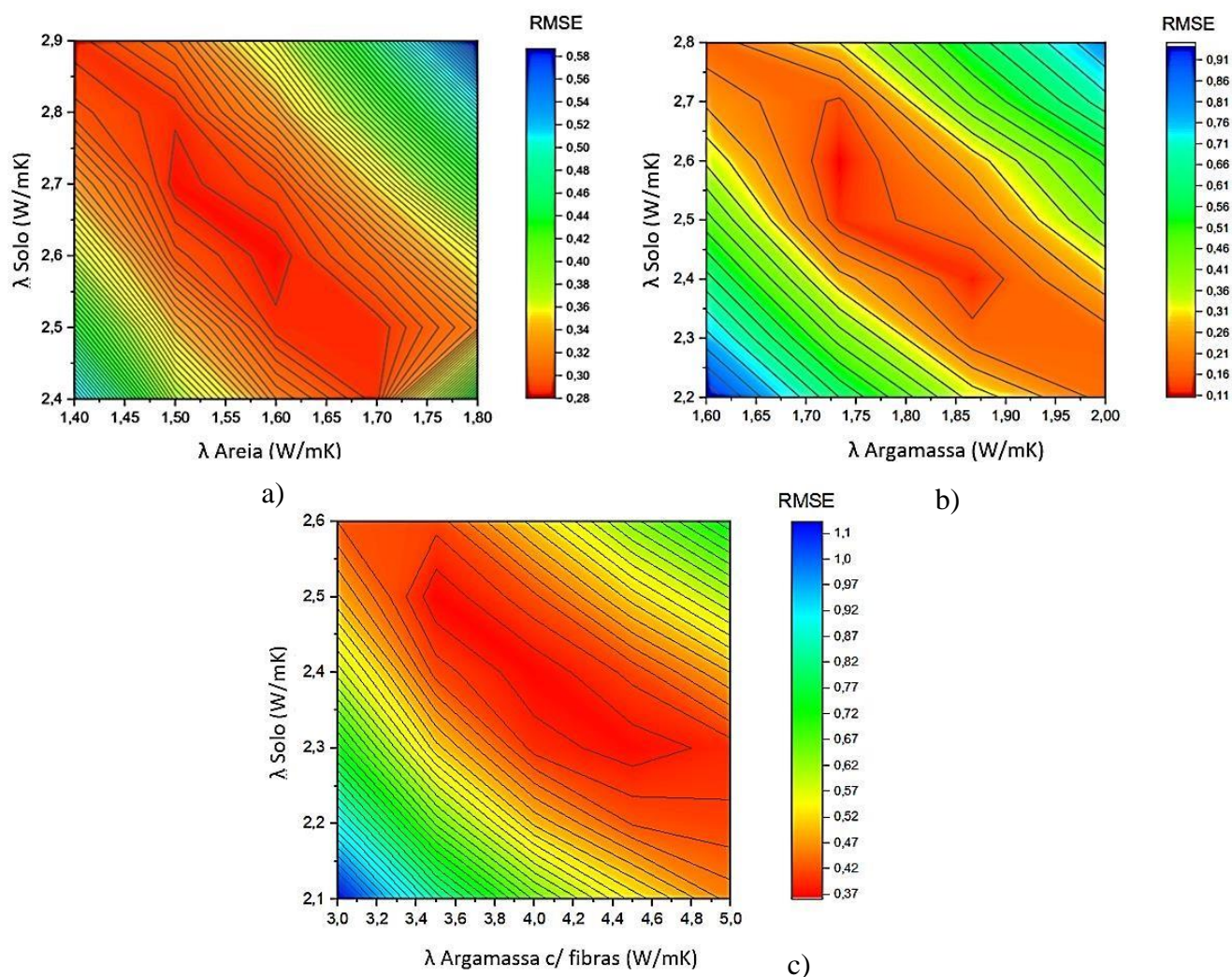
Testes	Materiais	Materiais de preenchimento			Solo	Estaca	RMSE
		Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Condutividade térmica (W/m.K)	Resistência térmica -R _b (mK/W)	
TRT-1	Areia	1.60	1800 ¹	1380 ¹	2.6	0.093	0.28
TRT-2	Argamassa	1.75	2000 ²	990 ²	2.6	0.086	0.11
TRT-3	Argamassa c/ Fibras	4.00	* 2000 ²	*990 ²	2.4	0.061	0.36

¹ Hamdham e Clarke, 2010, ² Kim et al., 2017, *Adotados mesmos valores da argamassa

Fonte: Autora

Os resultados das interações realizadas para estimar os parâmetros de cada modelo numérico são apresentados na Figura 3.20. Para cada análise, foram traçados os gráficos de contorno que relacionam as condutividades térmicas do solo, do material de preenchimento analisado e o erro quadrático médio calculado para cada par de valores (RMSE) com relação aos resultados dos ensaios TRT executados em campo. Os gráficos de contorno mostram que, dada uma tolerância aos erros de ajuste, vários pares de dados de λ_s e R_b podem ser obtidos. Os resultados também indicam a correlação entre os parâmetros analisados, por este motivo é preferível utilizar modelos e análises que consideram o par de valores para estimar os resultados de transferência de calor (JAVED et al., 2011).

Figura 5.21- Resultado das interações da análise paramétrica realizada numericamente pelos modelos em 2D para os três diferentes materiais de preenchimento (areia, argamassa e argamassa com fibras metálicas), a) TRT-1, b) TRT-2 e c) TRT-3



Fonte: Autora

De posse dos valores de condutividade térmicas dos materiais de preenchimento das estacas e do solo, obtidos nas análises numéricas em 2D, foi calculada a resistência térmica das estacas pelo método analítico *multipole model* de primeira ordem que considera os efeitos do preenchimento nas análises (HELLSTROM, 1991). O método é relativamente simples de ser aplicado para estacas com configuração em U simples e apresenta boa acurácia na determinação da resistência térmica conforme verificado por Lamarche et al (2010) e Javed e Spitler (2016).

Os resultados obtidos pelo *multipole model* são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10– Resistências térmicas das estacas preenchidas com diferentes materiais calculada pelo método multipole model (HELLSTROM, 1991)

Material de preenchimento	Rb (mK/W)
Areia	0.082
Argamassa	0.078
Argamassa e fibras	0.058

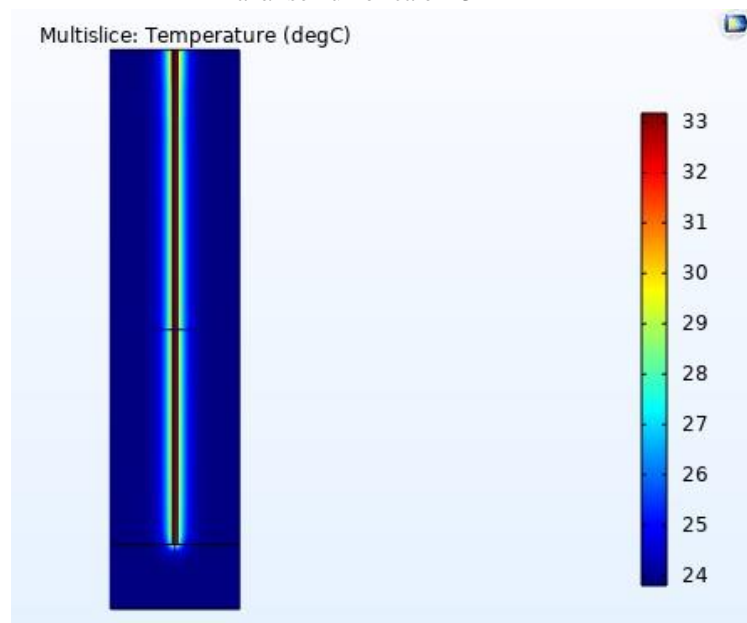
Fonte: Autora

5.2.4. Análise numérica em 3D

As análises numéricas em 3D permitiram compreender melhor os efeitos da convecção gerados na água usada como preenchimento da estaca. Como resultados da análise numérica, para validação do modelo, a evolução da temperatura de saída do fluído foi comparada com os resultados experimentais obtidos no ensaio TRT, conforme apresentado na Figura 5.23. Pelos resultados apresentados nota-se um bom ajuste entre os resultados, com erro quadrático médio de 0.20 °C.

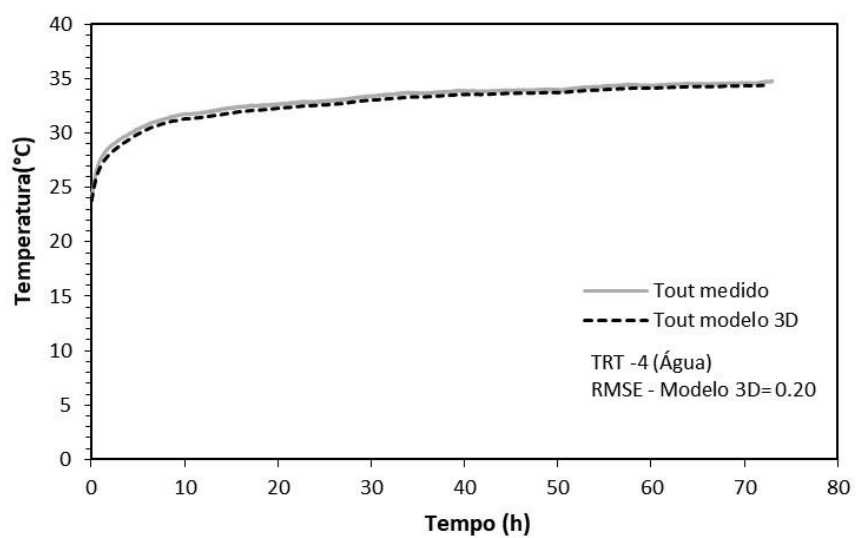
Na Figura 5.22 apresenta-se as temperaturas no término da análise, após 72 horas de aquecimento. As temperaturas do modelo numérico também foram analisadas nos mesmos locais aonde foram instalados os sensores no interior da estaca e os resultados foram comparados com os experimentais pelo cálculo do erro quadrático médio (RMSE). Na Figura 5.25 são apresentados os resultados das análises dos sensores instalados no centro das estacas nas profundidades de 4, 12 e 20 metros. Na Figura 5.24 são apresentados os resultados dos sensores instalados na borda das estacas nas profundidades de 2, 4, 8, 12, 16 e 20 metros.

Figura 5.22– Distribuição da temperatura no entorno da estaca obtida numericamente no término da análise numérica em 3D



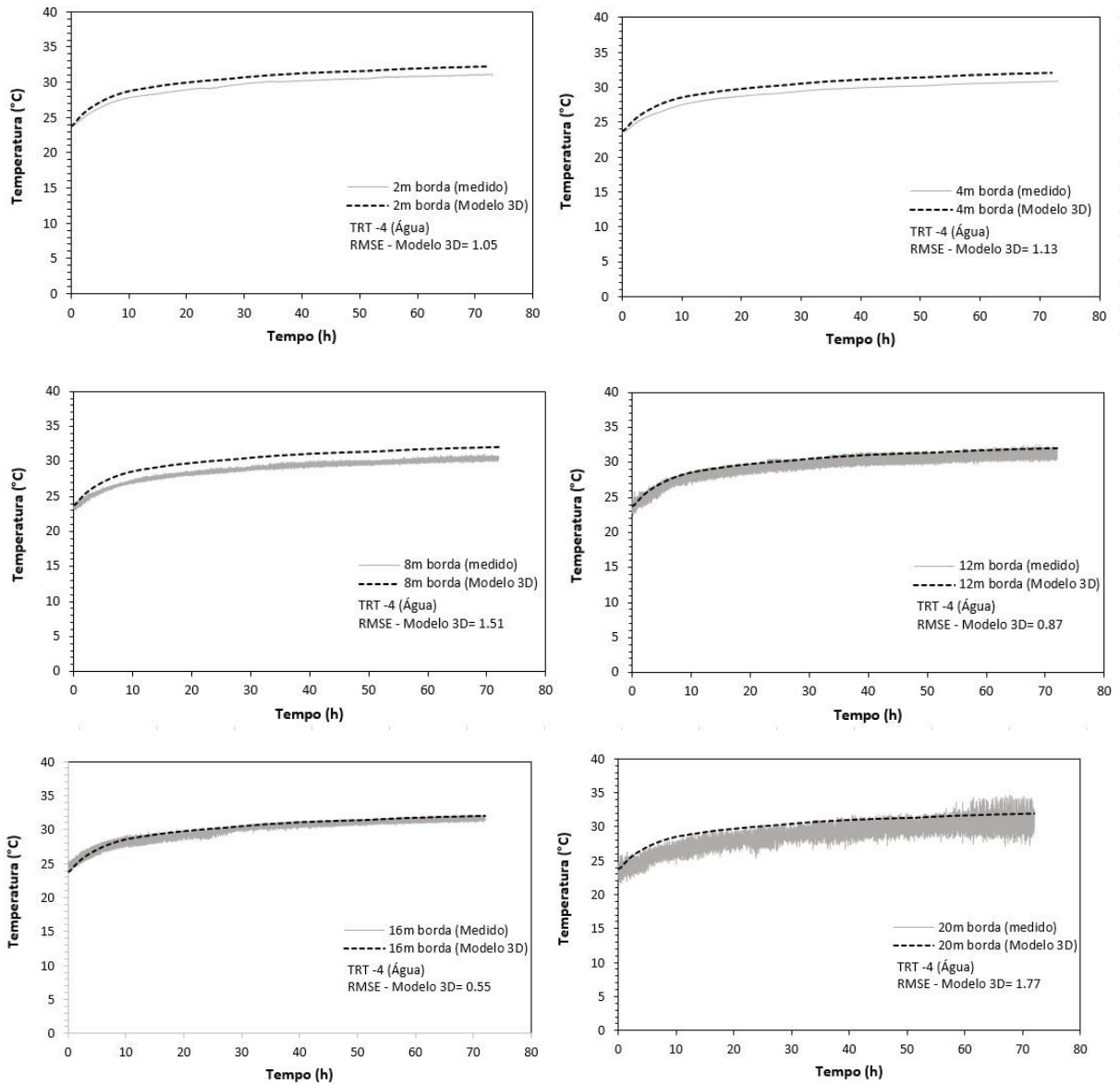
Fonte: Programa COMSOL Multiphysics

Figura 5.23-Variação da temperatura de saída da água obtida pelo ensaio TRT e pela simulação numérica em 3D



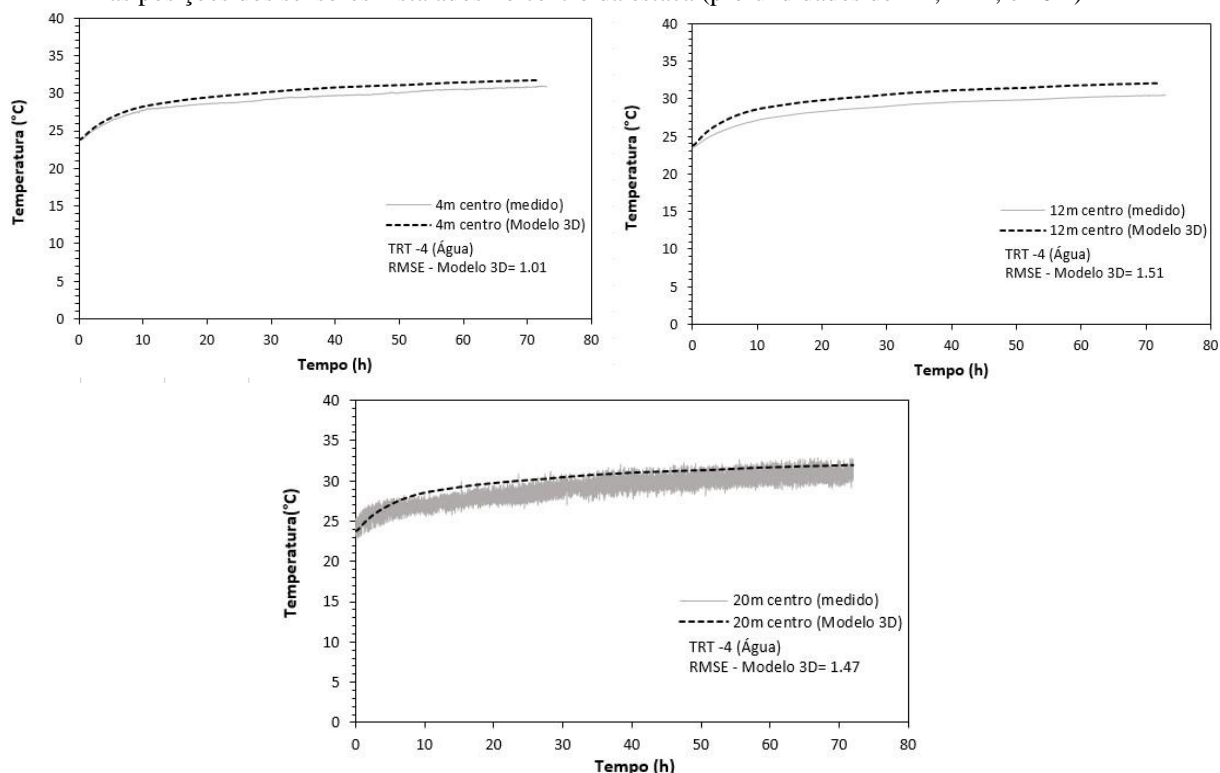
Fonte: Autora

Figura 5.24– Variação da temperatura ao longo do tempo obtida numericamente e experimentalmente nas posições dos sensores instalados na borda da estaca (2m, 4m, 8m, 12m, 16m e 20m)



Fonte: Autora

Figura 5.25– Variação da temperatura ao longo do tempo obtida numericamente e experimentalmente nas posições dos sensores instalados no centro da estaca (profundidades de 4m, 12m, e 20m)



Fonte: Autora

Os resultados da análise numérica em 3D apresentaram boa aproximação com os resultados experimentais. Mesmo que em alguns pontos analisados as diferenças entre os resultados foram um pouco maiores, considera-se o modelo numérico forneceu bons resultados, principalmente levando-se em conta as seguintes incertezas:

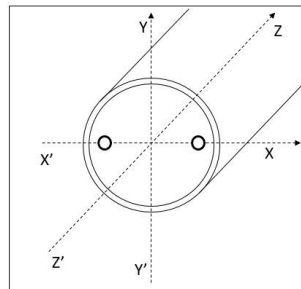
- As condições de contorno consideradas no modelo podem não condizer com a situação real encontrada em campo. A simplificação de uma temperatura inicial ao longo de toda a profundidade do solo não é verdadeira na prática mesmo apesar de serem próximas, existe um gradiente de temperatura ao longo da profundidade;
- Como o fluído inicialmente está em equilíbrio com o solo, o mesmo gradiente de temperatura encontrado no solo deve ocorrer no fluído ao longo da extensão da estaca;
- Apesar da variação da temperatura de entrada fixada ter influência da variação da temperatura ambiente, no modelo não foi considerado os efeitos da irradiação solar na superfície do terreno;
- As propriedades térmicas atribuídas ao solo também não são constantes, e variam de acordo com as camadas do solo. Além disso, por se tratar de

um meio poroso, e sabendo-se que o lençol freático está a 2 metros de profundidade, sendo o solo praticamente saturado, pode haver aumento da troca térmica devido ao escoamento convectivo no meio poroso;

- A malha do modelo pode não estar fina o suficiente, sendo necessário refinar ainda mais a malha que foi limitada à memória do computador utilizado;
- Como os resultados foram comparados com os resultados experimentais, deve-se também considerar a precisão dos sensores PT-100 utilizados;

No modelo numérico é possível observar o campo de velocidades que surgem na água dentro da estaca, as direções e a intensidade do fluxo. Para facilitar a compreensão dos resultados, são apresentadas na Figura 5.26 as coordenadas da estaca X, Y e Z adotadas como referência para as análises. Na Figura 5.27 são apresentados os resultados obtidos na seção transversal XZ da estaca, sendo X a direção em que os tubos PEAD foram instalados, e na Figura 5.28 são apresentados os resultados na seção YZ da estaca.

Figura 5.26– Coordenadas X, Y e Z adotadas para a estaca nas análises



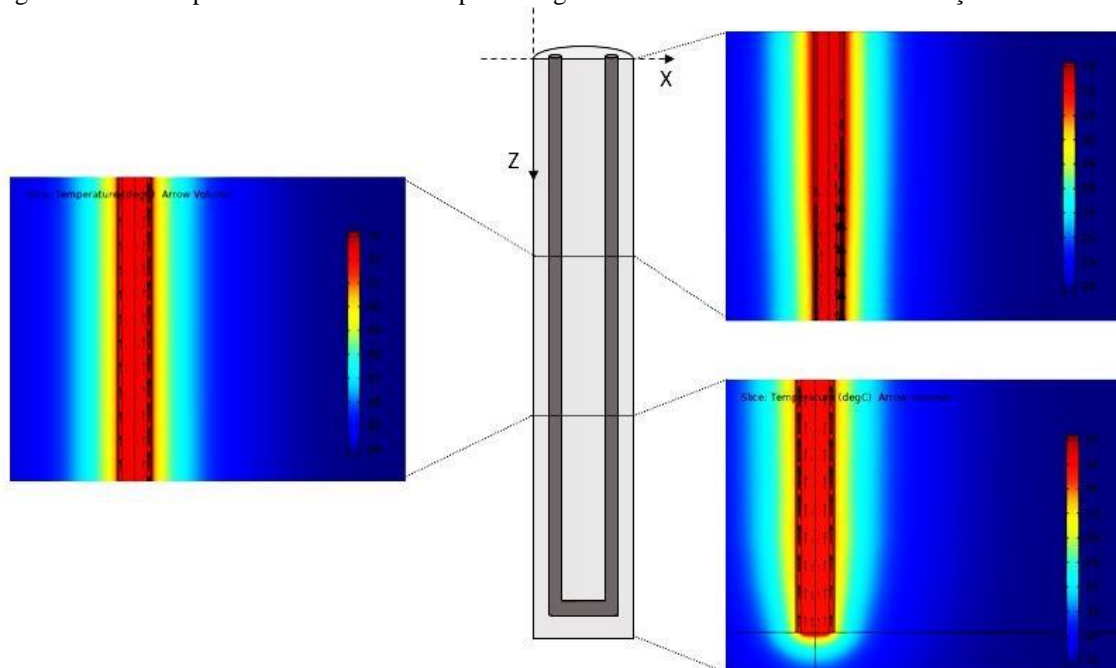
Fonte: Autora

Pelos resultados apresentados observa-se que a água aquecida sobe na região próxima aos tubos PEAD e na porção central da estaca, apresentados na seção xz, enquanto que a água menos aquecida desce preferencialmente na região próxima à parede da estaca e na também na porção central, conforme apresentado na seção yz.

O tamanho das setas apresentadas nos resultados é proporcional ao campo de velocidade gerado no fluido de preenchimento da estaca. Para a seção XZ nota-se uma maior diferença na porção no topo da estaca, devido ao maior diferencial de temperatura entre os tubos em PEAD de entrada e saída. Na mesma seção XZ, para a porção intermediária, nota-se que ainda existe um diferencial de temperatura entre os tubos, que

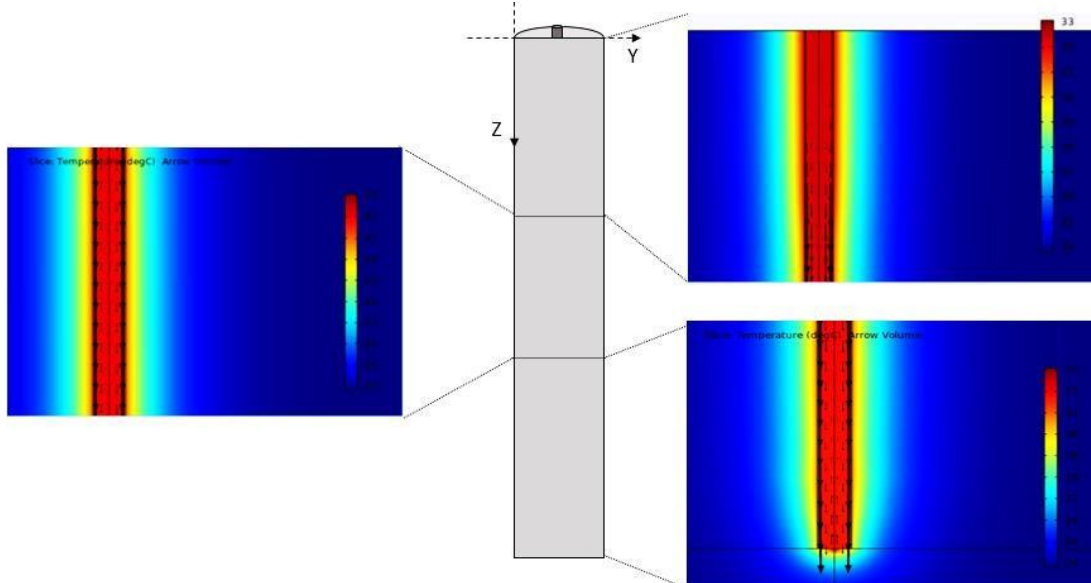
é refletido no efeito da convecção. Já na porção próxima à base da estaca, os efeitos da convecção é aproximadamente uniforme para no entorno dos tubos.

Figura 5. 27– Campo das velocidades e temperatura gerados na análise numérica 3D na seção transversal XZ da estaca



Fonte: Adaptada dos resultados da modelagem em 3D no COMSOL

Figura 5. 28- Campo das velocidades e temperatura gerados na análise numérica 3D na seção transversal YZ da estaca



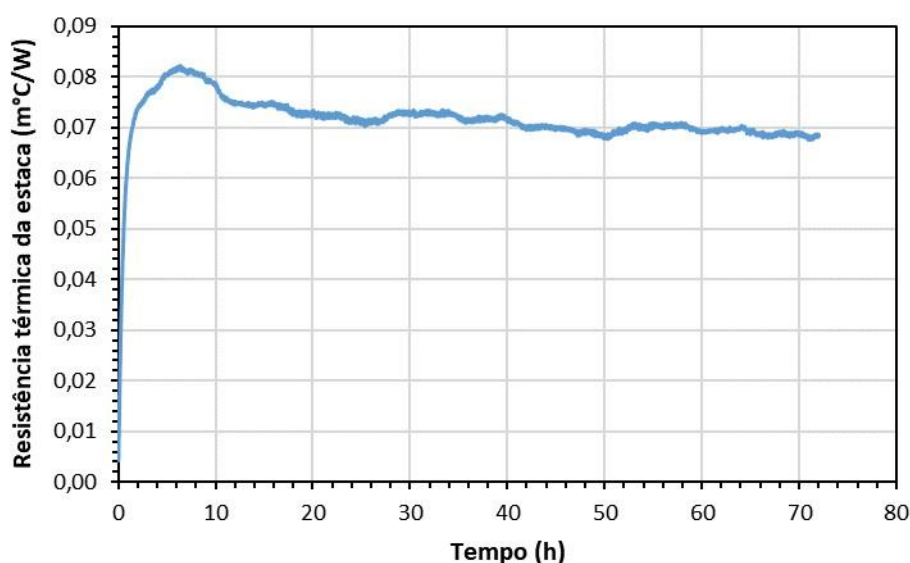
Fonte: Adaptada dos resultados da modelagem em 3D no COMSOL

Na seção YZ, o efeito da convecção é praticamente uniforme ao longo da profundidade, porém, observa-se na parte superior da estaca um maior efeito das correntes convectivas na

região central da estaca, que pode ser identificado pela maior presença dos vetores de convecção (representados pelas setas nas Figuras 5.27 e 5.28).

Para o cálculo da resistência térmica da estaca metálica preenchida com água foi adotada a Equação 3.7. Para isto, foram utilizados dos dados de temperatura média na superfície externa da estaca e a média entre as temperaturas de entrada obtividas experimentalmente e as temperaturas de saída do fluido obtidas numericamente. Na Figura 5.29 são apresentados os valores de resistência térmica calculados ao longo do tempo da simulação e na Tabela 5. 11 é apresentando o valor médio de resistência no estado estacionário de transferência de calor e o valor do erro quadrático médio entre os resultados experimentais e os resultados numéricos para a variação da temperatura do fluido de saída.

Figura 5.29– Resistência térmica da estaca calculada com os dados obtidos pela análise numérica em 3D



Fonte: Autora

Tabela 5.11- Resistência térmica da estaca e RMSE entre os dados medidos em campo e o resultado do modelo numérico para os pares de valores λ_{solo} e R_b

Teste/Modelo	$\lambda_{solo}(W/m^{\circ}C)$	$R_b (m^{\circ}C/W)$	RMSE
Modelo 3D	2.60	0.072	0.20

Fonte: Autora

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os métodos analíticos utilizados para análise dos resultados dos ensaios TRTs apresentaram boa convergência na determinação dos valores de condutividade térmica

do solo (λ_s) e resistência térmica da estaca (R_b), o que mostra que todos eles são adequados para aplicação no caso estudado. O método G-Function se mostrou um pouco mais conservador que os demais métodos para estimativa da resistência térmica das estacas. Comparando-se os métodos analíticos o ILSM apresenta vantagens pela facilidade que apresenta nos cálculos, e pela boa convergência dos resultados. Na Tabela 5.12 são apresentados todos os resultados obtidos em cada análise. Pelos resultados observa-se que a condutividade térmica média do solo é igual a $\sim 2,60$ W/m°C até a profundidade de 23,80 metros.

Porém, para o caso da estaca preenchida com água, os modelos analíticos não são adequados pois não consideram os efeitos de convecção. Consequentemente, os resultados da análise mostraram maiores valores de condutividade térmica do solo, conforme apresentado na Tabela 5.12. A condutividade térmica média do solo encontrada pela análise analítica para o TRT-4 foi $\sim 3,3$ W/mK, que combinou os efeitos da transferência de calor por condução e convecção no material de preenchimento. Este valor é 26% superior à condutividade térmica do solo encontrada no TRT-1 e TRT-2 (de 2,6 W/mK), refletindo a contribuição dos efeitos da convecção da estaca preenchida com água para o mecanismo de transferência de calor.

O valor médio de λ_g obtido do TRT-3 (estaca preenchida argamassa e fibras metálicas) foi de $\sim 3,0$ W/mK. Porém, o valor de λ_g obtido na fase de recuperação térmica (*recovery*) foi $\sim 2,4$ W/mK. Desta forma, o valor assumido de 2,60 W/mK parece ser razoável para o solo ao redor das estacas de teste.

As análises dinâmicas aplicadas aos métodos analíticos para determinar os pares de valores de λ_s e R_b contribui para identificar se existe interferências externas nos resultados. No ensaio TRT-3, conduzido na estaca metálica preenchida com concreto e fibras, observa-se que houve a influência de fatores externos nos resultados, conforme apresentado na Figura 5.19.

Tabela 5.12- Resumo dos resultados de condutividade térmica do solo, resistência térmica da estaca e erro quadrático médio dos métodos utilizados para análise dos ensaios TRTs

Teste/Método	λ_{solo} (W/mK)	Rb (mK/W)	RMSE
TRT- 1 Areia (P1)			
ILSM - Log Simplificado	2.64	0.096	0.35
ILSM – Exp. Integral	2.51	0.094	0.31
ILSM -Recovery ¹	2.60	-	0.36
SCSM	2.58	0.095	0.22
G-Function	2.58	0.103	0.27
Modelo numérico 2D	2.60	0.093	0.28
TRT- 2 Argamassa (P2)			
ILSM - Log Simplificado	2.71	0.103	0.21
ILSM – Exp. Integral	2.63	0.101	0.33
ILSM -Recovery ¹	2.36	-	0.28
SCSM	2.70	0.099	0.21
G-Function	2.72	0.110	0.18
Modelo numérico 2D	2.60	0.086	0.11
TRT- 3 Argamassa c/ fibras metálicas (P3)			
ILSM - Log Simplificado	3.25	0.106	0.15
ILSM – Exp. Integral	3.17	0.108	0.22
ILSM -Recovery ¹	2.39	-	0.40
SCSM	3.24	0.108	0.20
G-Function	2.83	0.104	0.22
Modelo numérico 2D	2.40	0.061	0.36
TRT- 4 Água (P4)			
ILSM - Log Simplificado	3.36	0.102	0.32
ILSM – Exp. Integral	3.26	0.105	0.09
SCSM	3.35	0.105	0.08
G-Function	3.15	0.107	0.12
Modelo numérico 3D	2.60	0.072	0.20

¹ T_{min} = 5 horas

O modelo numérico em 2D desenvolvido neste estudo apresentou boa convergência com os resultados analíticos quanto aos valores de condutividade térmica do solo e a resistência térmica das estacas, como apresentado na Figura 5.30. A grande vantagem da análise numérica é que a variação da taxa de calor injetada q (W/m) ao longo do tempo pode ser considerada. Pelos resultados apresentados pelo gráfico de contorno, obtidos pelas análises paramétricas, observa-se que mais de uma combinação de valores de λ_s e R_b se ajustam aos valores experimentais, sendo recomendado checar por outros métodos (analíticos e semiempíricos) a validade dos parâmetros estimados, conforme recomendado por Vieira et al., (2017).

O modelo em 3D desenvolvido neste trabalho apresentou bons resultados quando comparados com os dados experimentais da temperatura de saída da estaca e dos sensores instalados ao longo da profundidade. A principal contribuição do modelo foi na compreensão dos efeitos da convecção no interior da estaca, que mostrou que as correntes convectivas ocorrem principalmente na direção vertical, ao longo do comprimento das estacas, próximo às bordas. Além disso, os modelos numéricos mostraram que a convecção gera um fluxo turbulento para a taxa de calor do ensaio de 60.4 W/m. Os efeitos da convecção no interior da estaca estão diretamente associados à taxa de calor, sendo que quanto maior for a taxa de calor aplicada, maior será o efeito da convecção, e menor será a resistência térmica da estaca (SPITLER et al., 2016).

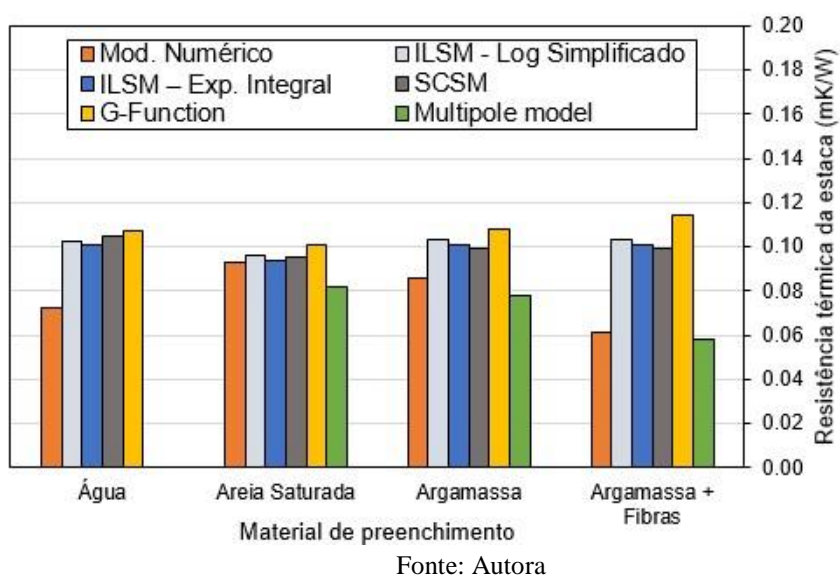
O valor de R_b da estaca preenchida com água foi obtido a partir da simulação numérica em 3D sendo que o valor encontrado foi ~ 30% menor (de 0,072 mK/W) em relação aos valores obtidos a partir de soluções analíticas.

Pelas análises paramétricas, a condutividade térmica do material de preenchimento das estacas foi de 1,60 W/mK para a argamassa e 1,75 W/mK para a areia saturada, o que justifica os valores semelhantes das resistências térmicas das estacas. A condutividade térmica obtida para a argamassa de fibra de aço foi consideravelmente maior, com valor de 4,0 W/mK.

Claesson e Hellström, (2011) observaram que a resistência térmica aumenta com a distância entre os tubos e a parede do poço, e que a resistência térmica do material de enchimento é inversamente proporcional à sua condutividade térmica. No caso deste trabalho, os tubos em U são instalados mais próximos da parede da estaca; portanto, a influência da condutividade térmica do material de enchimento na resistência térmica da pilha deve ser menos significativa, conforme indicado pelos resultados apresentados na Tabela 5.12.

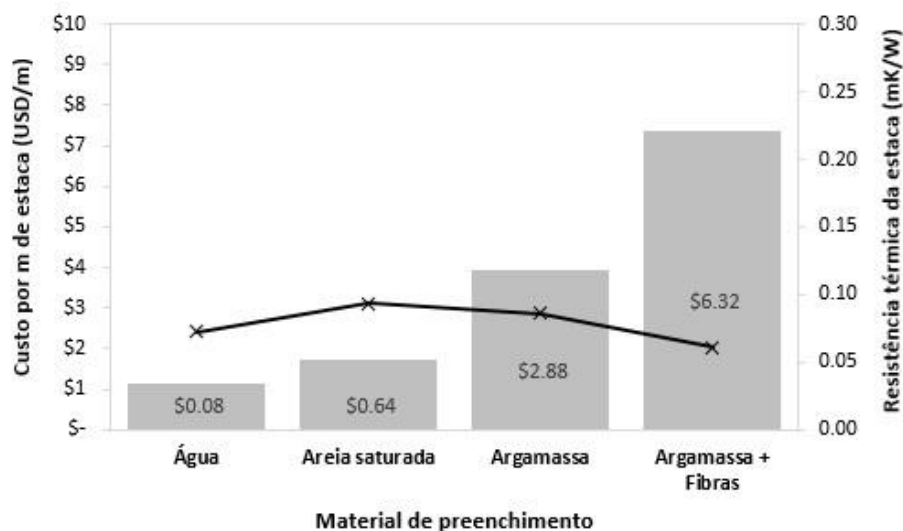
Considerando que a análise paramétrica 2D permitiu a estimativa das condutividades térmicas dos materiais do solo e do material de preenchimento (Tabela 5.9), esses parâmetros térmicos foram utilizados para a aplicação do Multipole Model (método analítico) para calcular a resistência térmica de P1, P2 e P3. Os resultados para as resistências térmicas das estacas são inferiores aos demais métodos, como apresentado na Figura 5.30. Estes resultados concordam com os resultados experimentais de variação de temperatura do fluido normalizada medidos durante os TRTs, apresentadas na Figura 5.6.

Figura 5.30- Resultados de resistência térmica das estacas obtidos pelos métodos analíticos e numéricos



Os resultados de R_b obtidos pelas simulações numéricas foram comparados com os custos dos diferentes materiais de preenchimento por metro de comprimento de estaca, conforme apresentado na Figura 5.31. As estacas preenchidas com areia saturada e água parecem ser as soluções mais otimizadas quando os custos de preenchimento e a resistência térmica são levados em consideração.

Figura 5. 31- Resultados da resistência térmica da estaca obtidas numericamente vs. custo por metro de preenchimento dos diferentes materiais testados



Fonte: Autora

É fundamental contribuir para a redução de consumo de cimento na construção civil com materiais alternativos. O cimento representa 36% dos 7,7 gigatonnes (Gt) de emissão global de CO₂ pelas atividades de construção em 2010 (BAJŽELJ et al., 2013). Portanto, neste sentido, o uso de água ou areia saturada podem ser alternativas de menor impacto ambiental para preenchimento das estacas trocadoras de calor, com desempenho térmico semelhante às estacas preenchidas com argamassa. Além disso, a estaca preenchida com água apresentou menor resistência térmica devido aos mecanismos de convecção gerados no seu interior

6. COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE ESTACAS TUBULARES METÁLICAS COMO TROCADORES DE CALOR

A fundações tem por função principal resistir as cargas mecânicas da edificação (devido ao peso próprio da estrutura, esforços de vento, carga móvel, etc.). Deste modo, a transferência da carga axial aplicada nas estacas que compõem a fundação acontece pela mobilização da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade (interface solo-estaca) e da resistência de ponta da estaca.

Diferente das fundações convencionais, no caso de fundações por estacas trocadoras de calor, as variações cíclicas de temperatura na estaca (que por estar envolvida pelo solo fica com expansão restrita quando aquecida) geram cargas térmicas adicionais que alteram o comportamento mecânico da fundação.

Os ciclos térmicos provocam contração e dilatação da estaca que são somados às cargas mecânicas do edifício. Neste sentido, buscando compreender as interferências dos carregamentos térmicos em fundação metálica trocadora de calor, foram analisados separadamente os efeitos do carregamento térmico, o efeito do carregamento mecânico e a soma dos efeitos térmico e mecânico.

As cargas térmicas que surgem na estaca trocadora de calor dependem da variação da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade e da resistência de ponta da fundação, que juntamente com a carga atuante na cabeça da estaca comandam (e impedem) a expansão radial e axial da estaca quando aquecida, e também a contração quando a estaca é resfriada. Portanto, as características do perfil de resistência do subsolo de suporte da fundação também afetam a ocorrência de carga axiais adicionais devido à variação de temperatura na estaca.

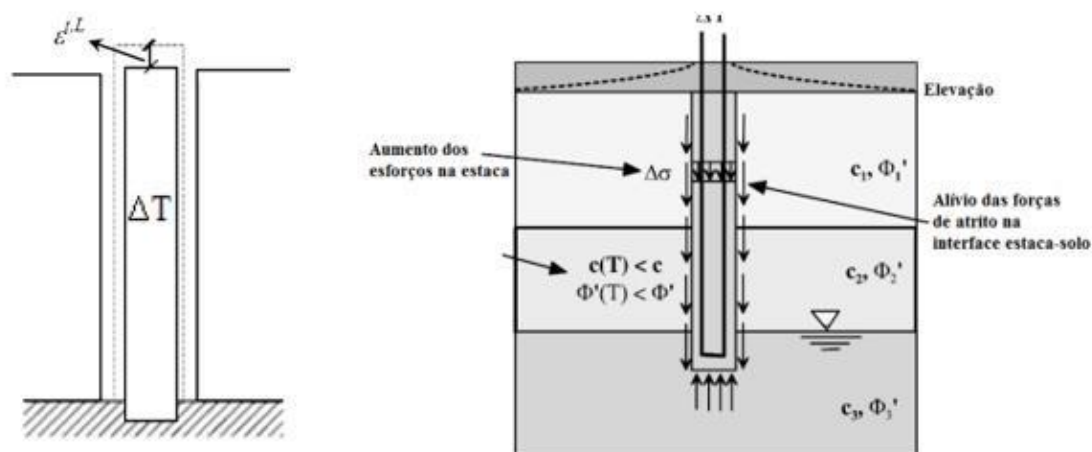
6.1. CARREGAMENTO TÉRMICO

Primeiramente nesta pesquisa foram analisados somente os efeitos do carregamento térmico (aquecimento) e resfriamento natural da estaca metálica preenchida com argamassa. A deformação térmica axial livre de uma estaca trocadora de calor devido ao carregamento térmico corresponde à deformação que a estaca sofreria

se não houvesse interferência do solo ou da estrutura. Porém, sabe-se que as deformações devido ao carregamento térmico estão associadas às interações entre a estaca e o solo ao longo do perfil atravessado, conforme indicado na Figura 6.1.

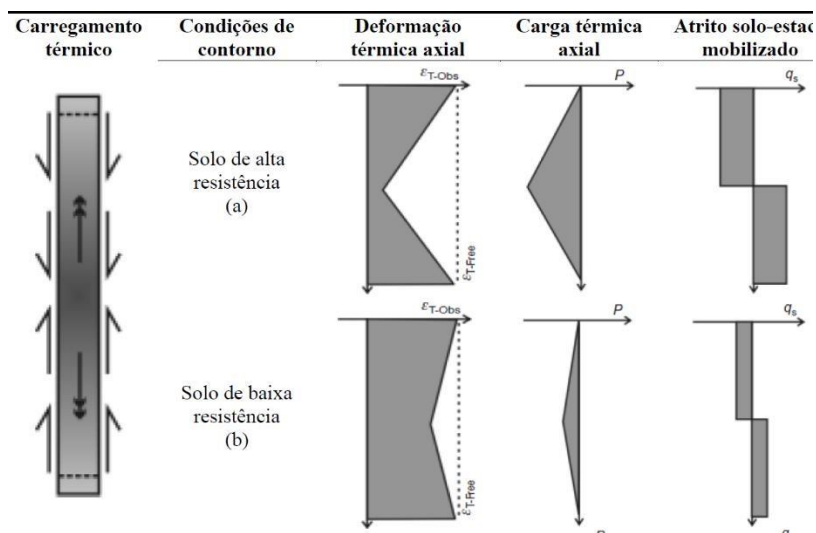
A Figura 6.2 de Amatya et al., (2012) mostra os diagramas de deformação axial, carga axial e atrito solo-estaca mobilizado para uma estaca sujeita a carregamento térmico em solo homogêneo de alta e baixa resistência. Observa-se pelos diagramas que as cargas axiais geradas pelos ciclos térmicos estão diretamente associadas à resistência do solo (resistência por atrito lateral na interface estaca-solo e também do solo da região da ponta).

Figura 6.1- Esquema de deformações térmicas em estaca com topo livre



Fonte: Adaptada Laloui, Moreni e Vulliet (2003)

Figura 6.2- Diagramas de deformação axial, carga axial e atrito lateral de uma estaca trocadora com carregamento térmico

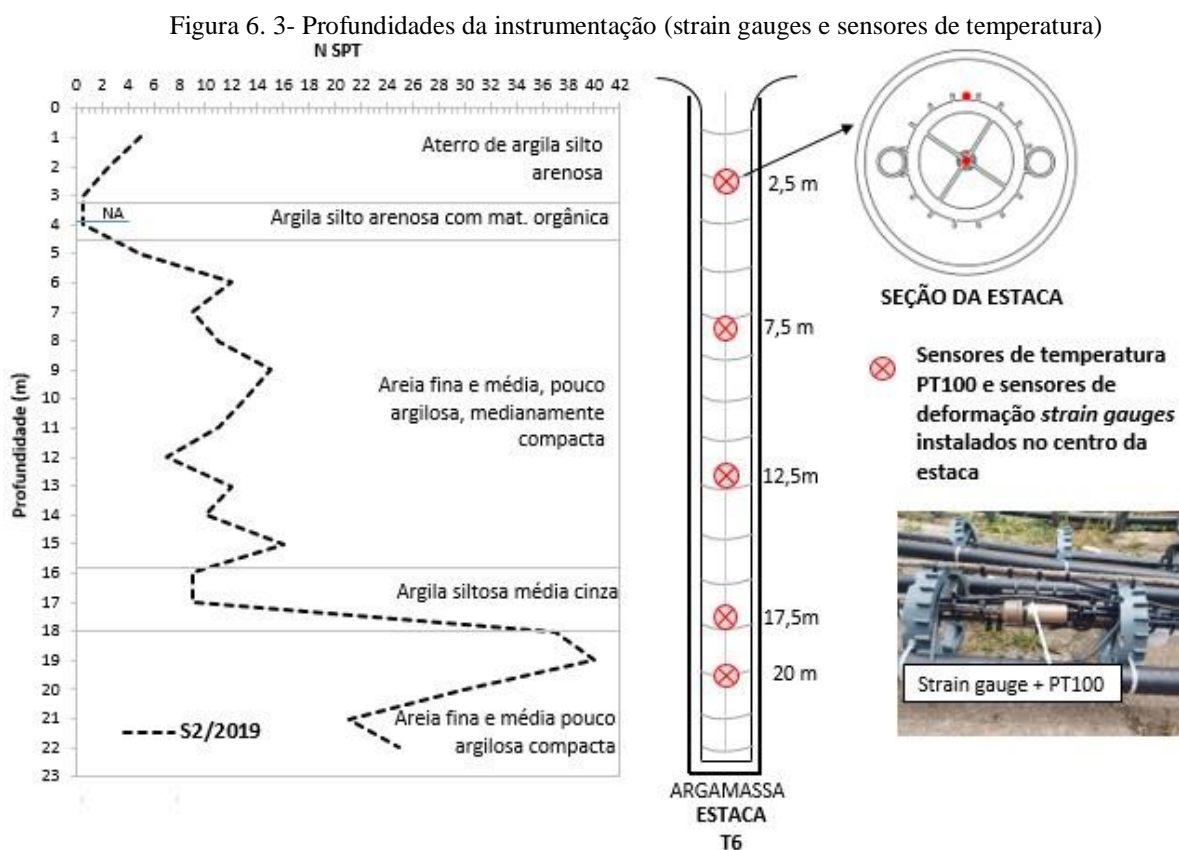


Fonte: Adaptada Amatya et al., 2012

Para avaliar o comportamento térmico da estaca metálica tubular utilizada como trocador de calor, foram analisados os dados das instrumentações instaladas na estaca P2. A estaca metálica tubular analisada possui diâmetro de 244 mm, espessura de 10 mm, e profundidade de 23,5 metros, sendo preenchida com Argamassa.

Nesta estaca foram instalados sensores de temperatura (PT100) e sensores de deformação (strain gauges) nos mesmos níveis. Na Figura 6.3 são apresentados os níveis de instrumentação adotados, sendo que as posições foram definidas de modo que houvesse pelo menos um sensor em cada camada do solo. É importante ressaltar que o último sensor instalado está a 3,5 metros acima da ponta da estaca.

Na seção a 12,5 m foram instalados sensores no centro, e sensores adicionais foram instalados próximos à borda da estaca, fixados ao espaçador conforme indicado na Figura 6.3, e no tubo PEAD.



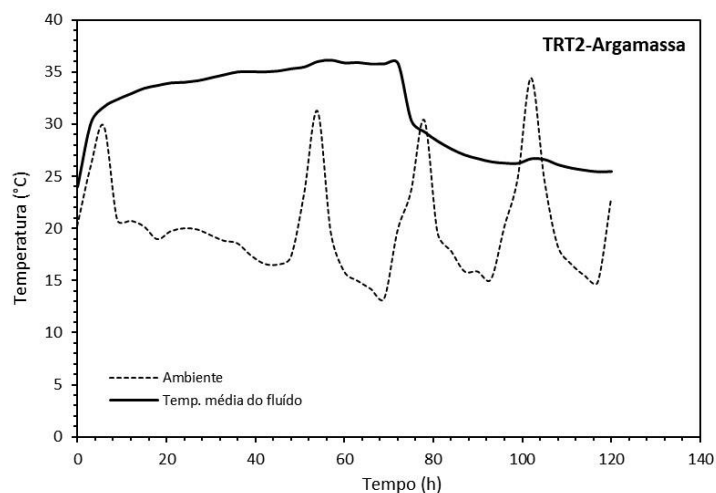
Fonte: Autora

Para as análises foram utilizados os dados do ensaio TRT nesta estaca, com aquecimento com duração de 72 horas e resfriamento natural (*recovery*) com duração

de 48 horas. A variação da temperatura média do fluido durante o ensaio é apresentada na Figura 6.4. As variações das temperaturas dos sensores instalados ao longo da profundidade da estaca são apresentadas na Figura 6.5 e as variações da temperatura na seção instrumentada a 12,5 m são apresentadas na Figura 6.7.

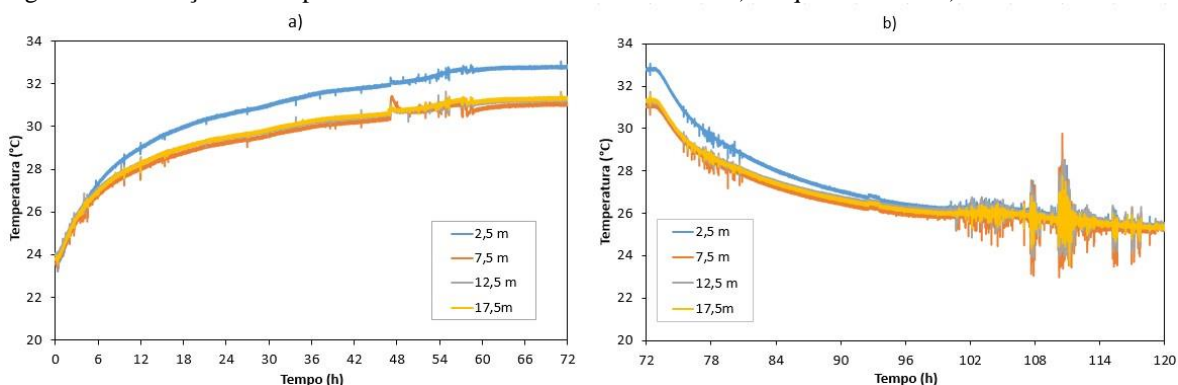
Pelos resultados observa-se que as temperaturas ao longo da estaca são muito próximas exceto para a profundidade à 2,5 m. O resultado pode ser justificado devido à camada de aterro de argila arenosa ser menos condutiva. Além disso, a variação da temperatura do fluido é maior nesta região o que também contribui com os resultados encontrados. O cabeamento do sensor de temperatura instalado a 20 metros foi rompido durante o preenchimento da estaca o que impossibilitou a leitura de temperatura nesta profundidade. Nota-se na Figura 6.5 que na fase final de resfriamento natural ocorreu problemas nos valores de temperatura medidos (ruídos).

Figura 6.4– Variação da temperatura do fluido e da temperatura ambiente durante o aquecimento e resfriamento natural da estaca



Fonte: Autora

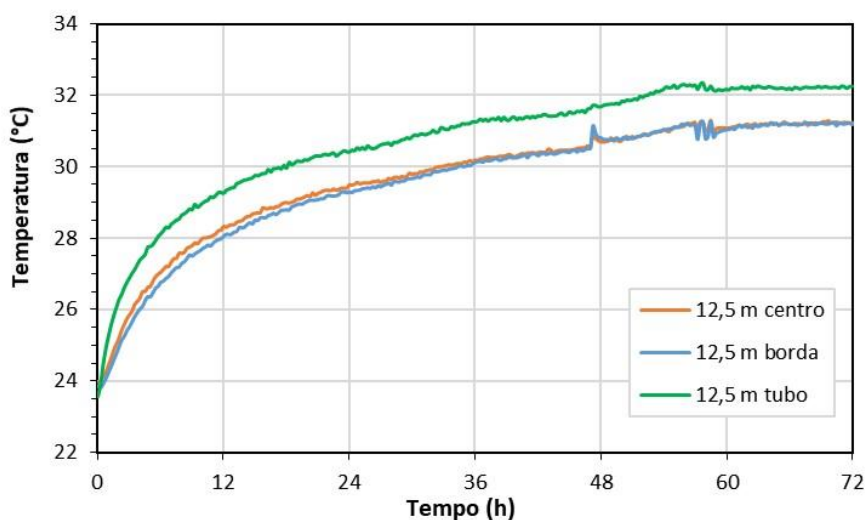
Figura 6.5- Variação da temperatura dos sensores na estaca durante a) o aquecimento e b) o resfriamento natural



Fonte: Autora

Os resultados apresentados na Figura 6.6 mostram maiores variações entre as temperaturas do sensor instalado no centro da estaca e sensor próximo a borda no início do ensaio. Porém, com o decorrer do tempo as temperaturas ficaram praticamente iguais. Quanto à temperatura do sensor instalado no tubo observa-se que a variação de temperatura foi aproximadamente 2°C ao longo do ensaio.

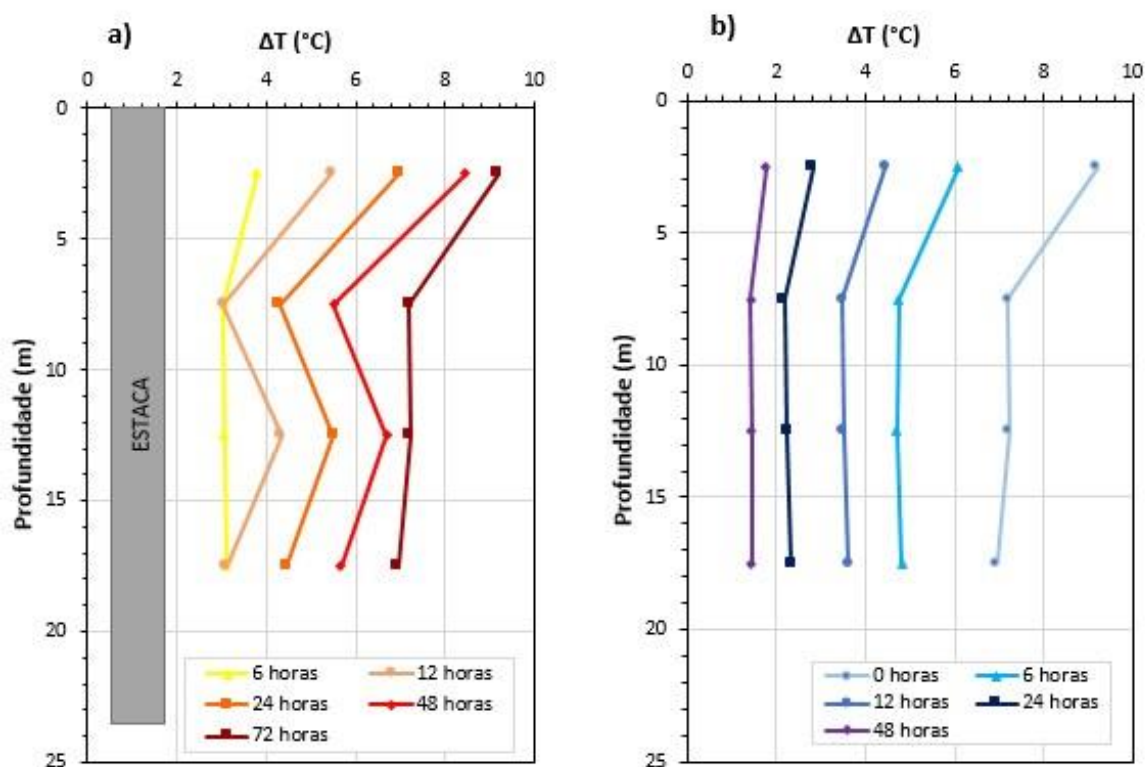
Figura 6.6-Seção a 12,5 m de profundidade com instrumentação no tubo PEAD, no centro e na borda da estaca



Fonte: Autora

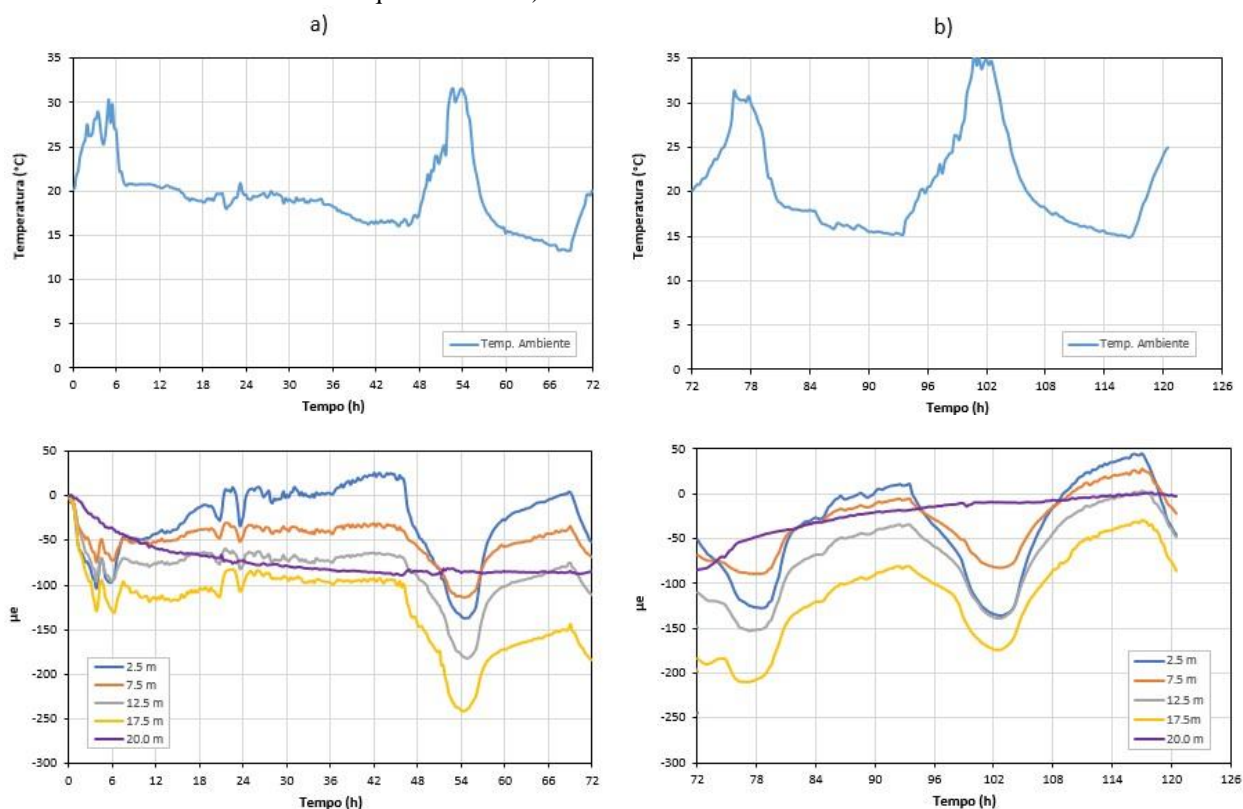
Na Figura 6.7 são apresentadas as variações das temperaturas na fase de aquecimento e resfriamento do ensaio. Observa-se que para a profundidade de 7,5 m, que corresponde à camada de areia, houve uma melhor condução do calor, diferentemente dos resultados obtidos para a camada de 12,5 em houve um maior aumento da temperatura.

Figura 6.7– Variação da temperatura na estaca ao longo da profundidade durante a) o aquecimento e b) o resfriamento natural



Com exceção da instrumentação instalada a 20 m de profundidade, os resultados nas leituras das barras instrumentadas com *strain gauges* foram fortemente influenciados pela temperatura ambiente (externa) como mostra a Figura 6.8. Os *strain gauges* foram conectados ao sistema de aquisição de dados por meio de longos cabos expostos às intempéries por um longo período, e provavelmente estes cabos foram danificados na região exposta ao ambiente. Como consequência, foi necessário descartar os dados obtidos nas fases de picos de aumento de temperatura do ambiente nas análises apresentadas neste capítulo.

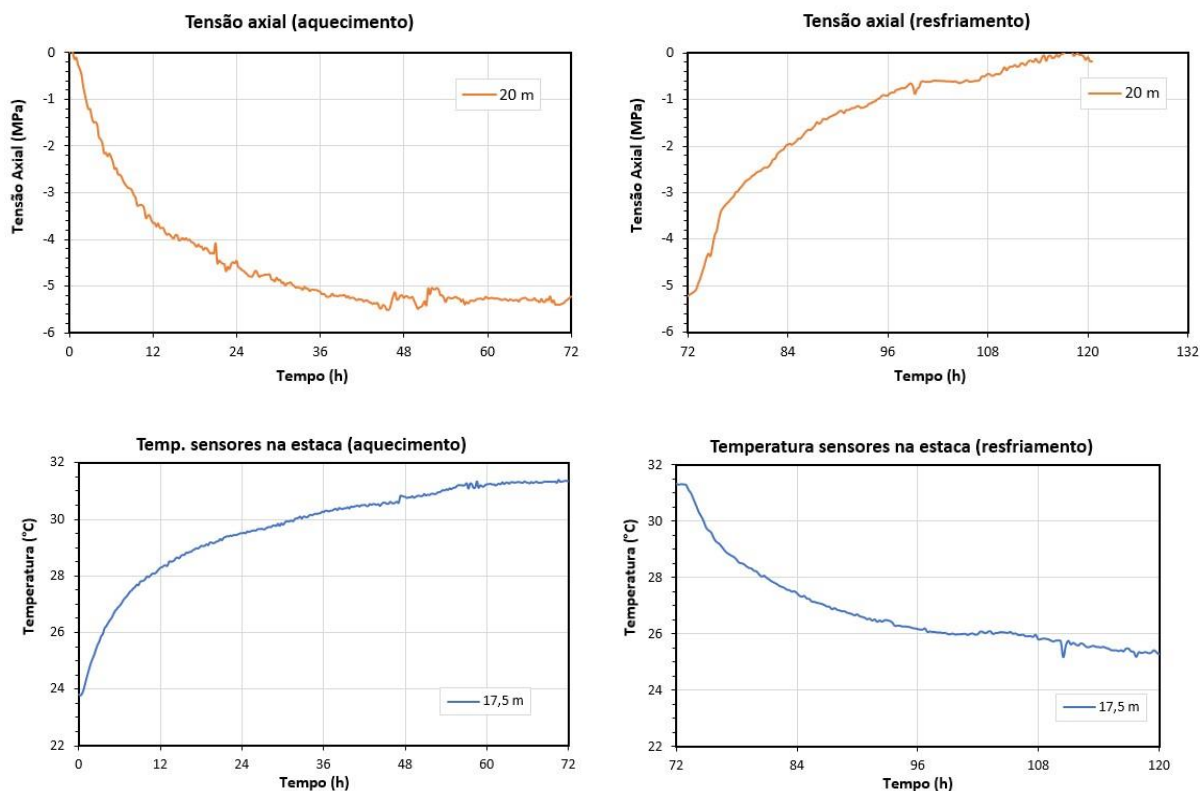
Figura 6. 8-Influência do efeito da temperatura ambiente nas leituras dos strain gauges para a) fase de aquecimento e b) fase de resfriamento da estaca



Fonte: Autora

Considerando-se que o resultado da instrumentação instalada a 20 m de profundidade dentro da estaca não foi afetado como nos outros níveis, a Figura 6. 9 apresenta os resultados de variação da tensão axial nesta seção durante o carregamento térmico nas fases de aquecimento e resfriamento natural. Os resultados desta figura mostram que após 48 horas de resfriamento natural as tensões axiais atuantes nesta seção (3.5m acima da ponta da estaca) voltaram a condição inicial anterior ao carregamento térmico.

Figura 6.9- Variação da tensão axial atuante (devido à subida da estaca sem restrição no topo) na seção a 20 metros de profundidade durante o carregamento térmico nas fases de a) aquecimento e b) resfriamento natural.

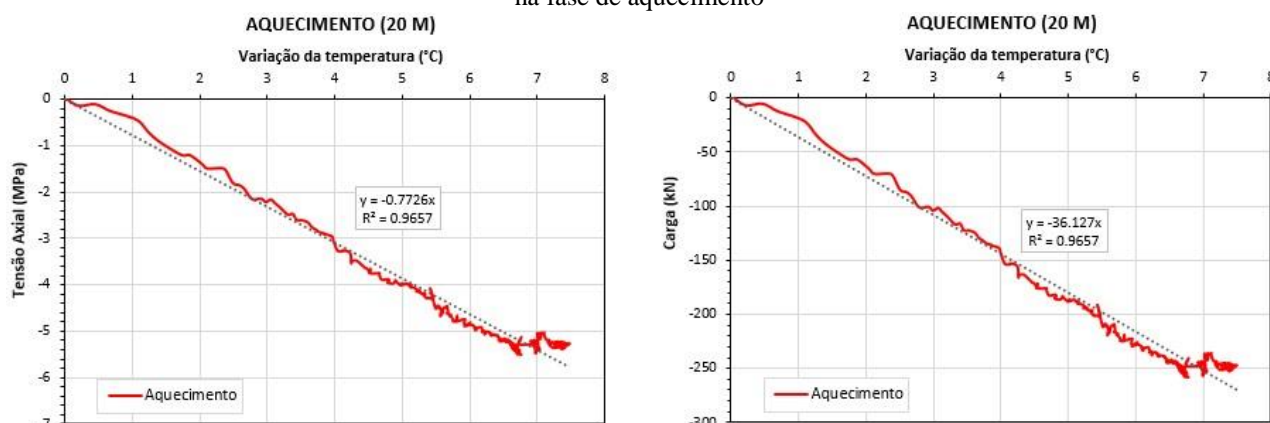


Fonte: Autora

A Figura 6.10 mostra a relação praticamente linear entre o aumento de temperatura e a tensão axial atuante na seção da estaca a 20 m (estaca não carregada mecanicamente, apenas termicamente). Os valores de tensão axial negativa indicam que nesta seção da estaca tendeu a se expandir para cima, e foi impedida pela resistência de atrito lateral na interface estaca solo, de modo similar ao esquema da Figura 6.1. A estaca tende a se movimentar para cima nesta profundidade devido a boa resistência do solo na região da ponta da estaca, como mostram os ensaios SPT neste terreno.

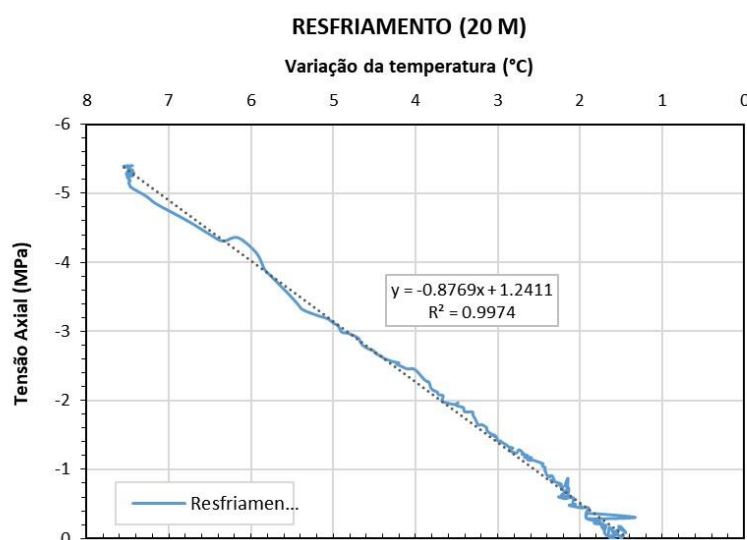
A Figura 6.11 apresenta a relação linear entre a diminuição de temperatura e a tensão axial atuante na seção da estaca a 20 m. Esta figura indica que após o resfriamento natural da estaca as tensões axiais atuantes nesta seção retornaram à condição inicial anterior ao aquecimento.

Figura 6.10–Curvas da tensão axial e carga induzidas na profundidade de 20 metros versus a variação da temperatura na fase de aquecimento



Fonte: Autora

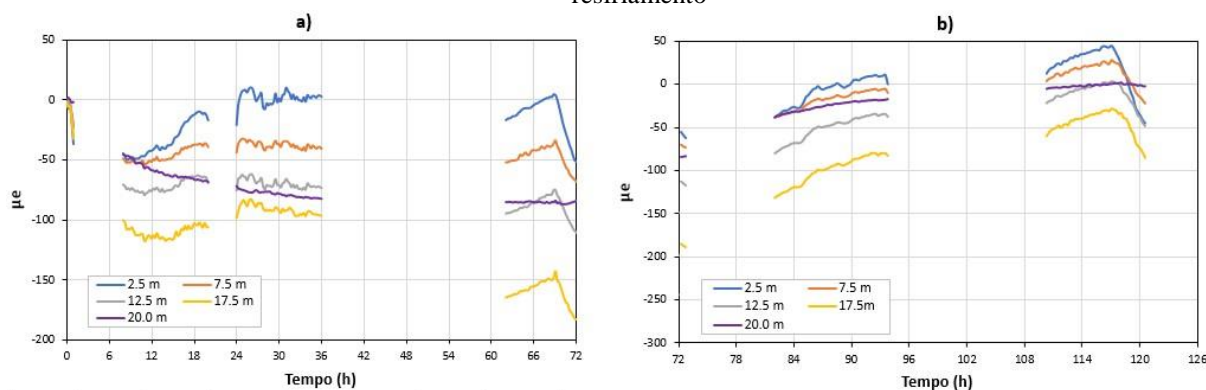
Figura 6. 11–Curva da variação da tensão axial e carga induzidas na profundidade de 20 m versus a variação da temperatura na fase de resfriamento



Fonte: Autora

Para poder analisar a variação de tensão axial ao longo da estaca nas profundidades em que a instrumentação foi prejudicada durante os aumentos de temperatura ambiente (atuante nos cabos externos), foram eliminados das análises os períodos de ensaio com as leituras incoerentes, por não estarem relacionadas diretamente com a variação de temperatura medida nestas seções da estaca. Os períodos utilizados são mostrados na Figura 6.12.

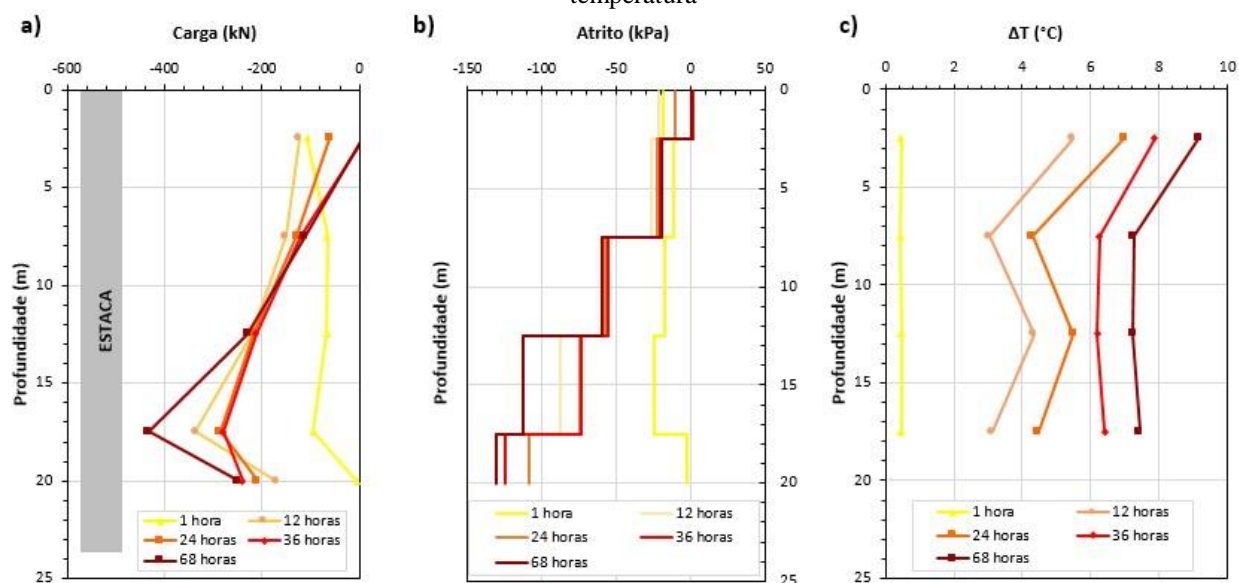
Figura 6.12 – Dados tratados dos strain gauges desconsiderando o efeito do ambiente em a) aquecimento e b) resfriamento



Fonte: Autora

Para análise dos resultados de variação de carga axial ao longo da profundidade causadas pelo carregamento térmico, foram considerados os tempos de 1, 12, 24, 36 e 68 horas, como mostra a Figura 6.13. Nesta figura nota-se que as maiores tensões axiais ao longo da estaca são geradas na região de maior resistência por atrito lateral (zona de maior restrição ao movimento de expansão axial).

Figura 6.13– a) carga axial termicamente induzida durante o ensaio, b) atrito unitário induzido e c) perfil de temperatura



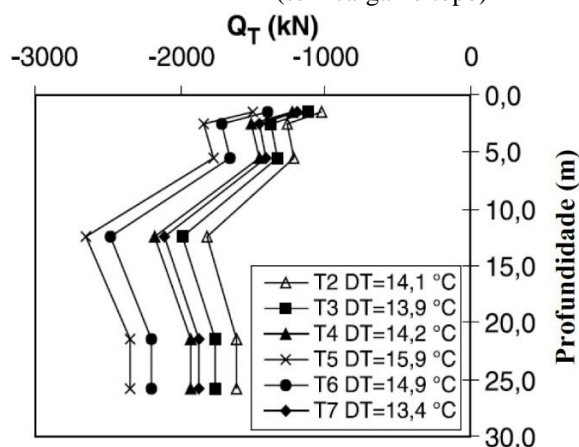
Fonte: Autora

A Figura 6.13 mostra que, conforme aumenta a temperatura na zona inferior da estaca, as tensões axiais também aumentam (zona de maior resistência por atrito lateral, impedindo a expansão axial da estaca para cima, como ilustra a Figura 6.1).

No entanto, na zona superior da estaca, por estar próxima do topo (onde não há restrição que impeça a estaca de se expandir para cima), e por estar em solo de baixa resistência (baixa resistência por atrito lateral), após 68 horas de carregamento praticamente não havia mais tensão axial atuante na seção a 2,5 metros de profundidade (a expansão livre no topo rompeu a baixa resistência por atrito nesta profundidade envolvida por argila mole). Nesta camada de menor resistência, o acréscimo de temperatura na estaca também foi maior (Figura 6.13c) devido a menor condutividade térmica da camada argilosa, que permitiu maior aumento de temperatura na estaca nesta zona.

Os resultados encontrados nesta tese são comparáveis aos apresentados por Laloui et al. (2003) por estacas trocadoras de calor submetidas a carregamento térmico com variação da temperatura entre 13,4 e 15,9°C, apresentadas na Figura 6.14. Como no caso desta tese, menores tensões axiais foram induzidas na região superior devido a maior liberdade para expandir axialmente (para cima). No entanto, no presente trabalho a variação de temperatura na estaca foi inferior, e as condições de solo e distribuição da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade são diferentes. As condições do subsolo de instalação da estaca comandam a variação de tensão axial ao longo da profundidade da fundação.

Figura 6.14-Cargas axiais ao longo de estaca trocadora de calor devido a carregamento térmico (sem carga no topo)

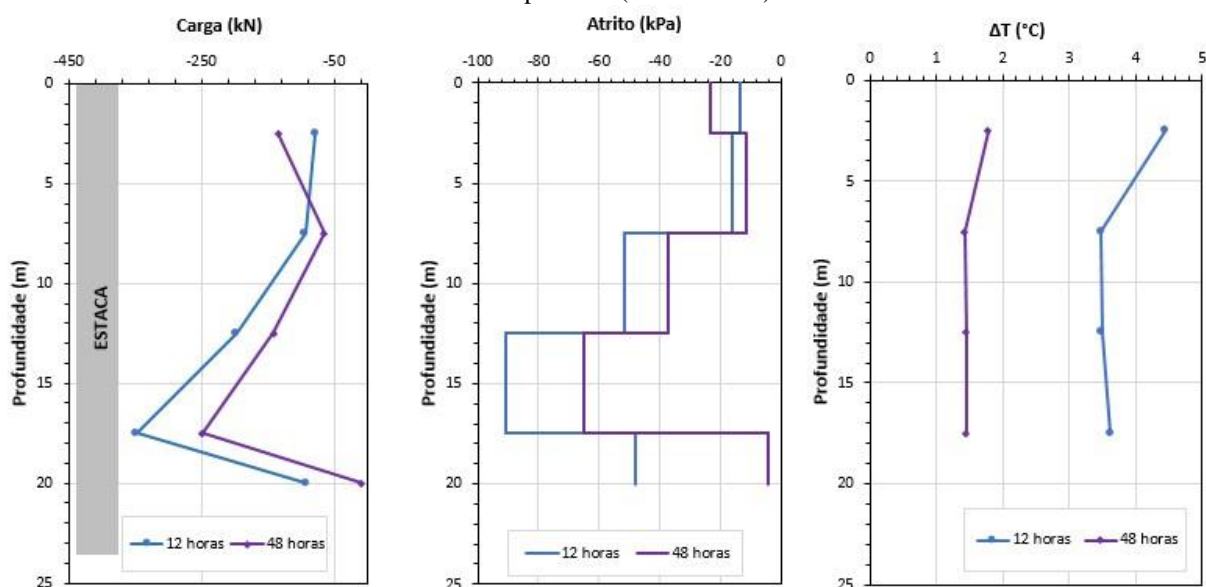


Fonte: Adaptado de Laloui et al. (2003).

A Figura 6.15 mostra os resultados de variação de carga axial ao longo da profundidade da estaca durante a fase de resfriamento natural após o carregamento térmico. Esta figura ilustra que conforme a temperatura na estaca vai diminuindo as tensões axiais também diminuem. No entanto, após 48 horas de resfriamento, na zona

inferior onde ocorreram maiores tensões axiais na fase de aquecimento, tensões residuais foram observadas. Provavelmente estes ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento contribuem para o surgimento de tensões residuais (carga presa) ao longo da estaca, principalmente nas zonas de maior resistência por atrito lateral, que impedem a estaca expandir e contrair livremente.

Figura 6.15- a) carga axial termicamente induzida durante o ensaio, b) atrito unitário induzido e c) perfil de temperatura (resfriamento)



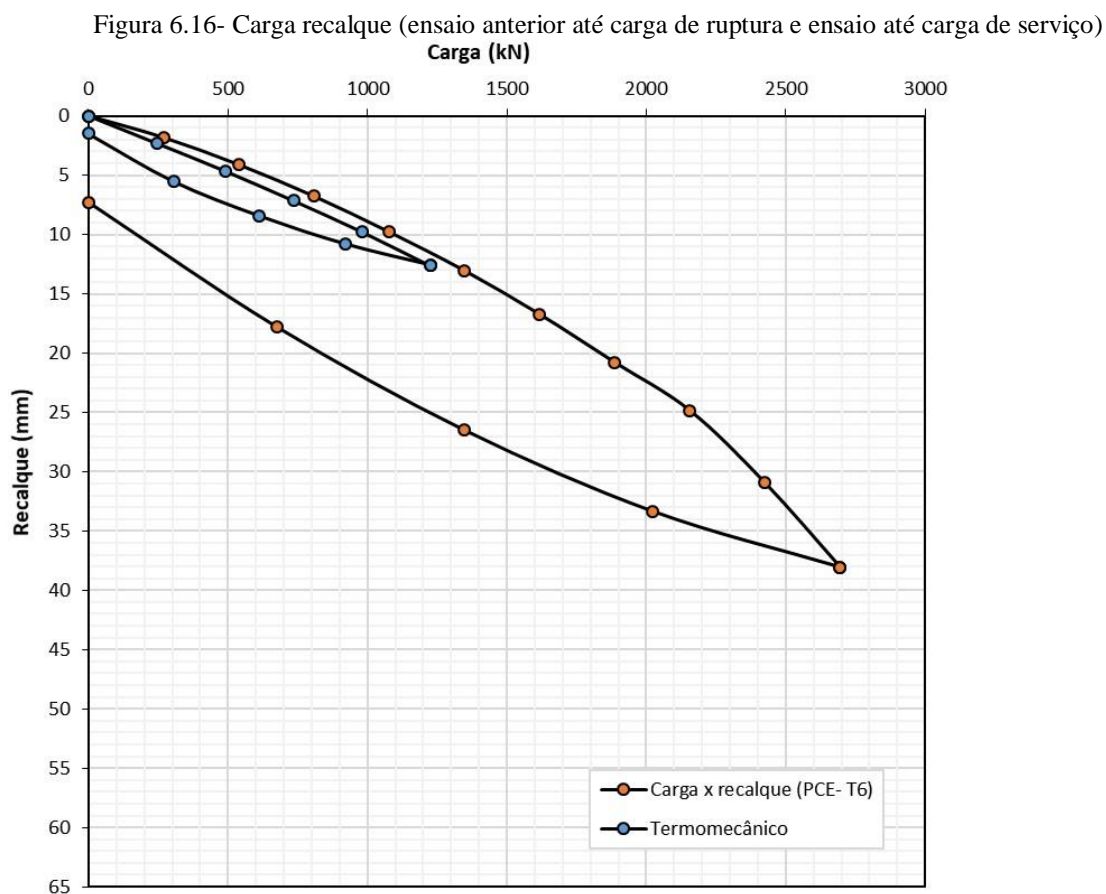
6.2. CARREGAMENTO TERMOMECÂNICO

Para avaliar o comportamento de uma fundação por estaca trocadora de calor na condição de serviço e simultaneamente carregada termicamente por um sistema de bomba de calor geotérmica para climatização do edifício, foi realizada nesta tese um ensaio termomecânico, no qual na primeira fase foi feito um carregamento apenas mecânico até a carga de serviço da fundação (simulando as etapas da construção e ocupação do prédio), e em seguida foi acrescentado um carregamento térmico por 24 horas, seguido de uma fase de resfriamento natural (simulando o desligamento da bomba de calor).

O objetivo principal do ensaio foi verificar se após o início do resfriamento (contração da estaca após expansão devido ao aquecimento) a estaca sob carga de serviço apresentaria recalques adicionais.

6.2.1 CARREGAMENTO MECÂNICO

Antes deste ensaio de carregamento de serviço foi realizada uma prova de carga estática na estaca (anteriormente a instalação da instrumentação com *strain gauges*). As curvas carga vs. recalque da prova de carga e do ensaio de carregamento até a carga de serviço (1220 kN) são apresentadas na Figura 6. 16.

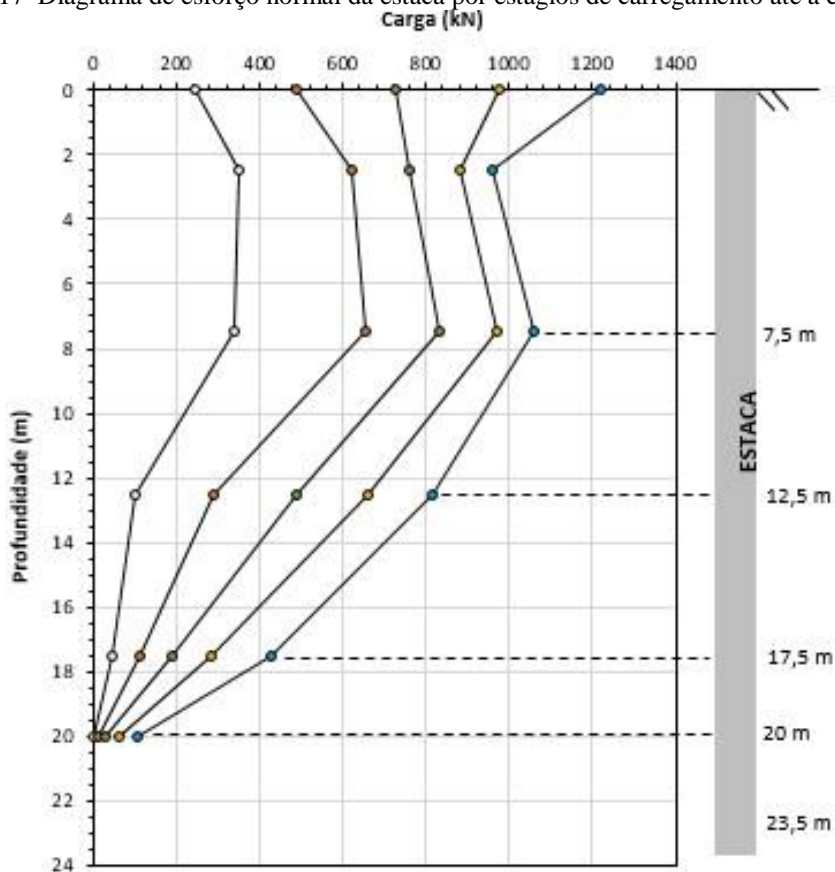


Fonte: Autora

A Figura 6.17 apresenta o diagrama de atrito mobilizado na estaca durante carregamento até a carga de serviço. Para o ensaio de serviço a instrumentação já havia sido instalada, permitindo observar a mobilização da resistência por atrito lateral e de ponta durante o carregamento de serviço. Esta figura indica que antes de iniciar o carregamento no topo da estaca havia carga residual positiva (para baixo), provavelmente devido ao resfriamento natural (contração) da zona superior da estaca, após expandir para cima no ensaio térmicos anterior, que foi interpretado pela

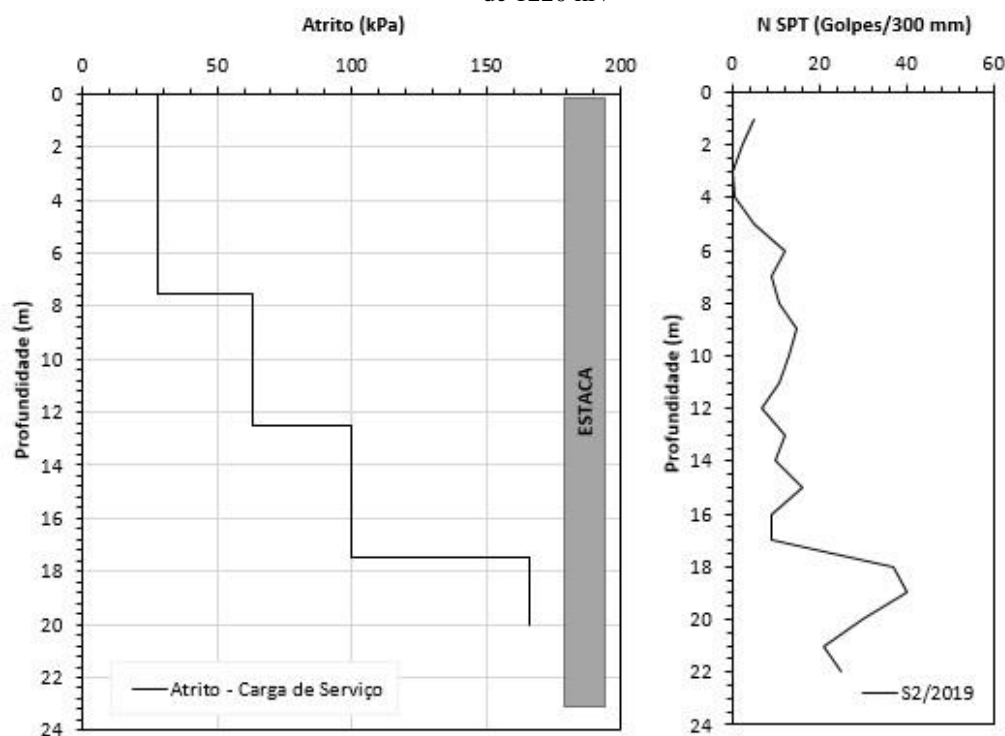
instrumentação como carga positiva nas profundidades de 2,5 e 7,5m, somando-se à carga aplicada pelo macaco hidráulico durante o carregamento mecânico.

Figura 6.17–Diagrama de esforço normal da estaca por estágios de carregamento até a carga de serviços de 1220 kN



A Figura 6.18 mostra a resistência por atrito lateral unitária mobilizada para a carga de serviço, e ilustra que maior parcela de carga foi mobilizada nas camadas de solo com maiores valores de NSPT (solo de maior resistência).

Figura 6.18– Valores de N_{SPT} e Resistência por atrito lateral unitária mobilizada para a carga de serviço de 1220 kN



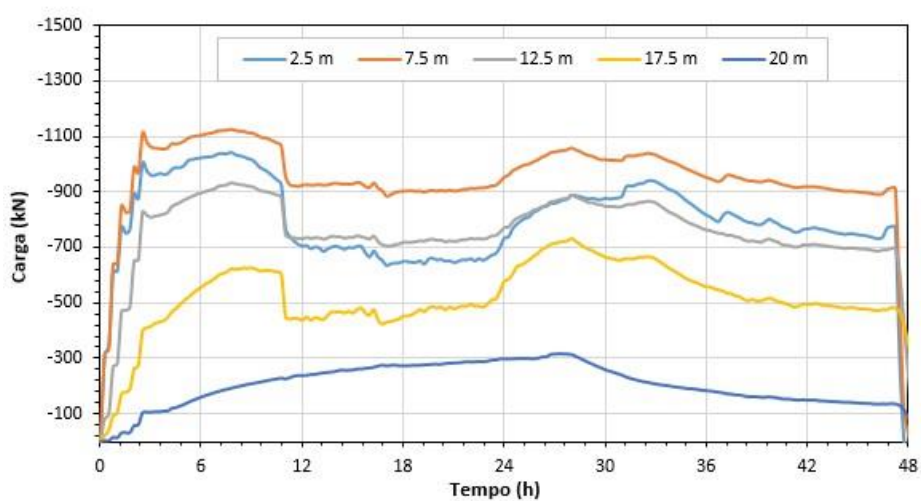
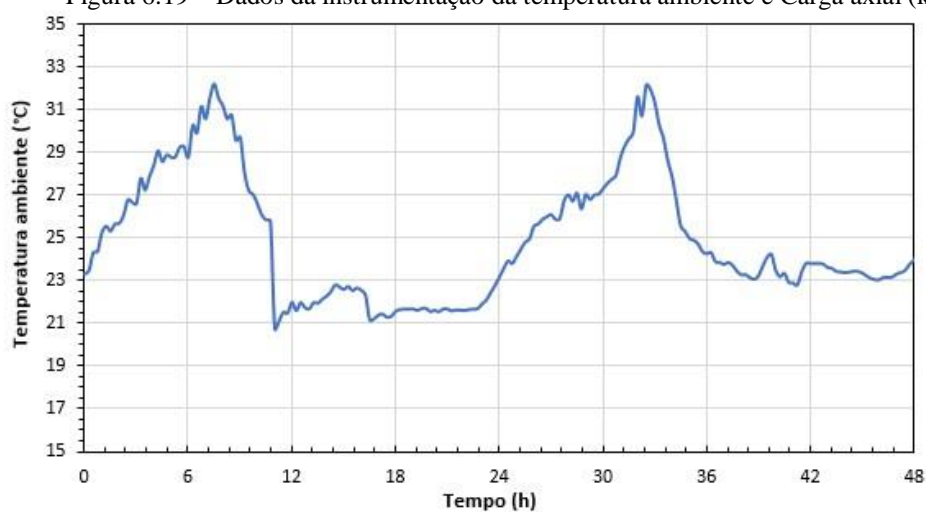
Fonte: Autora

6.2.2 CARREGAMENTO MECÂNICO + TÉRMICO (SIMULTANEO)

Como ocorrido no ensaio de carregamento térmico, os resultados das instrumentações foram afetados pela variação da temperatura ambiente, com exceção da profundidade de 20 m, como mostra a Figura 6.19. Portanto, como para o ensaio de carregamento térmico, os períodos de aumento de temperatura ambiente foram excluídos das análises (Figura 6.20).

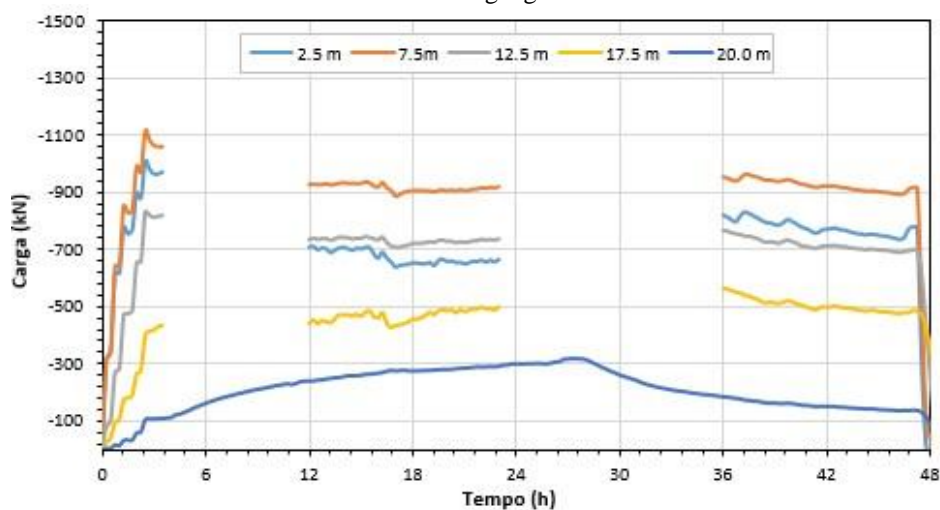
A Figura 6.21 apresenta a temperatura média no fluído circulante na estaca e nos sensores instalados ao longo da profundidade da estaca. Nota-se que como no ensaio de carregamento térmico a temperatura na estaca ficou mais elevada na profundidade de 2,5m (zona de argila mole, maior retenção de calor no entorno da estaca).

Figura 6.19 – Dados da instrumentação da temperatura ambiente e Carga axial (kN) na estaca



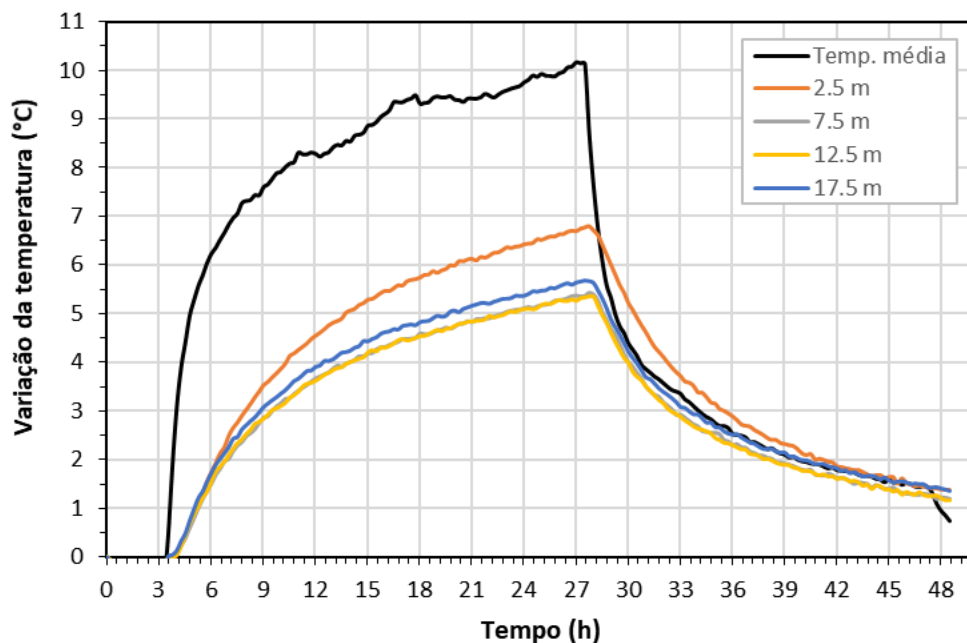
Fonte: Autora

Figura 6.20- Dados descartados devido ao efeito da temperatura ambiente nos resultados dos strain gauges



Fonte: Autora

Figura 6.21– Temperatura média no fluido e nos sensores instalados ao longo da profundidade da estaca

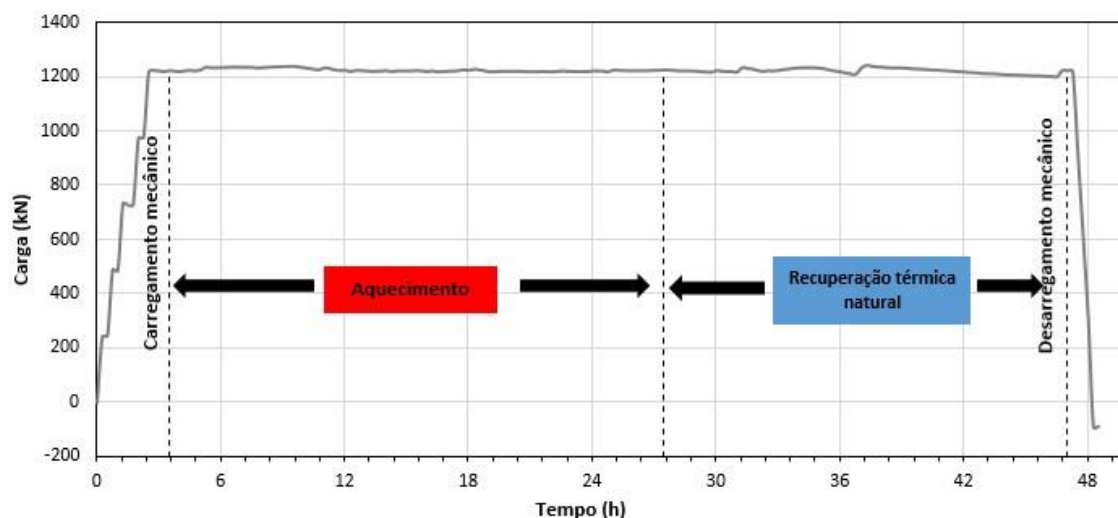


Fonte: Autora

A Figura 6.22 mostra a curva carga aplicada ao longo do tempo no ensaio termomecânico. A carga se manteve constante durante as fases de aquecimento e resfriamento natural da estaca. Após a fase de resfriamento a estaca foi descarregada mecanicamente.

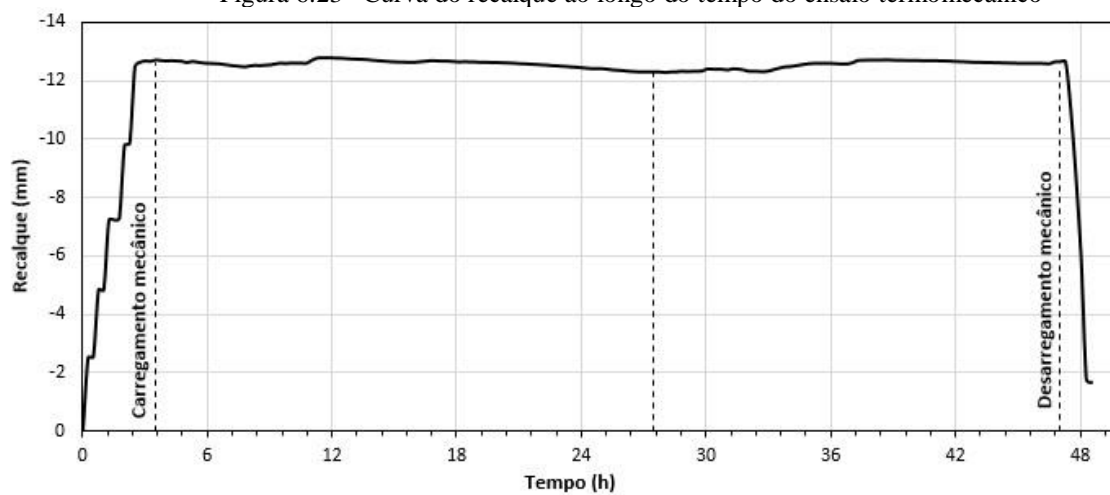
A Figura 6.23 indica que praticamente não ocorreram recalques adicionais na fundação sob carga de serviço tanto na fase de aquecimento quanto na de resfriamento natural. O que indica que para um ciclo de carregamento e descarregamento térmico, com aumento de temperatura ao longo da estaca em torno de 5,5 °C, a fundação não foi prejudicada em seu comportamento carga-recalque. No entanto, na fase de uso deste sistema a fundação sofrerá vários ciclos de carregamento e descarregamento térmico, de acordo com o seu uso para a climatização de ambientes. Por esta razão pretende-se para o edifício do CICS o monitoramento contínuo com pinos de recalque na base dos pilares suportados por estacas trocadoras de calor.

Figura 6.22– Curva carga x tempo do ensaio termomecânico



Fonte: Autora

Figura 6.23– Curva do recalque ao longo do tempo do ensaio termomecânico

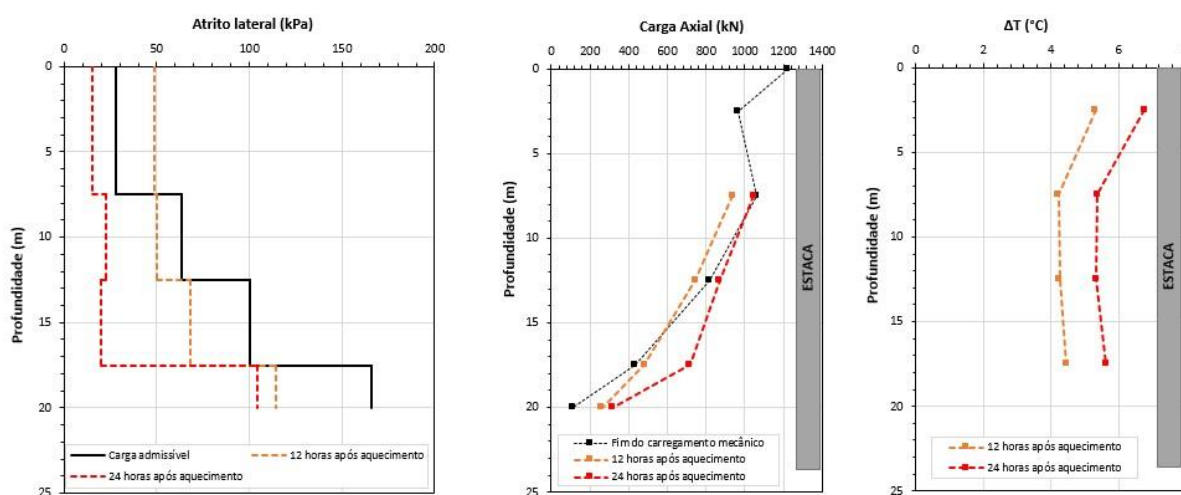


Fonte: Autora

A Figura 6.24 mostra os resultados de variação de carga axial ao longo da profundidade causadas pelo carregamento mecânico + térmico durante a fase de aquecimento da estaca sob carga de serviço, e a Figura 6.25 mostra os resultados relativos a fase de resfriamento natural após o aquecimento.

No final da fase de aquecimento nota-se uma alteração na mobilização de carga na região entre 12,5 e 20 m em relação ao carregamento apenas mecânico. Esta região da estaca tendeu-se a expandir aumentando as tensões (cargas) atuantes na seção, permitindo que chegasse mais carga na região da ponta da estaca (abaixo de 20m).

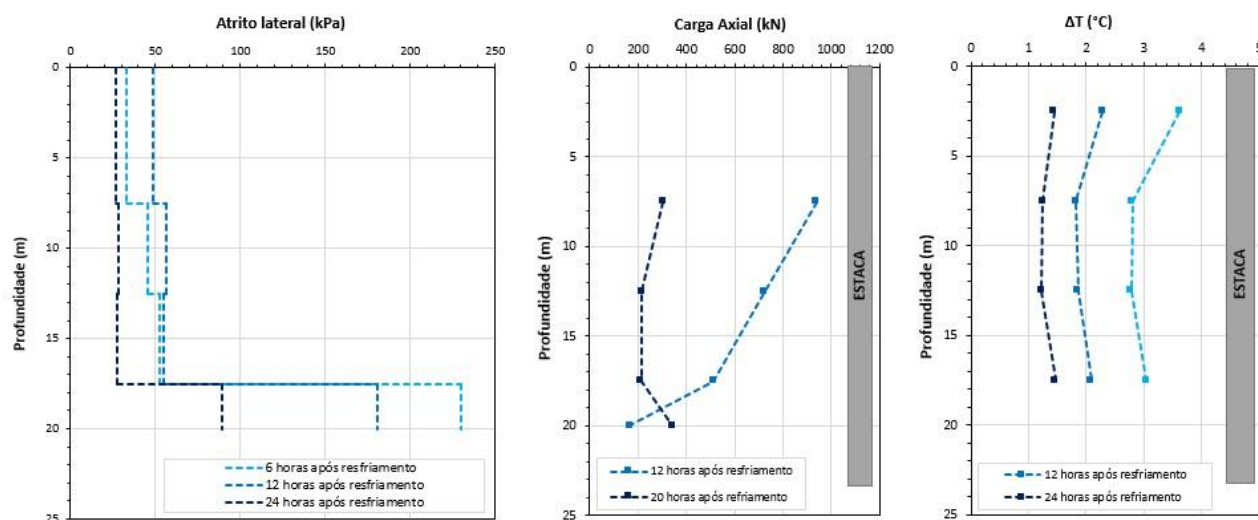
Figura 6.24- Diagrama de atrito (aquecimento) e variação de temperatura ao longo da estaca



Fonte: Autora

Após 12 horas de resfriamento, a Figura 6.25 mostra que antes de descarregar a estaca mecanicamente o diagrama de atrito mobilizado tende a voltar a condição anterior ao carregamento térmico. Nesta figura, após o descarregamento mecânico (24 horas após o início de resfriamento) ainda se observa cargas axiais residuais ao longo da estaca ainda não resfriada completamente.

Figura 6. 25- Diagrama de atrito (resfriamento natural) e variação de temperatura ao longo da estaca



Fonte: Autora

7. CONCLUSÕES

Esta tese teve como objetivo principal investigar e avaliar o desempenho térmico de fundações estacas metálicas tubulares, preenchidas com diferentes materiais (areia, concreto magro, concreto magro com fibras e água), para serem usadas como elementos trocadores de calor com o subsolo em sistema geotérmico superficial, para climatização de edifícios em condições climáticas e de temperatura de subsolo na cidade de São Paulo.

Para este fim, foram realizados ensaios em modelos físicos reduzidos em laboratório, e também em fundações piloto instaladas no campus da USP em São Paulo, onde está sendo construído um edifício que utilizará estas fundações trocadoras de calor para climatizar alguns de seus ambientes. Portanto, estes resultados desta pesquisa serão aplicados diretamente neste primeiro caso de uso desta tecnologia no Brasil, na qual se aproveitará as fundações já existentes para suportar as cargas do edifício para serem usadas em uma segunda função, que seria auxiliar na redução do consumo de energia elétrica com ar condicionado.

As soluções que apresentaram melhor desempenho térmico foram as de estaca preenchida com água e com argamassa com fibras metálicas. Porém, a primeira solução se torna mais atrativa por ser mais consideravelmente mais econômica e de menor impacto ambiental, considerando-se as emissões de CO₂ da produção de cimento.

Os resultados dos experimentos realizados na pesquisa mostraram também que o desempenho térmico das estacas preenchidas com argamassa e com areia saturada é similar. Porém a segunda alternativa envolve menores custos de execução, sendo mais atrativa. Além disso, como o objetivo deste trabalho é buscar soluções alternativas que reduzam os impactos ambientais e que tenham a mesma eficiência, a areia saturada se torna uma interessante opção de preenchimento para a estaca tubular quando comparada a argamassa (ou graute). É importante ressaltar que essa condição só é válida para areia saturada. Os resultados dos modelos físicos em laboratório evidenciaram um desempenho térmico inferior para a estaca preenchida com areia seca, justificado pela grande diferença entre a condutividade térmica da areia seca (varia de 0,3 a 0,4 W/m°C, LALOUÏ & LORIA, 2020) e da saturada (varia de 1,7 a 3,2 W/m°C, LALOUÏ & LORIA, 2020).

O satisfatório desempenho da estaca preenchida com água se deve ao efeito da convecção gerada no seu interior, detalhada pela modelagem numérica 3D, que gerou fluxo turbulento nas proximidades da parede da estaca, proporcionando melhor transferência de calor para o solo.

Os resultados dos ensaios em modelo físico apresentaram boa concordância com os resultados encontrados em campo, e indicaram melhor desempenho para as seções de estacas de aço comparadas com a de concreto. Pelas análises observa-se que o calor chegou mais rapidamente no solo na face externa das estacas com aço, contribuindo com a transferência de calor entre o fluido e o solo. Portanto, a modelagem física de uma seção de estaca trocadora de calor, que é uma técnica experimental mais econômica comparada aos ensaios de campo, foi eficiente em reproduzir de modo qualitativo as mesmas tendências observadas pelos ensaios na estaca real *in situ*, e pode ser usada em futuras pesquisas neste tema para avaliar o efeito de outras variáveis no sistema estudado.

É importante destacar a facilidade e economia de aço na montagem do sistema de geotermia em estacas tubulares usadas como fundações trocadoras de calor. Apesar de ter profundidades de ~23 m, os tubos foram inseridos manualmente e rapidamente em todo o comprimento da estaca cravada com ponta fechada.

Quanto aos métodos adotados para análise dos resultados dos ensaios TRT, o modelo numérico e o multipole model foram os métodos de interpretação dos resultados que melhor representaram a diferença observada experimentalmente entre os materiais de preenchimento testados. De modo geral, os valores de resistência térmica obtidos pelos métodos analíticos (exceto pelo multipole) foram um pouco mais conservadores (maiores).

No mais, os resultados indicaram que o simples método analítico ILSM pode ser utilizado para determinar os parâmetros λ_s e R_b para o caso analisado em que as estacas possuem elevada relação entre o comprimento e o diâmetro ($AR \sim 93$). No entanto, em um dos casos, a condutividade e a resistência foram superestimadas durante a injeção de calor, ilustrando a importância de incluir a fase de recuperação térmica (*recovery*) para determinação da condutividade independente da resistência térmica.

Neste trabalho também foi analisado o comportamento termomecânico da fundação por estaca metálica tubular preenchida com argamassa. O ensaio ilustrou, por meio dos resultados de instrumentação instalada na fundação, que ocorreu acréscimo de

tensões axiais ao longo do comprimento da estaca devido ao efeito do carregamento térmico simultâneo, modificando o diagrama de transferência de carga na fundação. No entanto, o valor de recalque medido durante o ensaio de carregamento da estaca na condição de serviço (antes, durante e após a aplicação de cargas térmicas) praticamente não variou.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e ensaios realizados nesta pesquisa, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Execução de ensaio TPT (*Thermal Performance Test*) para simular a condição de serviço da fundação por estaca durante o uso de bombas de calor geotérmica. Neste ensaio a temperatura de entrada na estaca é constante, simulando a temperatura de saída da bomba de calor, o que possibilita determinar a taxa de troca térmica entre a estaca e o solo;
- De posse dos resultados de λ_s e R_b da estaca metálica preenchida com argamassa e da estaca hélice contínua (PESSIN, 2021) analisar de forma analítica a superposição dos efeitos de aquecimento entre estacas vizinhas ou em grupos;
- Aprofundar as análises dos efeitos de diferentes camadas de solo ao longo do comprimento da estaca nas trocas térmicas e mecânicas;
- Com o modelo numérico em 3D calibrado, simular o efeito a longo prazo para a estaca preenchida com água e também fazer diferentes análises paramétricas para outras configurações de estacas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE handbook—heating, ventilating, and air-conditioning applications. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8p.

_____. NBR 7181 – Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

_____. NBR 12004 - Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos, 1990, 6p., Rio de Janeiro.

_____. NBR 12131- Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio, 2006, 12p., Rio de Janeiro.

ABU-HAMDEH, N. H., REEDER, R. C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. Soil science society of America Journal, 64(4), 1285-1290, 2000.

AKROUCH, G. A.; SÁNCHEZ, M.; BRIAUD, J. An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils. Computers and Geotechnics, v. 71, p. 207-220, 2016.

Comparing heat flow models for interpretation of precast quadratic pile heat exchanger thermal response tests. Energy, 2018, 145, 721-733.

ALVES, A. B. M; SCHMID, A. L. Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions. Energy and Buildings, v. 90, p. 41-50, 2015.

AMATYA B. L, SOGA K., BOURNE-WEBB P. J., AMIS T., LALOUI L. Thermomechanical behaviour of energy piles. Géotechnique. 2012 Jun 1;62(6):503.

ANTICS M., SANNER B. Status of geothermal energy use and resources in Europe. In: Proceedings of the European geothermal congress 2007 May (p. 8).

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Handbook- Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications. (SI Edition). Atlanta, EUA.2011, 1104p.

ASTM STANDARD, D 5334-92: test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure. ASTM Standards on DISC, vol. 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.

ARSHAD, M., INAYAT, M. H., CHUGHTAI, I. R. (2011). Experimental study of natural convection heat transfer from an enclosed assembly of thin vertical cylinders. *Applied Thermal Engineering*, 31(1), 20-27.

AUSTIN, W. A. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties. Dissertação de Mestrado. Oklahoma State University. Stillwater, 1995, Oklahoma.

AUSTIN, W. A., YAVUZTURK, C., SPITLER, J. D. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. *ASHRAE Transactions*, 2000, 106 (1): 365 – 379.

BANDEIRA NETO, L. A. Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado. 2015. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, São Carlos, 08/12/2015, 130 p.

BANKS, D. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. John Wiley & Sons, 2012.

BATINI N., LORIA A. F. R., CONTI P., TESTI D., GRASSI W., LALOUI, L. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86, 199-213.

BAJŽELJ, B., ALLWOOD, J. M. & CULLEN, J. M., 2013. Designing climate change mitigation plans that add up. *Environ. Sci. Technol.* 47, 8062–8069.

BEN. Balanço Energético Nacional 2018 - Relatório Final. 2018.

BERGMAN, T. L., INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*, 2011. John Wiley & Sons.

BERNIER, M. Ground Coupled Heat Pump System Simulations, *ASHRAE Transactions*, 2001, 107 (1), 605-616.

BIDARMAGHZ, A. 3D numerical modelling of vertical ground heat exchangers Doctoral dissertation, 2014, University of Melbourne.

BLACKWELL, J. H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, Part I – Theory Journal Appl. Physics. 1954, 25, 137 -144.

BOURNE-WEBB, P. J., AMATYA, B., SOGA, K., AMIS, T., DAVIDSON, C., PAYNE, P. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 2009, 59(3), 237-248.

BOURNE-WEBB, P. J., BODAS FREITAS, T. M., FREITAS ASSUNÇÃO, R. M. Soil–pile thermal interactions in energy foundations. *Géotechnique*, 2015, 66(2), 167-171.

BRANDL, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*. Mar; 56 (2):81-122.

BRANDL, H. (2013). Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 57, 9-18.

BOUQUET, J. C.; BURLON, S.; BEMAY, B.; EMERIAULT, F.; FARHAT, H. GRESS, J.

B.; ZERHOUNI, M. (2017). Apostila “Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques”.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, BS EN 12664:2001 (2001a), Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance, BSI, London.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, BS EN 12667:2001 (2001b), Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance, BSI, London.

BURLON, S., HABERT, J., SZYMKIEWICZ, F., SURYATRIYASTUTI, M., MROUEH, H. (2013). Towards a design approach of bearing capacity of thermo-active piles. In *European Geothermal Congress*, (pp. 1-6).

CAO, Z., ZHANG, G., LIU, Y., ZHAO, X., LI, C. (2022). Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile. *Renewable Energy*, 184, 374-390.

CARSLAW, H. S., JAEGER, J. C. (1946). *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press.

CECINATO, F., LOVERIDGE, F. A. (2015). Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy*, Feb. 82, p. 1021-1033.

CHIASSON, A. D., SPITLER, J. D., REES, S. J., SMITH, M. D. (2000). A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with closedloop ground-source heat pump systems. *ASHRAE transactions*, 106, 107.

CHOI J.C., LEE S.R., LEE D.S. (2011). Numerical simulation of vertical ground heat exchangers: intermittent operation in unsaturated soil conditions. *Computers and Geotechnics*. Dec 1;38(8):949-58.

CHOI, W., OOKA, R. (2015). "Interpretation of disturbed data in thermal response tests using the infinite line source model and numerical parameter estimation method." *Applied Energy* 148: 476-488.

CHOW, F., JARDINE, R. J. (1996). Investigations into the behavior of displacement piles for offshore foundations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 7, No. 33, pp. 319A-320A.

CLAESSON, J.; HELLSTROM, G. (2000) Analytical studies on the influence of regional groundwater flow on the performance of borehole heat exchangers. *Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage Terrastock 2000*, University of Stuttgart, Institute of Thermodynamics and Thermal Engineering, vol. 1, pp.195-200

CLARKE, B. G., AGAB, A., NICHOLSON, D. (2008). Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Geotechnical Engineering*, 161, 161–168.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO, Eurocode 7. TC 341 – Ground Investigation and testing, N 525 –Geothermal Testing – Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock using a Borehole Heat Exchanger, 2011.

COMSOL Multiphysics. COMSOL Reference Manual (Version 5.4), 2018.

CÔTÉ J., KONRAD J. M. A. (2005). Generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005 Apr 1;42 (2):443-58.

DELERABLEE, Y., BURLON, S., REIFFSTECK, P., ANTOINET, E. (2018). Numerical Assessment of Thermal Performance and Heat Storage Capacity of Thermoactive Geostructures. In *International Symposium on Energy Geotechnics*, pp. 11-18.

DESMEDT J, VAN BAELE J., HOES H., ROBEYN N (2012). Experimental performance of borehole heat exchangers and grouting materials for ground source heat pumps. *International Journal of Energy Research*. Oct 25;36(13):1238-46.

DI DONNA, A., BARLA, M., AMIS, T. (2017). Energy Geostructures: Analysis from research and systems installed around the World. In DFI 42nd Annual Conference on Deep Foundations.

EKLÖF C, GEHLIN S. (1996). TED-a mobile equipment for thermal response test: testing and evaluation.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Relatório de Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Sumário Executivo – Ano base 2005. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2009.

EPE (2018). Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 030/2018.

EROL S., FRANÇOIS B. (2014). Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers, *Appl. Therm. Eng.* 70 (1) (2014) 788 -799.

FAROUKI, O. (1981) Thermal properties of soils: CRREL Monograph. Hanover, NH: United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.

FERREIRA, M. S. (2017). Resposta termomecânica de estaca geotérmica. Dissertação de Mestrado. Universidade Norte Fluminense UENF, 115p.

ESKILSON, P. (1986). Superposition borehole model. Manual for computer code.

GAO J., ZHANG X., LIU J., LI K., YANG J. (2008). Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application. *Applied Energy*. 2008, 85(10): 901-910.

GEHLIN, S. (2002). Thermal response test: Method development and evaluation. Tese de doutorado. Division of water resources engineering. Department of Environmental Engineering. Lulea University of Technology, 44 p.

GLASSLEY, W. E. (2014). Geothermal energy: renewable energy and the environment. CRC Press.

GUPTA, H. K, ROY, S. (2006). Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier; Dec 12.

GUSTAFSSON, A. M., NORDELL, B. (2006). Thermal Response Test While Drilling. Proceedings of 2006 EcoStock – 10 th International Conference on Thermal Energy Storage.

HADJADJ A., MAAMIR S., ZEGHMATI B. (1999). A new study of laminar natural convection in two concentric vertical cylinders. Heat Mass transfer 1999; 35; 113-21.

HAFFAR, I. (2018). Physical modeling and study of the behavior of deep foundations of offshore wind turbines. Tese de doutorado, IFSTTAR-Nantes, França. 298 p.

HAMDHAN, I. N., CLARKE, B. G. (2010). Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils. In Proceedings of World Geothermal Congress, pp. 1-7.

HELLSTROM, G. (1991) Ground Heat Storage, Thermal Analysis of Duct Storage Systems, Theory, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden

HEMMINGWAY, P.; TOLOOIYAN, A. (2014). Numerical and finite element analysis of heat transfer in a closed loop geothermal system. International journal of green energy, v. 11, n. 2, p. 206-223.

HILLEL, D. (2003). Introduction to environmental soil physics. Elsevier; Dec 17.

INCROPERA, F. P., LAVINE, A. S. DEWITT, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons Incorporated.

INGERSOLL, L. R., ZOBEL O. J., INGERSOLL A. C. (1954). Heat Conduction with engineering, geological, and others applications. New York: McGraw-Hill.

IRITANI, M. A. (1993). Potencial hidro geológico da cidade universitária de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

ISO, CENEN. 17628 (2015). Geotechnical Investigation and Testing-Geothermal Testing Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock Using a Borehole Heat Exchanger. CEN: Brussels, Belgium.

JARDINE, R., CHOW, F., OVERY, R., STANDING, J. ICP (2005). Design methods for driven piles in sands and clays, 2005. London: Thomas Telford, 112 p.

JAVED, S., SPITLER, J. D., FAHLÉN, P. (2011). An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties. ASHRAE Transactions, 117(1), 13-21.

JENSEN-PAGE L., LOVERIDGE F., NARSILIO G (2019). "Thermal response testing of large diameter energy piles." *Energies* 12, no. 14: 2700.

JOHANSEN, O. (1977). Thermal conductivity of soils. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH; PhD, p. 637.

JUN L., XU Z., JUN G., JIE Y. (2009). Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems. *Renewable energy*. Dez 1;34(12):2898-904.

KELVIN, W. T. (1982). Mathematical and physical papers. Vol II, p.41.

KIM, D., KIM, G., KIM, D., & BAEK, H. (2017). Experimental and numerical investigation of thermal properties of cement-based grouts used for vertical ground heat exchanger.

Renewable Energy. 112, 260-267.

KNELLWOLF C., PERON H., LALOU L. (2011). Geotechnical analysis of heat exchanger piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890-902.

KJELLSSON E, HELLSTRÖM G. (1997). Laboratory study of the heat transfer in a water filled borehole with a single U-pipe. 7^a Conferência internacional em armazenamento de energia térmica. Sapporo, Japão, p. 509–14

KRAMER, C. A., GHASEMI-FARE, O., & BASU, P. (2015). Laboratory thermal performance tests on a model heat exchanger pile in sand. *Geotechnical and Geological Engineering*. 33(2), 253-271.

KREITH, F., MANGLIK, R. M. & BOHN, M. S. (2016). *Principles of Heat Transfer: SI Edition*, Cengage learning.

LALOU, L., LORIA, A. R. (2019). *Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application*. Academic Press. 1062 p.

LALOU, L., MORENI, M., VULLIET, L. (2003). Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(2), 388-402.

LALOUI, L., DI DONNA A. (2011). Understanding the behavior of energy geostructures.

Civil Engineering, n. 164, 184-191.

LENNON, D. J., WATT, E., SUCKLING, T. P. (2009). Energy piles in Scotland. Van Impe & Van Impe (eds). Proceedings of the Fifth International Conference on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Frankfurt. Taylor & Francis Group, London.

LHENDUP, T., AYE, L., FULLER, R. J. (2014). In situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. Applied Thermal Engineering, 2014, vol. 76, pp. 285 – 293

LOVERIDGE, F. (2012). The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems, Tese de Doutorado, Universidade de Southampton, 216 p.

LOVERIDGE, F. A., AMIS, A., & POWRIE, W. (2012). Energy pile performance and preventing ground freezing.

LOVERIDGE, F., LOW, J., POWRIE, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 50, n. 2, p. 158-168.

LOVERIDGE, F. A., POWRIE, W. (2013). Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 166(2), 178-196.

LOVERIDGE, F., POWRIE, W., NICHOLSON, D. (2014). Comparison of two different models for pile thermal response test interpretation. Acta Geotechnica. Jun 1;9(3):367-84.

LOVERIDGE, F., LOW, J., POWRIE, W. (2017). Site investigation for energy geostructures. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 50(2), 158-168.

LOW, J. (2016). Thermal conductivity of soils for energy foundation applications. Tese de Doutorado. University of Southampton, 220 p.

LUND, J., SANNER, B., RYBACH, L., CURTIS, R., HELLSTROM, G. (2004). Geothermal (ground-source) heat pumps-a world overview.

Manual técnico Estacas Tubulares Tuper com Conexão Rápida (2020).

MAN, Y., YANG, H., DIAO, N., LIU, FANG, Z. (2010). A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 253 -2601.

MARCOTTE, D. AND PASQUIER, P. (2008). Fast Fluid and Ground Temperature Computation for Geothermal Ground-Loop Heat Exchanger Systems. *Geothermics*, 37(6), pp.651–665.

MARTYNOV, G. A. (1959) Heat and Moisture Transfer in Freezing and Thawing Soils. In: *Principles of Geocryology*. National Research Council of Canada, Technical Translation 1065, Chapter VI

MEI, V. C., EMERSON, C. J. (1985). New approach for analysis of ground-coil design for applied heat pump systems. *ASHRAE Transactions*, p1 (2B): 1216 – 1224.

MITCHELL, J. K., KAO, T. C. (1978). Measurement of soil thermal resistivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 104, n. ASCE 14080 Proc Paper.

MORAIS, T. S. O. (2019) Análise do comportamento termomecânico de fundação trocadora de calor em região de clima subtropical. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 272 p.

MORAIS, T. S. O., TSUHA, C. H. C. (2016) Energy pile and ground temperature response to heating test: a case study in Brazil. *Bulgarian chemical communications*, 48, 115-119.

MORAIS T. S O., TSUHA C. H. (2018). In-situ measurements of the soil thermal properties for energy foundation applications in São Paulo, Brazil. *Bulgarian Chemical Communications*. 50:34-41.

MOGENSEN, P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. *Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, Sweden, Jun 68, 1983.

MURARI, M. C. F., TSUHA, C. H. C., AOKI, N., CAMPOS, H. H.P., KOTOVICZ. I.

Evolução da transferência de carga e “set-up” de fundações por estacas tubulares metálicas cravadas: estudo de caso. Artigo aceito para publicação no COBRAMSEG 2022.

MURAYA, N. K., O'NEAL, D. L., HEFFINGTON, W. M. Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump. ASHRAE Transactions, 1996, 102(2): 12-21.

NHBC. Efficient Design of piled foundations for low-rise housing, design guide, NHBC Foundations, 2010.

OLGUN C. G.; MCCARTNEY, J. S. Outcomes from International Workshop on Thermoactive Geotechnical Systems for near-surface geothermal energy: from research to practice. The Journal of the Deep Foundations Institute, 2014. vol. 8 (2), p. 58-72.

OMER, A. M. Ground-source heat pumps systems and applications. Renewable and sustainable energy reviews. 2008 Feb 1;12(2):344-71.

OROZCO C. H. Validação do ensaio TRT para estudo paramétrico da troca de calor de uma estaca de energia em um solo tropical. Dissertação Mestrado, Universidade de Brasília, UnB, 2016, 169 p.

PARK, H., LEE, S. R., YOON, S., CHOI, J. C. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. Applied Energy, 103, 12-24, 2013.

PARK, S., SUNG, C., JUNG, K., SOHN, B., CHAUCHOIS, A., CHOI, H. (2015) Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. Applied Thermal Engineering. 90, 10611071.

PESSIN, J. (2021). Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

POPPEL, J., PÉRON, H., SILVANI, C., STEINMANN, G., LALOUI L., WAGNER, R., LOCHBUHLER, T., ROHNER, E., (2008) Innovative Improvements of Thermal Response Tests Final Report. Swiss Federal Office of Energy, p. 1-34.

RAYMOND, J., THERRIEN, R., GOSSELIN, L., LEFEBVRE, R. (2011) A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Groundwater*. Nov;49(6):932-45.

REES, S. J (2016) An introduction to ground-source heat pump technology. In *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, (pp. 1-25). Woodhead Publishing.

REES, S. W., ADJALI, M. H., ZHOU, Z., DAVIES, M., THOMAS, H. R (2000) Ground heat transfer effects on the thermal performance of Earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol, 4, p. 213-265.

REMUND, C. P., LUND, J. T (1993) Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical GSHP systems. *Heat pump and refrigeration systems, design, analysis and applications*;29.

ROHNER E., RYBACH L., SCHÄRLI U (2005) A new, small, wireless instrument to determine ground thermal conductivity in-situ for borehole heat exchanger design. In *Proceedings World Geothermal Congress*.

ROSEN, B., GABRIELSSON, A. FALLSVIK, J., HELLSTROM, G., NILSSON, G. (2001) System for varme och kyla ur mark – En nulagesbeskrivning [Systems for ground source heating and cooling – a status report – in Swedish]. *Varia*, 511, Statens Geotekniska Institut Linköping, Sweden.

ROTTMAYER, S. P., BECKMAN, W. A., MITCHELL, J. W (1997) Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium, ASHRAE Transactions, 103(2) :651-659.

ROULEAU, J., GOSSELIN, L., RAYMOND, J. (2016). New concept of combined hydrothermal response tests (H/TRTS) for ground heat exchangers. Geothermics. Jul 1;62:103-14.

SABOYA, F., de SOUZA FERREIRA, M., MCCARTNEY, J. S., TIBANA, S. (2022). Thermal Response Testing of a Thermal Pile in a Tropical Climate Region. Geotechnical and Geological Engineering, 1-19.

SANNER, B., HELLSTRÖM G., SPITLER, J., GEHLIN S. (2005). Thermal response test– current status and world-wide application. In Proceedings world geothermal congress, vol.

1436, p. 2005. Antalya, Turkey: International Geothermal Association, 2005.

SANI, A. K., SINGH, R. M., CAVARRETTA, I., TSUHA, C. H. C., BHATTACHARYA, S. (2018). Inlet and Outlet Pipe Heat Interaction in a Contiguous Flight Auger (CFA) Pile. In:

International Symposium on Energy Geotechnics, pp. 113-122. Springer, Cham.

SANTOS, B. C. B. (2020). Avaliação termomecânica de uma estaca escavada submetida a gradientes térmicos. Dissertação de mestrado – Centro de Ciência e tecnologia da Universidade Federal Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), 103 p.

SELF, S. J., REDDY, B. V., ROSEN, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy. Jan 1;101:341-8.

SOUSA, J. D. (2018). Estudo da propriedade térmica de solo laterítico em laboratório. Relatório final de Iniciação Científica, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos. 2018, 45 p.

SINGH, R. M., SANI, A. K., AMIS, T. (2019). An overview of ground-source heat pump technology. *Managing Global Warming*, 455-485.

SIGNORELLI, S., BASSETTI, S., PAHUD, D., KOHL, T. (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36(2), 141-166.

SURYATRIYASTUTI M. E., MROUEH H., BURLON S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behavior of energy pile foundations. *Renewable and sustainable energy reviews*. Mar 24;16(2):3344-3354.

SPITLER, J. D.; JAVED, S.; RAMSTAD, R. K. (2016). Natural convection in groundwaterfilled boreholes used as ground heat exchangers. *Applied Energy*, v. 164, p. 352-365.

STAVRAKAKIS, G. M., KATSAPRAKAKIS, D. A., DAMASIOTIS, M. (2021). Basic Principles, Most Common Computational Tools, and Capabilities for Building Energy and Urban Microclimate Simulations. *Energies*, 14 (20), 6707.

SYNTEC, C. F. M. S. (2017). "Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques." *Revue Française de Géotechnique* 149-120

TEZA, G., GALGARO, A., & DE CARLI, M. (2012). Long-term performance of an irregular shaped borehole heat exchanger system: Analysis of real pattern and regular grid approximation. *Geothermics*, 43, 45-56.

THORNTON, J., MCDOWELL, T., SHONDER, J., HUGHES, P., PAHUD, D., & HELLSTRÖM, G. (1997). Residential vertical geothermal heat pump system models: calibration to data. *Ashrae Transaction*, 103(2), 660-674.

TOLOOIYAN, A.; HEMMINGWAY, P. A preliminary study of the effect of groundwater flow on the thermal front created by borehole heat exchangers. *International Journal of LowCarbon Technologies*, v. 9, n. 4, p. 284-295, 2012.

VELLA, C., BORG, S. P., MICALLEF, D. (2019). The effect of shank-space on the thermal performance of shallow u-tube ground heat exchangers, 2019.

VIEIRA, A., MARANHA, J., CHRISTODOULIDES, P., ALBERDI-PAGOLA, M., LOVERIDGE, F., F, RAMALHO, E. Characterisation of ground thermal and thermomechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 2017, 10(12), 2044.

VILELA, M. M. Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica à baixa profundidade. Tese de Doutorado, Programa inter-unidade de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004, 278 p.

WAGNER, V., BAYER, P., KÜBERT, M., & BLUM, P. (2012). Numerical sensitivity study of thermal response tests. *Renewable Energy*, 41, 245-253.

WANG, H., QI, C., DU, H., GU, J. Thermal performance of borehole heat exchanger under groundwater flow: a case study from Baoding. *Energy and Buildings*, 2009, 41(12), 13681373.

YANG, Z., JARDINE, R., GUO, W., CHOW, F. A Comprehensive Database of Tests on Axially Loaded Piles Driven in Sand. Academic Press, 2015.

YOU, S., CHENG, X., GUO, H., YAO, Z. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers. *Energy and Buildings*. 2014 Ago 1;79:23-31.

YU, Feng; YANG, Jun. Base capacity of open-ended steel pipe piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 138, n. 9, p. 1116-1128, 2011.

ZARRELLA, A., DE CARLI, M., GALGARO, A. Thermal performance of two types of energy foundation pile: helical pipe and triple U-tube. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2), 301-310.

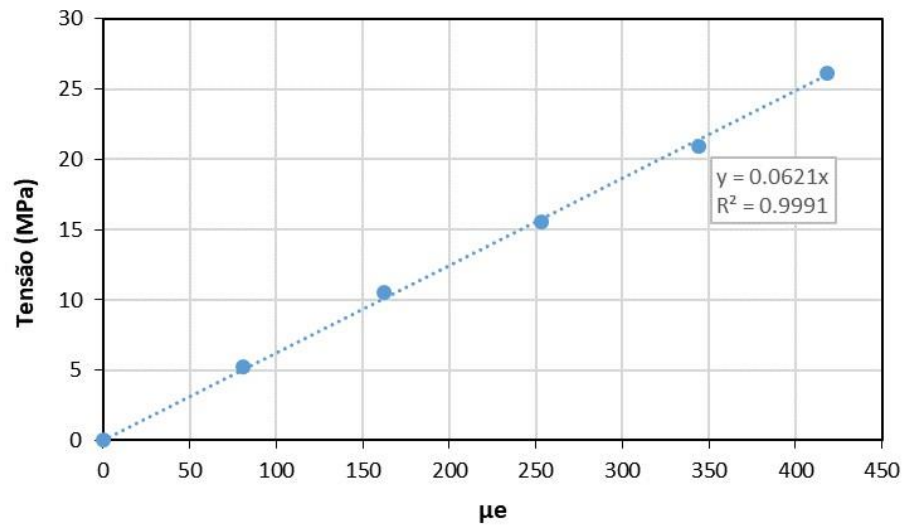
ZHANG, C., GUO, Z., LIU, Y., CONG, X., PENG, D. A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Dez 1;40:851-67.

APENDICE A
RELATÓRIO DAS SONDAGENS SPT (S1, S2 E S3)

APÊNDICE B

**MÓDULO DE ELASTICIDADE NA SEÇÃO DE
REFERÊNCIA DO ENSAIO TERMOMECÂNICO**

Módulo de elasticidade determinado para uma seção de referência no ensaio termomecânico



Fonte: Autora