

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JULIANA PESSIN

Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua
trocadoras de calor em solo arenoso saturado

São Carlos

2021

JULIANA PESSIN

Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua
trocadoras de calor em solo arenoso saturado

Versão Corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa.

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

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

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO 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 com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P475e Pessin, Juliana
Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado / Juliana Pessin; orientadora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos, 2021.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Fundações. 2. Geotermia superficial. 3. Estacas trocadoras de calor. 4. Estaca hélice contínua. 5. Areia. 6. Ensaio de resposta térmica em estacas. 7. Fluxo de água subterrânea. 8. Modelagem física. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA PESSIN**.

Título da tese: "Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado".

Data da defesa: 29/10/2021.

Comissão Julgadora

Resultado

Profa. Associada **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**
(Orientadora)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Titular **Orencio Monje Vilar**

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Associado **Alberto Hernandez Neto**

(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Saboya Albuquerque Júnior**

(Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro/UENF)

Aprovado

Prof. Dr. **Daniel Dias**

(Université Grenoble Alpes/UGA)

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**

DEDICATÓRIA

À Gi, à mamãe, ao papai e ao Vi
Aos meus educadores
Aos que estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meus caminhos e me permitir ir tão além do que poderia imaginar um dia.

À minha orientadora Cristina Tsuha, pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Pela orientação, dedicação às minhas atividades, parceria, generosidade e esforços realizados para que esta pesquisa pudesse ser concretizada. Agradeço também à sua família, que me acolheu como parte.

Aos meus pais e irmãos, que sempre estiveram presentes em minha vida mesmo que à distância.

Ao Décio Guimarães, grande amigo e incentivador.

Aos orientadores de mestrado Márcio Almeida e Fernando Saboya por terem me incentivado a realizar o doutorado.

À banca avaliadora, Alberto Hernandez Neto, Daniel Dias, Fernando Saboya e Orêncio Vilar por aceitarem examinar e contribuir com este trabalho.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da EESC, com os quais pude aprender mais sobre Geotecnia e desfrutar de momentos de descontração e acolhimento, especialmente à Valéria Guimarães, Orêncio Vilar, Rogério Ribeiro, Nelson Aoki, Edmundo Esquivel e Heraldo Giacheti.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia da EESC, Oscar, José Luiz e Benedito, pelo apoio na realização dos experimentos de laboratório. Também agradeço aos secretários Neiva, Maristela e Álvaro, pela amizade e auxílio sempre que necessário.

Ao Ricardo Formigari, bolsista de iniciação científica que auxiliou na preparação e execução dos ensaios em modelo em São Carlos e esteve ativamente trabalhando comigo durante os períodos em que a pandemia da Covid-19 nos permitiu.

Ao Clever, Samira e professor Jeferson, pelo auxílio na escolha e fornecimento dos geotêxteis utilizados nos ensaios em modelo.

A todos os ajudantes que auxiliaram na preparação e execução das estacas e dos ensaios no CICS, em especial ao Vivaldo, Francisco, Irineu, Leonardo, Leandro e Cleiton. Ao Engenheiro Caio, à coordenadora Diana Csillag e ao professor Vanderley John pelos esforços depositados no projeto CICS. Ao Ademar, pelo auxílio nos ensaios em modelo de estaca.

Aos colegas do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, Bruno Oliveira, Diego Moreira, João Manoel, Nélio Bastos, Cauê Somensi, Tayra Müller, Raul Cassaro, Lizeth Ardila,

Renato Gomes e Letícia Menezes, pela amizade e ajuda durante o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço especialmente ao Bruno, pelo grandioso auxílio na realização da prova de carga estática e do ensaio termomecânico, onde sua expertise em ensaios de prova de carga foi fundamental; ao João Manoel pelo auxílio em trabalhos experimentais e na escolha de materiais utilizados na confecção dos experimentos em diversos momentos da pesquisa, e à Milena Murari, pela troca de conhecimento e experiências ao longo do doutorado.

À empresa Tuper, pelo financiamento da execução das estacas hélice contínua assim como grande parte dos elementos necessários à realização dos ensaios no CICS.

À empresa Vértice Engenharia, pelo empréstimo das vigas e doação das barras utilizadas no sistema de reação do ensaio de prova de carga.

À empresa Stack Engenharia e Fundações Ltda e seus funcionários, que executaram as fundações hélice contínua do CICS com muito empenho.

A todos que gentilmente me acolheram em São Paulo durante a realização das atividades experimentais no CICS: Flávio e família, Cleide e Goreti, Dona Lourdes e Vera, Evelyn, Thaís e Leonardo.

Aos meus companheiros da república *Ceci n'est pas une pipe*, Patrícia, Leidiane, Tomás e Heitor, pela convivência diária, aprendizado e amizade.

Aos amigos do grupo “Sanca Badalada” que tão bem me acolheram desde a minha chegada em São Carlos. Por todos os momentos que vivemos.

Ao Romeu, pelo companheirismo, apoio, paciência e incentivo em uma das fases mais difíceis do doutorado.

À amiga Marina, pelas inúmeras conversas, palavras de apoio, desabafos e reflexões sobre a vida.

Aos amigos Dayana, Karina e Jonatas, por terem sido presentes mesmo à distância.

Os experimentos apresentados neste trabalho foram realizados nas cidades de São Carlos e São Paulo, em meio à pandemia da Covid-19. A distância geográfica e a situação sanitária do país nos anos 2020 e 2021 tornaram a execução dos ensaios nas duas cidades ainda mais desafiadora. Agradeço a todos que contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado, seja com uma ajuda física, intelectual, uma palavra de apoio ou que simplesmente torceram positivamente. Muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

PESSIN, J. **Estudo experimental do desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado**. 2021. 264 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Uma significativa parcela do consumo de energia elétrica em nosso país é utilizada para sistemas de climatização artificial em edificações. Portanto, diante da crise energética nacional e da redução de reservas naturais, o estudo de novas tecnologias de energia limpa para suprir esta demanda para climatização de ambientes é fundamental. A geotermia superficial, baseada no aproveitamento de energia térmica do subsolo, é uma solução bem sucedida em outros países para este fim, porém ainda não divulgada no Brasil. Um modo econômico de aproveitamento deste tipo de energia, já empregado no exterior, seria por meio de fundações por estacas trocadoras de calor. Neste caso, pela circulação de água em tubos de polietileno instalados dentro das fundações, com o auxílio de uma bomba de calor, é realizada a troca de calor entre o ambiente interno de edifícios e o subsolo. Diante deste cenário, esta tese apresenta um estudo experimental, focado em esclarecer aspectos relevantes para o dimensionamento destas fundações trocadoras de calor para as nossas condições de clima, temperatura de subsolo, e demanda para climatização ao longo do ano. Nesta pesquisa de doutorado foram investigados três pontos chaves para contribuir com futuros projetos de geotermia superficial por fundações trocadoras de calor no Brasil. O primeiro foi o efeito da configuração dos tubos de polietileno (instalados na estaca) na eficiência da troca de calor com o solo e na variação de temperatura da estaca, visto que quanto maior for a variação da temperatura maiores serão os efeitos no comportamento da fundação. O segundo aspecto estudado foi o comportamento termo-mecânico da fundação trocadora de calor, com foco nos efeitos causados na transferência de carga ao longo da estaca e no comportamento carga-recalque. O terceiro foi a influência do fluxo de água subterrânea na troca térmica da estaca com o subsolo. Para uso dessa tecnologia no Brasil, onde a demanda predominante é para o resfriamento de edifícios, a contínua rejeição de calor de ambientes no subsolo ao longo do tempo poderá aumentar a sua temperatura, e alterar a eficiência do sistema. Neste caso, maiores velocidades do fluxo de água subterrânea podem contribuir para dissipação de calor no solo e amenizar este problema. Para investigar estes três tópicos foram realizados experimentos em um terreno em São Paulo, com subsolo ao longo das estacas composto predominantemente por areia saturada, e ensaios em modelo físico em escala reduzida em laboratório. As principais conclusões obtidas pelos resultados descritos

e analisados neste trabalho são as seguintes: (i) a configuração dos tubos instalados na estaca afeta a eficiência na troca de calor com o subsolo; (ii) o efeito de um ciclo de carregamento térmico não prejudicou o desempenho da fundação por estaca hélice contínua avaliada neste estudo; (iii) a presença do fluxo de água subterrânea reduz o aquecimento da estaca e do solo em seu entorno durante a rejeição de calor no subsolo, além de contribuir para a recuperação da temperatura inicial do solo quando o sistema é desligado.

Palavras-chave: Fundações. Geotermia superficial. Estacas trocadoras de calor. Estaca hélice contínua. Areia. Ensaio de resposta térmica em estacas. Fluxo de água subterrânea. Modelagem física.

ABSTRACT

PESSIN, J. **Experimental study on the performance of continuous flight auger (CFA) energy piles in saturated sandy soil**. 2021. 264 p. Thesis (Doctorate) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

A significant portion of electricity consumption in our country is used for artificial air conditioning systems in buildings. Therefore, given the national energy crisis and the reduction of natural reserves, the study of new clean energy technologies to meet this demand for air conditioning is essential. Based on the use of thermal energy from the subsoil, shallow geothermal energy is a successful solution in other countries for this purpose, but it has not yet been disclosed in Brazil. An economical way to use this type of energy, already used abroad, would be through foundations using heat exchanger pipes. In this case, by circulating water in polyethylene pipes installed inside the foundations, with the aid of a heat pump, heat is exchanged between the internal environment of buildings and the underground. Given this scenario, this thesis presents an experimental study, focused on clarifying relevant aspects for the design of these heat exchanger foundations for Brazilian climate conditions, subsoil temperature, and demand for acclimatization throughout the year. In this doctoral research, three key points were investigated to contribute to the future use of shallow geothermal energy by means of heat exchanger foundations in Brazil. The first was the effect of the configuration of the polyethylene pipes (installed in the pile) on the efficiency of heat exchange with the soil and the temperature variation of the pile, since the greater the temperature variation, the greater the effects on the behavior of the foundation. The second aspect studied was the thermo-mechanical behavior of the heat exchanger foundation, focusing on the effects caused on the load transfer along with the pile and the load-settlement behavior. The third was the influence of groundwater flow on the thermal exchange between the pile and the subsoil. For the use of this technology in Brazil, where the predominant demand is for cooling buildings, the continuous rejection of heat into underground environments over time may increase its temperature and alter the system's efficiency. In this case, higher groundwater flow velocities can contribute to soil heat dissipation and alleviate this problem. To investigate these three topics, experiments were carried out in a terrain in São Paulo, with subsoil along the piles composed predominantly of saturated sand, and physical modeling tests on a small scale in the laboratory. The main conclusions obtained by the results described and analyzed in this work are the following: (i) the configuration of the tubes installed in the pile affects the efficiency of

heat exchange with the subsoil; (ii) the effect of one cycle of thermal loading did not affect the performance of the CFA pile foundation evaluated in this study; (iii) the presence of groundwater flow reduces the heating of the pile and the surrounding soil during underground heat rejection, in addition to contributing to the recovery of the initial soil temperature when the system is shut down.

Keywords: Foundations. Shallow geothermal energy. Heat exchanger piles. Continuous flight auger pile. Sand. Thermal response tests. Groundwater flow. Physical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial.....	39
Figura 2.2: Participação no consumo final de eletricidade por equipamento no setor residencial.	40
Figura 2.3: Matriz elétrica brasileira em 2017.	41
Figura 2.4: Cenário geotérmico na Europa e nos Trópicos.	43
Figura 2.5: Temperatura natural média do subsolo do campo experimental de fundações da EESC/USP em 2015.	43
Figura 2.6: Dependência da variação anual de temperatura do solo com a profundidade em Ottawa, Canadá.....	44
Figura 2.7: Sistemas GSHP: (a) circuitos abertos e (b) fechados.....	46
Figura 2.8: Funcionamento de estaca trocadora de calor durante operações de inverno e verão.	48
Figura 2.9: Armação de estaca com tubos instalados para sistema geotérmico de climatização.	49
Figura 2.10: Diferentes configurações de <i>loops</i> dos tubos trocadores de calor.	50
Figura 2.11: Esquema das deformações térmicas em uma estaca.	53
Figura 2.12: Variação da carga e recalque na cabeça da estaca para diferentes rigidezes e variações de temperatura.	54
Figura 2.13: Mecanismos de resposta da estaca submetida a carregamento termomecânico de aquecimento e resfriamento sem restrições nas extremidades: (a) carregamento mecânico; (b) resfriamento; (c) carga mecânica e resfriamento; (d) aquecimento; (e) carga mecânica e aquecimento.....	55
Figura 2.14: Programa de carregamento termomecânico em estaca.	56
Figura 2.15: Deslocamento vertical no topo da estaca nos ensaios.....	57
Figura 2.16: Diagrama para seleção de parâmetros para projetos de estacas trocadoras de calor de acordo com o potencial geotérmico do local.	58
Figura 2.17: Disposição dos tubos trocadores de calor na estaca geotérmica: (a) tubos fixados na armação e (b) instalados no centro da estaca.	60
Figura 2.18: Espaçamento mínimo entre os tubos PEAD e a armadura longitudinal das estacas geotérmicas.....	62

Figura 2.19: Limitação de altura dos tubos trocadores de calor em uma estrutura geotérmica.	62
Figura 2.20: Modos de transferência de calor de acordo com o diâmetro efetivo dos grãos e o grau de saturação.	66
Figura 2.21: Relação entre a condutividade térmica e o teor de umidade para diferentes tipos de solo.	69
Figura 2.22: Capacidade térmica volumétrica com o teor de umidade para diferentes massas específicas secas.	73
Figura 2.23: Transferência de calor na estaca geotérmica (a) componentes térmicos da estaca (b) diferenças de temperatura e resistência dos elementos.....	75
Figura 2.24: Configuração típica de um ensaio TRT.	77
Figura 2.25: Exemplo de registros de um ensaio TRT.	78
Figura 2.26: Ensaio <i>needle probe</i> : (a) sonda térmica e (b) resultado típico.....	80
Figura 2.27: Modelo puramente resistivo (fonte linear infinita) e (b) modelo resistivo-capacitivo proposto por Maragna & Loveridge (2021).	87
Figura 2.28: Ilustração das variáveis da lei de Darcy.....	89
Figura 2.29 - Efeito da velocidade de Darcy na sobre a quantidade de energia extraída pelas estacas geotérmicas.....	91
Figura 2.30: Distribuição do fluxo térmico para (a) um furo e (b) vários furos, com velocidade de fluxo de água iguais a 0 e 0,16 m/dia.	93
Figura 2.31 - Permeâmetros de (a) carga constante e (b) carga variável e respectivas equações para a determinação da condutividade hidráulica.....	94
Figura 2.32: <i>Slug e bail tests</i>	95
Figura 2.33: Configuração do poço para o método de Hvorslev.....	96
Figura 2.34: Configuração do poço para o método de Bouwer & Rice (1976).....	97
Figura 2.35: Esquema para determinar o gradiente hidráulico e a direção do fluxo.....	98
Figura 3.1: Local de implantação do edifício principal do CICS.....	101
Figura 3.2: Projeto arquitetônico 3D do CICS: Vista (a) frontal e (b) lateral.	101
Figura 3.3: Localização do CICS na Universidade de São Paulo <i>campus</i> Butantã – proximidade com a raia olímpica e o Rio Pinheiros.....	102
Figura 3.4: Funcionamento da técnica Direct push-piston sampler.	103
Figura 3.5: Perfuração e amostragem: (a) perfuração com o amostrador, (b) perfuração com o trado, (c) inserção do liner no amostrador, (d) core catcher, (e) abertura do liner após amostragem e (f) análise tátil-visual do solo.....	104

Figura 3.6: <i>Liners</i> coletados durante a amostragem para instalação dos poços PM-1, PM-2 e PM-3.	105
Figura 3.7: PM-1 com o detalhamento das camadas obtido por meio da amostragem de perfil completo.	106
Figura 3.8: Localização dos poços de monitoramento: (a) localização relativa e (b) planta de situação (sem escala).	107
Figura 3.9: Potenciometria e linhas de fluxo no entorno da Raia Olímpica para estação chuvosa e seca.....	108
Figura 3.10: <i>Slug/bail tests</i> : (a) medição do nível d'água, (b) inserção da sonda barométrica e (c) Inserção do tarugo (<i>slug</i>)......	109
Figura 3.11: Análise granulométrica das amostras de solo do PM-1.	110
Figura 3.12: Condutividade hidráulica obtida por meio de <i>slug</i> e <i>bail tests</i> e estimadas pela análise granulométrica.	111
Figura 3.13: Equipamento de estaca hélice contínua no canteiro do CICS.....	113
Figura 3.14: Localização das estacas hélice contínua trocadoras de calor do CICS, pilotos e estacas tubulares metálicas – medidas em centímetros.	114
Figura 3.15: Detalhamento da armação das estacas hélice contínua.	116
Figura 3.16: Tipos de conexões testadas para a formação dos loops dos tubos PEAD: (a) joelho de 90°, adaptador e joelho de 45°, (b) joelho a 45° (c) junção a 45°.	117
Figura 3.17: Montagem dos tubos em triplo U (em laboratório).....	117
Figura 3.18: Disposição dos tubos em configuração triplo U na armação da estaca.	118
Figura 3.19: Seção transversal da estaca geotérmica e posicionamento dos tubos PEAD em relação à armadura – dimensões em milímetros.....	118
Figura 3.20: Sensores utilizados para medir cargas térmicas e mecânicas: (a) Pt-100 e (b) barras instrumentadas com <i>strain gages</i>	119
Figura 3.21: Distribuição dos sensores nas estacas piloto e perfil estratigráfico correspondente.	121
Figura 3.22: Montagem e fixação dos tubos e conexões na estaca em triplo U: (a) aquecimento dos tubos com soprador térmico, (b) inserção das conexões, (c) conexões fixadas à armação com arame e (d) tubos presos com abraçadeiras de nylon.	123
Figura 3.23: Montagem da estaca em espiral: (a) início da confecção da espiral, (b) tubos sendo puxados para a formação da espiral, (c) conexão necessária para a configuração espiral e (d) espirais com passos de 300 e 600 mm.	124
Figura 3.24: Barra para guiar os sensores (a) barra central e (b) barras guia.....	125

Figura 3.25: Instalação dos sensores na armação: (a) soldagem das barras instrumentadas, (b) Pt-100 fixado com abraçadeiras de nylon na barra central, e (c) Pt-100 instalado na armação.	126
Figura 3.26: Sensores de temperatura na estaca piloto Triplo U, na seção a 5,5 m.	126
Figura 3.27: Preparação das armações para a execução das estacas (a) proteção dos cabos com conduítes e (b) reforço dos roletes com arame.	127
Figura 3.28: Armações com geotermia e sensores instalados antes da execução das estacas.	127
Figura 3.29: Execução das estacas hélice contínua no CICS: (a) perfuração, (b) retirada do trado com simultânea deposição de concreto, (c) içamento da armação, (d) inserção da armação no furo concretado, (e) ferramenta auxiliar para descida da armação, (f) utilização da ferramenta, (g) retirada do concreto fresco e (h) instalação das barras nas estacas de reação.	129
Figura 3.30: Projeto do bloco de coroamento da estaca Triplo U.	131
Figura 3.31: Execução do bloco de coroamento: (a) demarcação da área de escavação, (b) escavação do solo, (c) quebra da cabeça da estaca, (d) locação da fôrma, (e) deposição do concreto magro na base do bloco, (f) armação do bloco, (g) armação apoiada na fôrma, (h) passagem dos tubos PEAD e cabos pela lateral do bloco, (i) vibração do concreto, (j) vista do bloco após a concretagem, (k) vista do bloco curado e (l) reaterro.	132
Figura 3.32: Sistema de aplicação do carregamento durante a PCE: (a) vista frontal, (b) lateral e (c) dispositivos de aplicação de carga e medição dos deslocamentos	134
Figura 3.33: Esquema das vigas de reação considerando a locação <i>as built</i>	135
Figura 3.34: Aparato utilizado nos ensaios TRT: (a) sistema de circulação de água e (b) sistema de aquisição de dados acoplado ao computador utilizado no monitoramento de dados.	137
Figura 3.35: Isolamento térmico dos tubos PEAD com (a) lã de vidro, (b) espuma elastomérica e (c) fita adesiva metálica.	138
Figura 3.36: Aparato do modelo experimental.	142
Figura 3.37: Análise granulométrica das areias de Silva (2020) e Murari (2022).	144
Figura 3.38: Ensaio de permeabilidade de carga constante.	144
Figura 3.39: Resultados dos ensaios de permeabilidade.	145
Figura 3.40: Pré-dimensionamento da caixa de ensaio	146
Figura 3.41: Caixa de ensaio: (a) vista lateral, (b) grade a montante e (c) grade a jusante.	147
Figura 3.42: Sistema de entrada e saída de água da caixa: (a) entrada de água a montante, (b) boia com haste regulável e (c) saída do reservatório a jusante.	147

Figura 3.43: Areia de Analândia: (a) areia úmida, (b) secagem ao ar, (c) estufa geotécnica utilizada, e (d) areia seca armazenada em bags.	148
Figura 3.44: Análise granulométrica da areia de Silva (2020) da areia utilizada no presente estudo.	149
Figura 3.45: Preparação da estaca de modelo: (a) teste de estanqueidade dos tubos PEAD, (b) arranjo dos tubos com espaçadores e Pt-100, (c) fôrma da estaca dividida em camadas e (d) tubos presos e posicionados na fôrma.	150
Figura 3.46: Concretagem da estaca: (a) mistura do groute na betoneira, (b) densificação do groute, (c) madeira apoiada nos tubos para evitar sua flutuação e (d) amostras do groute.	151
Figura 3.47: Cura da estaca: (a) forma coberta após concretagem, (b) desmolde da estaca e (c) cura úmida.	151
Figura 3.48: Container utilizado durante a realização dos ensaios: (a) posicionamento do container no Campo Experimental e (b) caixa instalada no container.	153
Figura 3.49: Montagem do modelo para o ensaio seco: (a) instalação do geotêxtil, (b) placa de isopor no fundo da caixa, (c) estaca centrada no modelo, (d) deposição da areia em camadas, (e) compactação das camadas, (f) instalação dos sensores de temperatura no solo, (g) aquecedores de aquário no interior dos tubos PEAD, (h) lã de vidro na lateral da caixa e (i) lã de vidro na caixa.	154
Figura 3.50: Calibração de aquecedores de aquário.	155
Figura 3.51: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 0R.	156
Figura 3.52: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 0,5R.	157
Figura 3.53: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 1R.	157
Figura 3.54: Ensaio preliminar em areia seca - variação de temperatura na estaca e no solo.	158
Figura 3.55: Reforço no isolamento térmico do experimento.	158
Figura 3.56: Soluções implementadas para realização dos ensaios de fluxo: (a) Efeito de piping e escoamento superficial, (b) filtro de brita e (c) confinamento com sobrecarga.	160
Figura 3.57: Ensaio preliminar com fluxo de água – temperatura da estaca, do ambiente e do solo a 0R.	161
Figura 3.58: Isotermas de uma fonte linear em um meio infinito com advecção.	162

Figura 3.59: Ensaio preliminar com fluxo de água – variação de temperatura da estaca e do solo nas diferentes distâncias radiais.....	162
Figura 3.60: Efeito da variação da temperatura dos reservatórios no sistema na estaca e no solo nas diferentes distâncias radiais.....	164
Figura 3.61: Localização e isolamento térmico da mangueira que alimentava o reservatório a montante.	165
Figura 4.1: Taxa de troca de calor por comprimento de tubo, q_{tubo} , e por comprimento de estaca, q_{estaca}	167
Figura 4.2: Variação de temperatura: (a) ambiente, (b) média do fluido ao longo do tempo e (c) média do fluido ao longo do logaritmo do tempo.	168
Figura 4.3: Ensaio TRT: (a) diferença de temperatura entre a entrada e a saída da estaca e (b) variação da vazão ao longo do tempo.....	170
Figura 4.4: Efeito do comprimento de tubo no aumento da temperatura do fluido durante os ensaios TRT.....	172
Figura 4.5: Relação entre o aumento da temperatura do fluido e o logaritmo natural do tempo.	174
Figura 4.6: Efeito do comprimento de tubo na resistência térmica das estacas ensaiadas.	176
Figura 4.7: Temperatura do fluido e da estaca durante os ensaios TRT: (a) 3-U; (b) 1-W; (c) S300; e (d) S600.	178
Figura 4.8: Perfil de temperatura da estaca em diferentes tempos: a) 5 h; b) 15 h; c) 40 h; d) 80 h; e) 120 h; e f)190h.	180
Figura 4.9: Perfil de temperatura da estaca S300 após o término da fase de aquecimento.	181
Figura 4.10: Distribuição de temperatura na estaca 3-U na seção a 5,5 m durante o ensaio TRT.	182
Figura 4.11: Temperatura na estaca ensaiada (S300) e nas estacas vizinhas nas distâncias horizontais de 2,3 D e 2,9 D, sendo D o diâmetro da estaca, nas fases de (a) aquecimento e (b) resfriamento do ensaio TRT.	183
Figura 5.1: Curva carga <i>versus</i> recalque resultante do ensaio de prova de carga estática na estaca Triplo U.	185
Figura 5.2: Curva tensão <i>versus</i> deformação na seção de referência da estaca Triplo U.....	185
Figura 5.3: Diagrama de transferência de carga ao longo da profundidade na estaca Triplo U.	186
Figura 5.4: Diagrama de atrito lateral unitário desenvolvida ao longo da estaca, para a carga admissível (1230 kN) e carga máxima aplicada (1760 kN).	187

Figura 5.5: Carregamento e descarregamento até a carga de serviço na estaca Triplo U para realização do ensaio termomecânico.	188
Figura 5.6: Comparativo entre as curvas tensão <i>versus</i> deformação da seção de referência da estaca Triplo U durante a PCE (carregamento 1) e o carregamento mecânico (carregamento 2).	188
Figura 5.7: Temperatura de entrada e saída da estaca, ambiente e potência térmica durante a fase de aquecimento na estaca Triplo U.	189
Figura 5.8: Temperatura absoluta no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade e temperatura média do fluido trocador de calor.	190
Figura 5.9: Variação da temperatura no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade e variação da temperatura do fluido trocador de calor.	190
Figura 5.10: Cargas axiais induzidas na estaca devido ao carregamento térmico.	192
Figura 5.11: Atrito lateral unitário mobilizado na estaca devido ao carregamento térmico.	192
Figura 5.12: Ensaio de aquecimento e resfriamento da estaca durante o ensaio termomecânico.	193
Figura 5.13: Temperatura absoluta no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade durante o ensaio termomecânico.	194
Figura 5.14: Variação da temperatura no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade no ensaio termomecânico.	194
Figura 5.15: Cargas axiais na estaca durante o carregamento termomecânico.	195
Figura 5.16: Diagrama de atrito durante aquecimento e resfriamento da estaca sob carga de serviço.	196
Figura 6.1: Temperatura da estaca e do ambiente durante o ensaio <i>ED</i>	200
Figura 6.2: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R durante o ensaio <i>ED</i>	201
Figura 6.3: Variações de temperatura na estaca e no solo nas posições (a) P1, (b) P2, (c) P3 e (d) P4 durante o ensaio <i>ED</i>	202
Figura 6.4: Temperatura da estaca e do ambiente durante o ensaio <i>ES</i>	203
Figura 6.5: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio <i>ES</i>	204
Figura 6.6: Variações de temperatura na estaca e no solo nas posições (a) P1, (b) P2 e (c) P3 e (d) P4 durante o ensaio <i>ES</i>	205
Figura 6.7: Temperatura da estaca e do ambiente durante os ensaios <i>ED</i> e <i>ES</i>	206

Figura 6.8: Variações de temperatura geradas no solo e na estaca durante a fase de aquecimento em areia seca (coluna esquerda) e saturada (coluna direita).	207
Figura 6.9: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de aquecimento.....	209
Figura 6.10: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de resfriamento....	209
Figura 6.11: Temperatura da estaca, do ambiente e dos reservatórios (RM e RJ) durante o ensaio <i>EF8</i>	210
Figura 6.12: Ajuste da variação de temperatura do reservatório a montante para o ensaio <i>EF8</i>	211
Figura 6.13: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio <i>EF8</i>	212
Figura 6.14: Variações de temperatura no solo e na estaca nas posições (a) P1, (b)P2 e (c) P3 e (d) P4, durante o ensaio <i>EF8</i>	213
Figura 6.15: Advecção devido ao fluxo de água.	213
Figura 6.16: Temperatura da estaca, do ambiente e dos reservatórios durante o ensaio <i>EF15</i>	214
Figura 6.17: Ajuste da variação de temperatura do reservatório a montante no ensaio <i>EF15</i>	214
Figura 6.18: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio <i>EF15</i>	215
Figura 6.19: Variações de temperatura no solo e na estaca nas posições (a) P1, (b)P2 e (c) P3 e (d) P4, durante o ensaio <i>EF15</i>	216
Figura 6.20: Temperatura da estaca e da água do reservatório a montante durante os ensaios de fluxo <i>EF8</i> e <i>EF15</i>	217
Figura 6.21: Variação de temperatura da estaca e da água do reservatório a montante durante os ensaios de fluxo <i>EF8</i> e <i>EF15</i>	217
Figura 6.22: Variação de temperatura da estaca durante os ensaios de fluxo <i>EF8</i> e <i>EF15</i>	218
Figura 6.23: Variação de temperatura no solo nos ensaios <i>EF8</i> e <i>EF15</i>	218
Figura 6.24: Temperatura da estaca e do ambiente no ensaio <i>ES</i> e temperatura da estaca e da água do reservatório de montante no ensaio <i>EF8</i>	220
Figura 6.25: Variações de temperatura geradas no solo e na estaca durante a fase de aquecimento nos ensaios saturado (coluna esquerda) e com fluxo (coluna direita).....	220
Figura 6.26: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de aquecimento nos ensaios <i>EF8</i> e <i>ES</i>	221

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Quantidade de <i>loops</i> possíveis de utilização em estacas geotérmicas de acordo com o diâmetro.....	61
Tabela 2.2: Energia a ser extraída por meio de estruturas termoativas.	63
Tabela 2.3: Condutividade térmica dos constituintes do sistema geotérmico.	68
Tabela 2.4: Capacidade térmica e massa específica de diferentes materiais.....	71
Tabela 2.5: Capacidade térmica volumétrica de diferentes materiais.	72
Tabela 2.6: Valores de condutividade hidráulica para diferentes solos.	90
Tabela 3.1: Características dos poços de monitoramento (PM).	107
Tabela 3.2: Resultados dos ensaios Slug e bail tests.	109
Tabela 3.3: Velocidade de fluxo das camadas de solo ensaiadas em cada poço de monitoramento.....	112
Tabela 3.4: Características das estacas hélice contínua trocadoras de calor construídas.	115
Tabela 3.5: Disposição dos sensores nas estacas piloto (em realce) e nas estacas do edifício, onde “x” se refere aos sensores de temperatura e “X” às barras instrumentadas com <i>strain gages</i>	122
Tabela 3.6: Especificações da barra INCO-45D.	134
Tabela 3.7: Ensaios TRT realizados nas estacas piloto.	138
Tabela 3.8: Características granulométricas e condutividades hidráulicas das areias de Silva (2021) e Murari (2022).	145
Tabela 3.9: Características da areia utilizada.	149
Tabela 3.10: Ensaios realizados.....	152
Tabela 4.1: Características das estacas ensaiadas.....	166
Tabela 4.2: Condições dos ensaios TRT.	167
Tabela 4.3: Eficiência relativa na troca térmica.	175
Tabela 4.4: Resultados de resistência térmica.	177
Tabela 6.1: Ensaios em seção de estaca trocadora de calor.....	199

LISTA DE SIGLAS

<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>BEN</i>	Balanço Energético Nacional
<i>CICS</i>	Centro de Inovação em Construção Sustentável
<i>COP</i>	Coeficiente de Performance
<i>EESC</i>	Escola de Engenharia de São Carlos
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>GSHP</i>	Ground Source Heat Pump
<i>ICS</i>	Infinite cylinder source
<i>IEA</i>	International Energy Agency
<i>ILS</i>	Infinite line source
<i>ISCS</i>	Infinite solid cylinder source
<i>NA</i>	Nível d'água
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>PCE</i>	Prova de Carga estática
<i>PEAD</i>	Polietileno de alta densidade
<i>PM</i>	Poço de monitoramento
<i>RC</i>	Resistivo-capacitivo
<i>SMR</i>	Small modular reactor
<i>TRT</i>	Thermal Response Test
<i>USP</i>	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Difusividade térmica
β	Coefficiente de dilatação térmica da estaca
ΔT	Varição de temperatura
ΔT_g	Varição da temperatura do solo
ΔT_f	Varição da temperatura do fluido
ε_l	Deformação térmica livre
ε_g	Deformação térmica restringida
η	Porosidade
λ	Condutividade térmica
λ_e	Condutividade térmica efetiva
λ_f	Condutividade térmica do fluido
λ_s	Condutividade térmica dos sólidos
ρ	Massa específica
ρ_a	Massa específica do ar
ρ_c	Massa específica do concreto
ρ_f	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica dos grãos do solo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (radiação térmica)
σ_v	Tensão vertical
A	Área
b	Intercepto linear
c	Capacidade térmica específica
c_a	Capacidade térmica específica do ar
c_f	Capacidade térmica específica do fluido
c_p	Capacidade térmica específica global
c_s	Capacidade térmica específica do solo
C_v	Capacidade térmica volumétrica
D	Diâmetro
E_p	Módulo de elasticidade longitudinal da estaca

Fo	Número de Fourier
H	Profundidade alcançada pelo tubo trocador de calor
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção
k	Coeficiente angular
L	Comprimento
\dot{m}	Vazão em massa
m	Massa
n	Grau de liberdade da estrutura
q_c	Fluxo térmico por condução
q_l	Taxa de troca de calor por metro
q_r	Fluxo de calor por radiação
q_v	Fluxo térmico por convecção
Q_c	Taxa de transferência de calor por condução
Q_v	Taxa de transferência de calor por convecção
Q_r	Taxa de transferência de calor por radiação
r_b	Raio do furo
R_b	Resistência térmica do furo
R_T	Resistência térmica
$R_{T,c}$	Resistência térmica por condução
$R_{T,v}$	Resistência térmica por convecção
$R_{T,r}$	Resistência térmica por radiação
S	Grau de saturação
t	tempo
t_{\min}	Tempo mínimo
T	Temperatura
T_f	Temperatura do fluido
T_{in}	Temperatura de entrada
T_{out}	Temperatura de saída
T_{∞}	Temperatura da superfície (convecção)

V	Vazão
v	Velocidade de Darcy
x_s	Volume específico do solo
x_f	Volume específico do fluido
x_a	Volume específico do ar

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO.....	36
2 REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	39
2.1 Condicionamento ambiental no Brasil	39
2.2 Sistemas de climatização geotérmicos	42
2.3 Estacas trocadoras de calor.....	47
2.3.1 Características gerais	47
2.3.2 Comportamento termomecânico.....	52
2.3.3 Projeto de estacas trocadoras de calor – recomendações e aspectos construtivos...	57
2.4 Mecanismos de transferência de calor.....	63
2.4.1 Condução	64
2.4.2 Convecção	64
2.4.3 Radiação	66
2.5 Parâmetros térmicos do sistema	67
2.5.1 Condutividade térmica.....	67
2.5.2 Capacidade térmica específica.....	70
2.5.3 Difusividade térmica.....	73
2.5.4 Resistência térmica	74
2.6 Resposta térmica do solo	76
2.6.1 Ensaio de resposta térmica (TRT)	76
2.6.2 Ensaios de laboratório	80
2.6.3 Modelos de interpretação dos ensaios térmicos	81
2.7 Fluxo de água subterrânea	88

2.7.1 Efeito do fluxo de água subterrânea no comportamento térmico de estacas geotérmicas.....	90
2.8 Ensaaios hidráulicos.....	93
2.8.1 Ensaaios de permeabilidade em laboratório.....	94
2.8.2 <i>Slug e Bail tests</i>	95
2.8.3 Correlações.....	98
2.8.4 Gradiente hidráulico e direção do fluxo de água subterrânea.....	98
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	100
3.1 Edifício CICS.....	100
3.2 Investigações experimentais das condições geológicas e hidráulicas do subsolo do CICS.....	102
3.2.1 Amostragem.....	103
3.2.2 Poços de monitoramento.....	106
3.2.3 <i>Slug e bail tests</i>	108
3.2.4 Análise granulométrica.....	110
3.2.5 Velocidade de fluxo e resumo dos dados.....	111
3.3 Estacas trocadoras de calor do CICS.....	112
3.3.1 Projeto geotécnico e estrutural.....	112
3.3.2 Projeto de estacas para geotermia superficial.....	116
3.3.3 Instrumentação.....	118
3.3.4 Instalação dos tubos PEAD e sensores nas estacas.....	122
3.3.5 Execução das estacas.....	128
3.4 Ensaaios nas estacas trocadoras de calor.....	130
3.4.1 Prova de carga estática.....	130
3.4.2 Ensaaios de resposta térmica (TRTs).....	136
3.4.3 Ensaio termomecânico.....	141
3.5 Ensaaios em seção de estaca trocadora de calor.....	141
3.5.1 Concepção do modelo.....	143

3.5.2	Caracterização da areia	148
3.5.3	Execução da estaca	149
3.5.4	Programa de ensaios	151
3.5.5	Montagem dos ensaios	152
3.5.6	Ensaio em areia seca	155
3.5.7	Ensaio em areia saturada.....	159
3.5.8	Ensaio com fluxo de água	159
4	EFEITO DA CONFIGURAÇÃO DOS TUBOS TROCADORES DE CALOR NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS ESTACAS	166
4.1	Resultados gerais	166
4.2	Temperatura do fluido	170
4.3	Eficiência na troca térmica	172
4.4	Resistência térmica.....	176
4.5	Temperatura da estaca	177
4.6	Interação térmica com estacas vizinhas.....	182
5	COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DA ESTACA EM TRIPLO U	184
5.1	Prova de carga estática - PCE.....	184
5.1.1	Curva carga <i>versus</i> recalque	184
5.1.2	Diagrama de mobilização da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade	185
5.2	Ensaio de carregamento térmico.....	188
5.3	Ensaio de carregamento termomecânico	193
6	ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO DE ESTACA TROCADORA DE CALOR ...	199
6.1	Ensaio em areia seca – <i>ED</i>	200
6.2	Ensaio em areia saturada – <i>ES</i>	203
6.3	Comparação entre os ensaios em areia seca e saturada – <i>ED</i> e <i>ES</i>	205
6.4	Ensaio com fluxo – <i>EF8</i> ($v = 0,8$ m/dia).....	210
6.5	Ensaio com fluxo – <i>EF15</i> ($v = 1,5$ m/dia).....	213

6.6	Comparação entre os ensaios com fluxo – <i>EF8</i> e <i>EF15</i>	216
6.7	Comparação entre os ensaios saturado e com fluxo – <i>ES</i> e <i>EF8</i>	219
7	CONCLUSÕES.....	222
7.1	Ensaio TRT realizados nas estacas piloto.....	222
7.2	Ensaio de carregamento termomecânico.....	222
7.3	Ensaio em modelo de seção de estaca trocadora de calor.....	223
7.4	Sugestões para pesquisas futuras.....	223
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	225
	APÊNDICE A - Procedimento utilizado para a instrumentação de segmentos de barra de aço CA-50 de 1/2”.....	238
	APÊNDICE B - Ensaio de troca térmica (TRTs): <i>S300 preliminar</i> e <i>S450</i>	246
	APÊNDICE C - Ensaio em modelo de estaca trocadora de calor.....	248
	ANEXO A - Detalhamento dos poços de monitoramento.....	255
	ANEXO B - Relatório de execução das estacas emitido pela Stack.....	260

1 INTRODUÇÃO

O aumento dos gastos com climatização no Brasil e a forte dependência da matriz elétrica brasileira da energia hidráulica, que apesar de ser categorizada como renovável, gera impactos ambientais importantes, estimulam a exploração de novas fontes sustentáveis para a geração de energia. Neste contexto, a energia geotérmica superficial se apresenta como uma alternativa a ser explorada em solos brasileiros, pois além do caráter sustentável, pode proporcionar economia de energia elétrica.

A temperatura média do solo a partir de certa profundidade é geralmente inferior à temperatura ambiente no verão, e superior no inverno. Com base neste fato, a utilização da energia geotérmica superficial para climatização de edifícios, tem sido um procedimento bem-sucedido e eficiente em diversos países. O uso de sistemas geotérmicos acoplados às fundações de obras civis, conhecidos como “estacas trocadoras de calor”, “estacas geotérmicas” ou “estacas de energia”, consiste em uma alternativa inovadora que reduz significativamente os custos operacionais de um edifício.

Durante a execução das fundações por estacas trocadoras de calor, são instalados tubos de polietileno em sua armação, que permitem a transferência de calor do ambiente para o solo e vice-versa, por meio de um fluido, geralmente a água, que circula em circuito fechado com o auxílio de uma bomba de calor geotérmica. Este sistema pode ser usado tanto para aquecer como para resfriar o ambiente, de acordo com a época do ano. Durante o inverno, esse sistema instalado nas fundações retira o calor do solo e envia para o ambiente, e durante o verão, o sistema deposita no solo o calor extraído do ambiente. Além disso, o funcionamento deste sistema se deve ao fato de a temperatura do subsolo ser constante durante todo o ano a partir de certa profundidade.

Os principais aspectos a serem verificados na fase de operação destas fundações são: a evolução das temperaturas na estaca e no solo em seu entorno, deformações e tensões que se desenvolvem na estrutura da fundação devido ao carregamento térmico e alteram a transferência de carga ao longo da estaca, recalque das fundações devido aos ciclos de carregamento térmico, e o efeito do fluxo de água subterrânea na capacidade de troca de calor da estaca com o solo (no caso de sistemas não equilibrados, utilizados principalmente para o resfriamento de ambientes, o fluxo de água subterrânea pode ser fundamental para a recuperação da temperatura inicial do solo).

A presença de fluxo de água subterrânea contribui para a dissipação do calor rejeitado

pelas estacas no solo. O efeito do fluxo se torna mais importante em sistemas de estacas trocadoras de calor que trabalham sob um modo de operação, seja para aquecimento ou resfriamento de ambientes, à medida que somente a retirada ou deposição de calor no solo podem tornar o sistema ineficiente, a depender do grau de estresse térmico gerado. Neste contexto, a caracterização hidrogeológica do subsolo, que fornece a estratigrafia do terreno, assim como a velocidade do fluxo de água subterrânea, se torna fundamental.

Este projeto de doutorado centrou-se na implementação pioneira de estacas trocadoras de calor em um edifício no Brasil, mais especificamente no Centro de Inovação em Construção Sustentável (CICS). O CICS objetiva testar diferentes soluções inovadoras de baixo impacto ambiental e está sendo construído na Universidade de São Paulo, no *campus* Butantã, onde é estimado que a demanda por resfriamento de ambientes seja dominante. Assim, a investigação do regime de fluxo de água subterrânea assume caráter essencial, de modo a possibilitar a análise do potencial geotérmico do local visto a utilização de apenas um modo de operação.

O objetivo principal desta pesquisa de doutorado foi avaliar a eficiência na troca térmica de estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua, instaladas no CICS, construídas com diferentes configurações de tubos trocadores de calor. Também foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o regime de fluxo de água subterrânea da região do CICS por meio de uma caracterização hidrogeológica, bem como verificar a existência de camadas de solo com potencial de afetar a dissipação de calor no conjunto solo-estacas trocadoras de calor;

- Avaliar a eficiência na troca térmica de estacas com diferentes configurações de *loops* de tubos trocadores de calor por meio da realização de ensaios TRT em cinco estacas piloto;

- Verificar o comportamento termomecânico das estacas por meio da realização de carregamento mecânico estático em uma estaca piloto instrumentada, submetida a um ciclo de carregamento térmico (considerando-se que na vida útil deste tipo de sistema as fundações são submetidas a diversos ciclos térmicos).

- Avaliar a influência da saturação e velocidade do fluxo de água subterrânea do solo no comportamento térmico do sistema solo-estaca trocadora de calor por meio da análise de resultados obtidos em ensaios em modelo físico.

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, sendo:

1. Introdução: no primeiro capítulo contextualiza-se o tema da pesquisa, apresenta-se os objetivos alcançados e a estrutura deste trabalho.

2. Revisão bibliográfica: no segundo capítulo apresenta-se os aspectos relevantes de trabalhos publicados na literatura envolvendo os temas estudados nesta tese.

3. Materiais e métodos: o terceiro capítulo apresenta os procedimentos adotados na realização dos experimentos, assim como resultados preliminares alcançados.

4. Efeito da configuração dos *loops* no desempenho térmico de estacas trocadoras de calor: no quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados de ensaios TRT realizados em cinco estacas piloto que foram construídas utilizando diferentes configurações de tubos trocadores de calor.

5. Comportamento termomecânico de estaca trocadora de calor: no quinto capítulo avalia-se o comportamento termomecânico da estaca piloto em Triplo U, de configuração idêntica às estacas do edifício principal do CICS.

6. Ensaio em modelo reduzido de estaca trocadora de calor: no sexto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos experimentos realizados em seção de estaca trocadora de calor inserida em areia seca, saturada e sob diferentes velocidades de fluxo de água.

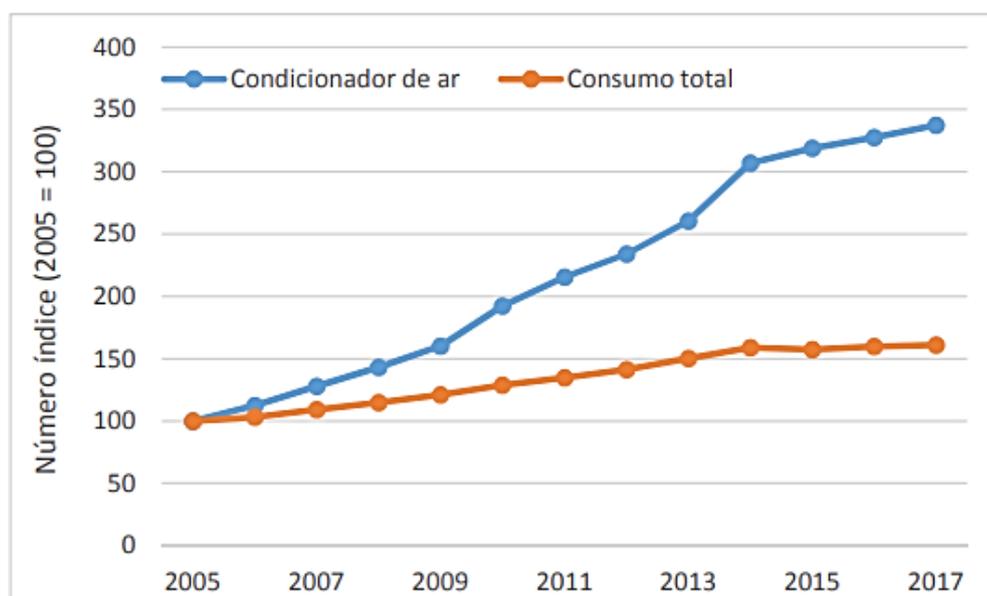
7. Conclusões: no sétimo e último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho.

2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 Condicionamento ambiental no Brasil

As edificações são responsáveis por aproximadamente 50% da energia elétrica consumida anualmente no Brasil (o setor residencial consumiu 25,6%, o setor comercial 17,2% e o setor público 8,3%) (BEN, 2019). O uso de ar-condicionado em edifícios comerciais brasileiros representa de 30% a 40% do consumo total de energia (OLIVEIRA *et al.*, 2021). De acordo com a EPE (2018), entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica do setor residencial cresceu 61%, passando de 83 TWh à 134 TWh, aumento significativo provocado pelo aumento do uso de aparelhos de ar-condicionado, como demonstra a Figura 2.1. Estima-se que o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar no setor residencial tenha aumentado cerca de 237% nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017. A estimativa da EPE (2018) também implica que o consumo de energia elétrica para condicionamento de ar nas residências brasileiras mais que triplicou de 2005 a 2017.

Figura 2.1: Crescimento do consumo de eletricidade total e para condicionamento de ar no setor residencial.



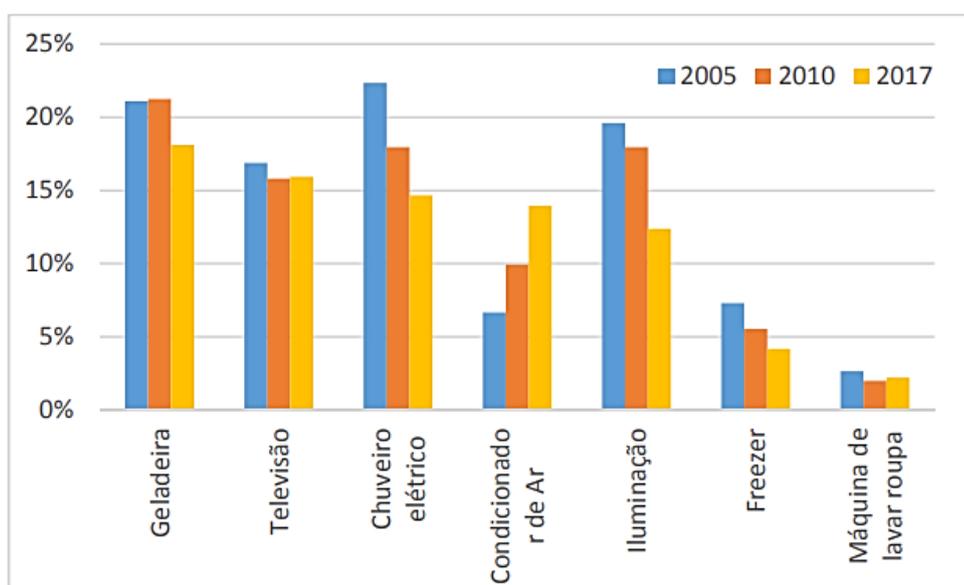
Fonte: EPE (2018).

O Brasil é o quinto maior comprador mundial de condicionadores de ar (PEREIRA *et al.*, 2013). Desde 2005, esses equipamentos têm ganhado participação relevante no consumo

total de eletricidade no setor residencial, ocupando em 2017 a quarta posição no ranking de equipamentos que mais consomem eletricidade nas residências, passando de 7% em 2005 para 14% em 2017, como mostrado na Figura 2.2 (EPE, 2018).

A nível mundial, o uso de ar-condicionado e ventiladores representa aproximadamente 20% do consumo de energia elétrica utilizada em edificações ou 10% de todo o consumo de eletricidade global. Entretanto, com o aumento da renda e do padrão de vida em países em desenvolvimento, espera-se que ocorra um aumento da demanda no uso de ar condicionado em regiões mais quentes e que o uso de ar condicionado seja a segunda maior fonte de crescimento da demanda global de eletricidade após o setor industrial até 2050 (IEA, 2018).

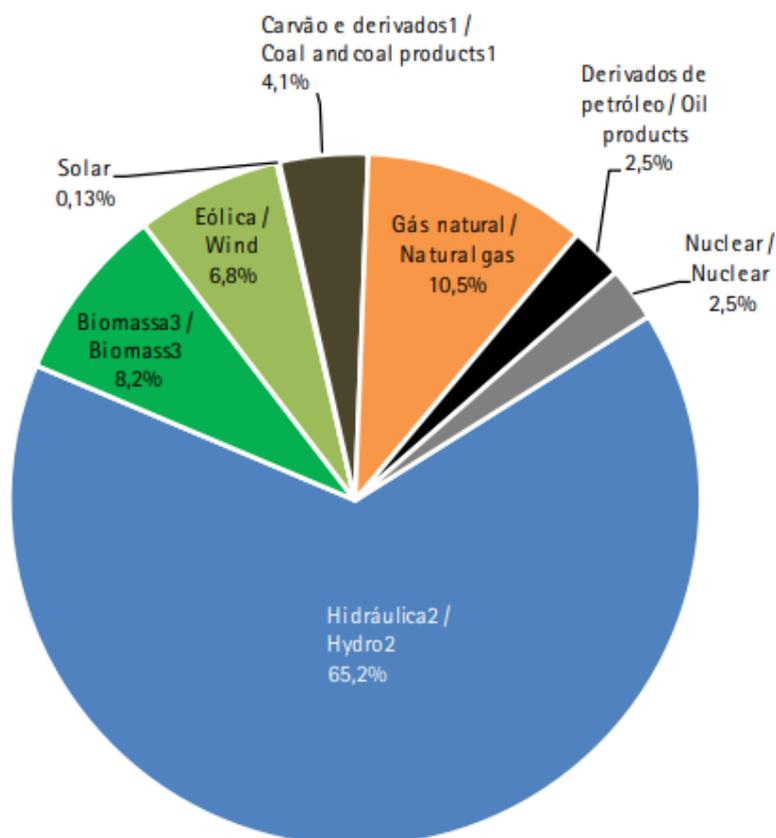
Figura 2.2: Participação no consumo final de eletricidade por equipamento no setor residencial.



Fonte: EPE (2018).

O conjunto de fontes disponíveis para a geração de energia elétrica, ou a matriz elétrica brasileira, é fortemente renovável, pois grande parte da energia elétrica gerada no Brasil provém de usinas hidrelétricas. Em 2017 essa fonte de energia representou 65,2% das fontes de energia elétrica (Figura 2.3). A energia hidráulica sempre foi dominante, uma vez que o Brasil é um dos países mais ricos do mundo em recursos hídricos (GOLDEMBERG & LUCON, 2007). Apesar do caráter renovável, a matriz elétrica brasileira poderia ser mais bem diversificada pela inclusão de novas tecnologias a fim de diminuir a dependência do país da energia hidráulica. Além disso, os impactos ambientais provocados pela instalação das usinas hidrelétricas estimulam a utilização de fontes renováveis menos agressivas ao meio ambiente.

Figura 2.3: Matriz elétrica brasileira em 2017.



Fonte: BEN (2018).

Dos dados apresentados, nota-se que o condicionamento ambiental representa importante contribuição no gasto de energia elétrica do país e a predominância da energia hidráulica na matriz elétrica brasileira estimula a adoção de fontes alternativas mais amigáveis ambientalmente.

O aumento da demanda por resfriamento artificial e os impactos das mudanças climáticas na operação das usinas hidrelétricas brasileiras, que conforme detalhado por Michels-Brito *et al.* (2021) podem levar a um aumento nas emissões de gases de efeito estufa e no preço da energia, indicam a necessidade urgente de exploração de novas fontes de energia limpa neste país. Para mitigar esses problemas, o uso de energia geotérmica superficial (encontrada em profundidades inferiores a 400 m) por sistemas de bombas de calor geotérmicas é uma solução alternativa sustentável capaz de reduzir as demandas de energia elétrica para climatização e também para abastecimento de água quente no Brasil.

A energia geotérmica foi citada no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), que reúne estudos e diretrizes para o desenho de uma estratégia de longo prazo para o setor energético brasileiro, como uma das tecnologias potencialmente disruptivas, definidas como

aquelas capazes de alterar significativamente o mercado de energia, mas para o qual tem-se poucos elementos para antever sua inserção na matriz energética e os desdobramentos decorrentes. Além desta, o Plano também inclui hidrogênio, etanol lignocelulósico, biorrefinaria, energia dos oceanos, *small modular reactor* (SMR), fusão nuclear, navio plataforma e transmissão sem fio (PNE 2050, 2020).

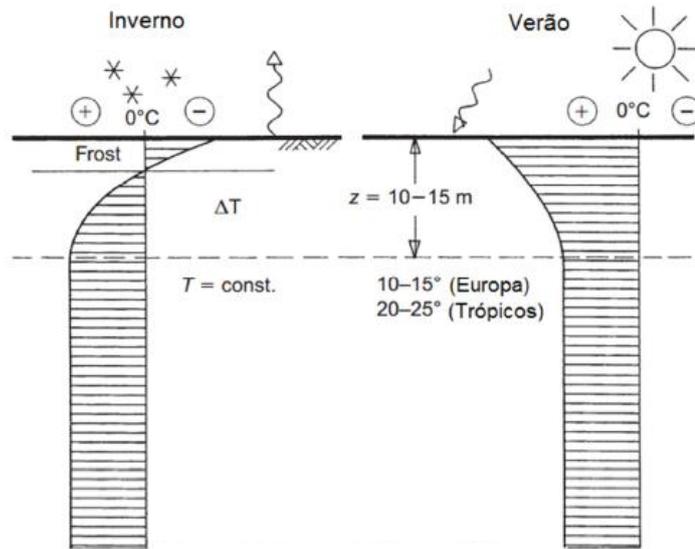
De acordo com o Decreto n° 99.280, de 6 de junho de 1990, o Brasil se tornou signatário do Protocolo de Montreal, um tratado realizado com o objetivo de reduzir a produção e o consumo de substâncias que danificassem a camada de ozônio. Com isso, algumas substâncias utilizadas nos setores de refrigeração no País têm tido seu consumo tanto proibido como reduzido, caso dos Clorofluorcarbonos e Hidroclorofluorcarbonos, respectivamente. Deste modo, a adoção de soluções ambientalmente amigáveis como alternativa aos sistemas de climatização tradicionais se torna altamente desejável.

Segundo Loveridge & Powrie (2012), o aumento dos preços da energia e o estímulo governamental estão levando a um aumento no uso de sistemas de energia geotérmica superficial para contribuir com os requisitos de aquecimento e resfriamento de novos edifícios. Neste cenário, o resfriamento da água para utilização em sistemas de climatização de ar por meio da circulação em fundações instaladas no solo pode ser uma solução para a economia de energia elétrica consumida com climatização no Brasil.

2.2 Sistemas de climatização geotérmicos

Em pequenas profundidades, a temperatura do solo sofre influência direta do clima regional, da temperatura média anual do ar, da temperatura do ar na superfície, do tipo de solo, da umidade e cobertura vegetal, da profundidade e da inércia térmica, além da variação característica das estações do ano. Esta fina camada da crosta terrestre é um coletor solar de grande capacidade, que armazena o calor que atinge a superfície nos dias de verão e perde durante a noite e nos meses frios (VILELA, 2004). De acordo com Brandl (2006), a partir da profundidade de 10 a 15 metros a temperatura permanece praticamente constante durante o ano com valores superiores a 20°C para as regiões tropicais (Figura 2.4).

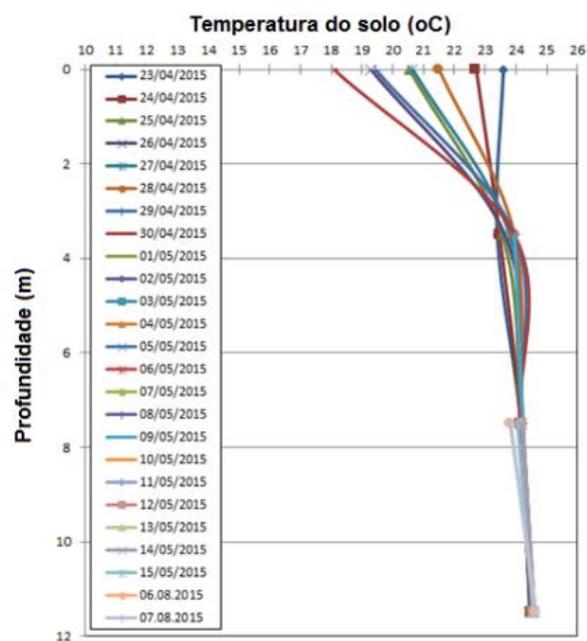
Figura 2.4: Cenário geotérmico na Europa e nos Trópicos.



Fonte: Adaptado de Brandl (2006).

Apesar da escassez de dados de monitoramento de temperatura do subsolo no Brasil, Bandeira Neto (2015) obteve em 2015, para a cidade de São Carlos – SP, temperaturas de subsolo aproximadamente constantes a partir da profundidade de 3,5 m com temperatura média próxima à 24°C, como apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Temperatura natural média do subsolo do campo experimental de fundações da EESC/USP em 2015.

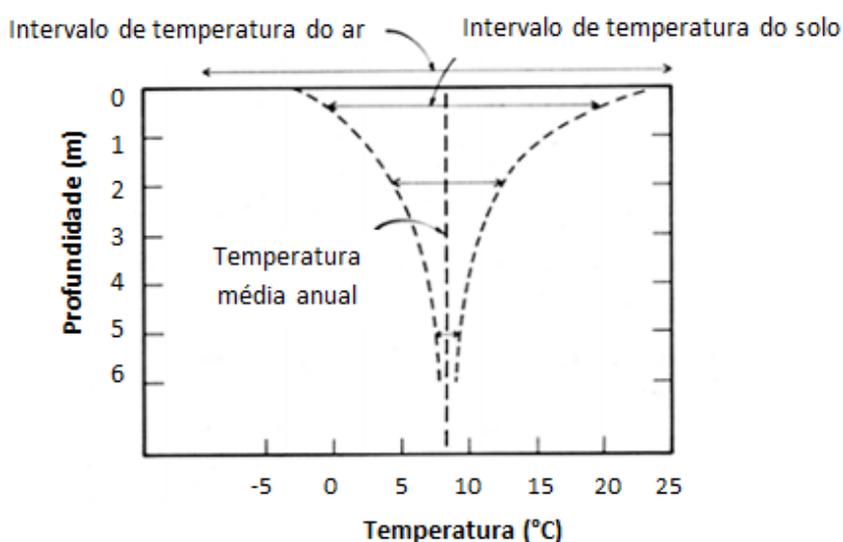


Fonte: Bandeira Neto (2015).

Willians & Gold (1976) apresentaram a amplitude de variação anual da temperatura do solo e do ar na cidade de Ottawa, no Canadá. É possível notar que a amplitude de variação de temperatura do ar é próxima à amplitude de variação de temperatura do solo na superfície e a partir de aproximadamente 5 metros de profundidade a temperatura do solo é aproximadamente constante, e, de maneira importante, próxima à temperatura média anual local.

As temperaturas do subsolo consideradas constantes a partir de certa profundidade obtidas por Bandeira Neto (2015) e Willians & Gold (1976) corroboram com a tendência apresentada em Brandl (2006).

Figura 2.6: Dependência da variação anual de temperatura do solo com a profundidade em Ottawa, Canadá.



Fonte: Adaptado de Willians & Gold (1976).

A energia geotérmica pode ter diversos usos e a ASHRAE (2011) os categoriza de acordo com o nível de temperatura, onde para temperaturas:

- a) Altas (maiores que 150°C), é utilizada principalmente para geração de eletricidade;
- b) Intermediárias a baixas (abaixo de 150°C), é utilizada em aplicações de uso direto;
- c) Geralmente abaixo de 32°C, é utilizada em sistemas de climatização por bombas de calor.

A energia geotérmica superficial ou de baixa entalpia é uma fonte de energia renovável e pode ser utilizada em sistemas de climatização de ambientes através de bombas de calor, conhecidos como *ground source heat pumps* (GSHPs), termo traduzido como bombas de calor acopladas ao solo ou bombas de calor geotérmicas. A sigla GSHP pode ainda ser aplicada a sistemas que utilizam o solo, a água subterrânea ou água de superfície como fonte ou dissipador

de calor (ASHRAE, 2011). Nos sistemas que utilizam o solo, a baixas profundidades onde a temperatura é constante realiza-se depósito ou extração de calor, fazendo uso da estabilidade térmica do meio para a realização de troca térmica.

Os sistemas GSHP são constituídos essencialmente por três elementos:

- Um circuito primário, responsável pela extração ou rejeição de calor por meio de tubos trocadores de calor que ficam em contato direto com o solo/água. Este circuito pode ser aberto ou fechado e se localizam em valas ou poços situados no terreno;

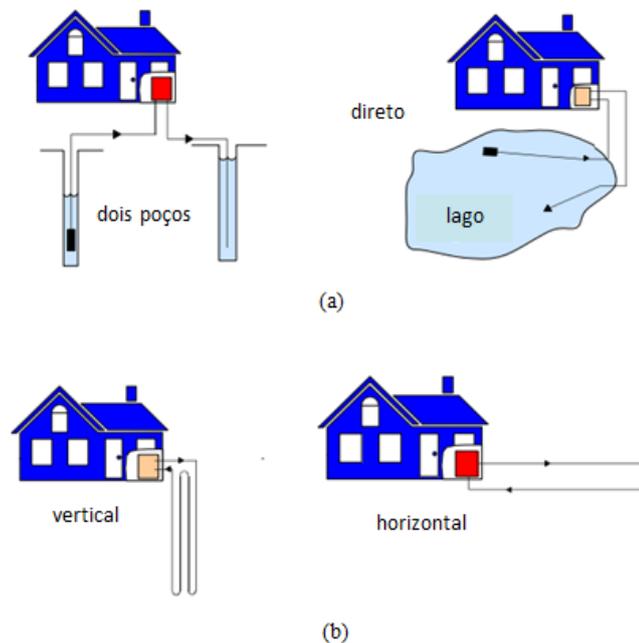
- Um circuito secundário, onde o calor é retirado ou depositado, de modo a resfriar ou aquecer o ambiente. Este circuito é geralmente composto por pisos ou tetos radiantes, radiadores ou ventilo-convectores (*fan coils*) (LOPES, 2014);

- Uma bomba de calor que une os dois circuitos, de modo a possibilitar o condicionamento do ambiente.

Além de possuir estabilidade térmica, durante o inverno, a temperatura do subsolo é maior do que a da atmosfera próxima à superfície, portanto, o sistema captura o calor do subsolo através do circuito primário. O fluido que transporta calor é bombeado para o sistema secundário, acoplado ao edifício, e por sua vez transmite esse calor para o edifício, de modo a aumentar a sua temperatura e retorna para o subsolo para repetição do processo. O princípio de funcionamento durante o verão é inverso: o calor da atmosfera é capturado do edifício e depositado no subsolo. Este modo de operação é chamado de sazonal, pois tem suas funções alteradas de acordo com as estações do ano, para proporcionar conforto térmico contínuo.

O circuito primário pode ser classificado como aberto (*open loop*) ou fechado (*closed loop*). Nos circuitos abertos ocorre troca de matéria entre o fluido que circula nos tubos e corpos d'água, havendo utilização direta da água superficial ou subterrânea, devendo haver uma fonte de extração de água e um sistema de despejo. Por outro lado, nos circuitos fechados não ocorre troca de matéria, e um fluido, em geral água, circula no interior de tubos em sistema fechado. Estes tubos atuam como trocadores de calor e transferem energia térmica de ou para o meio em que estão inseridos (VILELA, 2004). A Figura 2.7 mostra alguns exemplos de sistemas abertos e fechados, onde os tubos trocadores de calor podem estar dispostos horizontalmente ou verticalmente.

Figura 2.7: Sistemas GSHP: (a) circuitos abertos e (b) fechados.



Fonte: Adaptado de Geo-Heat Center (2001).

A bomba de calor trabalha como uma bomba de energia térmica; através da compressão e expansão de um fluido circulante em uma tubulação que passa por um compressor e por uma válvula de expansão, faz-se possível o resfriamento ou aquecimento de um ambiente. Já que no sistema geotérmico a temperatura do líquido que vem do subsolo é muito mais estável em comparação a outros sistemas de refrigeração (como o ar-condicionado, em que a climatização é baseada a partir do ar externo ao edifício, expondo o sistema a variações térmicas da atmosfera), a economia de energia elétrica aplicada ao sistema condicionante para que o ambiente atinja a temperatura desejada é significativa. Certa parcela de energia elétrica é necessária para acionar o compressor do sistema GSHP; no entanto, a produção de energia é da ordem de quatro vezes este valor (LUND *et al.*, 2004). Para determinar a eficiência das bombas de calor, pode-se determinar o coeficiente de performance (COP) de acordo com a Equação 1:

$$\text{COP} = \frac{\text{Energia total produzida (kW)}}{\text{Energia elétrica necessária à operação (kW)}} \quad (1)$$

A título de exemplo, um COP igual a 5 significa que utilizando uma porção de energia elétrica e quatro porções de energia do solo, cinco porções de energia utilizável são produzidas. A eficiência de uma bomba de calor é fortemente influenciada pela diferença entre a

temperatura extraída e a utilizada, onde variações significativas de temperatura reduzem sua eficiência. Brandl (2006) recomenda a utilização de bombas com COPs maiores ou iguais a 4.

A eficiência das bombas de calor que tem como fonte de calor o solo é muito maior que as bombas que tem como fonte o ar, visto que a temperatura do solo é maior que a média do ar no inverno, quando se almeja o aquecimento, e menor no verão, quando o resfriamento é necessário (ZENG *et al.*, 2002).

O uso de bombas de calor geotérmicas aumentou 10% em cerca de 30 países nos últimos 10 anos. A principal vantagem do GSHP é que esse sistema utiliza a temperatura disponível do solo (entre 5 e 32 ° C), que é uma fonte que pode ser obtida em qualquer lugar do mundo. A maior parte deste crescimento ocorreu na Europa e nos Estados Unidos, no entanto este sistema tem sido desenvolvido em outros países como o Japão e Turquia (LUND *et al.*, 2004).

Uma alternativa para a utilização do sistema geotérmico de climatização é inserir os tubos trocadores de calor do sistema primário em elementos enterrados que serão obrigatoriamente construídos em obras e que estão em contato com o solo, como fundações por estacas, paredes diafragma, túneis e *radiers*. Dessa forma, são poupados recursos que seriam despendidos com a escavação e materiais de preenchimento para a inserção dos tubos, assim como a área necessária à instalação.

2.3 Estacas trocadoras de calor

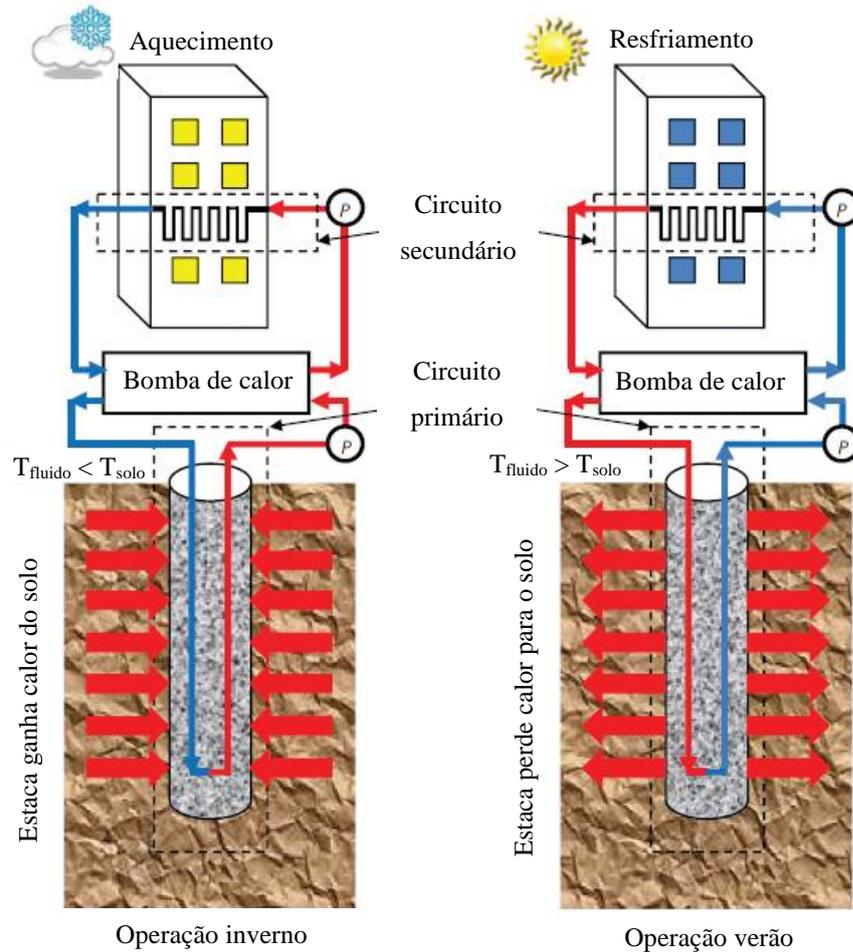
2.3.1 Características gerais

No início dos anos 1980, na Áustria e Suíça, a energia geotérmica começou a ser obtida através de elementos de fundações, primeiramente na forma de *radiers*, por estacas em 1984 e paredes diafragma em 1996 (BRANDL, 2006). Neste contexto surgiram as estruturas termoativas, definidas como elementos estruturais em contato com o solo, equipados com tubos trocadores de calor logo que são construídos. Enquanto no circuito primário dos sistemas de climatização geotérmicos tradicionais a troca térmica ocorre diretamente através do solo ou corpos d'água, nos sistemas que utilizam estruturas termoativas a troca térmica se dá entre essas estruturas e o solo circundante.

Apresenta-se na Figura 2.8 um sistema de climatização por fundações em estacas, nos modos de operação de inverno e verão. No inverno, a temperatura do solo é maior que a temperatura ambiente e o circuito primário retira calor do solo para transferir à edificação (circuito secundário) através da bomba de calor. No verão ocorre o inverso, onde a temperatura

do solo, inferior à do ambiente, atua como zona de depósito de calor do ambiente, processo que também ocorre através da bomba de calor.

Figura 2.8: Funcionamento de estaca trocadora de calor durante operações de inverno e verão.



Fonte: Adaptado de Abuel-Naga *et al.* (2014).

As estacas trocadoras de calor são eficazes em termos de custos, uma vez que combinam capacidade de suportar as cargas de edifícios e de atuar como trocador de calor em sistemas de bomba de calor geotérmica. Além disso, incorporar um sistema de tubos trocadores de calor nos elementos das fundações é extremamente vantajoso visto que o concreto tem boa condutividade e capacidade de armazenamento térmico (BRANDL, 2006). Comparado aos sistemas de climatização geotérmica tradicionais com perfurações profundas no terreno para a realização da troca térmica, os sistemas de climatização por estacas apresentam um menor custo de instalação, uma vez que as perfurações para a execução das fundações por estacas já fazem

parte do projeto de um edifício. Como o sistema funciona dentro das estacas, os tubos são acoplados geralmente na armação, como apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9: Armação de estaca com tubos instalados para sistema geotérmico de climatização.



Fonte: Brandl (2006).

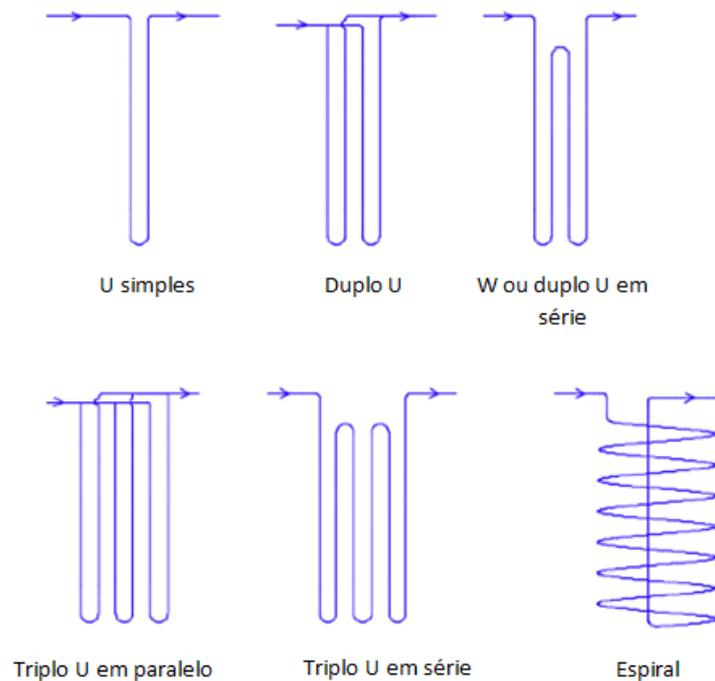
No interior da estaca os tubos trocadores de calor podem estar dispostos em várias configurações, como U simples, duplo U, W, triplo U e espiral (Figura 2.10). Alguns autores compararam a eficiência da transferência de calor para diferentes configurações (CAROTENUTO *et al.*, 2017; MEHRIZI *et al.*, 2016 e ZARRELLA *et al.*, 2013). Carotenuto *et al.* (2017) compararam a eficiência de quatro configurações: U, duplo U, triplo U e espiral com diferentes tamanhos de passos. Os resultados indicaram que a configuração em espiral assegura um desempenho de transferência de calor comparável ao duplo U. Além disso, o aumento do tamanho de passo para a configuração espiral de 0,25 para 0,70 m proporcionou melhora da troca térmica; por outro lado, o uso de um passo inferior a 0,25 m deve ser evitado devido ao excesso de quedas de pressão e uma melhora na transferência de calor menos pronunciada.

Zarrella *et al.* (2013) compararam as configurações em espiral e triplo U, encontrando melhor desempenho térmico para a espiral. Mehrizi *et al.* (2016) testaram U simples, W e W preenchendo o interior da gaiola (equivalente a sêxtuplo U). Os resultados mostraram que a configuração em sêxtuplo U tem melhor eficiência na taxa de transferência de calor e a conexão das estacas em série proporciona melhor desempenho e eficiência em comparação à em paralelo.

De acordo com Cui *et al.* (2011), o formato da bobina em espiral é vantajoso em comparação com os tubos em U, em série ou paralelos, devido à maior área de transferência de

calor em uma determinada estaca, e porque pode fornecer um melhor fluxo. A investigação sobre configuração espiral realizada em Park *et al.* (2015) indica que para estacas com maior área de tubos nas gaiolas, a eficiência de troca de calor por comprimento de estaca é maior; no entanto, esta eficiência pode diminuir no caso de passo estreito da bobina espiral devido à interferência térmica entre os *loops* de tubos trocadores de calor.

Figura 2.10: Diferentes configurações de *loops* dos tubos trocadores de calor.



Fonte: Adaptado de Sani *et al.* (2019).

Segundo Olgun & McCartney (2014), embora as estacas trocadoras de calor possam não suprir toda a demanda de energia térmica necessária para aquecer/resfriar certa edificação, essas estruturas podem fornecer troca térmica suficiente para suprir parte da carga de aquecimento/resfriamento, em torno de 10 a 20% da demanda de pico. Assim, este sistema pode ser uma alternativa aos sistemas de climatização tradicionais, de forma que sejam utilizados apenas em momentos de pico da demanda por climatização.

Um importante parâmetro para avaliar a performance térmica das estacas geotérmicas é o fluxo de calor trocado por metro de estaca (taxa de transferência de calor) e pode ser obtido experimentalmente por meio de medidas das temperaturas de entrada e de saída do fluido dentro da estaca. A taxa de troca de calor q_l representa quantos *watts* de energia térmica são extraídos ou rejeitados no solo por metro de profundidade dos tubos instalados na estaca, determinada segundo a Equação 2:

$$q_l = \frac{\Delta T \dot{m} c_f}{H} \quad (2)$$

onde ΔT é a diferença entre as temperaturas de entrada e saída no fluido na estaca, \dot{m} é a vazão do fluido em massa, c_f é a capacidade térmica específica do fluido utilizado e H a profundidade alcançada pelo trocador de calor.

Segundo Brandl (2006), os quase 20 anos de experiência com estacas de energia mostram que os custos de aquecimento ou resfriamento podem ser reduzidos em até dois terços, ao longo da vida útil da edificação. Se a operação for sazonal, a economia de energia elétrica pode ser de até 75% comparada ao sistema convencional de ar-condicionado. Além disso, a utilização de estacas de energia representa uma contribuição para a proteção do meio ambiente, à medida que utiliza energia limpa e renovável.

Se houver necessidade somente de aquecimento ou resfriamento de ambientes ao longo do ano, é importante que o solo tenha fluxo de água subterrânea com velocidade elevada, a fim de promover a recuperação térmica do solo. No entanto, a operação sazonal com balanço de energia, ou seja, aquecimento no inverno (extração de calor do solo) e resfriamento no verão (dissipação de calor no solo) é mais econômica e ecologicamente correta, onde subsolos com baixa velocidade de fluxo são propícios. Caso o solo seja seco, é necessária a execução de fundações mais profundas e de maior área para troca de calor, devido à menor condutividade térmica de solos secos. Para uso em sistemas de geotermia, o comprimento mínimo viável economicamente das estacas, estacas barretes ou paredes diafragma é de cerca de 6 m, mas não há limitação para a profundidade das estacas e, além disso, o potencial de energia aumenta com a profundidade (BRANDL, 2006).

No inverno, o sistema retira calor do solo e transfere à edificação, resfriando a temperatura do subsolo. Se houver um fluxo de água subterrânea elevado o suficiente, pode provocar a recuperação térmica do solo. Por outro lado, se não houver, o solo ficará mais frio, o que é uma vantagem se houver necessidade de resfriamento de ambientes no verão, ou seja, se o sistema tiver operação sazonal. Portanto, no caso de operação sazonal equilibrada, uma elevada velocidade de fluxo de água deixaria o sistema menos eficiente na estação seguinte.

Apesar do sistema de estaca geotérmica reunir muitas vantagens, existe uma preocupação quanto ao impacto das variações cíclicas de temperatura na estaca no seu desempenho como fundação (capacidade de carga e recalques). Esta condição de carga térmica adicional destaca a necessidade de se ter uma compreensão dos efeitos da temperatura no comportamento mecânico do solo e na interação solo-estaca (ABUEL-NAGA *et al.*, 2014).

2.3.2 Comportamento termomecânico

O que diferencia as estacas geotérmicas das convencionais é que as trocadoras de calor estarão submetidas a carregamento térmico além do mecânico. Assim, é muito importante compreender os efeitos da temperatura no comportamento mecânico da fundação (interação entre elemento estrutural e maciço geotécnico) a fim de prever se as cargas térmicas impostas à estaca influenciarão o papel mais importante da estaca, que é sustentar a construção.

Até o momento não existe um método de projeto preciso que considere as complexas interações termomecânicas das estacas geotérmicas (BURLON *et al.*, 2013). Dessa forma, durante anos o dimensionamento das estacas trocadoras de calor foi baseado em considerações empíricas (BOËNNEC, 2009). Para garantir a segurança, os fatores de segurança em projeto são consideravelmente aumentados e isso pode levar os construtores a argumentar que apesar desses sistemas exibirem alta eficiência energética, podem gerar custos adicionais consideráveis durante a construção e exigir habilidades de construção não padronizadas (KNELLWOLF *et al.*, 2011). Deste modo, existe uma forte necessidade de aprimorar a compreensão do comportamento das estacas trocadoras de calor a fim de contribuir para a criação de diretrizes de projeto mais refinadas e evitar o excessivo conservadorismo. O projeto dessas estacas deve considerar três aspectos importantes: o deslocamento axial da estaca, a variação do esforço axial e as resistências de ponta e atrito mobilizadas (BURLON *et al.*, 2013).

Quando uma estaca de concreto é submetida a variações térmicas ocorrem deformações longitudinais e transversais. De outro modo, as variações térmicas provocam contração e dilatação da estaca. As deformações longitudinais nas estacas não são uniformes e dependem principalmente da resistência por atrito lateral da estaca, ou seja, variam de acordo com as propriedades do solo por ela atravessado (LALLOUI *et al.*, 2003).

Uma estaca livre, sem restrições, contrai ou expande proporcionalmente ao coeficiente de dilatação térmica do material que a constitui e à variação térmica a que foi submetida, resultando em uma deformação térmica livre, de acordo com a Equação 3:

$$\varepsilon_l = \beta \Delta T \quad (3)$$

onde β é o coeficiente de dilatação térmica da estaca e ΔT é a variação de temperatura. O coeficiente de dilatação térmica do concreto é geralmente considerado como sendo igual a $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Para uma estaca livre, o aquecimento provocará expansão na estaca e o resfriamento contração. No entanto, na realidade estaca é restrita lateralmente pelo solo que a circunda, pela resistência por atrito lateral e de ponta, e pela estrutura que a estaca suporta (Bourne-Webb *et al.*, 2012). Devido à essas restrições, a deformação medida ε_g , ou deformação restringida, é apenas uma parcela da deformação livre, proporcional ao grau de liberdade da estrutura n , determinada de acordo com a Equação 4 (LALOUÏ *et al.*, 2003):

$$\varepsilon_g = n\beta\Delta T \quad (4)$$

O grau de liberdade é dado pela relação entre a deformação livre e a restringida (Equação 5) (LALOUÏ *et al.*, 2003):

$$n = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_l} \quad (5)$$

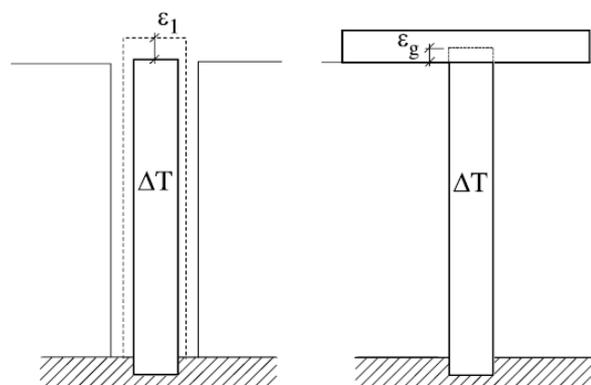
Assim, a deformação vertical impedida (diferença entre deformação livre e deformação restringida) provoca uma reação de apoio vertical, compensada por um aumento proporcional à tensão vertical na estaca (Equação 6):

$$\sigma_v = E_p(\varepsilon_l - \varepsilon_g) \quad (6)$$

onde E_p é o módulo de elasticidade longitudinal da estaca.

As deformações livre e restringida são ilustradas na Figura 2.11 para o caso de aquecimento da estaca.

Figura 2.11: Esquema das deformações térmicas em uma estaca.

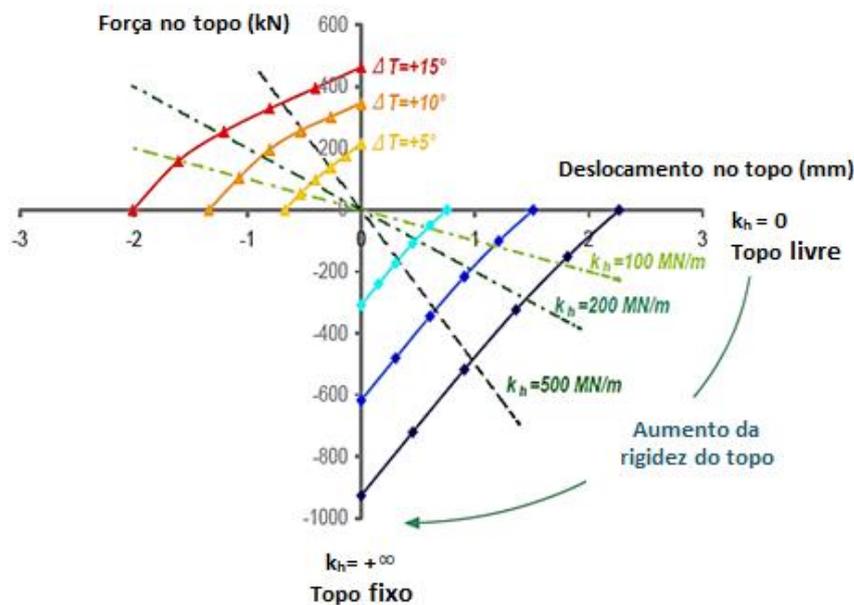


Fonte: Laloui *et al.* (2003).

Quanto ao nível de restrições, existem duas condições extremas às quais a estaca pode estar submetida: “topo livre”, onde não existe restrição na cabeça da estaca, e “topo restringido”, onde a cabeça da estaca é totalmente restringida a se deslocar longitudinalmente. Se a estaca fosse perfeitamente restringida nas extremidades, toda a deformação livre seria convertida em tensão axial na estaca. No entanto, esta condição não existe na natureza e a estaca poderá expandir ou contrair, ainda que pouco (BOURNE-WEBB *et al.*, 2012).

A estimativa da rigidez da cabeça da estaca, relacionada ao grau de restrição e ao grau de liberdade da estaca, é complexa, pois depende de fatores como a geometria do edifício, rigidez da laje e interação com outras estacas quando em grupo. Diferentes valores de rigidez da cabeça da estaca devem ser levados em consideração, e podem ser modelados por uma mola linear com fator de rigidez k_h (BURLON *et al.*, 2013). Estes autores apresentam um ábaco que relaciona a rigidez, o recalque e a carga no topo da estaca (Figura 2.12). Para uma dada variação de temperatura, quanto menor a rigidez, menor a carga e maiores os deslocamentos no topo da estaca.

Figura 2.12: Variação da carga e recalque na cabeça da estaca para diferentes rigidezes e variações de temperatura.

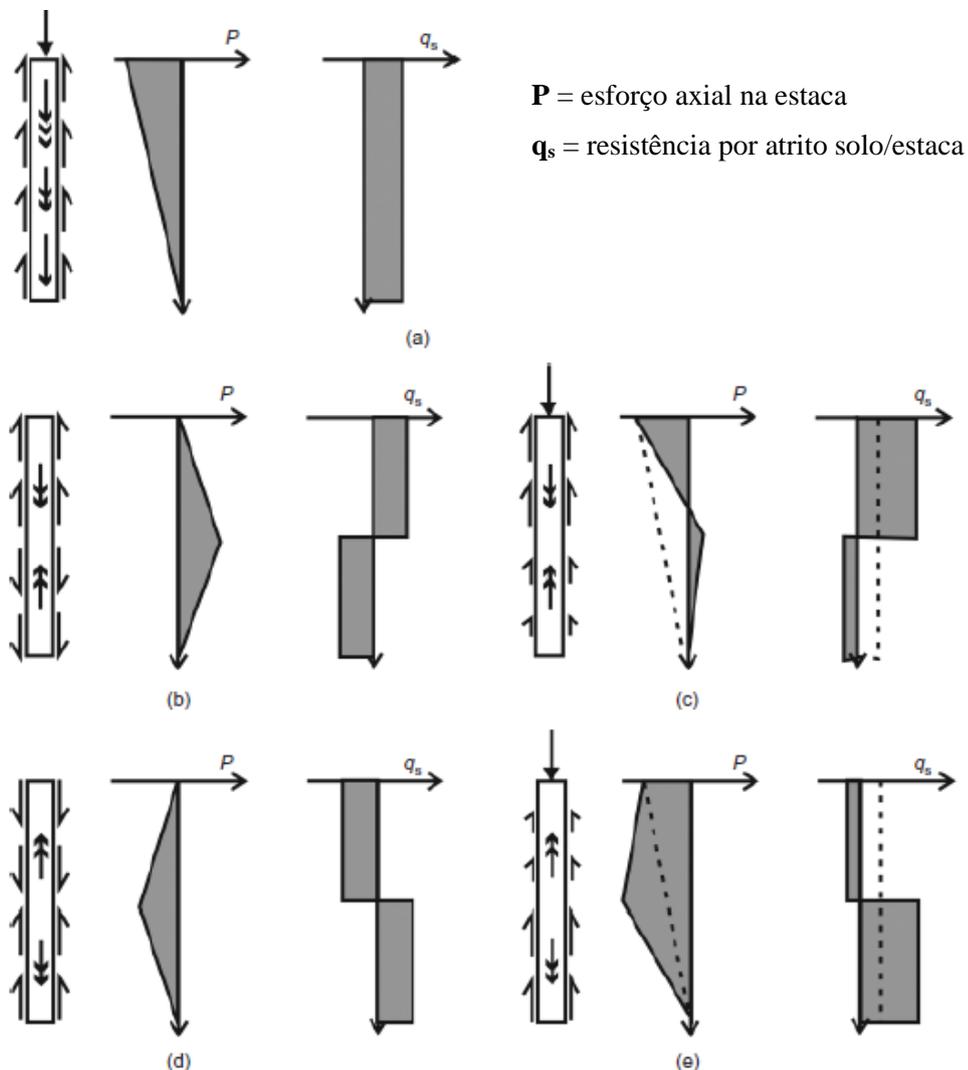


Fonte: Adaptado de Burlon *et al.* (2013).

Amatya *et al.* (2012) apresentam diagramas de esforço normal e atrito para estacas submetidas a carregamento térmico e mecânico, mas sem restrição nas extremidades (Figura 2.13). Quando as extremidades da estaca são impedidas de expandir livremente, durante o

aquecimento são gerados acréscimos adicionais de carga axial, e a carga axial total aumenta (Figura 2.13e). Por outro lado, no resfriamento ocorre um alívio no esforço axial e o desenvolvimento de esforços de tração (Figura 2.13c). Além disso, a presença de aquecimento ou resfriamento na estaca, tanto com as extremidades livres, quanto sob carregamento, provoca mudança da direção do atrito lateral.

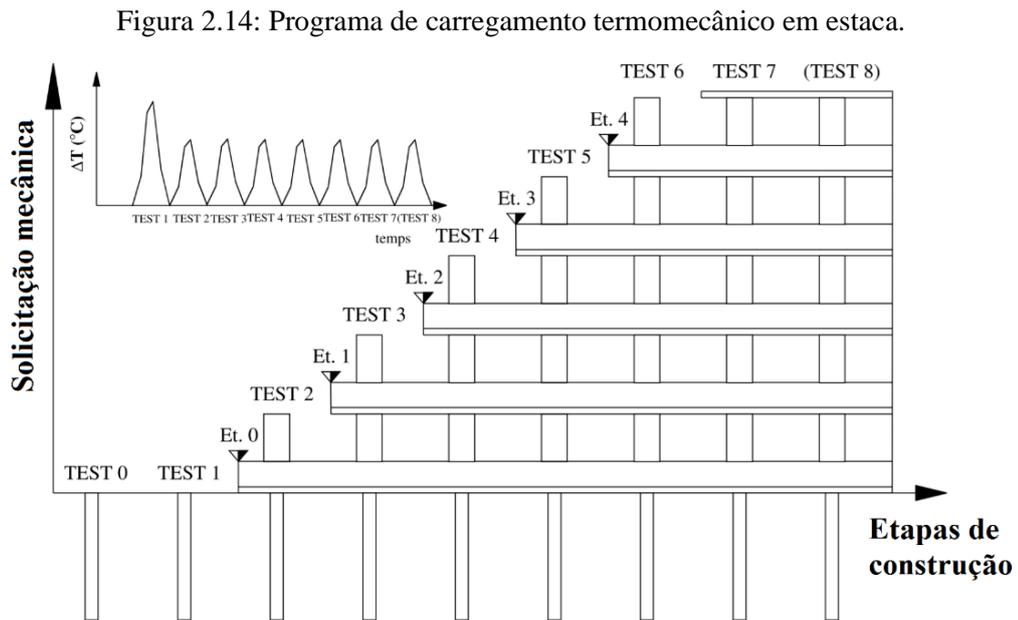
Figura 2.13: Mecanismos de resposta da estaca submetida a carregamento termomecânico de aquecimento e resfriamento sem restrições nas extremidades: (a) carregamento mecânico; (b) resfriamento; (c) carga mecânica e resfriamento; (d) aquecimento; (e) carga mecânica e aquecimento.



Fonte: Adaptado de Amatya *et al.* (2012).

Laloui *et al.* (2003) avaliaram *in situ* o comportamento de uma estaca trocadora de calor submetida a cargas termomecânicas com o objetivo de quantificar o efeito térmico no

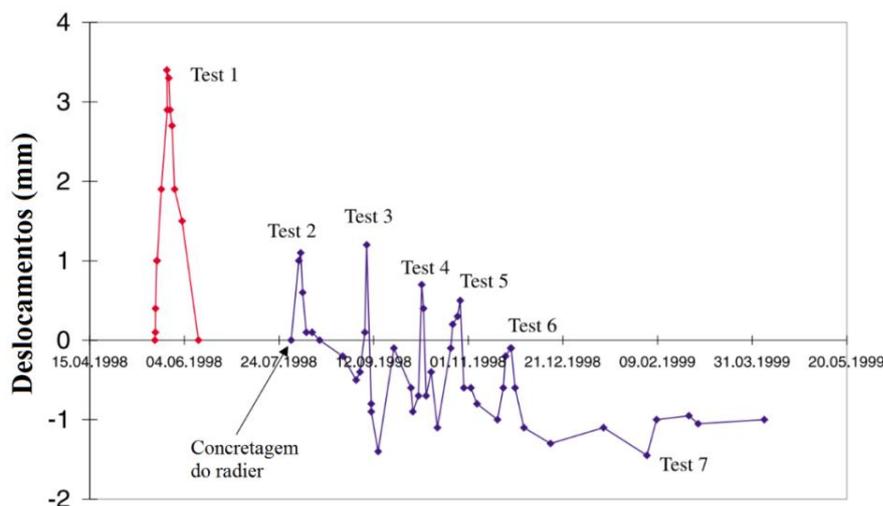
comportamento da fundação. Para este fim, uma estaca trocadora de calor de um edifício em construção foi avaliada em sete diferentes ensaios com cargas térmicas e mecânicas combinadas. As variações de temperatura aplicadas nos ensaios foram em torno de 15°C, e a carga mecânica máxima aplicada foi de 1300 kN. As etapas de carregamento térmico foram ajustadas de acordo com as etapas de construção do edifício, ou seja, a cada teste a carga mecânica aumentava gradativamente como ilustrado na Figura 2.14.



Fonte: Adaptado de Laloui *et al.* (2003).

Os resultados dos ensaios descritos na Figura 2.14 permitiram a quantificação de três efeitos significativos na fundação devido ao aumento de temperatura: i) elevação da estaca, (ii) mobilização de atrito negativo devido ao movimento da estaca e (iii) carga adicional gerada por expansão restrita. Quanto aos deslocamentos no topo da estaca, a Figura 2.15 ilustra que quanto maior for o carregamento mecânico menor será a elevação da estaca. Como mostra esta figura, no Teste 1 em que o carregamento mecânico foi igual a zero (estaca com o topo livre) foi observada maior elevação da estaca. Por outro lado, no Teste 7, que representa o carregamento mecânico máximo ao qual a estaca é submetida, a elevação devido ao carregamento térmico foi compensada pelo recalque da estaca.

Figura 2.15: Deslocamento vertical no topo da estaca nos ensaios.



Fonte: Adaptado de Laloui *et al.* (2003).

Mimouni & Laloui (2015) avaliaram o comportamento termomecânico de um grupo de estacas. Os resultados do estudo indicaram que o aquecimento do grupo de estacas aumenta os deslocamentos individuais, mas reduz os deslocamentos diferenciais. Conseqüentemente, a estrutura sobre a fundação é muito menos solicitada a longo prazo, já que os deslocamentos diferenciais cíclicos são significativamente menores.

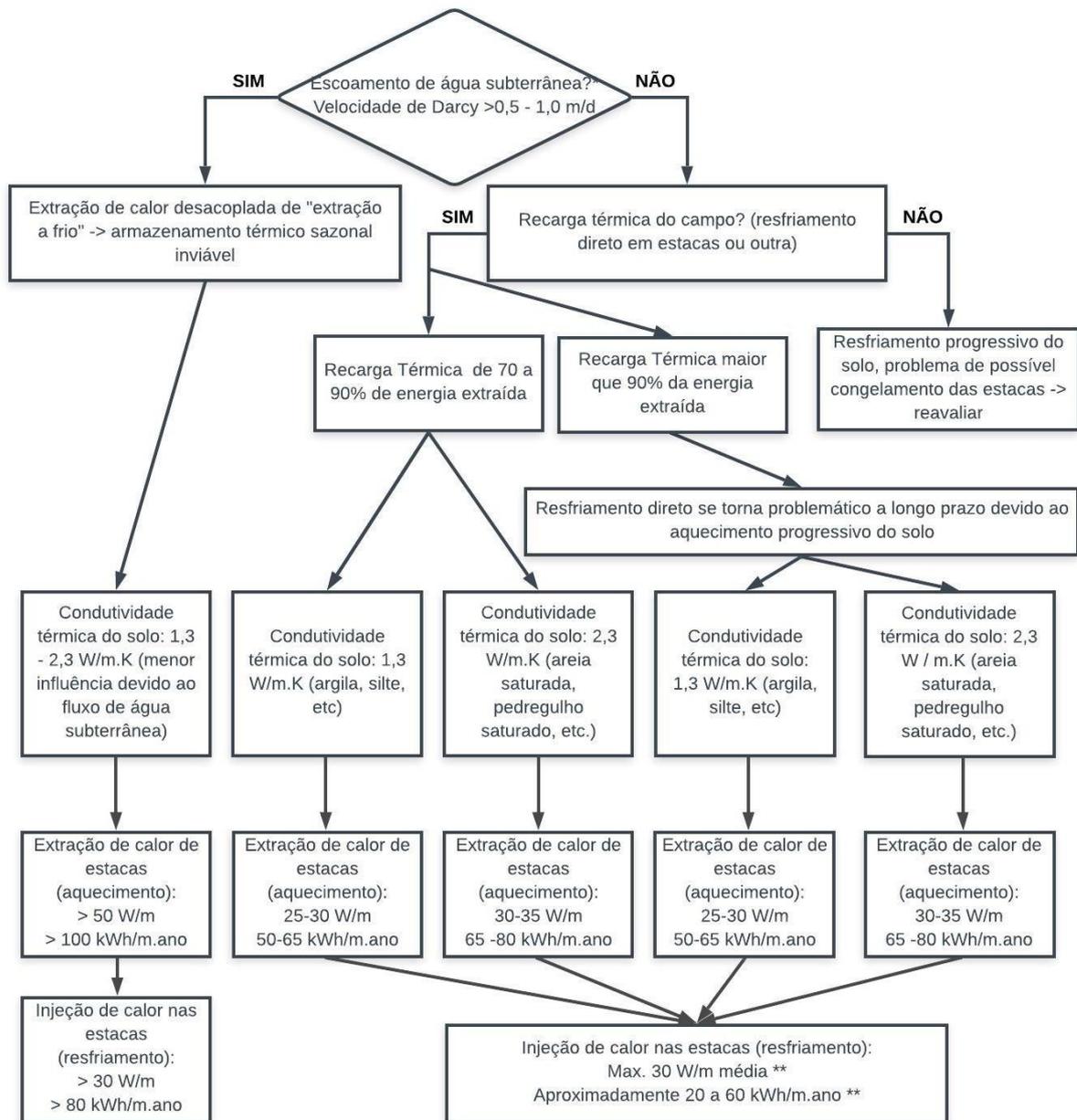
2.3.3 Projeto de estacas trocadoras de calor – recomendações e aspectos construtivos

Apesar da simplicidade envolvida no conceito de estacas trocadoras de calor, o dimensionamento desses sistemas depende de muitos parâmetros, como a condutividade térmica do solo e do material da estaca, a geometria e disposição dos tubos trocadores de calor nas estacas, a presença de um fluxo de água subterrânea e o modo de operação do sistema (FROMENTIN & PAHUD, 1997).

De acordo com Syntec (2017), na fase preliminar de projeto é importante determinar o potencial geotérmico (ou energia explorável) do local, de modo a definir se a fonte geotérmica será suficiente para suprir as necessidades energéticas do empreendimento ou parte dele. A avaliação do potencial geotérmico se utiliza principalmente da condutividade térmica do terreno e da presença do fluxo de água subterrânea, parâmetros que ditam os mecanismos que regem a transferência térmica em um meio poroso: condução, associada à existência de variação de temperatura e convecção, associada à presença de fluxo de água subterrânea.

Fromentin & Pahud (1997) apresentam um diagrama (Figura 2.16) que representa uma importante contribuição ao projeto de fundações termoativas.

Figura 2.16: Diagrama para seleção de parâmetros para projetos de estacas trocadoras de calor de acordo com o potencial geotérmico do local.



* É suficiente que a água subterrânea flua em uma camada atravessada pelas estacas, mesmo fina em relação à profundidade das estacas, para que o efeito seja significativo.

** Se a recarga térmica do solo exceder 90% da energia consumida, a temperatura do solo tenderá a aumentar a longo prazo, o que limitará a recarga térmica se for realizado por resfriamento direto nas estacas.

- Com estacas de maior diâmetro (> 40 cm), o espaçamento é geralmente maior, e os desempenhos indicados acima podem ser aumentados (até 50% para estacas de 1 m de diâmetro)

- Os valores indicados acima correspondem a um sistema monovalente. Para a operação de várias estacas, a potência por metro de estaca será menor, e a quantidade de energia por metro de estaca será maior.

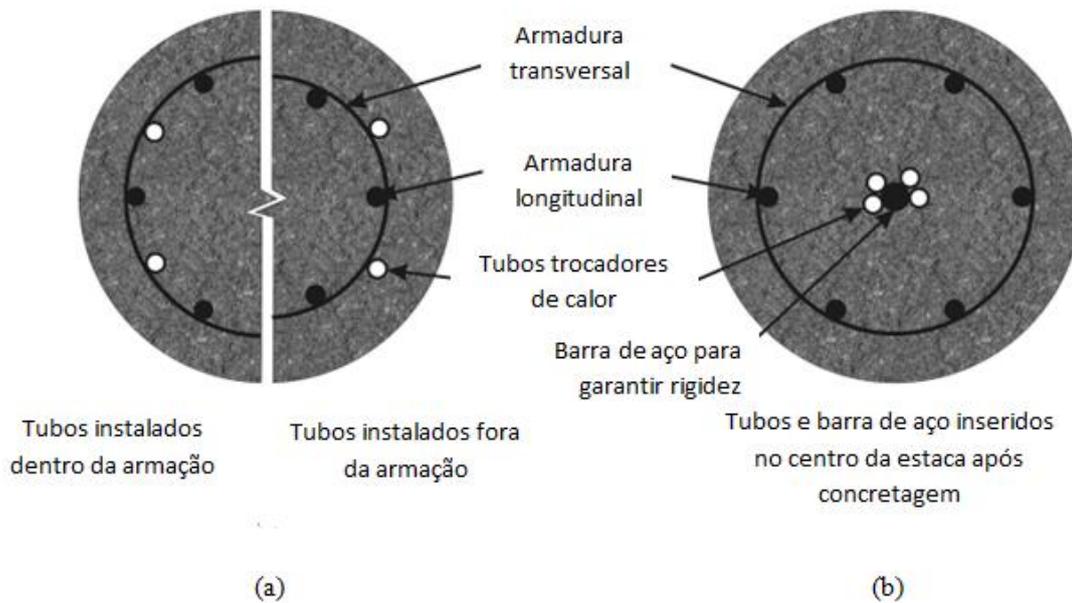
Fonte: Adaptado de Fromentin & Pahud (1997).

Este diagrama resume os principais resultados relacionados ao projeto de um sistema com estacas geotérmicas, que foram obtidos por meio de simulações desenvolvidas e validadas em quatro instalações e aplicadas em um sistema de referência, que satisfaz uma demanda de energia de 200 MWh/ano apenas para aquecimento. Das contribuições apresentadas, destaca-se que para velocidades de fluxo de água subterrânea maiores que 0,5 a 1 m/dia ($5,8 \times 10^{-6}$ a $1,2 \times 10^{-5}$ m/s), o armazenamento térmico sazonal se torna inviável e as necessidades de aquecimento e resfriamento são desacopladas. No entanto, se não houver fluxo, pelo menos de 70 a 90% da energia extraída no inverno deve ser injetada no verão, ou seja, deve haver operação sazonal para promover equilíbrio térmico do sistema. Apesar de constituírem importante contribuição, as informações presentes no diagrama devem ser utilizadas com cautela, visto que os valores apresentados são baseados em simulações para um sistema com geometria, geologia e necessidades específicas.

De acordo com Syntec (2017), em geral o contexto será mais favorável se a condutividade térmica e a velocidade de fluxo forem elevadas e o estado térmico do meio estiver próximo do estado natural, ou pouco influenciado por fatores antropogênicos.

Quanto aos aspectos construtivos, as estacas geotérmicas mais comuns são as do tipo pré-moldada de concreto e de concreto moldadas *in situ*. No caso das pré-moldadas de concreto, os tubos são instalados no interior da parte oca, em contato com a parede interna do concreto (KNELLWOLF *et al.*, 2011). Em estacas escavadas, onde a armação ocupa toda a profundidade da estaca, os tubos são instalados junto à armação. Para estacas tipo hélice contínua, ou estacas em que a armação não ocupa toda a profundidade da estaca, é comum instalar os tubos no centro da estaca, muitas vezes fixados à uma barra de aço para fornecer rigidez suficiente para facilitar a instalação do *loop* dentro da estaca (Figura 2.17). Prender os tubos na armação é mais vantajoso, à medida que um sistema com os tubos mais próximos do solo proporcionará menor resistência térmica. Quando os tubos são posicionados centralmente haverá uma grande resistência, assim como os tubos tenderão a interagir de forma adversa, e surgem dúvidas quanto à adequação de uma abordagem de estado estacionário ao comportamento da estaca (LOVERIDGE & POWRIE, 2012).

Figura 2.17: Disposição dos tubos trocadores de calor na estaca geotérmica: (a) tubos fixados na armação e (b) instalados no centro da estaca.



Fonte: Adaptado de Loveridge & Powrie (2012).

Em geral, os tubos são instalados na armação no local da obra, solicitando então uma área especial de trabalho para montagem do sistema. Para checar a integridade dos tubos e ajudar a resistir ao lançamento do concreto, fixa-se uma válvula de fechamento e um manômetro na entrada e saída dos tubos de cada elemento de fundação, que permitem que o sistema seja pressurizado a 8 bar, em geral. A pressão é usualmente mantida até mesmo depois de alguns dias após a concretagem e é aplicada novamente antes de o circuito primário estar definitivamente fechado (BRANDL, 2006). Os tubos são de polietileno de alta densidade com diâmetro de 25 a 32 mm (SYNTEC, 2017). O polietileno é escolhido por razões práticas e econômicas, e como fluido trocador de calor recomenda-se utilizar água sempre que possível (FROMENTIN & PAHUD 1997).

Para o material das estacas, o concreto se apresenta como uma boa opção, visto que possui boa condutividade térmica e capacidade de armazenamento térmico, o que faz com que ele seja um meio ideal para troca de calor. Para utilizar essas propriedades nas estacas, são utilizados tubos de polietileno de alta densidade de modo a permitir a circulação de um fluido transportador de calor, que pode ser água, água com anticongelante ou uma solução salina (BRANDL, 2006).

Os tubos trocadores de calor podem estar dispostos em diferentes configurações no interior da estaca geotérmica. Se estiverem dispostos em *loops* do tipo U, sugere-se valores

máximos de *loops* de acordo com o diâmetro das estacas, conforme apresentado na Tabela 2.1. Para diâmetros de estaca maiores que 100 cm, a cada acréscimo de 20 cm ao diâmetro da estaca considera-se possível aumentar 1 *loop*.

Tabela 2.1: Quantidade de *loops* possíveis de utilização em estacas geotérmicas de acordo com o diâmetro.

Diâmetro das estacas (ϕ)	Quantidade máxima de <i>loops</i>
$\phi < 40$ cm	1
$40 \leq \phi \leq 60$ cm	2
$60 < \phi \leq 80$ cm	3
$80 < \phi \leq 100$ cm	4

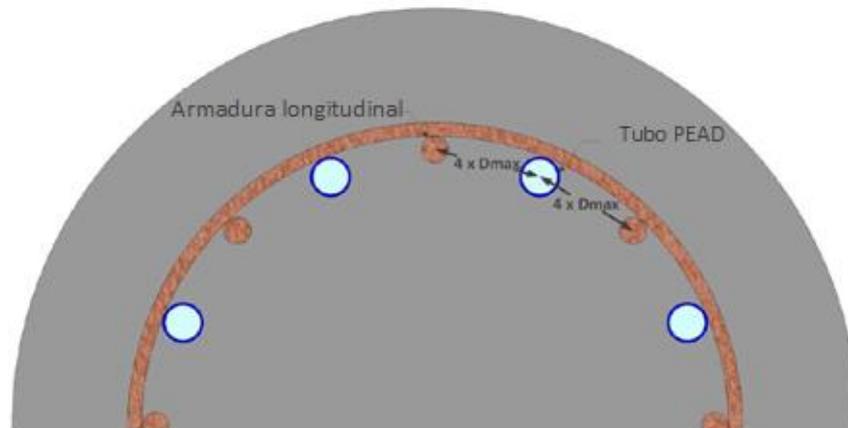
Fonte: Syntec (2017).

A disposição dos tubos em *loop* provocará a formação de uma curvatura na dobragem dos tubos, e se não houver informação do fabricante, Syntec (2017) sugere que o raio de curvatura seja igual a 20 vezes o diâmetro externo do tubo trocador de calor.

O espaçamento entre os tubos deve ser de no mínimo 15 cm e o espaçamento entre os tubos e a armadura longitudinal deve respeitar a função estrutural da armação: se for definitiva, recomenda-se um espaçamento mínimo de quatro vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo, D_{\max} , de acordo com a Figura 2.18; se não for definitiva, os tubos devem ser posicionados de modo a permitir apenas uma boa implementação do concreto. Por fim, a fixação dos tubos na armadura longitudinal é aceitável se for compatível com a função estrutural definitiva da armadura (SYNTEC, 2017).

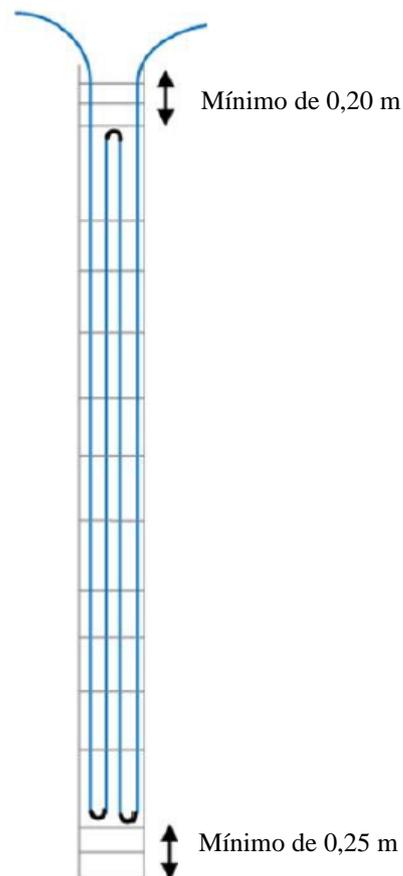
Os tubos devem ser fixados transversalmente e entre as armaduras transversais, para evitar deformações excessivas. Se forem fixados com fios metálicos, fixar a cada 1 m; se com abraçadeiras plásticas, a cada 50 cm. A uma altura de 1 m da base da curvatura do tubo, fixar a cada 25 cm. A volta do tubo na parte superior deve ficar no mínimo 20 cm abaixo da cota de arrasamento, para que não seja danificado quando for feito o arrasamento. Além disso, a volta do tubo na parte inferior deve ficar a no mínimo 25 cm acima da base da gaiola, de modo que os tubos não interfiram na concretagem, como ilustrado na Figura 2.19. De todo modo, os tubos devem ficar protegidos pela gaiola de armadura (SYNTEC, 2017).

Figura 2.18: Espaçamento mínimo entre os tubos PEAD e a armadura longitudinal das estacas geotérmicas.



Fonte: Adaptado de Syntec (2017).

Figura 2.19: Limitação de altura dos tubos trocadores de calor em uma estrutura geotérmica.



Fonte: Adaptado de Syntec (2017).

Sobre a quantidade de energia que pode ser extraída das fundações trocadoras de calor, Brandl (2013) apresenta alguns valores para serem utilizados em estudos de viabilidade e pré-dimensionamento, de acordo com o diâmetro da estaca (D) e tipo de estrutura (Tabela 2.2):

Tabela 2.2: Energia a ser extraída por meio de estruturas termoativas.

Estrutura	Energia
Estaca, $0,3 \text{ m} < D < 0,5 \text{ m}$	40 a 60 W/m
Estaca, $D \geq 0,6 \text{ m}$	35 W/m ²
Paredes diafragma, estacas barrete (completamente embutidas no solo)	30 W/m ²
Radier	10 a 30 W/m ²

Fonte: Brandl (2013).

2.4 Mecanismos de transferência de calor

Segundo Incropera (2008), a transferência de calor, ou calor, é definida como energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Com isso, sempre que houver diferença de temperatura em um meio ou entre dois meios, haverá transferência de calor.

Em sistemas geotérmicos por estacas trocadoras de calor, Abdelaziz *et al.* (2011) menciona que os seguintes mecanismos de transferência de calor são possíveis:

- (a) Convecção de calor entre o fluido que circula nos tubos e as paredes internas dos tubos;
- (b) Condução de calor através das paredes dos tubos;
- (c) Condução de calor dentro da estaca;
- (d) Condução de calor no solo;
- (e) Convecção de calor através do fluxo de água subterrânea, caso existente.

Apesar de no solo ocorrerem os três mecanismos mencionados, a condução é o mecanismo dominante, mesmo que exista um fluxo de água subterrânea significativo. A radiação geralmente contribui de forma insignificante para a transferência de calor e seu efeito na areia é inferior a 1% da transferência total de calor (REES *et al.*, 2000). Além disso, a radiação somente se torna significativa em solos secos com grandes poros e sob elevadas variações de temperatura (ABUEL-NAGA *et al.*, 2014). Assim, este mecanismo será discutido brevemente. Congelamento e descongelamento também podem transferir calor significativo, mas tais processos devem ser evitados em geoestruturas termoativas (Brandl, 2006) e não são fenômenos recorrentes na maioria dos solos brasileiros, sendo desconsiderados neste trabalho.

2.4.1 Condução

A condução ou difusão térmica consiste no processo de transferência de calor que se dá através do contato molecular na presença de um gradiente de temperatura, onde partículas de maior temperatura e que se movem com maior velocidade colidem com as de menor temperatura, com menor velocidade, transferindo calor ou energia térmica. No estado estacionário, a taxa de transferência de calor por condução é expressa pela lei de Fourier, segundo a Equação 7:

$$q_c = \frac{Q_c}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

onde q_c (W/m²) é o fluxo térmico por condução, relação entre a taxa de transferência de calor Q_c (W) por unidade de área A (m²) na direção x , perpendicular à direção da transferência. O fluxo é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx , sendo relacionados pela constante de proporcionalidade λ , a condutividade térmica (W/mK). O sinal negativo na formulação deve-se ao fato da transmissão de calor se dar da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

Quando existe fluido ocupando os vazios entre as partículas sólidas, e as duas fases são condutoras, tem-se uma condutividade térmica efetiva λ_e . Considerando um arranjo paralelo de fluidos e sólidos, a condutividade térmica efetiva pode ser definida considerando as frações de volume e condutividades térmicas das fases individuais, sendo η a porosidade, de acordo com a Equação 8 (DOMENICO & SHWARTZ, 1990):

$$\lambda_e = \eta\lambda_f + (1 - \eta)\lambda_s \quad (8)$$

onde λ_f e λ_s são as condutividades térmicas dos fluidos e sólidos respectivamente.

2.4.2 Convecção

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois processos: um pelo movimento aleatório das moléculas, que consiste na condução ou difusão, e outro pelo movimento global ou macroscópico do fluido, usualmente referido como *advecção* (INCROPERA, 2008). É importante principalmente como mecanismo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido. Quando partículas de um fluido são aquecidas por uma superfície sólida, elas tenderão a migrar para regiões de menor temperatura e assim ocorre a

transmissão de calor por convecção. Quando o fluxo de calor é causado por forças externas, diz-se que o transporte de calor ocorre por convecção forçada. Por outro lado, quando o movimento do fluido ocorre exclusivamente devido às variações de temperatura, fala-se em convecção livre (DOMENICO & SHWARTZ, 1990).

Segundo Loveridge (2012), a convecção forçada, por vezes chamada de advecção, tem maior importância para os sistemas de energia do solo e pode ocorrer tanto devido à diferença de temperatura entre o fluido trocador de calor e as paredes dos tubos assim como devido ao fluxo de água subterrânea. A convecção livre ocorre quando os vazios do solo são grandes o suficiente para que as células de convecção se desenvolvam (LOVERIDGE, 2012), no entanto, os vazios são em geral da ordem de vários milímetros (FAROUKI, 1986 *apud* LOVERIDGE, 2012).

De acordo com a lei de resfriamento de Newton, a taxa de transferência de calor por convecção é expressa por:

$$q_v = \frac{Q_v}{A} = h(T_f - T_\infty) \quad (9)$$

onde q_v é o fluxo térmico por convecção (W/m^2), Q_v a taxa de transferência de calor por convecção (W), proporcional à diferença de temperatura entre a superfície T_∞ e o fluido T_f . O coeficiente de transferência de calor por convecção h (W/m^2K) depende das propriedades do fluido (densidade, viscosidade, capacidade térmica específica e taxa de fluxo) e das propriedades da superfície, como rugosidade e geometria da interface (LOVERIDGE, 2012).

No solo, a convecção é a combinação dos processos de difusão através dos constituintes do solo e advecção devido ao movimento do fluido, que ocorrem simultaneamente. Esses processos são descritos pela equação difusão-advecção, expressa pela Equação 9 (LOVERIDGE, 2012):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} - v \frac{\rho_f c_f}{\lambda_e} \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

onde α é a difusividade térmica, v a velocidade de Darcy, ρ_f e c_f a massa específica e capacidade térmica específica do fluido, respectivamente.

2.4.3 Radiação

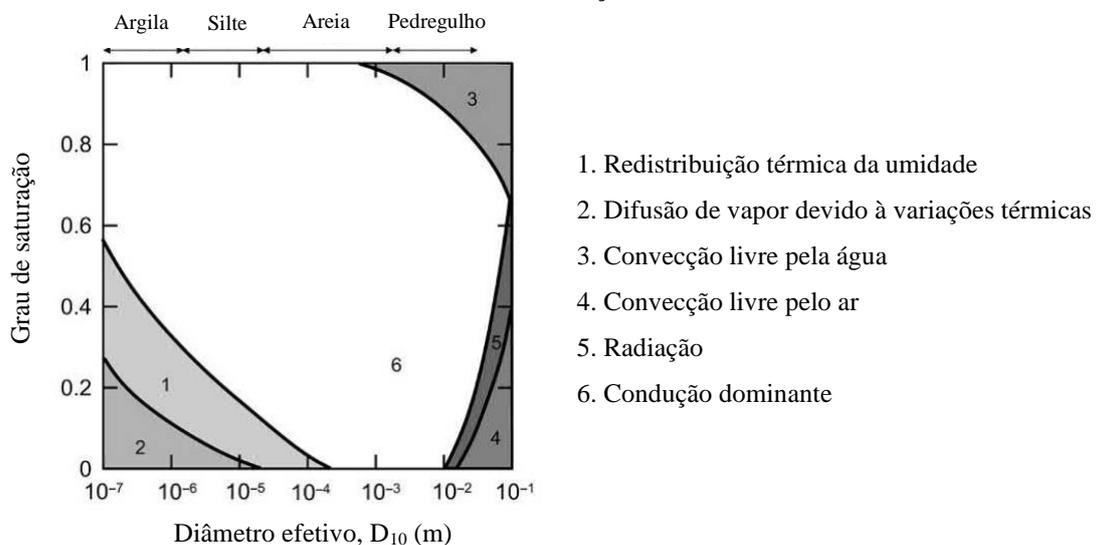
O transporte de calor por radiação se dá devido à radiação emitida pela temperatura de um corpo (DOMENICO & SHWARTZ, 1990). A radiação não precisa de um meio para transferir energia e pode ocorrer no vácuo. A lei de Stefan-Boltzmann relaciona a quantidade de energia irradiada de um corpo negro, ou irradiador térmico perfeito, com a temperatura absoluta (Equação 10):

$$q_r = \frac{Q_r}{A} = \sigma(T^4) \quad (10)$$

onde q_r é o fluxo de calor por radiação (W/m^2), A é a área superficial do corpo, T é a temperatura absoluta do corpo em Kelvin e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Na prática, a maioria dos corpos não é puramente negra e não existe isoladamente, o que faz com que a transferência de calor seja reduzida comparada à lei idealizada de Stefan-Boltzmann (LOVERIDGE, 2012).

Dos três mecanismos apresentados, a condução predomina na transferência de calor no concreto e através da parede dos tubos. No solo, apesar de a condução ser o mecanismo dominante, o modo de transferência de calor é influenciado de maneira importante pelo grau de saturação e diâmetro das partículas, como apresentado na Figura 2.20, além do fluxo de água subterrânea.

Figura 2.20: Modos de transferência de calor de acordo com o diâmetro efetivo dos grãos e o grau de saturação.



Fonte: Adaptado de Farouki (1986) *apud* Laloui & Rotta Loria (2020).

2.5 Parâmetros térmicos do sistema

A condutividade térmica λ , a capacidade térmica c e a massa específica do solo ρ são parâmetros dependentes da temperatura e são acoplados na equação básica da condução de calor (Equação 11), que derivada da Lei de Fourier, considera a condutividade térmica constante. O parâmetro térmico do solo mais importante é a condutividade térmica (BRANDL, 2006), e quanto melhor o conhecimento dessas propriedades, melhor a avaliação do comportamento térmico do sistema (VILELA, 2004).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

As propriedades térmicas do solo dependem do conteúdo mineral, porosidade e grau de saturação do meio (CHIASSON *et al.*, 2000; SYNTEC, 2017). A porosidade exerce influência importante, pois quanto maior o contato entre os grãos do solo, maior a condutividades térmica, independente do conteúdo mineral. Isso justifica o fato de as rochas apresentarem maior condutividade térmica que o solo. Para materiais saturados, o aumento da porosidade conduz a uma maior capacidade térmica e menor difusividade térmica. Em geral, materiais com elevada porosidade também possuem elevadas condutividades hidráulicas, exceto em solos finos (CHIASSON *et al.*, 2000).

Entre 1 e 35°C, intervalo de temperatura relacionado à estruturas geotérmicas e à energia geotérmica de baixa temperatura, as propriedades térmicas podem ser consideradas constantes (SYNTEC, 2017).

2.5.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica representa a capacidade de um material conduzir calor. Considerando o solo composto por sólidos e fluidos (ar e/ou água) e visto que a condutividade térmica dos componentes sólidos é maior que a do ar ou da água, o mecanismo de condução se dará preferencialmente através dos pontos de contato das partículas sólidas. Dessa forma, a água ou ar nos vazios do solo influenciam de maneira importante a condutividade térmica do solo (LOVERIDGE, 2012). Quanto mais poroso o meio, menor a condutividade térmica efetiva, principalmente porque a água tem condutividade térmica menor que a maioria dos minerais sólidos (DOMENICO & SHWARTZ, 1990).

A Tabela 2.3 apresenta valores de condutividade térmica dos principais constituintes dos sistemas geotérmicos. Em geral, o maciço apresentará maior condutividade térmica no estado saturado e quanto maior for o teor de quartzo. No entanto, Morais (2019) e Bandeira Neto (2015) encontraram elevados valores de condutividade térmica para um solo não saturado e laterítico, da ordem de 3 W/mK. Acredita-se que o processo de laterização, ao formar óxidos de ferro, tenha contribuído para aumentar a condutividade térmica do solo.

Tabela 2.3: Condutividade térmica dos constituintes do sistema geotérmico.

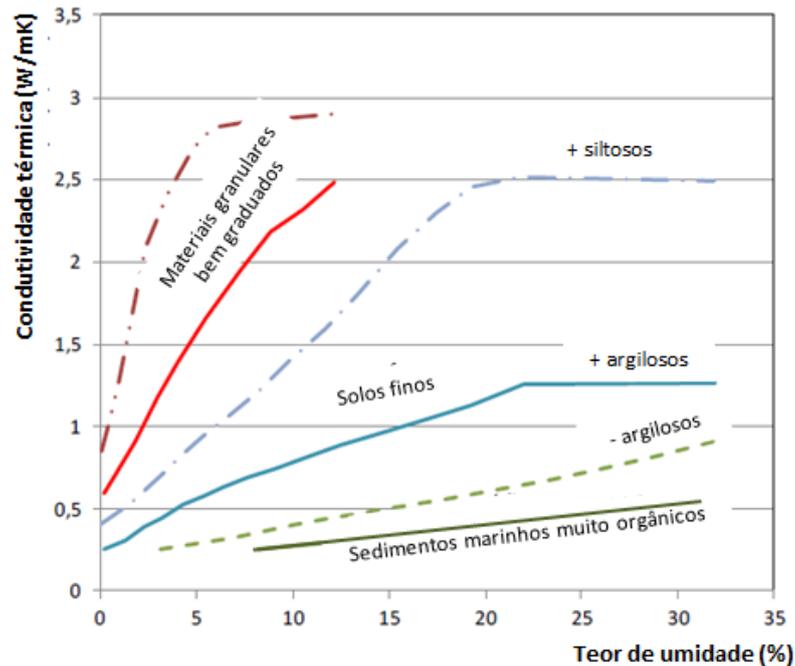
Material	Condutividade térmica (W/mK)	
	Seco	Saturado
Argila /Silte	0,4 – 1,0	0,9 – 2,3
Areia	0,3 – 0,8	1,7 – 5,0
Pedregulho	0,4 – 0,5	1,8
Turfa	0,2 – 0,7	
Argilito/ Siltito	1,1 – 3,5	
Arenito	1,3 – 5,1	
Calcário	2,5 – 4,0	
Mármore	1,3 – 3,1	
Gnaisse	1,9 – 4,0	
Granito	2,1 – 4,1	
Basalto	1,3 – 2,3	
Concreto	0,9 – 2,0	
Aço	14 – 60	
Água	0,6	
Ar	0,024	
Polietileno	0,39	

Fonte: Adaptado de Pahud (2002) *apud* Laloui & Rotta Loria (2020).

Yun & Santamarina (2008) mencionam que a presença de líquidos ou agentes cimentantes nos contatos, assim como maiores áreas de contato, devido a carregamento, *creep* ou diagênese, aumentam a condutividade térmica. Em uma análise da transferência de calor, a nível de partícula justificam a seguinte sequência de valores condutividade térmica: $\lambda_{\text{ar}} < \lambda_{\text{solo-seco}} < \lambda_{\text{água}} < \lambda_{\text{solo-saturado}} < \lambda_{\text{mineral}}$.

A influência do teor de água na condutividade térmica para diferentes tipos de solo pode ser observada na Figura 2.21. A condutividade aumenta com o teor de umidade, numa taxa mais acentuada quanto mais granular for o solo.

Figura 2.21: Relação entre a condutividade térmica e o teor de umidade para diferentes tipos de solo.



Fonte: Adaptado de Syntec (2017).

Em geral, a condutividade térmica de solos e rochas não varia muito, indo de 0,25 W/mK até 5 W/mK. Por outro lado, o solo tem elevada capacidade de armazenamento térmico, com uma capacidade térmica específica para os sólidos em torno de 800 J/kgK (BANKS, 2008; LOVERIDGE, 2012). Desconsiderando a influência do fluxo de água subterrânea, a transmissão de calor nos solos e rochas não se propaga rapidamente por possuírem baixa difusividade térmica, mas uma quantidade potencialmente grande de calor que pode ser explorada (LOVERIDGE, 2012). Neste contexto é importante conhecer o nível d'água do terreno, mais especificamente o nível d'água na época de estiagem, que seria representativo do nível médio do lençol freático (SYNTEC, 2017).

Se no meio houver fluido em movimento, ocorre a dispersão térmica, que consiste numa dispersão microscópica de calor devido ao transporte convectivo pelo meio poroso e provoca um aumento na condutividade térmica efetiva (DOMENICO & SHWARTZ, 1990). Dessa forma, a presença de um fluxo de água subterrânea contribuiria para aliviar o calor depositado

no solo em torno das estacas e conseqüentemente aumentaria a condutividade térmica efetiva do sistema solo-estaca.

2.5.2 Capacidade térmica específica

A capacidade térmica específica (ou calor específico) é definida como a quantidade de energia armazenada no solo para uma unidade de massa do solo e uma unidade de variação de temperatura (Equação 12). É necessária quando soluções não estacionárias tem de ser determinadas:

$$c = \frac{Q^*}{m\Delta T} \quad (12)$$

onde Q^* é a quantidade de energia armazenada (J), m a massa do solo (kg) e ΔT a variação da temperatura (K ou °C).

A capacidade térmica não depende da microestrutura e na maioria dos casos é satisfatório calcular a capacidade térmica dos solos a partir das capacidades térmicas específicas dos diferentes constituintes de acordo com suas razões de volume, segundo a Equação 13 (BRANDL, 2006):

$$c_p = c_s x_s + c_f x_f + c_a x_a \quad (13)$$

onde os índices s , f e a designam solo, fluido (água) e ar, respectivamente e x representa o volume específico. Sendo η a porosidade e S o grau de saturação,

$$x_s = 1 - \eta, \text{ para a fase sólida} \quad (14)$$

$$x_f = \eta S, \text{ para a fase líquida} \quad (15)$$

$$x_a = \eta(1 - S), \text{ para a fase gasosa} \quad (16)$$

Como mostra a Tabela 2.4, os componentes minerais e sólidos orgânicos tem capacidades térmicas específicas semelhantes, e somente o teor de água permanece como uma variável relevante, a curto prazo. A longo prazo, o adensamento (sob carregamentos externos ou peso próprio ou devido à extração de calor excessiva) pode ter importância porque o volume

muda. A capacidade térmica geral aumenta com o teor de água e diminui em caso de congelamento (BRANDL, 2006).

Tabela 2.4: Capacidade térmica e massa específica de diferentes materiais.

Material	Capacidade térmica específica, c_p (J/kgK)	Massa específica, ρ (kg/m ³)
Quartzo	799	2650
Caulim	937	2600
Carbonato de cálcio	870	2710
Sulfato de cálcio	816	2450
Óxido de ferro (III)	690	5240
Óxido de alumínio	908	3700
Hidróxido de ferro (III)	946	3600
Ortoclásio	812	2560
Oligoclásio	858	2640
Muscovita	870	2900
Biotita	862	2900
Horneblenda	816	3200
Apatita	766	3200
Dolomita	929	2900
Talco	874	2700
Granito	803	2600
Sienito	833	2700
Diorito	812	2900
Andesito	833	2400
Basalto	891	3000

Fonte: Adaptado de Clark (1966) *apud* Rees *et al.* (2000).

A capacidade térmica volumétrica expressa a capacidade de um material de armazenar energia térmica. É expressa pelo produto entre a capacidade térmica específica c_p pela massa específica ρ , de acordo com a Equação 17:

$$C_v = \rho c_p \quad (17)$$

A capacidade térmica volumétrica efetiva pode ser obtida através de uma função que relaciona as capacidades térmicas específicas, massa específica e volume de cada fase do meio (Equação 18), de maneira análoga à determinação da condutividade térmica efetiva:

$$\rho_e c_e = \eta \rho_f c_f + (1 - \eta) \rho_s c_s \quad (18)$$

onde η é a porosidade do meio, ρ_f e c_f são a massa específica e a capacidade térmica específica do fluido que preenche os poros do meio, e ρ_s e c_s são a massa específica e capacidade térmica específica dos sólidos. Para o caso de solos saturados, as propriedades do fluido são substituídas pelas da água, e no caso de solos secos, do ar. No entanto, a contribuição da capacidade térmica volumétrica do ar é geralmente negligenciada devido à sua pequena influência nos resultados, exceto nos casos em que a porosidade é relativamente alta (LALOUÏ & ROTTA LORIA, 2020).

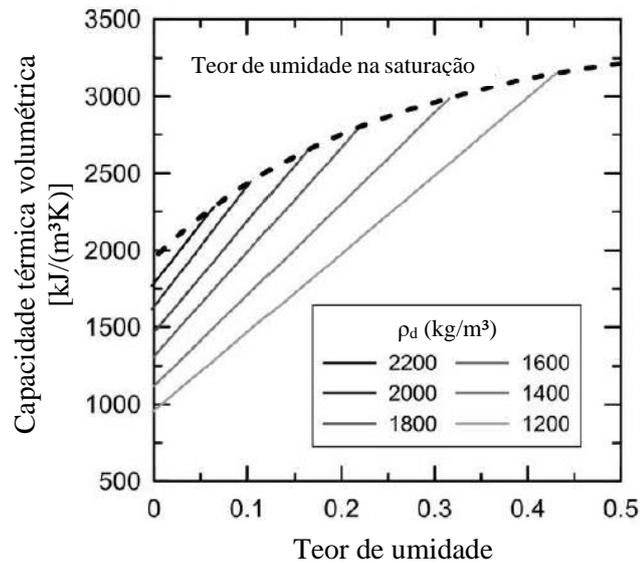
Tabela 2.5: Capacidade térmica volumétrica de diferentes materiais.

Material	Capacidade térmica volumétrica (MJ/m ³ K)	
	Seco	Saturado
Argila e Silte	1,5 – 1,6	1,6 – 3,4
Areia	1,3 – 1,6	2,2 – 2,9
Pedregulho	1,4 – 1,6	2,4
Turfa	0,5 – 3,8	
Argilito/ Siltito	2,1 – 2,4	
Arenito	1,6 – 2,8	
Calcário	2,1 – 2,4	
Mármore	2,0	
Gnaisse	1,8 – 2,4	
Granito	2,1 – 3,0	
Basalto	2,3 – 2,6	
Concreto	1,8 – 2,0	
Aço	3,12	
Água	4,186	
Ar	0,0012	

Fonte: Adaptado de Pahud (2002) *apud* Laloui & Rotta Loria (2020).

A substituição de diferentes massas específicas secas e graus de saturação do solo na Equação 18 resultou no Ábaco apresentado na Figura 2.22.

Figura 2.22: Capacidade térmica volumétrica com o teor de umidade para diferentes massas específicas secas.



Fonte: Adaptado de Dysli (1991) *apud* Laloui & Rotta Loria (2020).

2.5.3 Difusividade térmica

A condutividade térmica é um parâmetro relacionado à condução estacionária, todavia, fenômenos transientes são de particular interesse para a energia geotérmica, e assim a Equação de calor envolve outro parâmetro, a difusividade térmica α (m²/s). Este parâmetro caracteriza a profundidade e a velocidade de penetração de uma onda de temperatura no solo (BRANDL, 2006). É definido pela relação entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (19)$$

Assim, a difusividade térmica mede a capacidade que o material tem de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Quanto maior a difusividade térmica de um material, mais rápida será sua resposta quanto à variações nas condições térmicas, enquanto materiais com baixa difusividade térmica serão mais lentos para atingir a nova condição de equilíbrio (INCROPERA, 2008).

Na presença de fluxo de fluido, a difusividade térmica é chamada de dispersividade térmica α , pois entende-se que o efeito convectivo da dispersão térmica é levado em consideração na condutividade (DOMENICO & SCHWARTZ, 1998). Para um fluido em

movimento, um efeito convectivo referido como dispersão térmica é observado. A dispersão térmica é microscópica devido ao transporte convectivo através a estrutura porosa, e tem o mesmo efeito, quando visto macroscopicamente, como um aumento na eficácia condutividade térmica.

2.5.4 Resistência térmica

De maneira análoga à resistência elétrica associada à condução de eletricidade, na transferência de calor também ocorre uma resistência térmica, que inclui efeitos do fluido, dos tubos e do material de preenchimento do trocador de calor ou estaca (LOVERIDGE, 2012). É definida como a relação entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência de calor, segundo a Equação 20:

$$R_T = \frac{\Delta T}{Q \text{ ou } q_l} \quad (20)$$

onde ΔT é a variação de temperatura entre os meios, Q é a taxa de transferência de calor (W) ou q_l a taxa de transferência de calor por metro (W/m).

Considerando a definição de resistência térmica apresentada na Equação 20, para a condução, convecção e radiação, a resistência térmica é definida de acordo com as seguintes equações (INCROPERA, 2008):

$$R_{T,c} = \frac{L}{\lambda A} \quad (21)$$

$$R_{T,v} = \frac{1}{hA} \quad (22)$$

$$R_{T,r} = \frac{1}{h_r A} \quad (23)$$

onde os subíndices c , v e r representam resistência térmica por condução, convecção e radiação, respectivamente; L é o comprimento da peça, A é a área da secção transversal ao fluxo de calor.

Além da resistência térmica que ocorre através dos componentes da estaca também existe uma resistência térmica de contato em sistemas compostos por mais de um material. Na

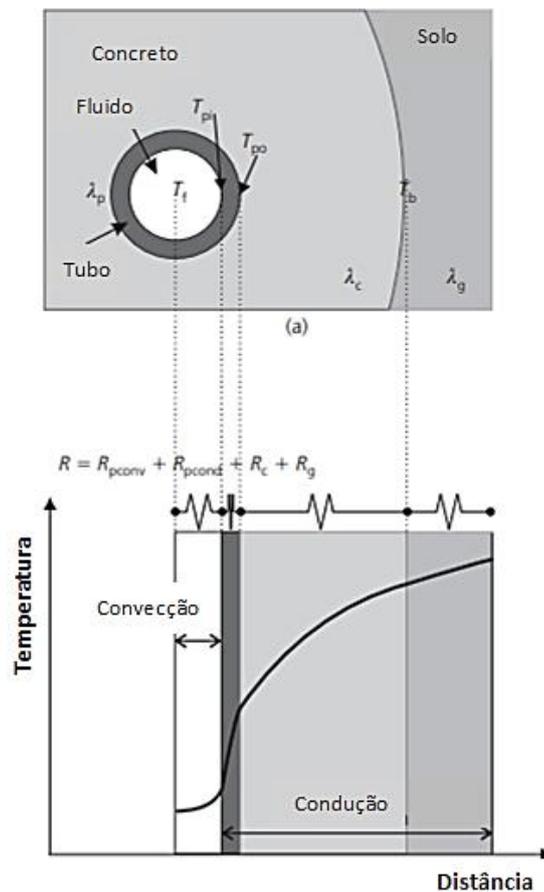
transmissão de calor ocorre uma queda de temperatura entre as interfaces, cuja diminuição é associada à resistência de contato, que para uma área de contato unitária é definida como:

$$R_T = \frac{\Delta T}{q_i} \quad (20)$$

A resistência de contato se deve principalmente aos efeitos de rugosidade da superfície e a transferência de calor é devida à condução através da área de contato real e condução e/ou radiação através dos interstícios (INCROPERA, 2008).

A Figura 2.23 ilustra de maneira simplificada como a transferência de calor ocorre através dos componentes da estaca geotérmica. No interior dos tubos ocorre por convecção forçada e através da parede dos tubos e do concreto para o solo por condução. No solo, a condução normalmente é dominante (REES *et al.*, 2000) mas se existe fluxo de água subterrânea a advecção pode ser importante (CHIASSON *et al.*, 2000). Através dos componentes da estaca existe a resistência térmica ao fluxo de calor.

Figura 2.23: Transferência de calor na estaca geotérmica (a) componentes térmicos da estaca (b) diferenças de temperatura e resistência dos elementos.



Fonte: Adaptado de Loveridge & Powrie (2012).

2.6 Resposta térmica do solo

O conhecimento das propriedades térmicas do subsolo é imprescindível para dimensionar trocadores de calor geotérmicos (ZHANG *et al.* 2014). A determinação das propriedades térmicas pode se dar por meio de valores publicados na literatura, ensaios de laboratório em amostras de solo ou rocha e ensaios realizados em campo. Estes tendem a ser mais representativos, visto que os valores obtidos são específicos do local do empreendimento e maior volume de material é avaliado sob condições mais realistas do que em laboratório. O procedimento comum é medir a resposta de temperatura de um fluido circulado em um tubo em *loop* simples com a aplicação de uma potência térmica constante (CHIASSON *et al.*, 2000), conhecido como ensaio de resposta térmica (TRT).

2.6.1 Ensaio de resposta térmica (TRT)

O ensaio TRT (sigla derivada do inglês *Thermal Response Test*), possibilita a determinação da condutividade térmica efetiva *in situ* de solos saturados e não saturados e rochas e a temperatura média do solo não perturbado, assim como a resistência térmica do furo. Em linhas gerais, o TRT mede a resposta da temperatura a uma energia térmica imposta em um furo trocador de calor.

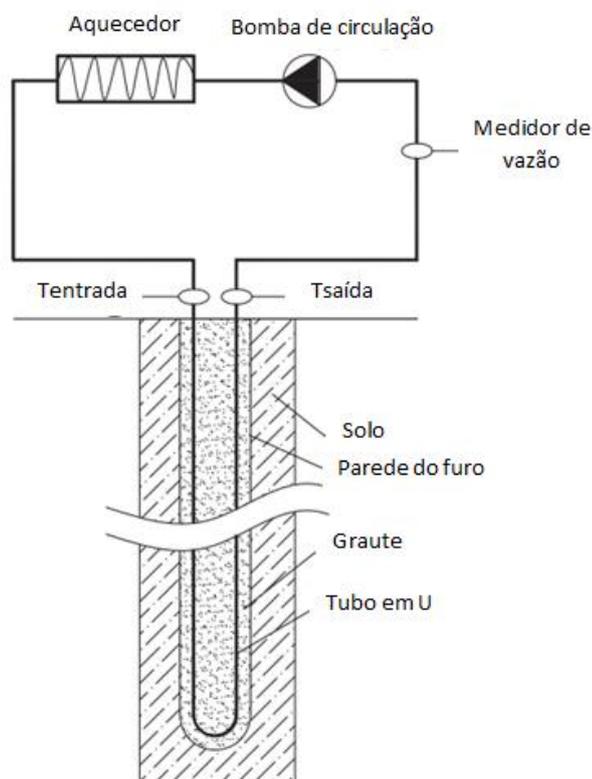
Os procedimentos e orientações necessários à realização desse ensaio são especificados no Eurocode CEN/TC 341 N525 (2011), que se refere ao TRT como *Geothermal Response Test*. No campo o TRT tem se mostrado adequado, pois pode ser realizado diretamente com os trocadores de calor verticais, ou seja, em furos, estacas geotérmicas ou paredes de energia (BRANDL, 2006). O Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011) se aplica à trocadores de calor instalados em furos verticais ou inclinados com até cerca de 400 m de profundidade e diâmetro de até 0,2 m e considera a utilização de fluido trocador de calor que não sofra mudança de fase.

O conhecimento das condições geológicas e hidrogeológicas é necessário para a interpretação dos resultados do TRT e para a seleção do material de preenchimento do furo, que deve ter permeabilidade menor ou igual à do solo circundante. A preparação para o ensaio consiste na execução de um furo no solo, inserção de tubo trocador de calor em U e posterior preenchimento do furo. Após a preparação para o ensaio deve ser feito um teste de fluxo e pressão no conjunto tubo-fluido. A referida Norma recomenda ainda que o fluido que preenche os tubos trocadores de calor seja água potável, levando em conta suas boas propriedades hidrodinâmicas e que pode haver vazamento. A distância dos furos até os edifícios existentes

deve ser de pelo menos 2 m e sua estabilidade não pode ser comprometida (CEN/TC 341 N525, 2011).

Como equipamentos de ensaio, necessita-se de um aquecedor de água, uma bomba de circulação e dispositivos que vão possibilitar o registro da potência térmica injetada, da temperatura de entrada e saída nos tubos, da temperatura ambiente e da vazão. O fluxo deve ser turbulento e fornecer uma taxa de calor apropriada, preferencialmente entre 40 a 80 W/m, devendo ser tão mais alta quanto maior a condutividade térmica esperada. A Figura 2.24 apresenta uma configuração típica do ensaio TRT.

Figura 2.24: Configuração típica de um ensaio TRT.



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2014).

Para formações onde se estima uma condutividade térmica menor do que 1,7 W/mK, o Eurocode recomenda a espera de no mínimo cinco dias após o preenchimento do furo para início do TRT, e para condutividades maiores que 1,7 W/mK, três dias. Cumprido o devido tempo, pode-se dar início ao ensaio propriamente dito, cujas fases são descritas abaixo:

- Medida da temperatura inicial (não perturbada) do subsolo, antes do aquecimento.

Zhang *et al.* (2014) menciona que comumente a temperatura inicial é obtida registrando a

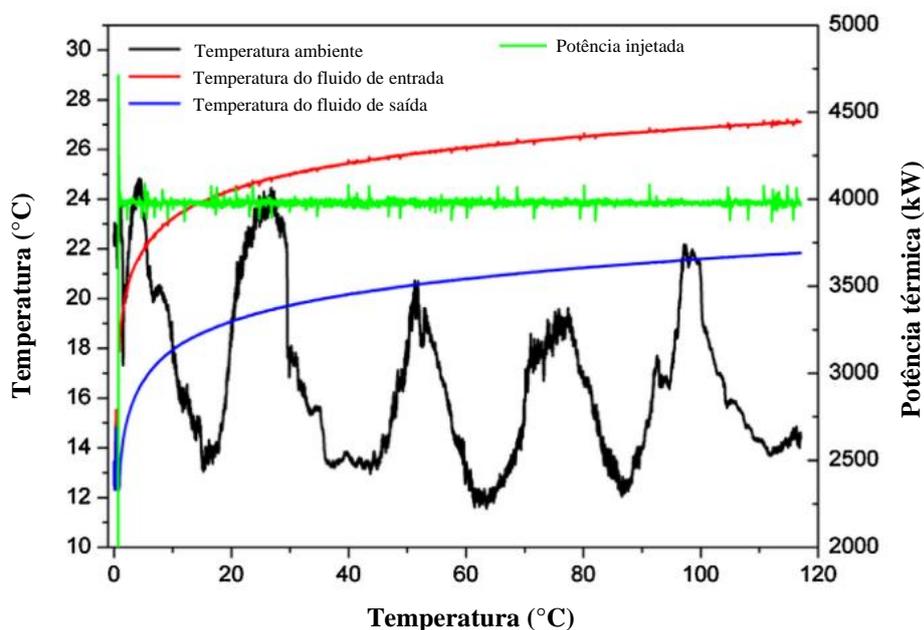
temperatura no furo ou circulando fluido sem aquecimento por 10 a 30 minutos antes que o aquecedor seja ligado; o Eurocode menciona de 10 a 20 minutos;

- Uma taxa de calor constante é injetada no subsolo, por meio do fluido trocador de calor que circula nos tubos inseridos no furo preenchido (ou estaca) sob vazão constante. A temperatura do fluido deve aumentar pelo menos 10°C em relação à temperatura inicial. A temperatura do fluido é medida continuamente na entrada e saída dos tubos. Mede-se também a temperatura ambiente e a vazão do fluxo. Os tubos que ligam os dispositivos de medida e o trecho de tubo inserido na estaca devem ser bem isolados para evitar a perda de calor para o ambiente durante a medição.

Como ilustra a Figura 2.25, tem-se como resultados imediatos do TRT:

- Temperatura ambiente;
- Temperatura de entrada e saída dos tubos;
- Potência aplicada ao sistema, estimada a partir das medidas de vazão do fluido e das temperaturas de entrada e saída dos tubos.

Figura 2.25: Exemplo de registros de um ensaio TRT.



Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2016).

A duração ideal dos ensaios de resposta térmica ainda é um assunto em discussão e ainda não existe norma que determine esse tempo (Raymond, 2011). No entanto, existem recomendações: Smith & Perry (1999) consideram um intervalo de 12 a 20 h, Gehlin (1998) de 60 h a 72 h, Austin *et al.* (2000) 50 h, Gehlin & Hellstrom (2003) 30 h, Signorelli *et al.* (2007)

50 h e o Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011) um tempo mínimo de 48 horas. O problema de conduzir ensaios de curta duração é que pode ocorrer uma subestimativa da condutividade térmica, tendo como consequência a execução de projetos conservadores dos trocadores de calor (RAYMOND, 2011).

Bandeira Neto (2015) foi pioneiro na realização de TRTs no Brasil. Os ensaios foram conduzidos no Campo Experimental de Fundações da Universidade de São Paulo em São Carlos/SP, Brasil, cujo solo consiste em uma camada superficial de solo tropical não saturado, composto de areia argilosa coluvial (laterítico), sobreposta a um solo residual de arenito (saprolito). Para a realização dos ensaios, foram executadas duas estacas com diâmetros iguais a 25 e 50 cm, sendo os tubos trocadores de calor dispostos em U e duplo U, respectivamente. Os valores de condutividade térmica obtidos na estaca de menor diâmetro foram relativamente elevados, em torno de 2.94 W/mK (MORAIS *et al.*, 2020), que se justificam pela grande quantidade de quartzo e óxidos oriundos da laterização presentes no solo.

Quando o subsolo é homogêneo, o TRT é o ensaio mais recomendado para a investigação da condutividade térmica, pois é de fácil implementação e a condutividade térmica efetiva pode razoavelmente representar a propriedade térmica do subsolo. Por outro lado, se o subsolo é heterogêneo, recomenda-se a instrumentação térmica do furo ao longo da profundidade, para que se possa melhor avaliar o comportamento térmico das camadas atravessadas.

Para uma determinada taxa de aquecimento, quanto maior o aumento na temperatura média do fluido registrado no ensaio, menor a condutividade térmica do solo, pois um solo com condutividade térmica mais baixa tem maior dificuldade de dissipar calor (ZHANG *et al.* 2014). Por outro lado, quanto mais lento é o aumento de temperatura do fluido trocador de calor durante o ensaio TRT, mais calor está sendo transferido ao solo, e, assim, maior será a condutividade térmica obtida (WAGNER *et al.* 2012).

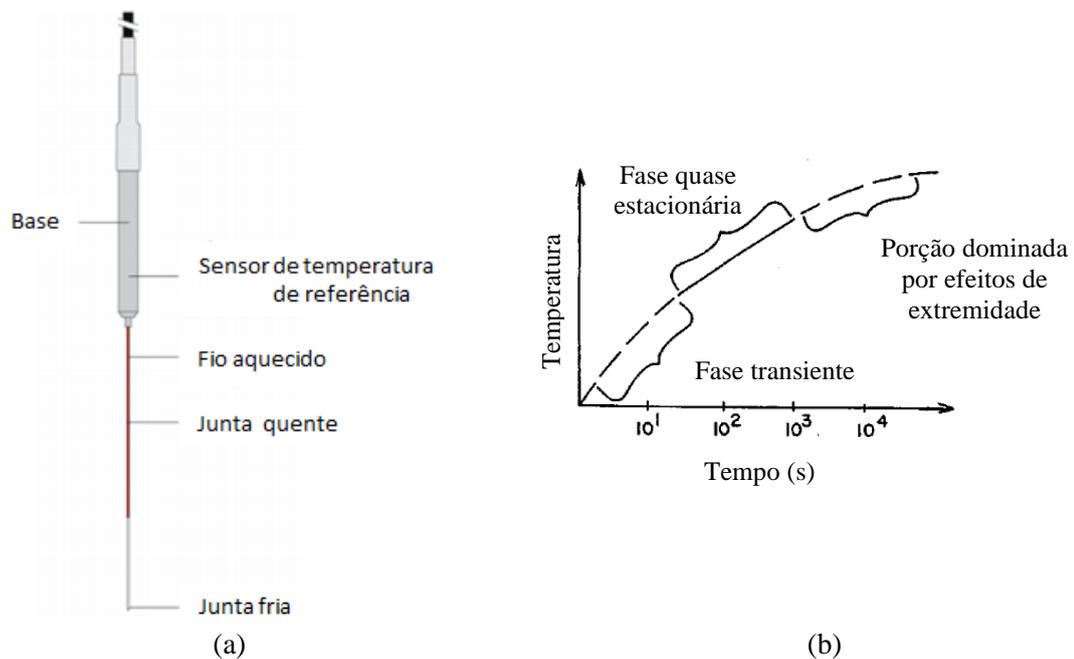
Além da possibilidade real da permeabilidade do solo variar com a profundidade, devido à heterogeneidade do solo, o processo real de transferência de calor pode ser afetado pelo fluxo de água subterrânea, discordando da simplificação que a transferência de calor no ensaio ocorre por condução pura. No entanto, os efeitos do fluxo sobre a temperatura podem não ser observados na escala de tempo dos ensaios de condutividade *in situ*, sendo uma alternativa conduzir simulações numéricas com duração de vários anos (CHIASSON *et al.*, 2000). Além disso, estes autores concluíram que quanto maior a velocidade de fluxo, menor o tempo para encontrar as condições estacionárias e menor a temperatura do estado estacionário, e a diferença

de um caso sem fluxo para um caso com fluxo se torna ainda maior com o tempo, enfatizando que a duração do ensaio influenciaria a condutividade térmica em ensaios *in situ*.

2.6.2 Ensaio de laboratório

Existem vários métodos para determinar a condutividade térmica em laboratório. Um dos mais simples e práticos aparatos consiste em uma sonda térmica composta por um fio fino que é aquecido para a realização do ensaio (Figura 2.26a). Este ensaio é interpretado pelo modelo da fonte linear infinita, que será discutido no Item 2.6.3. No início do ensaio, a resistência de contato e a capacidade térmica da sonda estão sendo superadas e a curva da variação da temperatura com o tempo ainda não é linear. Depois disso, a curva torna-se aproximadamente linear e atinge-se uma temperatura-tempo quase estacionária, conforme Figura 2.26b.

Figura 2.26: Ensaio *needle probe*: (a) sonda térmica e (b) resultado típico.



Fonte: (a) Adaptado de Low *et al.* (2015) e (b) ASTM D5334 (2005).

A Equação 24 é então aplicada a parte da curva quase estacionária para calcular a condutividade térmica. O tempo necessário para que ocorra a linearidade depende do contato entre a sonda e o solo, que será tão mais curto quando melhor o contato entre a sonda e o meio (LOW *et al.* 2015).

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln(t_2/t_1) \quad (24)$$

2.6.3 Modelos de interpretação dos ensaios térmicos

Desde que o primeiro dispositivo de medição móvel de TRT foi implementado na Suécia, em 1995, análises analíticas e numéricas têm sido desenvolvidas visando o aprimoramento da utilização dos TRTs. Os ensaios visam determinar principalmente a condutividade térmica do sistema por meio de dados da variação de temperatura do fluido *versus* tempo.

Os modelos de interpretação mais utilizados para avaliar resultados de ensaios térmicos são os modelos analíticos da fonte linear infinita e o da fonte cilíndrica infinita. Na Europa o modelo da fonte linear infinita é mais utilizado devido à facilidade de utilização, enquanto nos Estados Unidos é usual optar pelo da fonte cilíndrica infinita combinado à utilização de modelos numéricos (MONZÓ, 2011). O modelo da fonte linear infinita é recomendado pelo Eurocode (CEN/TC 341 N525, 2011). Apesar de serem os mais utilizados, esses dois modelos assumem algumas simplificações que devem ser levadas em consideração no caso a ser estudado:

- A transferência de calor ocorre somente por condução e a transferência por advecção é desconsiderada. Esta é uma simplificação delicada em casos em que a presença do fluxo de água subterrânea ocorre de maneira significativa;

- A transferência de calor ocorre simetricamente na direção radial e desconsidera-se a transferência na direção axial, que segundo esses modelos seria negligenciável.

Os modelos de interpretação são baseados em análises de transferência de calor em furos trocadores de calor, onde a relação comprimento/diâmetro é tipicamente de 500 a 1000 enquanto em estacas termoativas varia entre 10 e 50. Modelos que consideram fonte de calor infinita superestimam a mudança de temperatura de estacas geotérmicas a longo prazo e quanto menor for a relação comprimento/diâmetro, com relação à modelos que consideram fonte de calor linear finita (LOVERIDGE, 2012).

Assim, as variações de temperatura no eixo axial do furo podem ser importantes em casos em que a relação comprimento/diâmetro da estaca é baixa, principalmente a longo prazo. Os modelos que consideram fonte de calor finita levam em conta esse efeito.

Além da variação da temperatura na direção axial, as estacas trocadoras de calor podem estar submetidas à fluxo de água subterrânea. Na presença do fluxo, o processo físico que regerá a transferência de calor no solo será um acoplamento de condução e advecção. Alguns modelos

consideram o efeito da advecção devido à presença do fluxo: Diao *et al.* (2004) consideram uma fonte de calor infinita e Claesson & Hellström (2000) uma fonte finita.

Análises numéricas também podem ser utilizados para avaliar ensaios térmicos e permitem avaliar condições mais complexas como solos heterogêneos e presença de fluxo de água subterrânea.

2.6.3.1 Fonte linear infinita (ILS)

Este modelo considera um sólido infinito aquecido por uma fonte de calor linear infinita (KELVIN, 1882; INGERSOLL *et al.* 1954). Para a aplicação em furos trocadores de calor, assume-se que o trocador de calor se comporta como uma fonte de calor linear infinita, com taxa de calor por unidade de comprimento constante q_l inserido em um meio infinito, homogêneo e isotrópico. A variação de temperatura no meio (solo), ΔT_g , pode ser calculada pela Equação 25:

$$T(r, t) - T_0 = \Delta T_g = \frac{q_l}{4\pi\lambda} E_i\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (25)$$

onde $T_{r,t}$ é a temperatura do meio a um raio r da fonte de calor num tempo t , T_0 é a temperatura não perturbada do meio, λ é a condutividade térmica, α a difusividade térmica e γ a constante de Euler, aproximadamente igual a 0,5772.

Adotando a simplificação representada pela Equação 26, a Equação 25 se torna a Equação 27:

$$E_i\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad (26)$$

$$\Delta T_g \cong \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right) \quad (27)$$

Durante o ensaio TRT, calor q_l não é injetado diretamente no solo, mas sim através do fluido trocador de calor. Assim, a transferência de calor entre o fluido e o solo na borda do furo também deve ser contabilizada, o que é feito assumindo uma resistência térmica R_b constante

para o furo, que inclui efeitos do fluido, tubos e material de preenchimento do furo. Dessa forma, um acréscimo de temperatura no fluido é dado pela Equação 28 (LOVERIDGE, 2012):

$$\Delta T_f = \Delta T_g + q_l R_b \quad (28)$$

Substituindo 27 em 28, a variação da temperatura média do fluido se torna:

$$\Delta T_f(t) \cong \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + q_l R_b \quad (29)$$

onde r_b é o raio do furo.

A condutividade térmica pode ser estimada traçando a temperatura do fluido com o logaritmo natural do tempo, de acordo com as Equações 30 a 32:

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + b \quad (30)$$

$$T_f(t) = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi k} \quad (32)$$

sendo k o coeficiente angular da reta gerada e b o intercepto linear.

Por fim, pode-se determinar a resistência térmica do furo por meio do intercepto b e assumindo uma capacidade térmica volumétrica no cômputo da difusividade térmica, de acordo com a Equação 33:

$$R_b = \frac{b - T_0}{q_l} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (33)$$

Este modelo considera uma resistência térmica constante. No entanto, o ensaio TRT demora algumas horas para atingir um estado estacionário. Assim, as primeiras horas do ensaio são descartadas e o ensaio começa a ser analisado a partir de um tempo mínimo, t_{min} , em geral estimado adotando um número de Fourier (tempo normalizado), Fo , igual a 5, de acordo com a Equação 34:

$$Fo = \frac{\alpha t_{min}}{r^2} = 5 \quad (34)$$

Utilizando este critério, o tempo necessário para que o ensaio atinja o estado estacionário é da ordem de horas em furos trocadores de calor, enquanto em estacas com maiores diâmetros pode atingir dias e até mesmo semanas.

Assim, este modelo permite a obtenção da condutividade térmica efetiva e a resistência térmica do furo, que representa uma medida do desempenho de transferência de calor no furo (WAGNER *et al.*, 2012). Este modelo subestima a temperatura para tempos pequenos pois assume que a fonte de calor está no centro e não na circunferência do furo (LOVERIDGE, 2012).

Como o modelo descrito considera que ocorre somente condução no processo de transferência de calor durante os ensaios TRT, apesar da simplicidade e facilidade de aplicação, nos casos em que existe fluxo de água subterrâneo significativo a condutividade térmica obtida não é realista. A consideração de condução pura no processo de transferência de calor em projetos de trocadores de calor se deve às dificuldades encontradas na modelagem e computação da transferência de calor por convecção e na compreensão do fluxo de água subterrânea na prática (DIAO *et al.*, 2004).

2.6.3.2 Fonte cilíndrica infinita (ICS)

Este modelo foi inicialmente implementado por Carslaw & Jaeger (1947), apresentado por Ingersol *et al.* (1954). O modelo considera o furo trocador de calor como um cilindro *oco* infinito submetido a uma taxa de calor constante q_l , onde os tubos trocadores de calor são considerados como um tubo único com diâmetro equivalente. A teoria da fonte linear infinita é considerada como uma simplificação deste método (GEHLIN, 2002; MONZÓ, 2011). A variação de temperatura no meio, devido à fonte de temperatura é dada pela Equação 35:

$$\Delta T_g = \frac{q_l}{\lambda} G(Fo, p) \quad (35)$$

A função de Green G é função do número de Fourier Fo e da razão entre o raio onde a temperatura é calculada e o raio externo do furo, p , de acordo com a Equação 36:

$$p = \frac{r}{r_b} \quad (36)$$

A função de Green é descrita pela Equação 37:

$$G(Fo, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta \quad (37)$$

Onde

$$f(\beta) = (e^{-\beta^2 Fo} - 1) \cdot \frac{[J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (38)$$

sendo J_0 , J_1 , Y_0 , Y_1 são funções de Bessel do primeiro e segundo tipo.

Bernier (2001) apresentam uma simplificação para a teoria da fonte cilíndrica, com soluções para p igual a 1, 2, 5 e 10, obtidas através do ajuste das curvas dos dados apresentados por Ingersoll *et al.* (1954). Para p igual a 1, ou seja, quando o ponto onde se deseja determinar a temperatura coincide com a borda do furo, a variação da temperatura no solo pode ser obtida pela Equação 39:

$$\Delta T_g = \frac{q_l}{\lambda} 10^{(-0,89129+0,36081 \log Fo - 0,05508 \log^2 Fo + 3,59617 \times 10^{-3} \times \log^3 Fo)} \quad (39)$$

3.6.3.4 Fonte cilíndrica sólida infinita (ISCS)

Diferente do modelo clássico da fonte cilíndrica infinita, este modelo assume que o cilindro não é oco, mas sim preenchido com o mesmo material do meio que circunda o cilindro. Foi desenvolvido inicialmente para avaliar estacas com *loops* em espiral, onde as duas principais teorias, fonte linear infinita e fonte cilíndrica infinita não são válidas devido às suas simplificações. Assim como a maioria dos modelos de interpretação, este modelo considera as seguintes hipóteses (MAN *et al.*, 2010):

- O solo é considerado um meio infinito e homogêneo dentro e fora do cilindro e as propriedades termofísicas não mudam com a temperatura;
- O meio tem uma temperatura uniforme;

- A fonte de calor tem a forma de um cilindro e a espessura, massa e capacidade térmica da fonte de calor são desconsideradas. A taxa q_l é constante desde o tempo inicial.

Neste modelo, a transferência de calor ocorre tanto para o interior do cilindro quanto para a região ao redor, diferente do que ocorre no modelo clássico de fonte cilíndrica, que considera um cilindro oco, onde não ocorre transferência de calor para o seu interior. O aumento de temperatura obtido por este modelo se situa entre o resultado de temperatura obtido pelo modelo clássico da fonte linear infinita e o da fonte cilíndrica. Para o caso das estacas com tubos trocadores em espiral os autores mencionam que os modelos clássicos não podem ser usados devido à importante dimensão radial e capacidade térmica das estacas (MAN *et al.*, 2010).

Considerando um modelo unidimensional e fonte de calor infinita, o aumento de temperatura na fonte de calor, ou seja, na posição do cilindro, pode ser avaliado pela Equação 40 (MAN *et al.*, 2010):

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\lambda\Delta T_g}{q}\right) = & -2,321016 + 0,499615 \ln(Fo) - 0,027243 \ln^2(Fo) \\ & - 0,00525 \ln^3(Fo) + 0,000264311 \ln^4(Fo) \\ & + 0,00006873912 \ln^5(Fo) \end{aligned} \quad (40)$$

onde ΔT_g é a variação de temperatura do solo na interface com a estaca, e λ_g a condutividade térmica do solo.

Este modelo leva em consideração as dimensões radiais e a capacitância térmica do concreto da estaca (Zarrella *et al.*, 2013), e é sugerido em Loveridge & Powrie (2013) quando os tubos estão instalados mais próximos da borda da estaca (na periferia).

2.6.3.3 Modelo Resistivo-Capacitivo (RC)

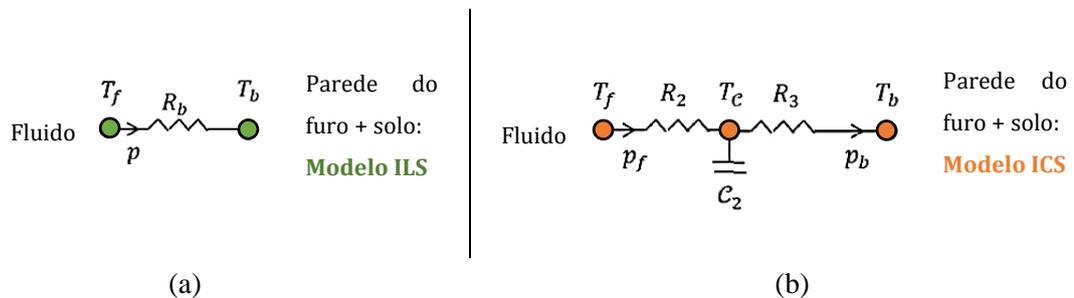
Este modelo foi proposto por Maragna & Loveridge (2021) para aplicação de ensaios TRT de curta duração para determinar a resistência térmica de estacas trocadoras de calor. Estes autores concluíram que se a condutividade térmica pode ser obtida por outro meio (TRT em um furo profundo de pequeno diâmetro), o tempo para o modelo RC convergir é muito reduzido, o que significa que a resistência de uma estaca trocadora de calor pode ser obtida por um ensaio

TRT com duração correspondente a um número de Fourier com intervalo aproximado de 2 a 2,5.

Em geral, o raio da estaca é muito maior do que o raio de um furo trocador de calor convencional. Neste caso, a capacitância térmica do concreto afeta o comportamento térmico a curto prazo das estacas trocadoras de calor. Para estacas de grande diâmetro, o modelo da fonte linear infinita superestima as variações de temperatura nas primeiras horas de ensaio, o que pode subestimar a capacidade de transferência de calor das estacas. Além disso, o tempo mínimo de duração do ensaio (t_{\min}) é muito maior no caso das estacas comparado aos furos de pequeno diâmetro, o que pode provocar a exclusão de uma parte considerável do ensaio (MARAGNA & LOVERIDGE, 2021).

Neste contexto, Maragna & Loveridge (2021) propuseram um modelo que considera a inércia térmica do concreto e pode ser aplicado em estacas com diâmetros bem maiores que 20 cm. A transferência de calor no concreto depende de uma capacitância linear, localizada entre as resistências 2 e 3 da Figura 2.27, e estimada pela Equação 41. A transferência de calor fora do concreto se baseia no modelo da fonte cilíndrica infinita.

Figura 2.27: Modelo puramente resistivo (fonte linear infinita) e (b) modelo resistivo-capacitivo proposto por Maragna & Loveridge (2021).



Fonte: Adaptado de Maragna e Loveridge (2021).

$$C = \pi (\rho_c c_c) r_b^2 \quad (41)$$

onde o produto $\rho_c c_c$ consiste na capacidade térmica volumétrica do concreto.

A potência injetada no fluido trocador de calor por metro linear p_f e a resistência R_2 são relacionadas pela Equação 42:

$$p_f = \frac{T_f - T_c}{R_2} \quad (42)$$

onde T_f é a temperatura média do fluido e T_c a temperatura no concreto.

A partir de um equilíbrio de energia no nó central (Figura 2.27 b) na temperatura T_c :

$$C \frac{dT_c}{dt} = p_f - p_b = \frac{T_f - T_c}{R_2} - \frac{T_c - T_b}{R_3} \quad (43)$$

onde p_b é a potência linear na parede da estaca e T_b é a temperatura do solo na parede da estaca.

Os valores de p_b podem ser estimados pela Equação 44:

$$p_b = p_f - C \frac{dT_c}{dt} \quad (44)$$

A taxa de aumento da temperatura no concreto com o tempo, dT_c/dt , pode ser obtida por meio das medidas de temperatura no centro das estacas testadas nesta tese durante os ensaios TRT, para determinação de p_b pela equação acima.

2.7 Fluxo de água subterrânea

No solo, a água se apresenta nas zonas não saturada e saturada, que são divididas pelo lençol freático. O termo “água subterrânea” se refere à água presente na zona saturada. O fluxo de água subterrânea ocorre como resultado das condições hidrológicas da área e está presente de maneira mais importante nos aquíferos, que podem ser confinados, limitados por duas ou mais camadas de materiais de baixa permeabilidade, e não confinados, limitados na superfície superior pelo lençol freático. Na prática, os furos onde ficam os trocadores de calor podem atravessar parcialmente aquíferos não confinados e a grandes profundidades aquíferos confinados (CHIASSON *et al.*, 2000).

A equação que governa o fluxo em um meio poroso é a lei de Darcy, e é comumente utilizada para modelar fluxo na zona saturada em sistemas de água subterrânea:

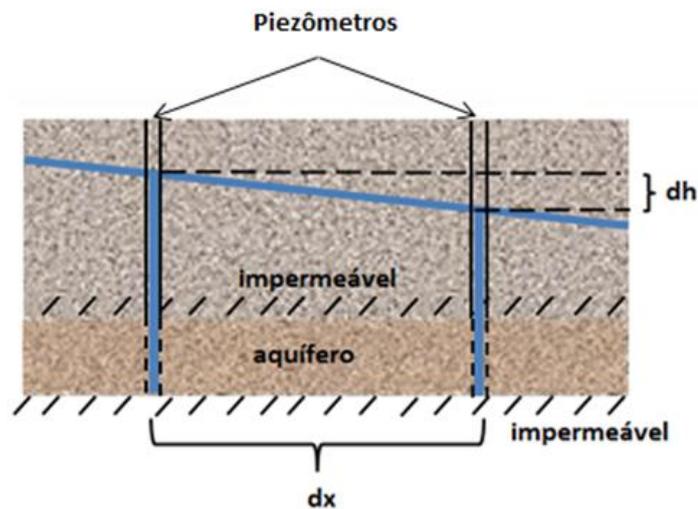
$$V = -kA \frac{dh}{dx} \quad (45)$$

onde V é a vazão ou fluxo, k é a condutividade hidráulica, A é a área da seção submetida ao fluxo e h a carga hidráulica. A parcela dh/dx consiste na razão entre a diferença de carga hidráulica entre dois pontos e a respectiva distância entre eles, denominada gradiente hidráulico, indicado na Figura 2.28. Usualmente a condutividade hidráulica também é denominada permeabilidade.

A velocidade do fluxo de água subterrânea é caracterizada pela velocidade de Darcy, cuja notação usualmente empregada em sua forma simplificada (DELERABLÉE, 2019) é dada pela Equação 46:

$$v = -k \frac{dh}{dx} \quad (46)$$

Figura 2.28: Ilustração das variáveis da lei de Darcy.



Fonte: Autora.

Assim, a magnitude do fluxo depende da condutividade hidráulica e do gradiente hidráulico do local. O gradiente hidráulico é o gerador do fluxo e uma diferença de potencial zero implica que não há fluxo no meio. Assim, o gradiente é independente do meio, sendo apenas função das condições hidrogeológicas como a presença de rios, canais e drenos. Por outro lado, a condutividade hidráulica depende das propriedades do meio poroso e das propriedades do fluido, e reflete a capacidade de circulação do fluido no meio (DELERABLÉE, 2019). A Tabela 2.6a apresenta valores de condutividade hidráulica para diferentes solos.

Tabela 2.6: Valores de condutividade hidráulica para diferentes solos.

K (m/s)		10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹¹											
GRANULOMETRIA	Homog.	Cascalho puro		Areia pura	Areia muito fina		Silte	Argila					
	Variada	Cascalho	Cascalho e areia	Areia e argila siltosa									
GRAU DE PERMEABILIDADE		MUITO BOA		BOA	RUIM				NULA				
TIPOS DE FORMAÇÃO		Permeável				Semi-permeável				Impermeável			
						↓ Limites convencionais ↓							

Fonte: Adaptado de Syntec (2017).

De acordo com Syntec (2017), a faixa de valores de condutividade hidráulica de interesse para estruturas geotérmicas está no intervalo de 10^{-2} a 10^{-7} m/s, pois condutividades muito baixas implicam em baixas velocidades de fluxo, e, portanto, trocas de calor por condução.

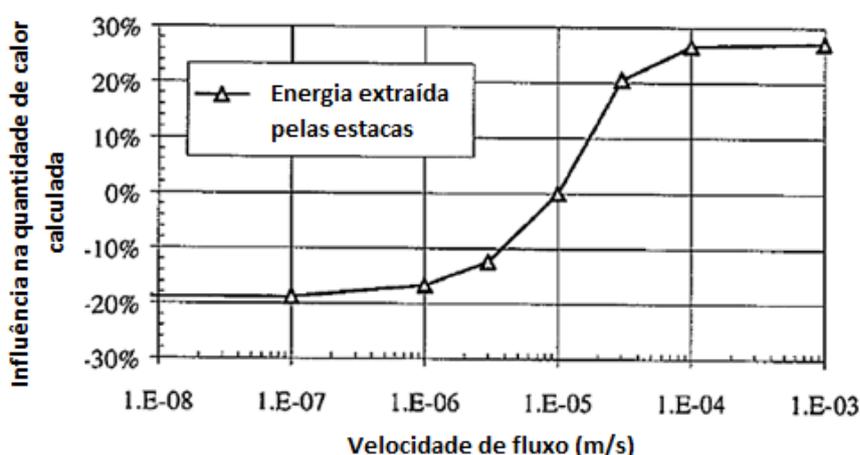
2.7.1 Efeito do fluxo de água subterrânea no comportamento térmico de estacas geotérmicas

Quando existe fluxo de água subterrânea, a transferência de calor entre a estaca de energia e o meio circundante se torna mais complexa e compreende condução pela matriz sólida e água nos poros, e advecção de calor pela água subterrânea em movimento (ZHANG *et al.* 2013). Em geral, os métodos de projeto de trocadores de calor no solo e de medição da condutividade *in situ* são baseados em modelos que só consideram a condução de calor. Dessa forma, a análise do problema de transferência de calor se torna mais complexa de forma que também se tornam mais complexos o projeto e a determinação da condutividade térmica. Por outro lado, espera-se que o fluxo seja benéfico na performance térmica dos trocadores de calor, ao passo que aliviaria o possível acúmulo de calor em torno dos furos ao longo do tempo (CHIASSON *et al.*, 2000; DIAO *et al.*, 2004).

O projeto de estacas geotérmicas deve levar em consideração uma definição prévia do contexto geológico e hidrogeológico onde as estacas serão instaladas, sendo essencial determinar, no caso da presença de um aquífero, a velocidade de fluxo de água subterrânea, a fim de especificar os princípios de utilização da central energética (FROMENTIN & PAHUD, 1997).

Em um sistema onde há balanço de energia, no verão a energia térmica do edifício é depositada no solo e no inverno ocorre a retirada de energia do solo, que vai sendo aquecido e resfriado, respectivamente, ao longo da estação. No entanto, o grau de aquecimento ou resfriamento do solo dependerá do fluxo de água subterrânea. No inverno, como a energia térmica é extraída do solo a fim de aquecer o edifício, é importante que exista uma recarga térmica advinda da estação anterior assim como no verão seguinte é vantajoso que a energia térmica seja depositada em um solo mais frio. Por outro lado, em um sistema não balanceado, se houver somente depósito de energia térmica no solo, a temperatura aumentará ao longo do tempo; se somente extração, a temperatura diminuirá. Este desvio térmico deve ser quantificado de modo a saber se a temperatura do solo atingirá um valor crítico durante a vida útil do edifício (DELERABLÉE, 2019). Neste caso, a presença do fluxo de água subterrânea pode dissipar a temperatura no solo que circunda a fundação e potencializar a transferência de calor, fazendo com que o sistema seja capaz de absorver mais carga de aquecimento ou resfriamento, melhorando o desempenho das estacas geotérmicas. A velocidade do fluxo de água subterrânea influencia a capacidade de armazenar energia térmica a longo prazo de estacas geotérmicas. De acordo com Fromentin & Pahud (1997), velocidades de fluxo de 0,5 a 1,0 m/dia numa camada permeável atravessada pelas estacas geotérmicas seriam suficientes para dispersar a energia transferida e impedir o armazenamento de energia térmica. Por outro lado, de acordo com o resultado apresentado por Fromentin *et al.* (1999), na Figura 2.29, para velocidades abaixo de 1×10^{-6} m/s (ou 0,1 m/dia) o fluxo não influencia as trocas térmicas, e para velocidades maiores que 1×10^{-4} m/s (10 m/dia) o benefício já não aumenta mais.

Figura 2.29 - Efeito da velocidade de Darcy na sobre a quantidade de energia extraída pelas estacas geotérmicas.



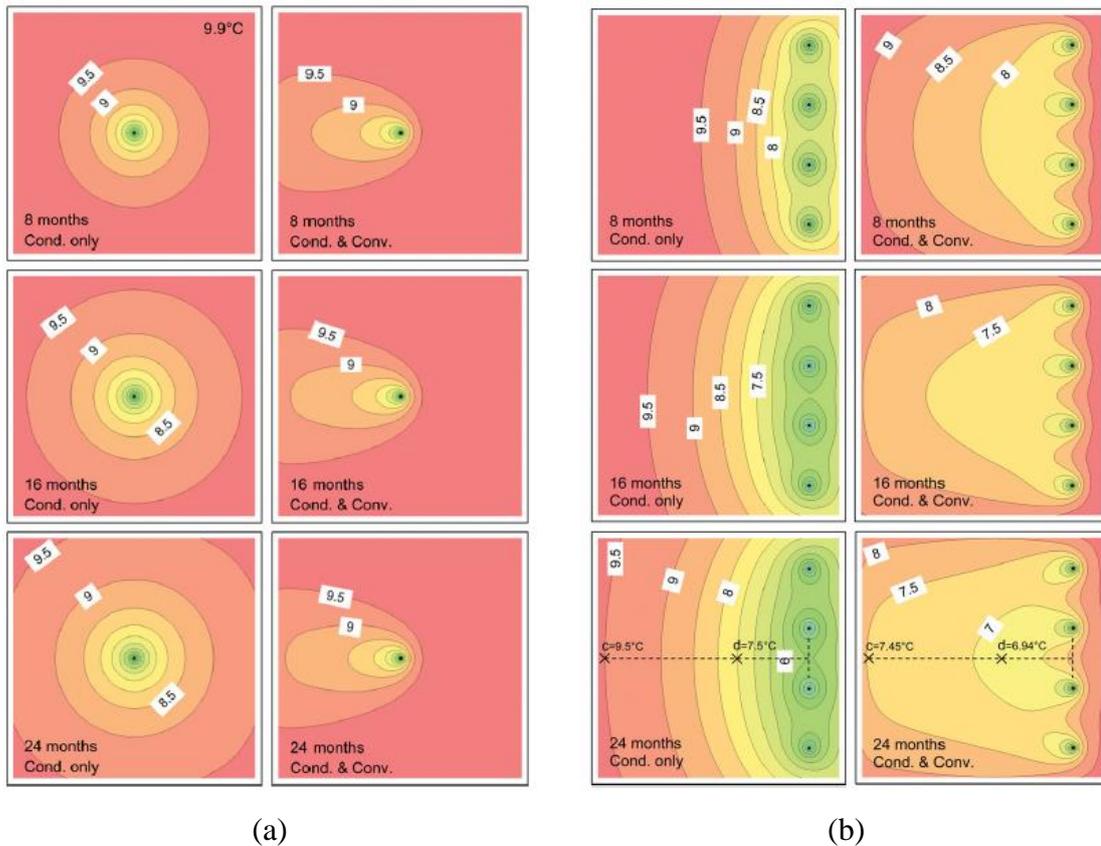
Fonte: Adaptado de Fromentin *et al.* (1999).

Utilizando um modelo bidimensional em elementos finitos, Chiasson *et al.* (2000) perceberam que o fluxo tem um efeito significativo na performance de furos trocadores de calor onde ocorrem materiais geológicos com elevada condutividade hidráulica e rochas fraturadas.

Para avaliar a performance da troca térmica de uma estaca trocadora de calor em uma região rica em água subterrânea, You *et al.* (2017) fizeram medidas experimentais e simulações numéricas. Os resultados obtidos indicaram que a condutividade térmica aumenta com a velocidade de fluxo. Para um aumento de velocidade de fluxo de 0 a 5×10^{-8} m/s (0,004 m/dia), a condutividade térmica aumentou de 2,03 W/(mK) a 2,25 W/(mK), representando quase 10%, indicando que mesmo velocidades de fluxo baixas podem ter efeito significativo na transferência de calor da estaca.

Tolooiyan & Hemmingway (2012) analisaram o efeito do fluxo de água subterrânea na frente térmica criada por furos trocadores de calor, para o caso de aquecimento (retirada de calor do solo). Os resultados indicam que quando não há fluxo de água subterrânea e a transferência de calor ocorre por condução, a temperatura se distribui uniformemente ao redor dos furos. Quando há fluxo, o calor é carregado na direção do fluxo, ambos resultados também encontrados por You *et al.* (2017). Mesmo baixas velocidades de fluxo como 0,16 m/dia ($1,9 \times 10^{-6}$ m/s) mostraram exercer influência importante na distribuição de temperatura, como apresenta a Figura 2.30a. Estes autores também analisaram o efeito do fluxo em um sistema com vários furos (Figura 2.30b) e concluíram que para aproveitar ao máximo o benefício de recarga térmica que o fluxo de água subterrânea proporciona, em especial em sistemas não balanceados, os furos devem ser orientados perpendicularmente à direção do fluxo, de modo a reduzir a interação térmica entre os furos induzida pelo fluxo.

Figura 2.30: Distribuição do fluxo térmico para (a) um furo e (b) vários furos, com velocidade de fluxo de água iguais a 0 e 0,16 m/dia.



Fonte: Tolooyan & Hemmingway (2012).

2.8 Ensaios hidráulicos

Dos parâmetros hidráulicos necessários ao projeto de trocadores de calor com solo para uso de geotermia superficial, a condutividade hidráulica é um parâmetro essencial, pois junto ao gradiente hidráulico fornece a velocidade do fluxo de água subterrânea, segundo a lei de Darcy. Para a determinação da condutividade hidráulica podem ser realizados ensaios de laboratório e de campo. Em laboratório podem ser conduzidos os ensaios de permeabilidade de carga constante ou variável. Para os ensaios de campo existem algumas opções, valendo destacar os *slug* e *bail tests* e os ensaios de dissipação de poro-pressão. Além disso, a condutividade hidráulica também pode ser obtida por correlação através da curva granulométrica.

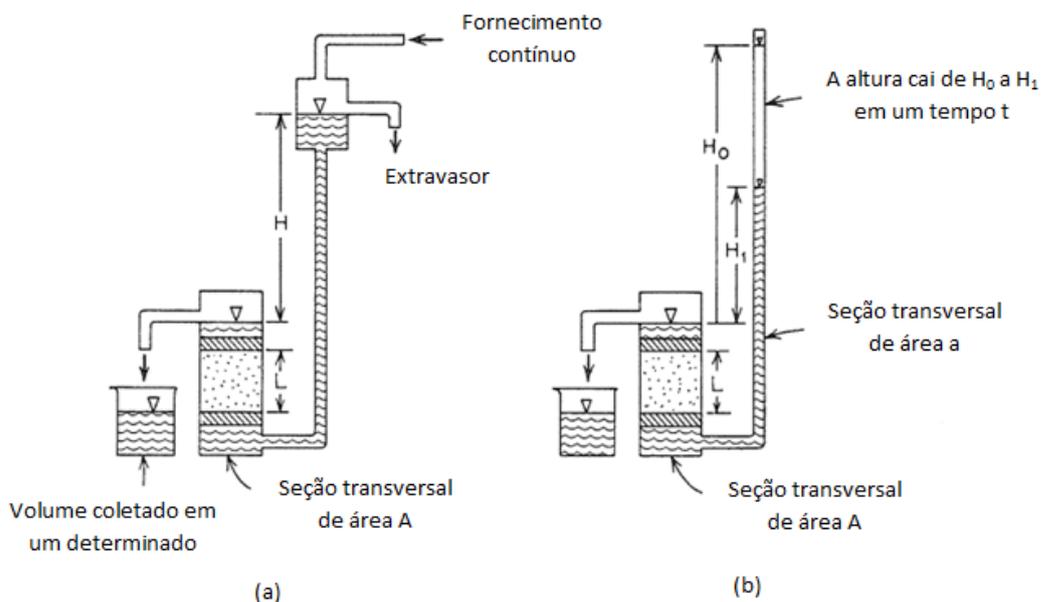
Nos ensaios de laboratório, as condições de contorno são mais controladas, mas as amostras representam apenas pontualmente o comportamento do maciço de solo, devido à sua usual heterogeneidade. Por outro lado, os ensaios de campo fornecem uma medida mais representativa das condições reais, porém, há menor controle das condições de contorno.

Enquanto a condutividade hidráulica pode ser determinada por ensaios de laboratório e de campo, o gradiente hidráulico deve ser determinado através de medições da carga hidráulica em poços de monitoramento *in situ*.

2.8.1 Ensaios de permeabilidade em laboratório

Para determinar a condutividade hidráulica em laboratório são realizados ensaios que simulam a percolação do fluxo de água através de uma amostra de solo, submetida a uma carga hidráulica constante ou variável, como ilustra a Figura 2.31. Os ensaios de carga constante são indicados para solos arenosos, mais especificamente solos granulares contendo no máximo 10% em massa de material que passa na peneira 0,075 mm (NBR 13292 – ABNT, 2021). Por outro lado, os ensaios de carga variável são indicados para solos argilosos, com condutividade hidráulica menor do que 10^{-5} m/s (NBR 14545 – ABNT, 2021). No permeâmetro de carga constante a carga hidráulica H é mantida e mede-se o volume de água que percola em um determinado tempo. Em solos com permeabilidade muito baixa, a determinação da condutividade hidráulica por meio de ensaios a carga constante é pouco precisa, sendo recomendado o ensaio de carga variável.

Figura 2.31 - Permeâmetros de (a) carga constante e (b) carga variável e respectivas equações para a determinação da condutividade hidráulica.



Fonte: Adaptado de Freeze & Cherry (1979).

2.8.2 Slug e Bail tests

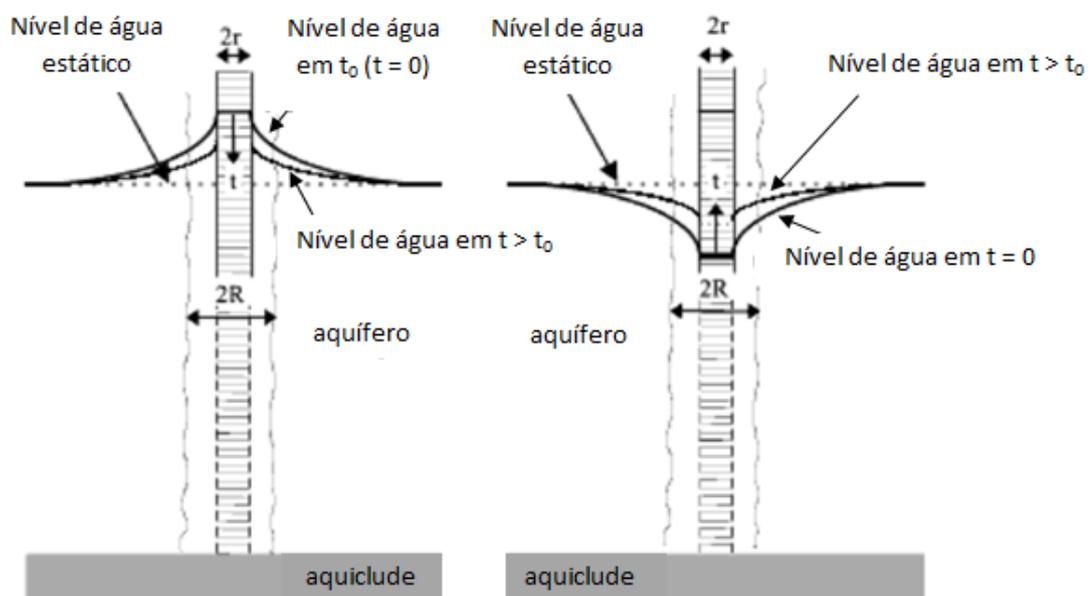
Os ensaios *Slug* e *Bail* (conhecidos como *slug* e *bail tests*), são realizados *in situ* em poços de monitoramento, onde é inserido ou removido um volume conhecido de água ou um cilindro sólido, provocando mudança imediata do nível d'água. O retorno do nível de água à condição inicial é monitorado ao longo do tempo. Como requisitos para a execução dos ensaios, o nível de água deve estar estável e para o monitoramento manual do nível a condutividade hidráulica não deve ser elevada, caso contrário devem ser previstos transdutores de pressão (Fetter 2001).

Para a realização dos ensaios *Slug* e *Bail* são seguidos os seguintes procedimentos:

- Faz-se a medição do nível de água estático antes do teste;
- Inseri-se um tarugo sólido (ou um volume de água conhecida) e mede-se o nível de água, dando início ao *slug test*;
- Monitora-se o rebaixamento do nível de água ao longo do tempo, até atingir o nível estático;
- Retira-se o tarugo, caracterizando o início do *bail test*;
- Monitora-se a recuperação do nível de água ao longo do tempo.

A Figura 2.32 apresenta um esquema dos ensaios *slug* e *bail*, onde o raio do revestimento do poço e o raio do poço são definidos pelas letras r e R , respectivamente.

Figura 2.32: *Slug* e *bail tests*.



Fonte: Adaptado de Thomas Rohrich & Waterloo Hydrogeologic Inc. (2002).

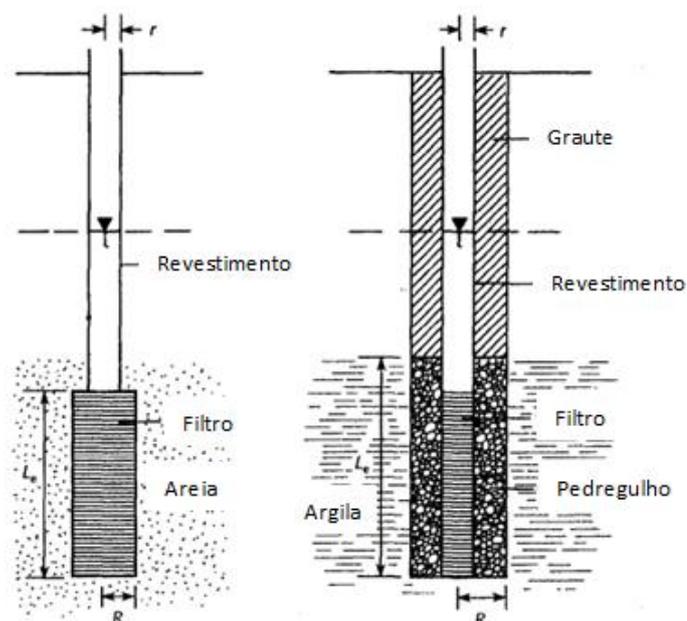
Os resultados obtidos nos ensaios podem ser interpretados segundo alguns métodos, sendo os métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) os mais comuns.

O Método de Hvorslev (1951) considera poços parcialmente penetrantes em aquífero confinado, homogêneo e isotrópico, mas pode ser usado em aquíferos livres, se o nível d'água estiver muito acima do filtro. A Figura 2.33 ilustra a configuração do poço para o método de Hvorslev (1951), para solos arenosos e argilosos.

Sendo h_0 a profundidade do nível d'água logo após a inserção do tarugo e h a profundidade ao longo do tempo, após h_0 , plota-se a razão h/h_0 ao longo do tempo em escala logarítmica *versus* tempo. A curva assim obtida fornece o tempo necessário para o nível d'água se recuperar ou rebaixar 37% em relação à profundidade inicial, ou seja, o tempo correspondente à razão h/h_0 igual a 0,37, denominado t_{37} . Para filtros com comprimentos maiores que oito vezes o raio do poço, $L_e/R > 8$, a condutividade hidráulica pode ser obtida de acordo com a Equação 47. Tal condição é normalmente encontrada nos poços de monitoramento, onde o comprimento do filtro é consideravelmente maior que o raio do poço (PEDE, 2004).

$$k = \frac{r^2 \ln(L_e/R)}{2L_e t_{37}} \quad (47)$$

Figura 2.33: Configuração do poço para o método de Hvorslev.



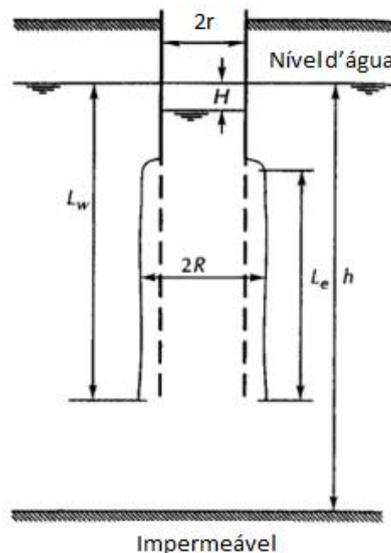
Fonte: Adaptado de Fetter (2001).

O método de Bouwer & Rice (1976) é aplicado a poços totalmente ou parcialmente penetrantes em aquífero livre, homogêneo, isotrópico e incompressível. Contudo, pode ser usado em aquíferos confinados se o topo do filtro estiver a alguma distância abaixo da base da camada confinante (FETTER, 2001). A condutividade hidráulica pode ser obtida pela Equação 48:

$$k = \frac{r^2 \ln(R_e/R)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \frac{H_0}{H_t} \quad (48)$$

onde r corresponde ao raio do revestimento, R_e é o raio efetivo da dissipação da condutividade hidráulica, R é o raio que envolve o pedregulho, L_e o comprimento da seção do filtro, H_0 a elevação no instante inicial e H_t a elevação num instante de tempo t , como indicado na Figura 2.34.

Figura 2.34: Configuração do poço para o método de Bouwer & Rice (1976).



Fonte: Adaptado de Fetter (2001).

O método de Bouwer & Rice (1976) foi concebido para ensaios tipo *bail*, no qual a retirada do tarugo provoca a entrada de água do aquífero para o poço, mas também pode ser utilizado para ensaios do tipo *slug*, uma vez que o nível de água estático está acima do filtro (FETTER, 2001).

2.8.3 Correlações

Hazen (1911) *apud* Freeze & Cherry (1979) propôs uma correlação para determinar a condutividade hidráulica de areias de acordo com a granulometria:

$$k = 100 D_{10}^2 \quad (49)$$

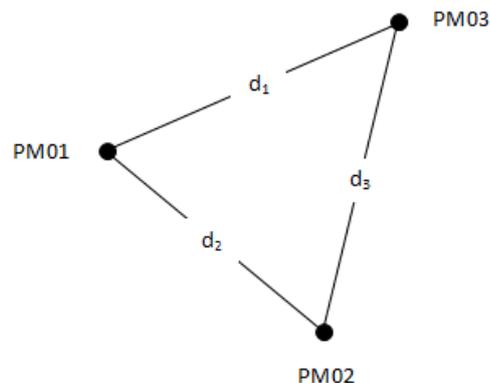
onde k é dado em cm/s, D_{10} é o diâmetro da partícula do solo na curva granulométrica correspondente à porcentagem passante igual a 10%.

O D_{10} é também chamado de *diâmetro efetivo do solo*, devido à sua boa correlação com a permeabilidade do solo, verificada experimentalmente (PINTO, 2006). Essa correlação é utilizada para solos com $D_{60}/D_{10} \leq 2$ (DELERABLÉE, 2019). De acordo com Freeze & Cherry (1979), ela foi originalmente determinada para areias uniformes, mas pode fornecer estimativas úteis para a maioria dos solos na faixa de areia fina a cascalho.

2.8.4 Gradiente hidráulico e direção do fluxo de água subterrânea

O gradiente hidráulico consiste na variação de carga hidráulica por unidade de distância numa dada direção, enquanto a direção do fluxo indica a direção de movimento da água subterrânea. Tanto o gradiente hidráulico como a direção do fluxo podem ser determinados com o auxílio de três poços de monitoramento (PM), dispostos em um arranjo triangular. Para isso devem ser conhecidos: a posição geográfica relativa dos poços, a distância entre eles no plano horizontal, (d_i) e a carga hidráulica em cada poço (CH_i). Heath (2004) descreve os passos para determinar manualmente esses dois parâmetros, conforme esquema da Figura 2.35:

Figura 2.35: Esquema para determinar o gradiente hidráulico e a direção do fluxo.



Fonte: Autora.

- a) Identificar o poço que tem a carga hidráulica com valor intermediário;
- b) Calcular a posição entre os poços de maior e menor carga hidráulica onde a carga é a mesma do poço com carga intermediária;
- c) Traçar uma reta entre o poço com carga intermediária e o ponto definido em (b). Esta linha representa uma linha equipotencial, onde todos os pontos possuem a mesma carga hidráulica;
- d) Traçar uma reta perpendicular à equipotencial passando pelo poço de maior carga hidráulica ou menor carga hidráulica. Esta linha define a direção do fluxo de água subterrânea;
- e) Para encontrar o gradiente hidráulico, basta dividir a diferença de carga hidráulica do poço e da equipotencial e dividir pela distância entre eles.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo descrever os procedimentos experimentais adotados na produção deste trabalho, sendo estruturado sequencialmente nos seguintes assuntos:

- Contextualização do edifício CICS;
- Investigações de campo e laboratório realizadas no CICS, a fim de determinar as condições hidráulicas e geológicas do subsolo;
- Preparação e execução das estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua do CICS, tanto do edifício principal como das estacas piloto;
- Ensaios nas estacas piloto: um ensaio de carregamento mecânico (prova de carga estática), um ensaio termomecânico e um ensaio térmico na estaca Triplo U, e ensaios de resposta térmica (TRTs) em cinco estacas piloto;
- Ensaios em modelo físico de seção de estaca trocadora de calor, inserida em solo arenoso na condição seca, saturada e com diferentes velocidades de fluxo de água.

3.1 Edifício CICS

O edifício CICS - Centro de Inovação de Construção Sustentável - consiste em um edifício que contará com laboratórios, salas de reunião e espaço multiuso para exposições, a ser construído na Universidade de São Paulo, no *campus* Butantã, na cidade de São Paulo. No CICS serão testadas diferentes soluções inovadoras de baixo impacto ambiental, com o objetivo de acelerar a pesquisa e a inovação da sustentabilidade na cadeia produtiva da construção. O CICS é desenvolvido por professores, pesquisadores, estudantes da USP e de outras Universidades e por profissionais da indústria, para em conjunto resolverem problemas complexos de pesquisa, de desenvolvimento e inovação. O uso de sistemas de estacas trocadoras de calor para fins de climatização será uma das soluções sustentáveis que serão avaliadas neste edifício (CICS, 2021).

A construção do CICS possibilitará a aplicação de sistemas de climatização por meio de estacas trocadoras de calor pela primeira vez em um edifício no Brasil. Assim, esta pesquisa constitui uma oportunidade pioneira e de extrema relevância para avaliar a viabilidade da utilização de sistemas de climatização por estacas trocadoras de calor em solos e clima brasileiros. A Figura 3.1 apresenta uma foto do local de implantação do edifício antes da construção das estacas, em 2018.

Figura 3.1: Local de implantação do edifício principal do CICS.



Fonte: Autora.

O projeto arquitetônico do CICS é apresentado na Figura 3.2: o edifício 1 será construído sobre as estacas hélice contínua, o edifício 2 será um prédio de escadas a ser construído sobre as estacas tubulares metálicas e o edifício 3 já existe e será apenas reformado.

Figura 3.2: Projeto arquitetônico 3D do CICS: Vista (a) frontal e (b) lateral.



(a)

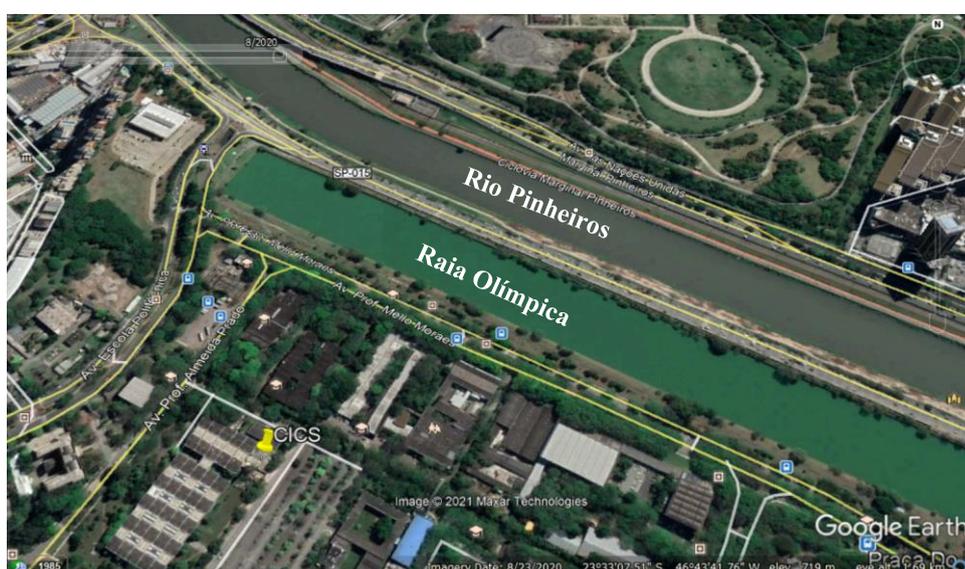


(b)

Fonte: CICS (2021).

O CICS está localizado próximo à Raia Olímpica da USP e ao Rio Pinheiros, no *campus* da USP na Cidade Universitária (Figura 3.3). Considerando a proximidade do CICS desses corpos d'água e que o grau de saturação e fluxo de água subterrânea são fatores-chave a serem avaliados no projeto e desempenho das estacas trocadoras de calor, investigações de campo foram conduzidas no local do CICS a fim de quantificar o regime de fluxo e as características das camadas do subsolo.

Figura 3.3: Localização do CICS na Universidade de São Paulo *campus* Butantã – proximidade com a raia olímpica e o Rio Pinheiros.



Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2021).

3.2 Investigações experimentais das condições geológicas e hidráulicas do subsolo do CICS

Devido às condições climáticas do local de implementação das estacas trocadoras de calor, o sistema geotérmico deve operar preferencialmente no modo de resfriamento. Diferente de sistemas com operação sazonal, onde a temperatura do subsolo pode ser recuperada após cada estação, sabe-se que a elevada permeabilidade e gradiente hidráulico são vantajosos em sistemas com um modo único de operação, de modo a promover melhor recuperação térmica do solo. Nesse contexto, são necessárias investigações das condições hidráulicas, como condutividade hidráulica, direção do fluxo da água subterrânea e velocidade do fluxo. Para determinar esses parâmetros, também é importante investigar os estratos geológicos para fornecer os materiais em contato com as estacas trocadoras de calor. Essas investigações foram

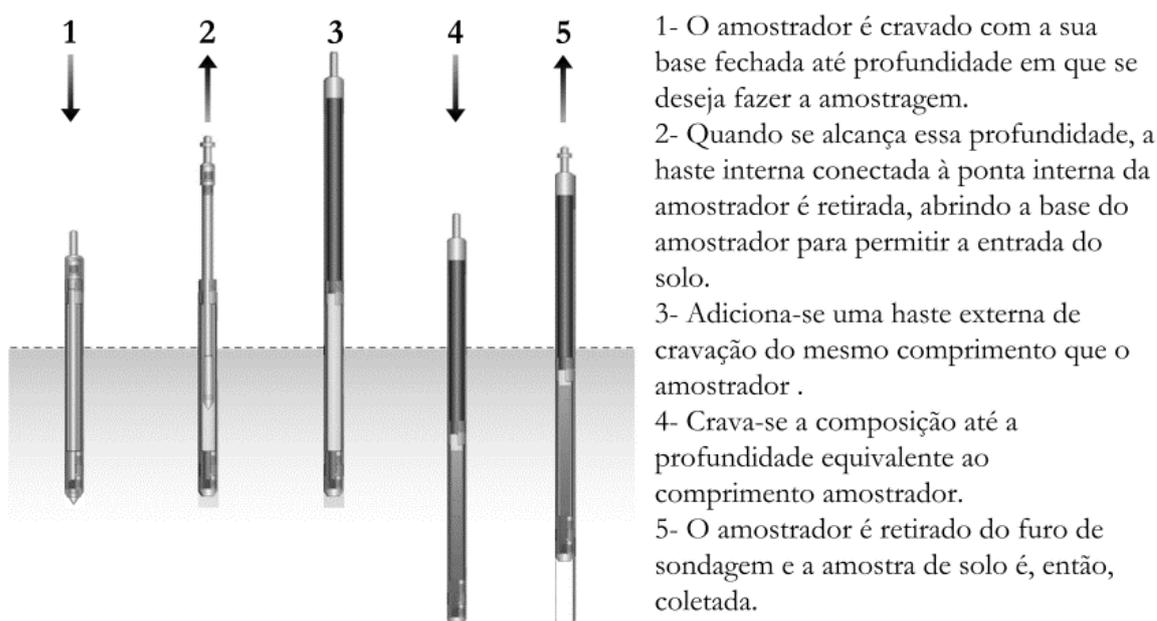
realizadas por meio de ensaios de campo e de laboratório em agosto de 2019, período de seca em São Paulo.

3.2.1 Amostragem

A investigação hidráulica do subsolo foi realizada com base em amostragem e poços de monitoramento (PMs). Para a amostragem, foi utilizada a técnica de amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para coletar amostras representativas do perfil do solo, incluindo a zona saturada. As amostras de solo foram utilizadas para classificação de solos e para definir o perfil hidroestratigráfico, e orientaram a instalação dos poços de monitoramento (RIYIS *et al.*, 2019).

A técnica de ASPC combina os métodos *direct push* e *piston sampler*: o *direct push* é uma técnica de perfuração recomendada para amostragem de solo de subsuperfície, e a técnica de *piston sampler* é uma das metodologias utilizadas. O amostrador geralmente tem 1,30 m de comprimento, 55 mm de diâmetro externo e 46 mm de diâmetro interno. Contém um *liner*, um tubo de plástico transparente feito de PEAD ou PVC, onde as amostras de solo são recuperadas após a perfuração e retirada da composição. Os revestimentos usados foram de 1,20 de comprimento e com diâmetro externo de 44 mm (GICHETI *et al.*, 2015). A operação do método *direct push-piston sampler* é apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4: Funcionamento da técnica Direct push-piston sampler.



Fonte: Giacheti *et al.* (2015).

Embora a ASPC seja geralmente empregada na investigação de alta resolução de áreas contaminadas (RIYIS *et al.*, 2019), sua utilização neste estudo foi benéfica porque forneceu o perfil do subsolo e permitiu a avaliação da heterogeneidade do perfil e possíveis variações na condutividade hidráulica. A Figura 3.5 mostra alguns registros feitos durante a perfuração e amostragem.

Figura 3.5: Perfuração e amostragem: (a) perfuração com o amostrador, (b) perfuração com o trado, (c) inserção do liner no amostrador, (d) core catcher, (e) abertura do liner após amostragem e (f) análise tátil-visual do solo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autora.

Após a amostragem, um poço de monitoramento foi instalado em cada furo. Em seguida, cada perfil de amostragem foi referido ao poço de monitoramento correspondente. O PM-1 foi o primeiro e mais profundo perfil amostrado e guiou a profundidade dos outros poços, PM-1A, PM-2 e PM-3, já que pelo menos três poços são necessários para fornecer o gradiente hidráulico. A Figura 3.6 mostra as amostras de solo obtidas no PM-1, PM-2 e PM-3. O PM-1A foi perfurado adjacente a PM-1 e, portanto, não foi apresentado.

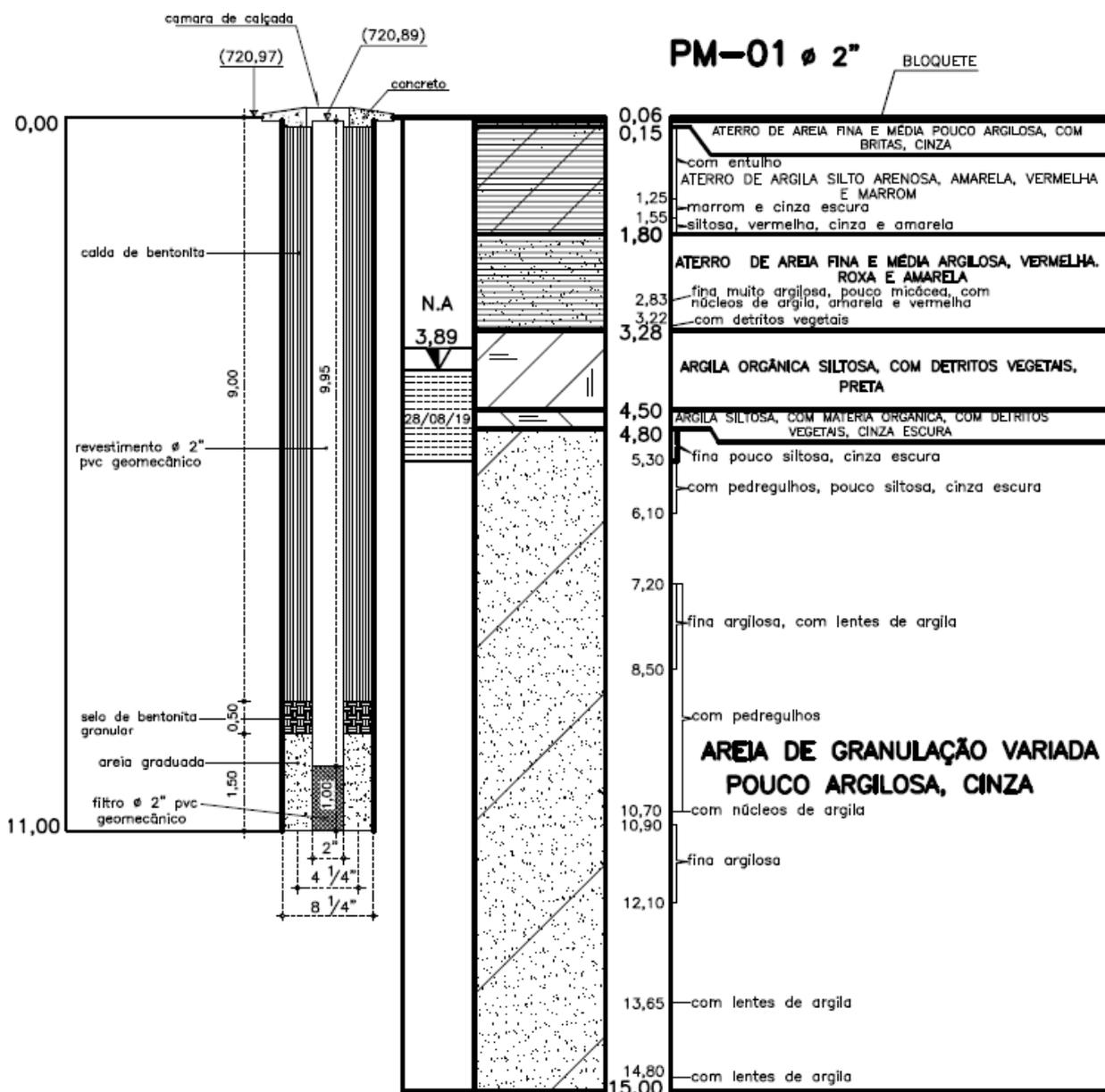
Figura 3.6: *Liners* coletados durante a amostragem para instalação dos poços PM-1, PM-2 e PM-3.



Fonte: Pessin *et al.* (2022).

Observações durante a amostragem de solo do PM-1 indicaram uma camada uniforme e fina de areia em torno de 5 a 6 m de profundidade. De acordo com as estimativas de campo, esta camada forneceria a maior condutividade hidráulica de todo o perfil. A fim de determinar a condutividade hidráulica desta camada (através de *slug/bail tests*), decidiu-se instalar a seção filtrante dos outros três poços de monitoramento (PM-1A, PM-2 e PM-3) nesta camada. Por outro lado, no PM-1, a seção filtrante foi posicionada na camada que se apresentava a mais representativa do perfil arenoso, de 10 a 11 m de profundidade.

Figura 3.7: PM-1 com o detalhamento das camadas obtido por meio da amostragem de perfil completo.



Fonte: Engesolos (2019).

3.2.2 Poços de monitoramento

Os poços de monitoramento PM1a, PM2 e PM3 com os respectivos perfis de solo são apresentados no Anexo A, e a Tabela 3.1 resume as características de cada um. O nível de água instantâneo (NA) foi medido de um a dois dias após a instalação dos poços e pode ter envolvido perturbações causadas pela perfuração, instalação e desenvolvimento do poço. No entanto, o

NA também foi medido durante os *slug/bail tests* realizados alguns dias após a execução dos poços e forneceu uma leitura mais confiável.

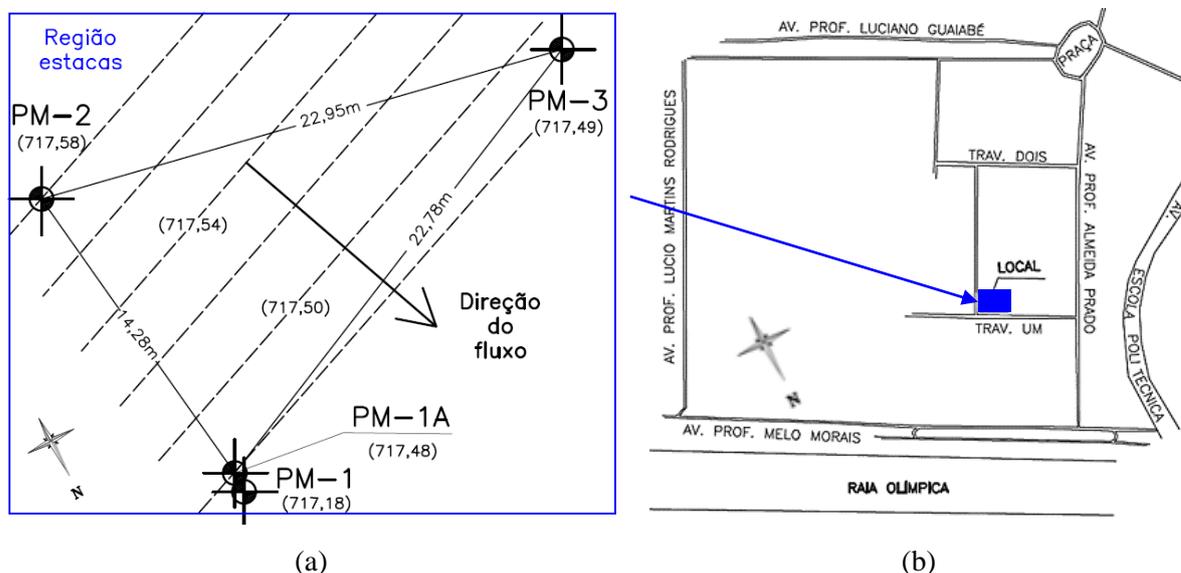
Tabela 3.1: Características dos poços de monitoramento (PM).

Poço de monitoramento	Profundidade (m)	Cota de topo (m)	Posição da seção filtrante (m)	NA instantâneo (m)	NA dos <i>slug/bail tests</i> (m)	Carga total dos <i>Slug/bail tests</i> (m)
PM-1	15,0	720,89	10,0 – 11,0	3,89	3,71	717,18
PM-1A	6,0	720,88	5,0 – 6,0	3,31	3,40	717,48
PM-2	7,2	720,68	5,0 – 6,0	3,12	3,10	717,58
PM-3	7,2	721,03	5,0 – 6,0	3,45	3,54	717,49

Fonte: Autora.

Os poços de monitoramento foram instalados de acordo com a NBR 15495-1 (2007) e executados no terreno do CICS, onde posteriormente foram instaladas as estacas de trocadores de calor. A posição relativa entre os poços é mostrada na Figura 3.8a e um plano de situação para essa região na Figura 3.8b. A direção do fluxo e as equipotenciais foram obtidas através dos poços localizados em arranjo triangular, conforme procedimento descrito em Heath (2004). Foi possível estimar um gradiente hidráulico através do traçado equipotencial igual a 7×10^{-3} m/m.

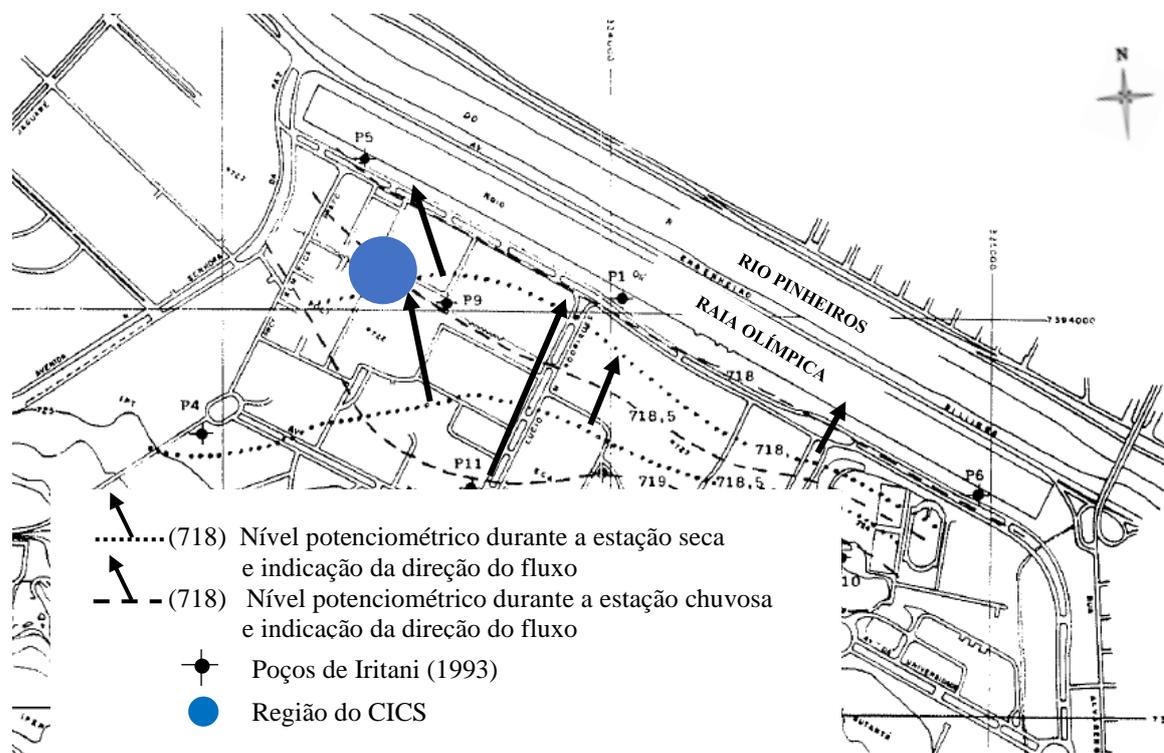
Figura 3.8: Localização dos poços de monitoramento: (a) localização relativa e (b) planta de situação (sem escala).



Fonte: (a) Autora e (b) Engesolos (2019).

Iritani (1993) caracterizou o fluxo regional de uma área da USP que abrange o CICS. Embora os resultados não se refiram à mesma unidade hidroestratigráfica do presente estudo, o fluxo regional aponta na mesma direção para a estação seca, conforme mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9: Potenciometria e linhas de fluxo no entorno da Raia Olímpica para estação chuvosa e seca.

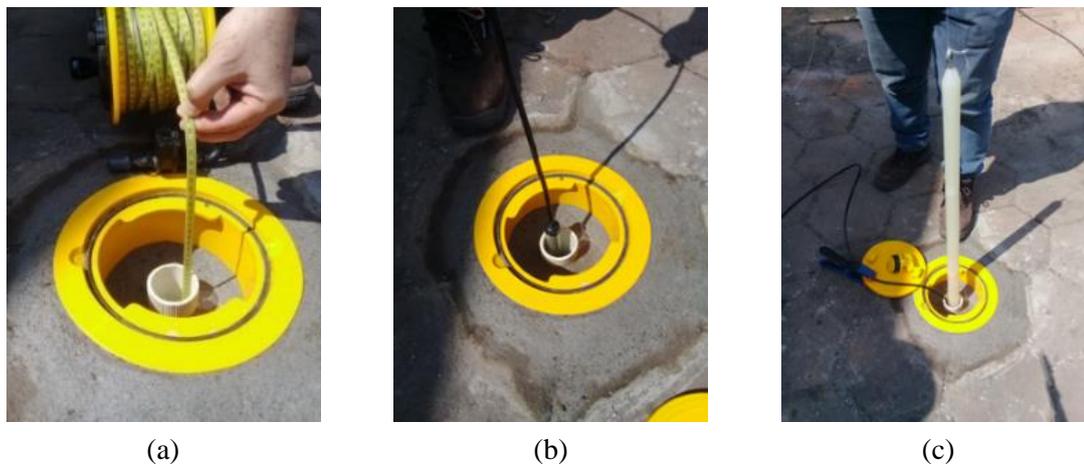


Fonte: Adaptado de Iritani (1993).

3.2.3 Slug e bail tests

Slug e *bail tests* foram realizados para determinar a condutividade hidráulica de duas camadas de solo diferentes. Esses ensaios foram realizados nos poços de monitoramento, de acordo com a Figura 3.10. Inicialmente, foi medido o nível da água (Figura 3.10a) e, em seguida, uma sonda barométrica foi inserida cerca de 2,5 m abaixo do nível da água para controlar sua variação (Figura 3.10b). O *slug test* começou com a introdução de um tarugo (*slug*) no poço (Figura 3.10c), e o lençol freático foi registrado ao longo do tempo até atingir o nível de água estático. Em seguida, o tarugo foi retirado, iniciado o *bail test*, e a variação do lençol freático também foi monitorada.

Figura 3.10: *Slug/bail tests*: (a) medição do nível d'água, (b) inserção da sonda barométrica e (c) Inserção do tarugo (slug).



Fonte: Autora.

Os métodos de Hvorslev (1951) e Bouwer & Rice (1976) foram usados para interpretar os resultados dos ensaios e fornecer as condutividades hidráulicas, resumidas na Tabela 3.2. Os resultados mostram que os três poços instalados na camada mais superficial estão na mesma unidade hidroestratigráfica, pois possuem condutividade hidráulica aproximadamente da mesma ordem de magnitude. Por outro lado, a camada mais profunda tem condutividade três ordens de magnitude menor, indicando que não pertence à mesma unidade hidroestratigráfica.

Tabela 3.2: Resultados dos ensaios Slug e bail tests.

Poço de monitoramento (camada)	<i>Slug test</i> (m/s)		<i>Bail test</i> (m/s)		Condutividade hidráulica estimada (m/s)
	Hvorslev (1951)	Bouwer & Rice (1976)	Hvorslev (1951)	Bouwer & Rice (1976)	
PM-1 (10-11 m)	$4,40 \times 10^{-7}$	$4,06 \times 10^{-7}$	$6,98 \times 10^{-7}$	$6,40 \times 10^{-7}$	$5,46 \times 10^{-7}$
PM-1A (5-6 m)	$9,91 \times 10^{-5}$	$7,60 \times 10^{-5}$	$8,87 \times 10^{-5}$	$7,74 \times 10^{-5}$	$8,53 \times 10^{-5}$
PM-2 (5-6 m)	$5,86 \times 10^{-4}$	$4,91 \times 10^{-4}$	$6,54 \times 10^{-5}$	$5,92 \times 10^{-5}$	$3,00 \times 10^{-4}$
PM-3 (5-6 m)	$1,41 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$2,52 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$

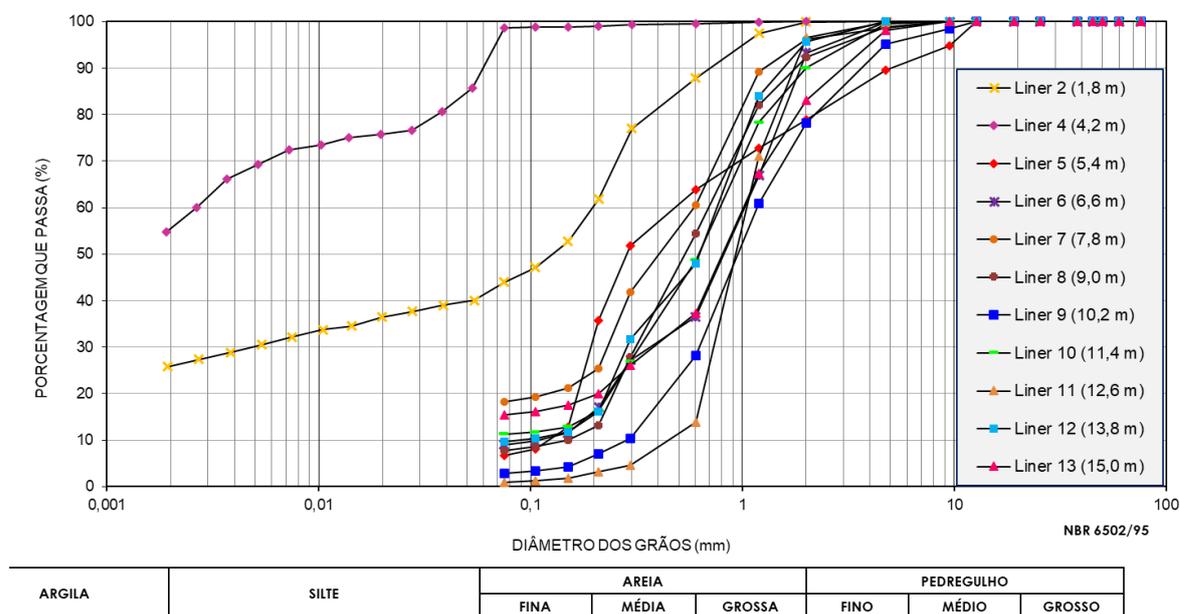
Fonte: Autora.

3.2.4 Análise granulométrica

Análises granulométricas foram realizadas em amostras de solo coletadas de cada *liner* do PM-1, exceto os *liners* 1 e 3, que possuem solo de aterro em geral, então representado pelo *liner* 2. Essas análises tiveram como objetivo identificar o tamanho do grão e estimar a condutividade hidráulica das diferentes camadas. As amostras representam apenas parte do *liner*, exigindo cautela na interpretação.

A distribuição granulométrica das amostras de solo é mostrada na Figura 3.11, que também indica a profundidade média do *liner* correspondente. Os resultados do *liner* 2 (aterro) e do *liner* 4 (argila mole) discordam dos demais. Exceto para o *liner* 5 (camada de areia encontrada no PM-1A, PM-2 e PM-3), as amostras mostraram distribuição granulométrica relativamente uniforme. No entanto, estes não parecem representar a heterogeneidade das camadas devido à presença de intercalações de argila encontradas no perfil do subsolo conforme descrito na descrição dos poços de monitoramento no Anexo A.

Figura 3.11: Análise granulométrica das amostras de solo do PM-1.

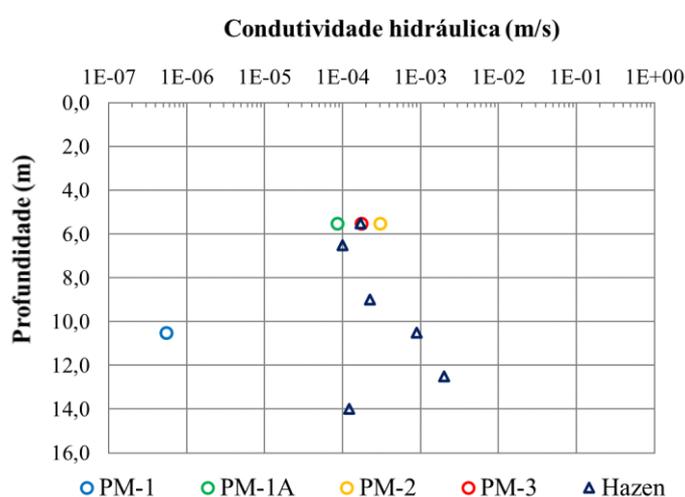


Fonte: Pessin *et al.* (2022).

A condutividade hidráulica foi estimada por meio da correlação de Hazen, de acordo com o tamanho da partícula, e os resultados foram plotados com os *slug/bail tests*, conforme apresenta-se na Figura 3.12. O resultado da correlação apresentou boa concordância com a camada testada nos três poços de monitoramento: PM-1A, PM-2 e PM-3, que se refere à areia

mais pura encontrada em PM-1, de acordo com estimativas de campo. Por outro lado, o resultado de campo obtido no PM-1 destoa consideravelmente da correlação. Isso provavelmente está relacionado à presença de argila entre os grãos, sob a forma de lentes de núcleos não captados pela análise granulométrica. Portanto, essa comparação deve ser interpretada com cautela, pois a correlação de Hazen tem muitas limitações e não leva em consideração as condições de campo. Desta forma, os resultados fornecidos pelos ensaios de campo devem ser tomados como referência, uma vez que fornecem uma medida mais representativa das condições reais.

Figura 3.12: Condutividade hidráulica obtida por meio de *slug* e *bail tests* e estimadas pela análise granulométrica.



3.2.5 Velocidade de fluxo e resumo dos dados

A velocidade de fluxo, segundo a lei de Darcy, ou velocidade aparente de percolação v_D , é expressa pelo produto entre condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico do local. No entanto, a velocidade real v_s , ou a velocidade com que a água percola nos vazios do solo, é determinada dividindo-se a velocidade aparente pela porosidade efetiva do solo. A velocidade real representa uma média, pois como a área dos vazios do solo varia, a velocidade também varia (LOPES, 2007).

Considerando o gradiente hidráulico determinado em campo por meio das informações obtidas dos ensaios realizados nos poços de monitoramento, igual a 7×10^{-3} m/m, e assumindo-se uma porosidade efetiva para solos arenosos igual a 0,4 (CHIASSON *et al.*, 2000), também

foram determinadas as velocidades reais de percolação v_s , apresentadas na Tabela 3.3. No poço mais profundo, a velocidade real é igual a $9,6 \times 10^{-9}$ m/s ($8,3 \times 10^{-4}$ m/dia). Nos três poços mais rasos, a velocidade real varia de 0,1 a 0,5 m/dia.

Tabela 3.3: Velocidade de fluxo das camadas de solo ensaiadas em cada poço de monitoramento.

Poço de monitoramento	K (m/s)	i	v_D (m/dia)	v_s (m/dia)
PM-1	$5,46 \times 10^{-7}$	-	$3,3 \times 10^{-4}$ *	$8,3 \times 10^{-4}$ *
PM-1A	$8,53 \times 10^{-5}$	$7,00 \times 10^{-3}$	0,052	0,13
PM-2	$3,00 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-3}$	0,18	0,45
PM-3	$1,75 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-3}$	0,11	0,27

*Estimadas com base no gradiente hidráulico obtido para os demais poços.

Fonte: Autora.

Dentre as camadas ensaiadas, a maior velocidade de fluxo (0,1 a 0,5 m/dia) foi encontrada na camada uniforme de areia (5 a 6 m de profundidade), conforme observado na investigação de campo. A camada arenosa menos permeável (entre 10 e 11 m de profundidade) apresentou uma velocidade de fluxo muito menor, igual a $8,3 \times 10^{-4}$ m / dia.

De acordo com o perfil do subsolo obtido através do programa de investigação realizado, acredita-se que o fluxo se dê preferencialmente na camada de areia uniforme, a mais permeável dentre aquelas presentes no perfil. A baixa velocidade de fluxo na camada inferior (10 a 11 m de profundidade) se deve à presença de um material mais argiloso nessa parte do perfil do subsolo, que apresenta intercalações de areia e argila, conforme observado por meio das ASPC. As diferenças de carga hidráulica entre os poços de monitoramento foram baixas, mas indicam uma direção de fluxo que está de acordo com o fluxo regional. Recomenda-se que novos ensaios sejam feitos nos poços de monitoramento, que continuam instalados no local, a fim de verificar possíveis variações temporais dessas cargas hidráulicas.

3.3 Estacas trocadoras de calor do CICS

3.3.1 Projeto geotécnico e estrutural

Considerando o tipo de solo (predominantemente arenoso), o nível do lençol freático, e a proximidade das estacas dos edifícios da USP, foram escolhidas estacas do tipo hélice

contínua para compor as fundações do edifício principal do CICS. Além disso, esse tipo de estaca é o mais utilizado em projetos de construção urbana no Brasil. A Figura 3.13 mostra o equipamento de hélice contínua utilizado, com trado de 16 m de comprimento e 70 cm de diâmetro, da empresa Stack.

Figura 3.13: Equipamento de estaca hélice contínua no canteiro do CICS.

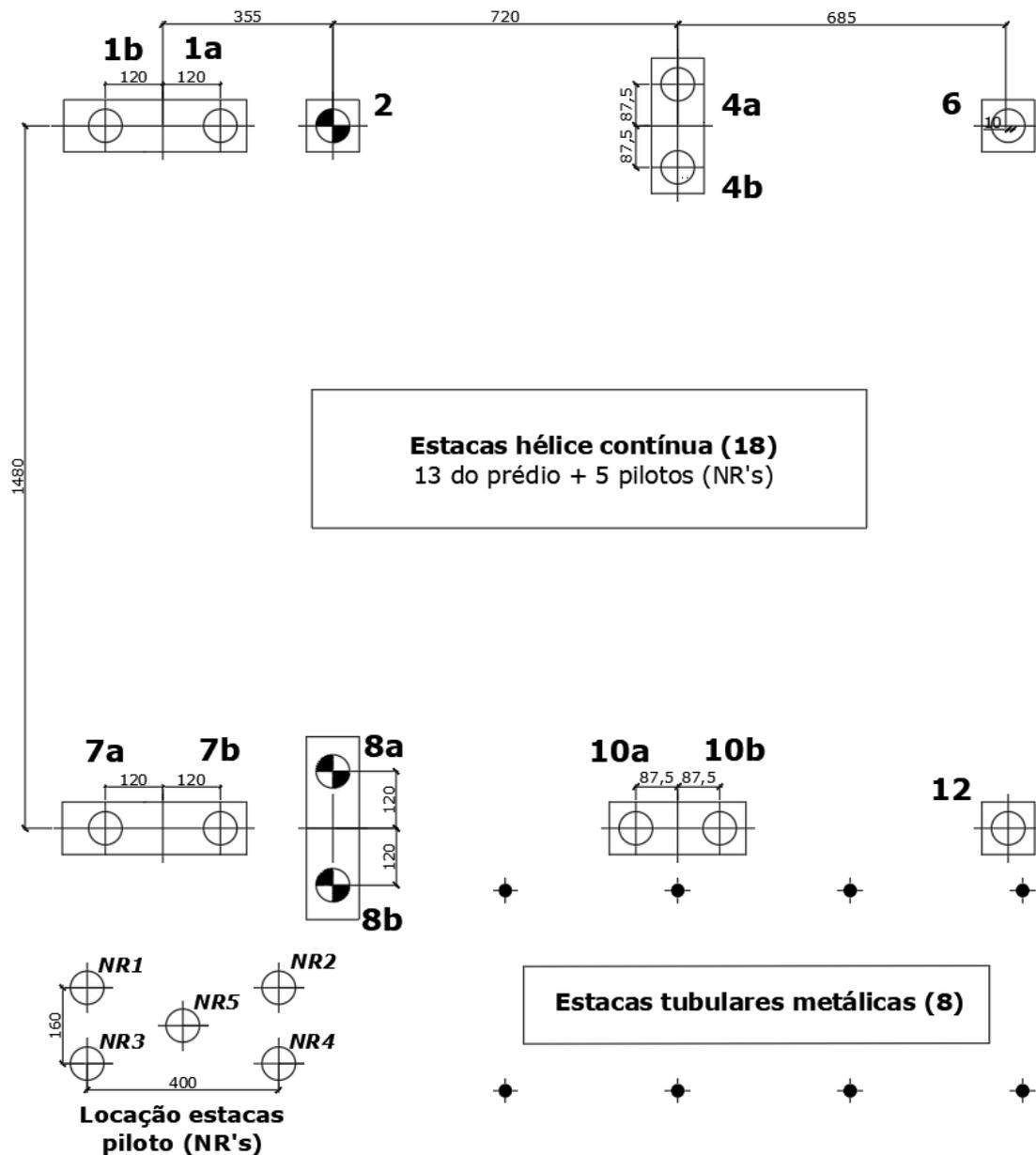


Fonte: Takeashi (2019).

A fundação do edifício principal do CICS compreende 13 estacas hélice contínua trocadoras de calor, construídas para atender o sistema de resfriamento de uma parcela do edifício. Os projetos geotécnico e estrutural das estacas hélice contínua foram realizados pela empresa Consultrix Engenheiros Associados LTDA. Além das estacas do edifício, foram construídas cinco estacas piloto, sendo quatro delas posicionadas para atuarem como reações em prova de carga estática. Estas estacas foram construídas para a realização de ensaios térmicos, mecânico (prova de carga) e termomecânico para avaliação do desempenho destas estacas do CICS.

A Figura 3.14 ilustra a localização das estacas. Estacas tubulares metálicas foram construídas para suportar o edifício de escadas ao lado do CICS, e foram executadas e estudadas pela então doutoranda Milena Murari.

Figura 3.14: Localização das estacas hélice contínua trocadoras de calor do CICS, pilotos e estacas tubulares metálicas – medidas em centímetros.



Fonte: Autora.

A Tabela 3.4 resume as características de todas as estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua executadas. As estacas hélice contínua do edifício do CICS foram construídas com os tubos trocadores de calor dispostos em U triplo (em série), enquanto as estacas piloto possuem os tubos trocadores de calor montados com diferentes configurações: uma em U triplo (idêntica às estacas do edifício), uma em W, e três espirais, com passos de 300, 450 e 600 mm. Todos as estacas possuem 70 cm de diâmetro.

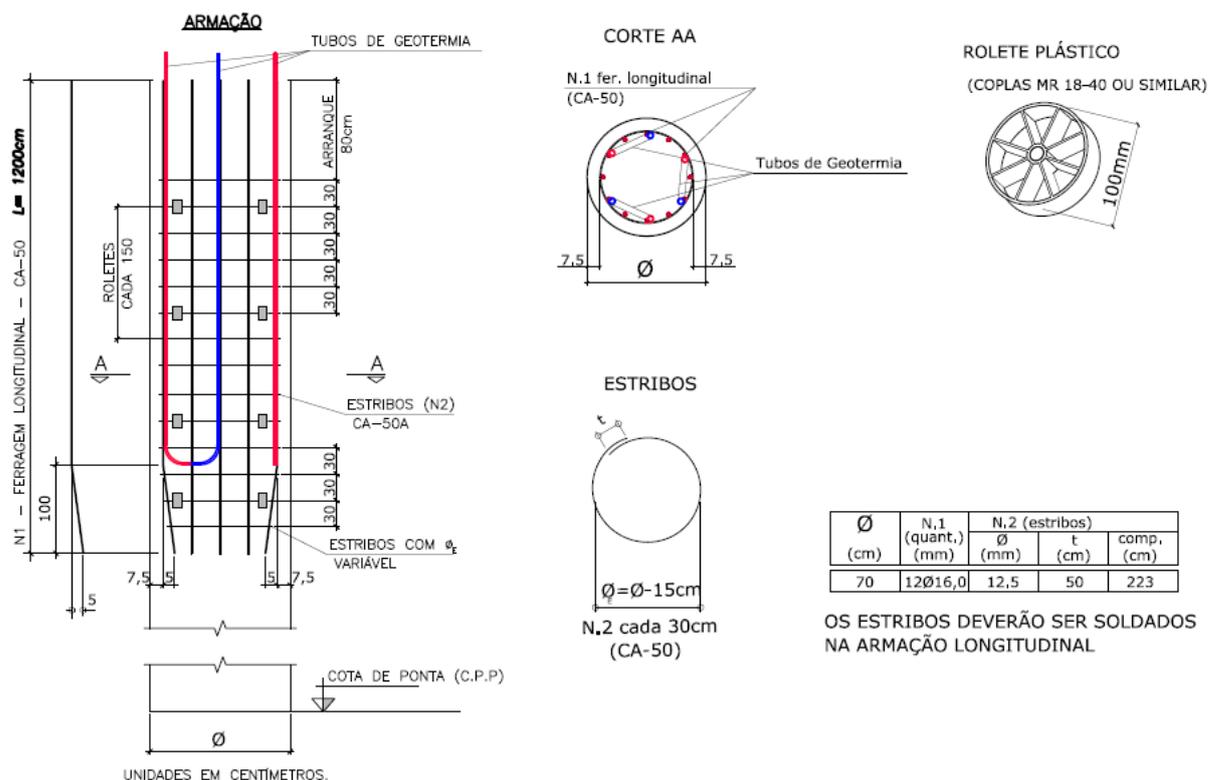
Tabela 3.4: Características das estacas hélice contínua trocadoras de calor construídas.

Categoria das estacas	Estaca – denominação executiva	Comprimento da estaca (m)	Configuração dos tubos	Comprimento de tubo (m)
Edifício principal do CICS	1b	16	Triplo U	63
	1a			
	2			
	4a			
	4b			
	6			
	7a			
	7b			
	8a			
	8b			
	10a			
	10b			
Pilotos	12	15	Espiral (600 mm)	32
	NR1		Espiral (300 mm)	61
	NR2		Espiral (450 mm)	41
	NR3		W	42
	NR4		Triplo U	63
	NR5			

Fonte: Autora.

O detalhamento das armações utilizadas em todas as estacas construídas, do edifício principal e pilotos é apresentado na Figura 3.15.

Figura 3.15: Detalhamento da armação das estacas hélice contínua.



Fonte: Consultrix (2019).

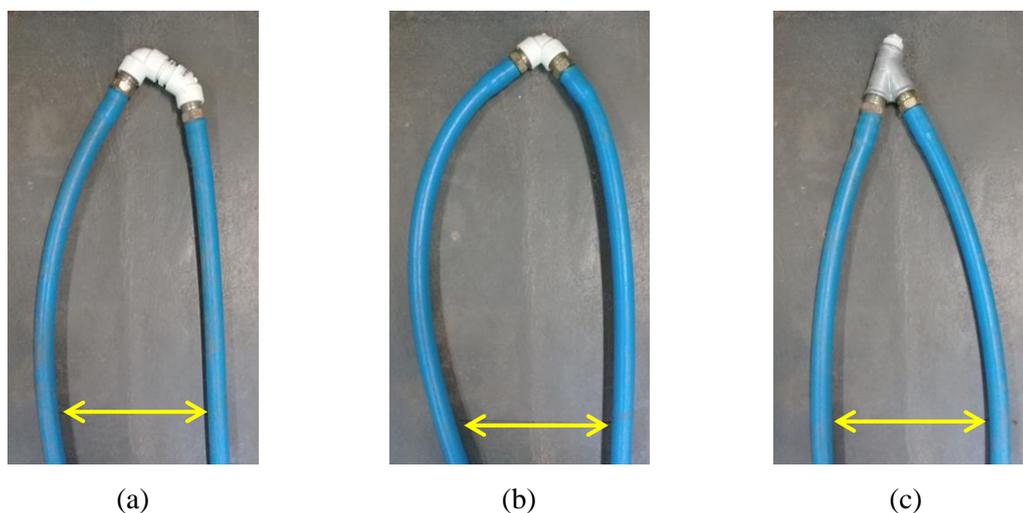
3.3.2 Projeto de estacas para geotermia superficial

Como apresentado no item 2.3.3 da Revisão Bibliográfica, a disposição dos tubos de geotermia em U na estaca pode ser definida em função de seu diâmetro. As 13 estacas geotérmicas do CICS possuem 70 cm de diâmetro e, dessa forma, optou-se por utilizar os tubos dispostos em triplo U (3 loops). Considerando que o tubo PEAD utilizado possui 32 mm de diâmetro externo, o diâmetro da curva formada seria igual a 64 cm, demasiado grande para a formação de 3 loops numa estaca de 70 cm. No entanto, foi realizada uma tentativa de dobragem manual dos tubos de modo a permitir a inserção dos 3 loops na estaca, mas os tubos começaram a estrangular e a utilização dos loops com voltas por dobragem foi descartada. Uma alternativa bastante utilizada para a formação das voltas é fazê-las pelo uso de conexões. Existem diversos tipos de conexões utilizadas em trabalhos apresentados na literatura, porém sem especificações.

A utilização de conexões adequadas pode facilitar o trabalho na obra e a Figura 3.15 apresenta algumas conexões testadas neste trabalho. A opção apresentada na Figura 3.16a se utiliza de cinco peças, a opção da Figuras 3.16b três e a Figura 3.16c quatro. A opção 3.16b

oferece maior dificuldade para o dobramento dos tubos e foi descartada. Visando facilidade de montagem, optou-se pela conexão junção a 45°, da Figura 3.16c.

Figura 3.16: Tipos de conexões testadas para a formação dos loops dos tubos PEAD: (a) joelho de 90°, adaptador e joelho de 45°, (b) joelho a 45° (c) junção a 45°.



Fonte: Autora.

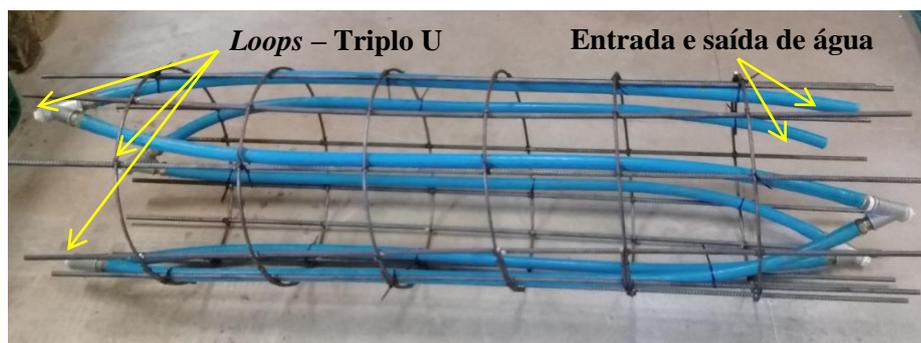
Para testar a inserção dos tubos em triplo U na armação e a utilização da conexão selecionada antes da execução na obra, adquiriu-se um segmento de gaiola de armadura com comprimento de 2 m. Na armação de teste, as armaduras longitudinais e transversais possuíam os mesmos espaçamentos previstos no projeto das estacas do CICS, mas com diâmetros reduzidos de 16 para 12,5 mm para as longitudinais e de 12,5 para 8 mm nas transversais, visando economia e o caráter de teste desta armação. A Figura 3.17 apresenta a montagem dos *loops* antes da inserção na armação e a Figura 3.18 a armação com os tubos já amarrados e dispostos em triplo U.

Figura 3.17: Montagem dos tubos em triplo U (em laboratório).



Fonte: Autora.

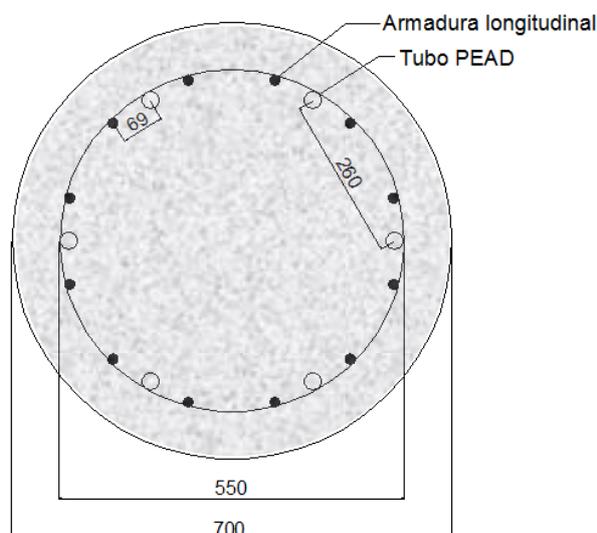
Figura 3.18: Disposição dos tubos em configuração triplo U na armação da estaca.



Fonte: Autora.

A Figura 3.19 apresenta uma seção transversal da estaca em triplo U, com a disposição dos tubos PEAD em relação à armadura. O espaçamento mínimo entre a armadura longitudinal e os tubos PEAD foi de aproximadamente 7 cm, respeitando o espaço mínimo recomendado por Syntec (2017), de modo a não comprometer a concretagem e a função estrutural da armação.

Figura 3.19: Seção transversal da estaca geotérmica e posicionamento dos tubos PEAD em relação à armadura – dimensões em milímetros.



Fonte: Autora.

3.3.3 Instrumentação

Considerando-se o papel pioneiro das fundações por estacas trocadoras de calor construídas no CICS para a avaliação do desempenho desta solução em clima subtropical brasileiro, torna-se fundamental monitorar as variações de temperatura, carga axial e recalque

sofridos pela fundação ao longo dos ciclos de operação. Neste estudo, as estacas do edifício e pilotos foram instrumentadas com sensores de temperatura do tipo Pt-100 (Figura 3.20a) e as cargas axiais em algumas estacas por barras instrumentadas com *strain gages* (Figura 3.20b).

Figura 3.20: Sensores utilizados para medir cargas térmicas e mecânicas: (a) Pt-100 e (b) barras instrumentadas com *strain gages*.



Fonte: Autora.

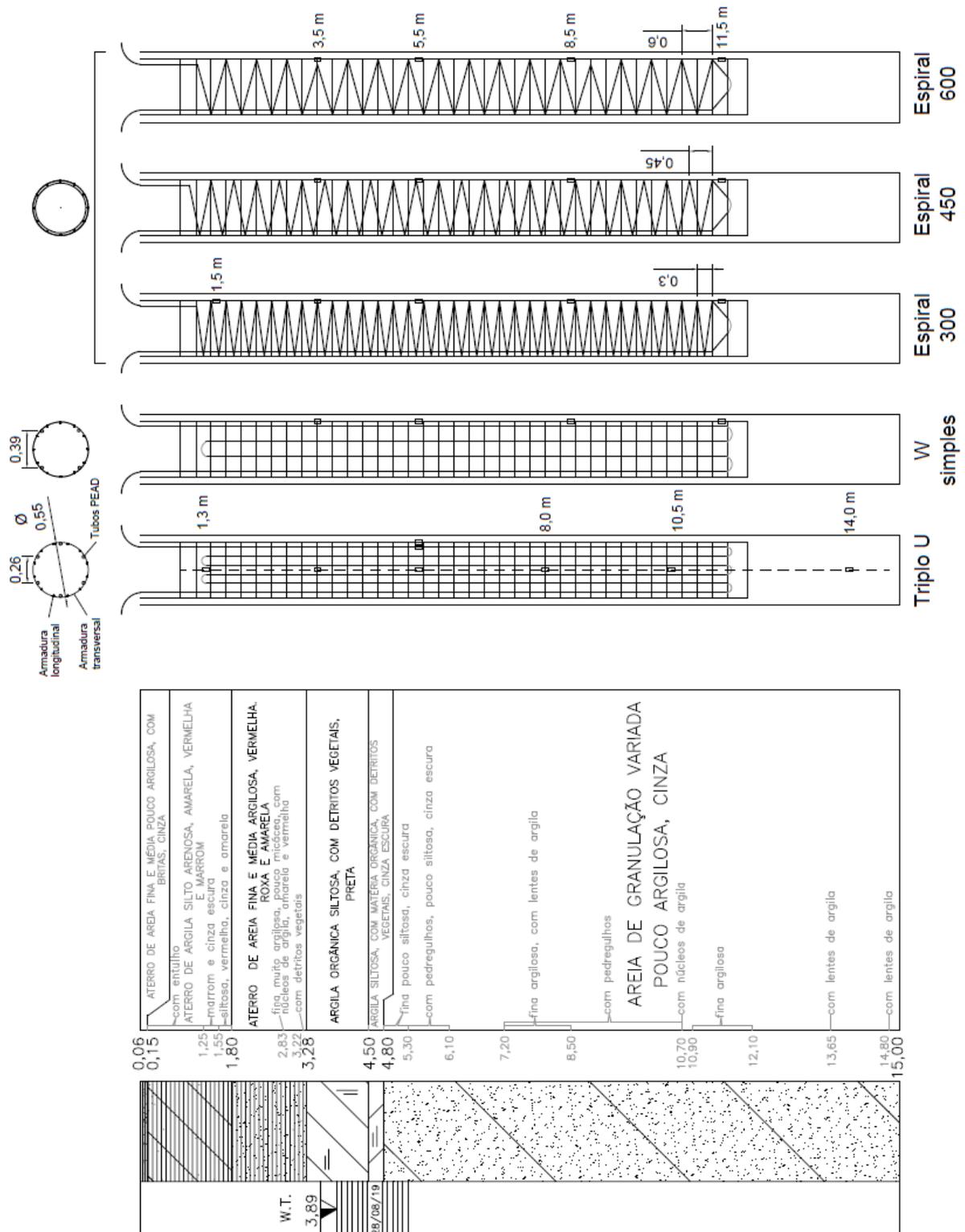
O Pt-100 é um sensor resistivo que se baseia no princípio de que a resistência elétrica de um fio de metal varia com a temperatura. É feito de Platina (Pt), e seu valor de resistência elétrica à temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é de $100\ \Omega$, conforme indicado por sua nomenclatura “Pt-100”. Além disso, o Pt-100 geralmente tem uma resistência de $138,5\ \Omega$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa que a variação da resistência para cada mudança de grau Celsius é de $0,385\ \Omega$. Os sensores Pt-100 são classificados de acordo com sua precisão em classes, sendo os sensores Classe “A” e “B” os mais utilizados. Cada classe tem uma única resistência nominal *versus* curva característica de temperatura e designações de precisão, que são $\pm (0,15 + 0,002 |T|)^{\circ}\text{C}$ e $\pm (0,3 + 0,005 |T|)^{\circ}\text{C}$ para as classes A e B, respectivamente. Devido à sua melhor precisão, todas as estacas trocadoras do CICS foram instrumentadas com Pt-100 Classe A. Os sensores foram fornecidos pela empresa Salcas, e possuem cabos com 3 fios, uma haste revestida de aço inoxidável de 4,7 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento e uma faixa de temperatura de medição de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para monitorar as cargas axiais em algumas estacas, vinte barras instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) foram confeccionadas de forma artesanal. Os extensômetros foram dispostos em um circuito de ponte completa, para a medição da deformação da estaca comprimida e para compensar os efeitos da temperatura. Para cada barra,

foram utilizados dois *strain gages* biaxiais (quatro *strain gages* ativos), fornecidos pela empresa Excel Sensores. O procedimento adotado para a confecção das barras é apresentado em detalhes no Apêndice A.

Os sensores foram distribuídos nas estacas com base na investigação hidrogeológica apresentada no Item 3.2, principalmente na camada de argila mole (3,5 m), na camada de areia que seria a mais permeável (5,5 m), na camada de areia a 8,5 m e próximo à base da armação, a 11,5 m, como apresentado nas estacas piloto na Figura 3.21. Todas as estacas foram instrumentadas com sensores de temperatura, mas apenas uma estaca piloto (Triplo U) e três estacas do edifício (6, 7a e 7b) foram instrumentadas também com *strain gages*. Nas estacas com dupla instrumentação, os sensores foram instalados em uma barra central soldada no centro da armação, como detalhado no próximo Item, enquanto nas demais estacas todos os sensores foram instalados na armação. Além disso, na profundidade de 5,5 m na estaca piloto Triplo U, foram instalados três sensores de temperatura: um na barra central, um na armação e um no tubo PEAD. A posição dos sensores em todas as estacas encontra-se resumida na Tabela 3.5.

Figura 3.21: Distribuição dos sensores nas estacas piloto e perfil estratigráfico correspondente.



Fonte: Autora e Engesolos (2019).

Tabela 3.5: Disposição dos sensores nas estacas piloto (em realce) e nas estacas do edifício, onde “x” se refere aos sensores de temperatura e “X” às barras instrumentadas com *strain gages*.

Estaca	Profundidade (m)															
	1,3	1,5	2,5	3,0	3,5	5,5	7,0	8,0	8,5	9,0	10,5	11,0	11,5	12,0	14,0	15,0
Espiral 600					x	x			x				x			
Espiral 300		x			x	x			x				x			
Espiral 450					x	x			x				x			
W					x	x			x				x			
Triplo U	xX				xX	xxx X*		xX				xX				xX
1b					x	x			x					x		
1a					x	x			x					x		
2					x	x			x					x		
4a					x	x			x					x		
4b					x	x			x					x		
6				xX				xX					xX			xX
7a			xX			xX				xX				xX		xX
7b			xX			xX				xX				xX		xX
8a					x	x			x					x		
8b					x	x			x					x		
10a					x	x			x					x		
10b					x	x			x					x		
12					x	x			x					x		

* “xxx”: um sensor de temperatura no centro, um no tubo e outro na armação.

Fonte: Autora.

3.3.4 Instalação dos tubos PEAD e sensores nas estacas

O processo de instalação das estacas trocadoras de calor tipo hélice contínua compreendeu duas etapas principais: a instalação dos tubos trocadores de calor (PEAD) na armação com conexões, sensores e acessórios, e a própria execução da estaca.

Para a montagem das estacas com *loops* em U (duplo U e triplo U), os tubos foram cortados em segmentos de aproximadamente 10,4 m antes de serem instalados na armação. Esse comprimento foi definido em função das dimensões da armação, descontando do comprimento total de 12 m o arranque de 0,8 m e os espaçamentos livres de 0,3 m da ponta e 0,5 m da base do arranque. O espaço livre na ponta da armação se faz necessário para que as conexões estejam bem protegidas no interior da armação durante a inserção no furo concretado, enquanto o espaço livre na base do arranque é importante para proteger as conexões durante a quebra da cabeça da estaca para a execução dos blocos de coroamento.

A principal conexão utilizada para compor os *loops* dos tubos em U foi a junção a 45° de 1" de ferro galvanizado, conectada aos tubos PEAD por meio de um adaptador reto de latão e abraçadeiras de metal, definidas de acordo com o Item 3.3.2. Inicialmente, os adaptadores retos eram de PVC, mas não resistiram ao sol e foram trocados. Para inserir os adaptadores retos nos tubos, utilizou-se um soprador térmico (Figura 3.22a) e pasta lubrificante. Com o tubo ligeiramente quente, as abraçadeiras metálicas eram apertadas próximas às conexões. A fim de evitar que as conexões se movessem durante a execução, estas foram presas à gaiola por meio de arames (Figura 3.22c). Os tubos foram fixados à armação por meio de abraçadeiras de nylon a cada 60 cm, aproximadamente (Figura 3.22d), e a cada 30 cm próximo à ponta e topo da armação.

Figura 3.22: Montagem e fixação dos tubos e conexões na estaca em triplo U: (a) aquecimento dos tubos com soprador térmico, (b) inserção das conexões, (c) conexões fixadas à armação com arame e (d) tubos presos com abraçadeiras de nylon.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (a, b e c) e Takeashi (2019) (d).

Diferente das estacas em triplo U, a montagem da configuração em espiral demandou muito esforço físico para a formação dos *loops*, devido à rigidez dos tubos PEAD. O procedimento adotado consistiu em passar a ponta do tubo por dentro da armação em direção à sua base, estando o rolo de tubo próximo ao topo; em seguida, fazia-se um “círculo” com o tubo e inseria-o na parte interna da armação e próximo à sua ponta, a fim de facilitar o início da confecção da espiral (Figura 3.23). Fixado o círculo na armação, a espiral ia sendo formada puxando-se o tubo e prendendo-o progressivamente com as abraçadeiras de nylon na armação, de acordo com os passos da espiral previamente marcados com giz na armação. Por fim, uma junção a 45° foi acoplada na base da espiral, e um segmento de tubo com o comprimento da armação foi ligado à essa conexão para formar o *loop* completo. A grande vantagem da configuração em espiral é a utilização de apenas uma conexão, na base do *loop*.

Figura 3.23: Montagem da estaca em espiral: (a) início da confecção da espiral, (b) tubos sendo puxados para a formação da espiral, (c) conexão necessária para a configuração espiral e (d) espirais com passos de 300 e 600 mm.



(a)

(b)

(c)

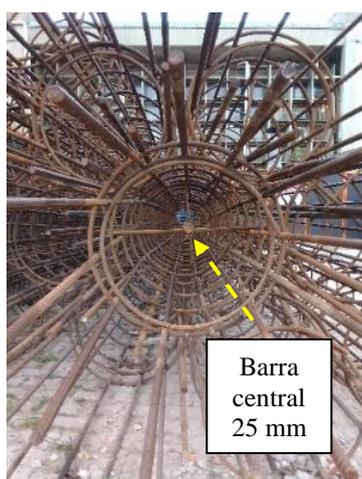


(d)

Fonte: Autora.

O projeto inicial das estacas hélice contínua previa estacas com comprimentos entre 15 e 18 m, enquanto a armação possuía um comprimento fixo de 11,2 m, desconsiderando o arranque de 80 cm. Considerando o caráter investigativo da implementação das estacas, pretendia-se instrumentar algumas com sensores de temperatura e de deformação ao longo do comprimento além da profundidade alcançada pela armação. Assim, para guiar os sensores, uma barra de 25 mm de diâmetro foi centrada na armação através da soldagem de algumas barras de 16 mm de diâmetro no perímetro da armação (Figura 3.24).

Figura 3.24: Barra para guiar os sensores (a) barra central e (b) barras guia.



(a)

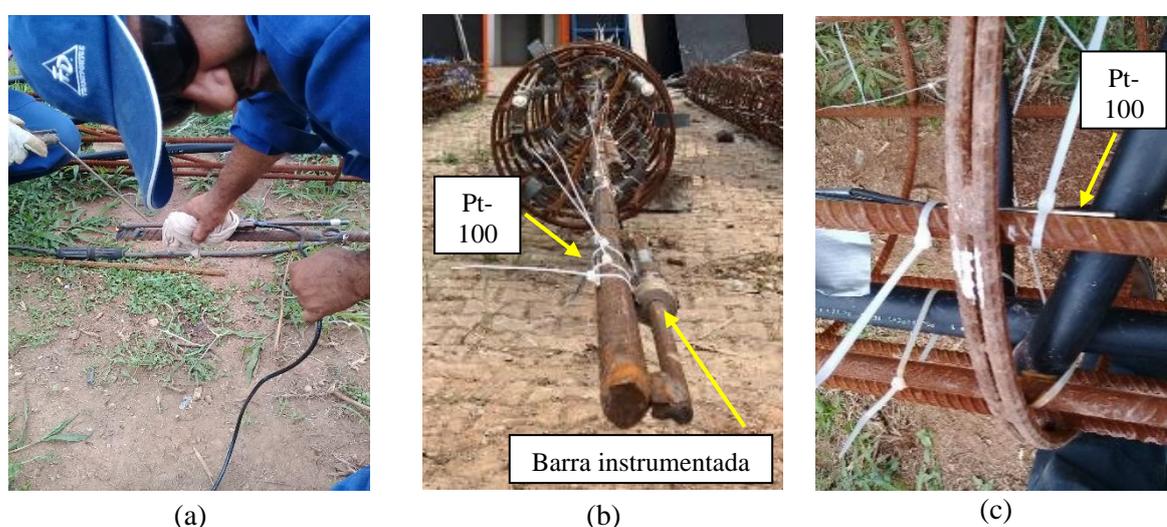


(b)

Fonte: Autora.

Nas estacas instrumentadas com sensores de deformação foram soldadas barras centrais para guiar os sensores. Nestas estacas, os sensores de temperatura também foram posicionados no centro da estaca. As barras instrumentadas foram soldadas junto à barra central, e os sensores de temperatura fixados com abraçadeiras de nylon, de acordo com as Figuras 3.25a e 3.25b. Nas estacas que não receberam barra central, os sensores de temperatura foram instalados na própria armação (Figura 3.25c).

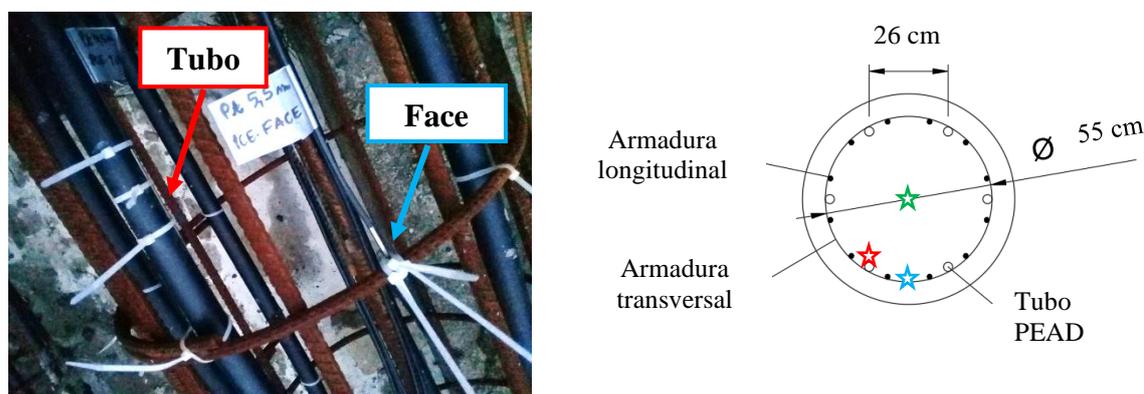
Figura 3.25: Instalação dos sensores na armação: (a) soldagem das barras instrumentadas, (b) Pt-100 fixado com abraçadeiras de nylon na barra central, e (c) Pt-100 instalado na armação.



Fonte: Autora.

Na estaca piloto Triplo U, a 5,5 m, foram instalados sensores no tubo na armação e na barra central, de acordo com a Figura 3.26.

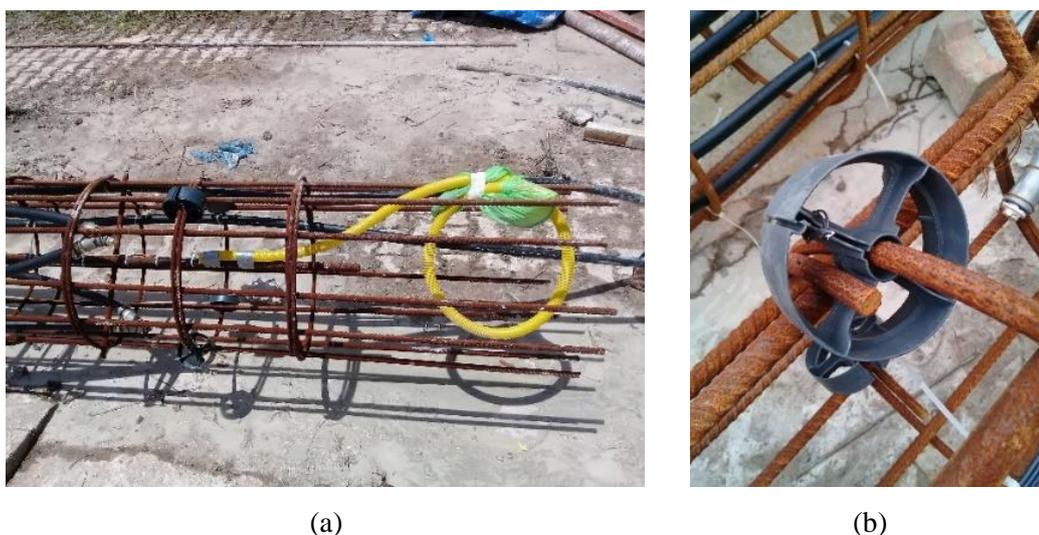
Figura 3.26: Sensores de temperatura na estaca piloto Triplo U, na seção a 5,5 m.



Fonte: Autora.

Por fim, antes da execução, os cabos dos sensores da maioria das estacas foram protegidos com conduítes (Figura 3.27a) e os roletes espaçadores da armação foram reforçados com arame (Figura 3.27b), de modo a evitar que se desprendessem durante a inserção no furo concretado. Antes da execução das estacas, os tubos de PEAD foram preenchidos com água para evitar estrangulamento.

Figura 3.27: Preparação das armações para a execução das estacas (a) proteção dos cabos com conduítes e (b) reforço dos roletes com arame.



Fonte: Autora.

As armações, que durante a instalação da geotermia estavam espalhadas no canteiro do CICS, foram amontoadas de modo a facilitar a circulação dos equipamentos no local, como apresentado na Figura 3.28.

Figura 3.28: Armações com geotermia e sensores instalados antes da execução das estacas.



Fonte: Autora.

3.3.5 Execução das estacas

As estacas trocadoras de calor do tipo hélice contínua foram executadas de acordo com o procedimento padrão adotado para este tipo de estaca, exceto pelo cuidado com os sensores e tubos, principalmente porque a armação é inserida no concreto fresco. Além disso, a utilização de uma armação de 12 m de comprimento trouxe desafios à execução, pois estacas hélice contínua geralmente se utilizam de armações com comprimentos inferiores, da ordem de 6 m. Vale salientar que os estribos foram soldados às barras longitudinais da armação de modo a conferir maior rigidez e facilitar a sua inserção no concreto.

As estacas foram concretadas com um concreto do tipo LEAP, sigla proveniente do inglês *Low emission advanced performance*. O concreto LEAP consiste em um concreto de baixa emissão de CO₂ e com desempenho avançado, e demanda menor quantidade de água na produção. O concreto utilizado foi formulado por meio de uma parceria entre a Escola Politécnica da USP e a empresa fabricante de cimento InterCement. Foram utilizados 176 litros de água por metro cúbico de concreto, o que representa uma redução de 52% em relação aos teores convencionais, entre 250-300 litros/m³ (INFRAROI, 2020).

A Figura 3.29 apresenta algumas etapas do procedimento executivo das estacas hélice contínua. De acordo com o projeto dos blocos das estacas do edifício principal do CICS, havia uma razoável variação de altura dos blocos de cada estaca. Dado que a altura do arranque de todas as armações era igual, a cota de topo das armações foi variável entre as estacas. Para empurrar as armações até a cota especificada, foi desenvolvida a ferramenta apresentada na Figura 3.29e, que era empurrada pela base da concha da retroescavadeira sobre a armação. Feito isso, o concreto fresco era removido ao máximo considerando a base do bloco. Vale mencionar que a instrumentação das armações levou em consideração a variação de altura dos blocos.

Por outro lado, as armações das estacas piloto foram empurradas até que fossem totalmente enterradas, ou seja, o topo da armação coincidiu com o topo do terreno. Exceto a estaca piloto Triplo U, as outras quatro estacas piloto atuaram como reações durante os ensaios de prova de carga estática e termomecânico. Após a concretagem dessas estacas, barras de reação com 6 m de comprimento, do tipo INCO-45D da empresa Incotep, foram inseridas no concreto fresco, centradas na estaca por meio de um aparato feito com peças de madeira (Figura 3.29h). Um trecho de cerca de 50 cm ficou livre para viabilizar o acoplamento das barras complementares posteriormente.

Figura 3.29: Execução das estacas hélice contínua no CICS: (a) perfuração, (b) retirada do trado com simultânea deposição de concreto, (c) içamento da armação, (d) inserção da armação no furo concretado, (e) ferramenta auxiliar para descida da armação, (f) utilização da ferramenta, (g) retirada do concreto fresco e (h) instalação das barras nas estacas de reação.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Fonte: (a-c, e-h) Autora e (d) Takeashi (2019).

3.4 Ensaios nas estacas trocadoras de calor

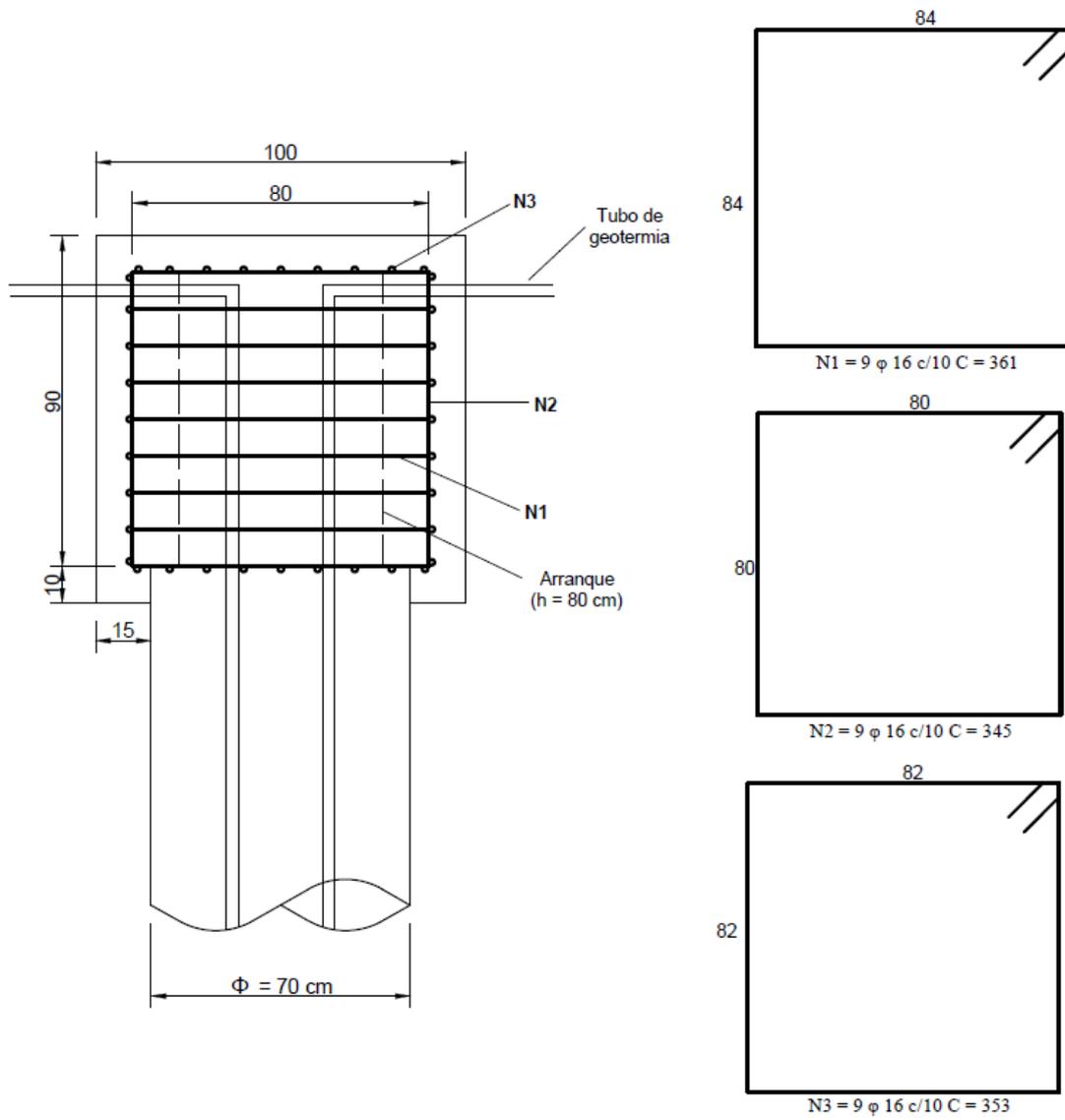
3.4.1 Prova de carga estática

Um ensaio de prova de carga estática (PCE) instrumentada a compressão foi realizada na estaca piloto Triplo U para determinar o comportamento carga-deslocamento da fundação além da distribuição de carga ao longo da estaca. Antes disso, foi necessário dimensionar e construir um bloco de coroamento sobre a estaca a ser ensaiada: a triplo U. O bloco de coroamento foi dimensionado estruturalmente como um elemento rígido, isto é, com linhas de tensões compressivas internas inclinadas em um ângulo de cerca de 40° a 55° com a horizontal. O dimensionamento resultou em uma armação com barras de aço de 10 mm de diâmetro espaçadas a cada 20 mm, de acordo com o detalhamento apresentado na Figura 3.30.

Na execução do bloco foi utilizado um concreto com resistência à compressão f_{ck} estimada em 30 MPa. Para cada metro cúbico de mistura, foram utilizados 350 kg de cimento, 1000 kg de brita zero, 800 kg de areia e 200 kg de água.

O procedimento seguido na construção do bloco é apresentado na Figura 3.31. Antes da escavação, a área do bloco foi demarcada com base no gabarito existente no entorno do CICS. Após a escavação, a quebra manual da estaca foi feita por um martelo de demolição até o nível definido. Em seguida, a fôrma do bloco foi centralizada na estaca segundo o gabarito. Uma camada de 5 cm de concreto magro preencheu o espaço entre a estaca e a caixa. A colocação da gaiola consistiu em uma etapa crítica: os tubos PEAD e conduítes com os cabos dos sensores foram passados pela base da armação e, posteriormente, pela lateral, enquanto ela era elevada e ajustada ao centro da estaca. Os tubos PEAD foram passados pela lateral da armação por meio de cotovelos de PVC de 90° , pois não poderiam atravessar o topo do bloco que deveria ficar livre para os ensaios de carga. Após esta experiência, recomenda-se projetar uma armação de bloco com as barras tendo o maior espaçamento possível. A vibração do concreto foi realizada em quatro camadas e, após 3 dias, o bloco foi desenformado.

Figura 3.30: Projeto do bloco de coroamento da estaca Triplo U.



Fonte: Autora.

Figura 3.31: Execução do bloco de coroamento: (a) demarcação da área de escavação, (b) escavação do solo, (c) quebra da cabeça da estaca, (d) locação da fôrma, (e) deposição do concreto magro na base do bloco, (f) armação do bloco, (g) armação apoiada na fôrma, (h) passagem dos tubos PEAD e cabos pela lateral do bloco, (i) vibração do concreto, (j) vista do bloco após a concretagem, (k) vista do bloco curado e (l) reaterro.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Fonte: Autora.

O ensaio de prova de carga estática (PCE) foi realizado com base na NBR 16903:2020, exceto pelo fato de que não se esperou o tempo de 12 horas após a estabilização dos recalques no último estágio de carregamento.

A capacidade de carga da fundação foi estimada pela empresa Consultrix Engenheiros Associados Ltda. As cargas de ruptura e admissível foram iguais a 2240 kN e 1120 kN, considerando o fator de segurança determinístico igual a dois, como propõe a NBR 6122:2019.

O carregamento da estaca foi conduzido até 1,6 vezes a carga admissível, dada a capacidade do sistema de aplicação de carga. Deste modo, foram conduzidos dez estágios de carregamento sucessivos e iguais a 180 kN, sendo a carga do estágio mantida até atingir o critério de estabilização de recalques, onde a diferença de deslocamento entre leituras sucessivas deve ser igual ou inferior a 5% do deslocamento obtido no estágio. Respeitou-se também o tempo mínimo de 30 minutos e o máximo de 2 horas de duração de cada estágio.

A prova de carga estática requer uma aparelhagem que consiste em:

- Um sistema de aplicação de carga
- Dispositivos de medição de carga e deslocamento
- Um sistema de reação
- Um sistema de aquisição de dados.

O sistema de aplicação de carga se utilizou de um cilindro hidráulico da marca Yellow Power, com capacidade nominal de 2500 kN e curso de pistão de 250 mm, e uma bomba elétrica para acionamento do cilindro hidráulico. Este sistema deve ter uma capacidade pelo menos 10% maior que a carga máxima de teste.

Uma célula de carga do tipo coluna modelo C-200T da marca Alfa Instrumentos, com precisão de 0,3 kN e capacidade de 2000 kN, foi utilizada para medir a carga aplicada no topo da estaca.

Três transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) da marca Kyowa Electronic Instruments, modelo DLT-50AS, foram usados para monitorar os deslocamentos no topo da estaca. Idealmente devem ser utilizados quatro transdutores, mas um deles foi danificado e não houve tempo hábil para repará-lo antes da execução da PCE. Esses transdutores foram fixados em duas vigas de referência com 4,5 m de comprimento (vigas metálicas em perfil I), por meio de bases magnéticas e um braço extensível flexível, que permitiu o posicionamento de cada transdutor sobre o bloco da estaca.

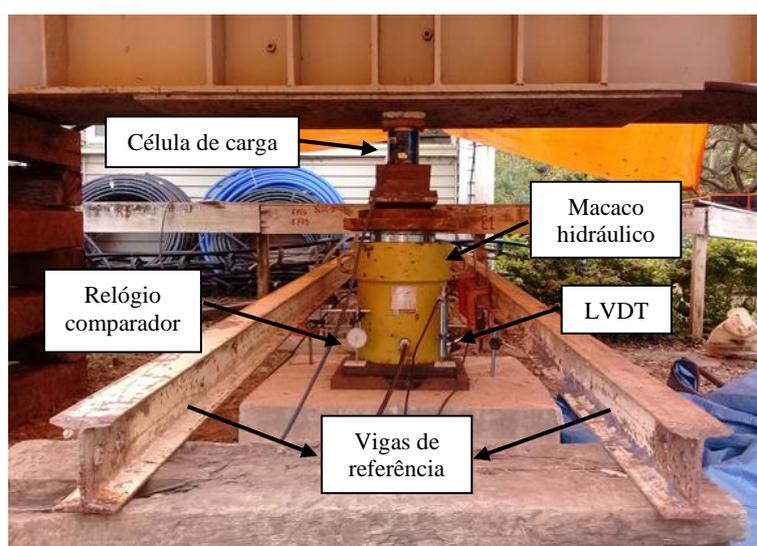
As 4 estacas de reação incluíram barras de aço do tipo INCO 45D, da empresa Incotep, com 6 metros de comprimento, e cujas especificações encontram-se detalhadas na Tabela 3.6.

Figura 3.32: Sistema de aplicação do carregamento durante a PCE: (a) vista frontal, (b) lateral e (c) dispositivos de aplicação de carga e medição dos deslocamentos



(a)

(b)



(c)

Fonte: Autora.

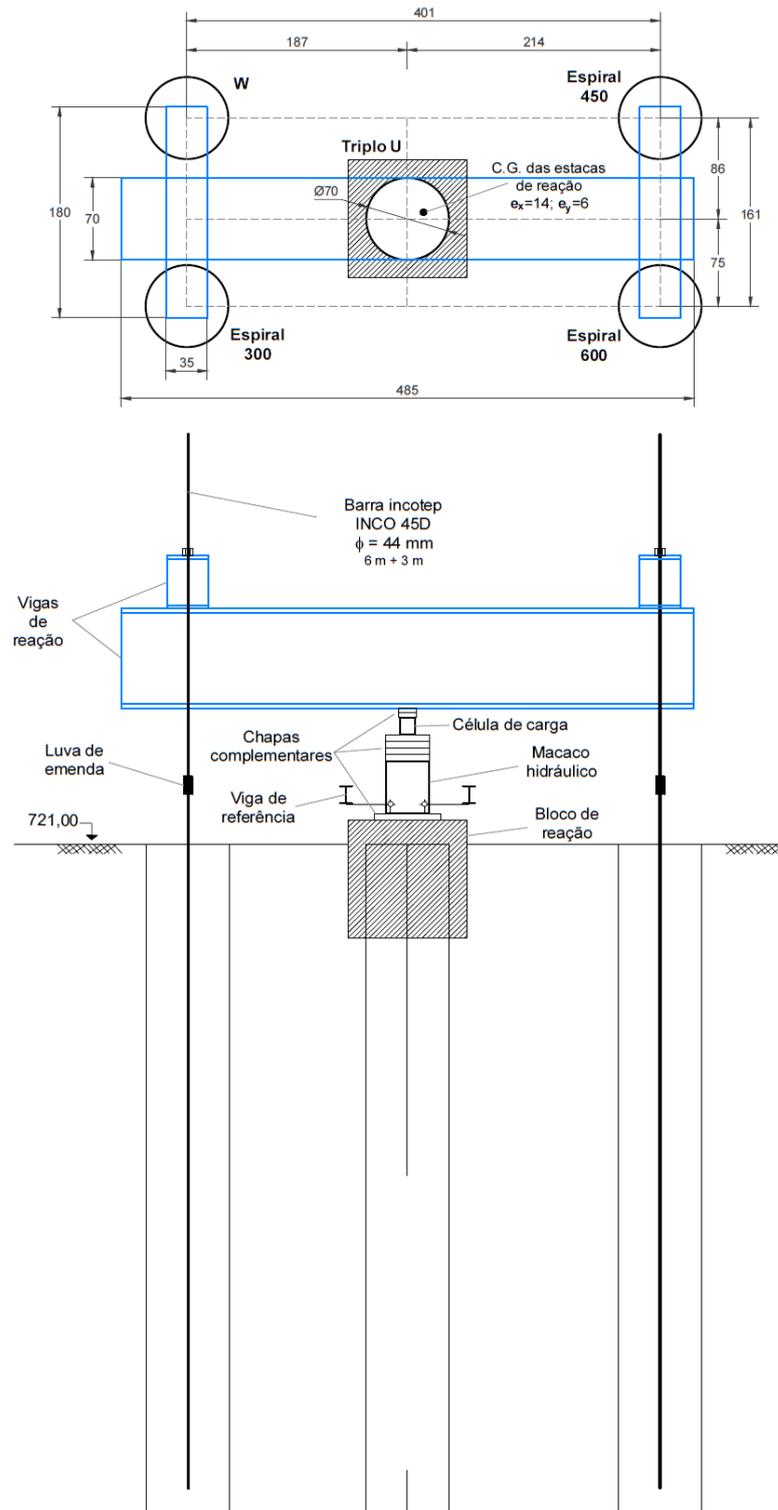
Tabela 3.6: Especificações da barra INCO-45D.

Barra	Diâmetro nominal	Diâmetro efetivo	Área (mm ²)	Módulo de elasticidade (kg/mm ²)	Peso linear (kg/m)	Carga limite (ton)		PCE (tf)
	(mm)	(mm)				Escoam.	Ultim.	
INCO-45D	44	41	1319	21000	10,5	89,7	114,7	67,3

Fonte: Incotep (2021).

As estacas que compõem o aparato do ensaio de prova de carga (estacas piloto) foram executadas com uma ligeira excentricidade, e um esquema do sistema de prova de carga como construído é detalhado na Figura 3.33.

Figura 3.33: Esquema das vigas de reação considerando a localização *as built*.



Fonte: Autora.

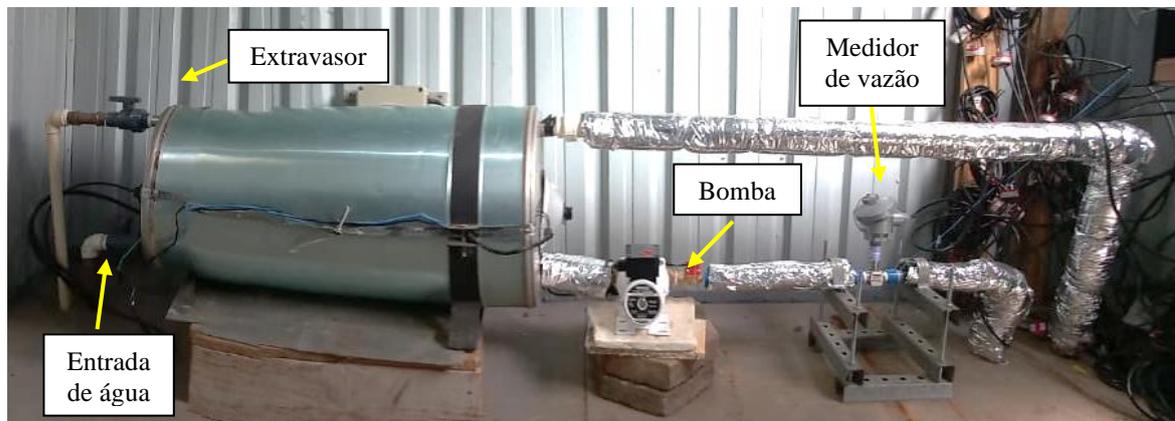
A estaca a ser comprimida durante o ensaio de prova de carga foi instrumentada com barras instrumentadas com sensores de deformação do tipo *strain gages* (SG), e com sensores de temperatura do tipo Pt-100, como detalhado no Item 3.3.3. No entanto, visto que a PCE se trata apenas de um ensaio de carga, somente os sensores de deformação foram monitorados neste ensaio.

3.4.2 Ensaio de resposta térmica (TRTs)

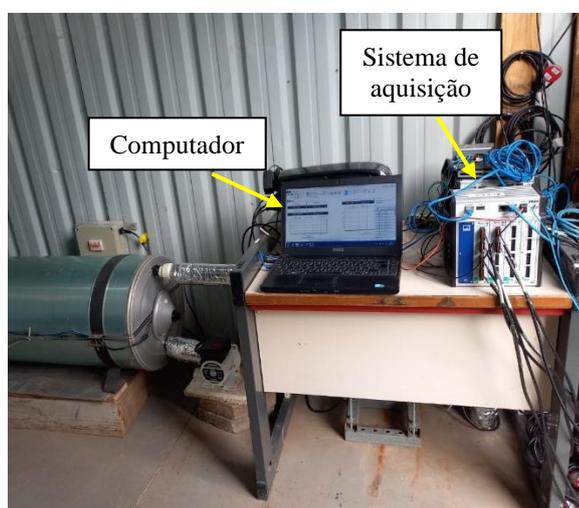
A fim de avaliar e comparar o comportamento térmico dos 5 tipos de estacas trocadoras de calor construídas com diferentes configurações de tubos PEAD, foram realizados ensaios de resposta térmica em cada uma das estacas piloto. Estes ensaios consistiram em injetar um fluxo de calor constante na estaca através da água que circula no interior dos tubos PEAD. Os equipamentos de ensaio foram montados em um container com 3 m de comprimento e 2,3 m de largura (Figura 3.34), com disposição similar àquela adotada durante os trabalhos de Bandeira Neto (2015) e Morais (2019), e compreenderam:

- Um reservatório térmico (boiler) com capacidade de armazenamento de 100 L para prover a água aquecida que circula no interior dos tubos;
- Uma resistência elétrica de 1000 W e outra de 500 W de potência, instaladas no reservatório para fornecer fluxo de calor constante durante o teste;
- Uma bomba de circulação de 350 W, modelo TP 120 da empresa Komeco, com três chaves de potência (120 W, 248 W e 350 W). Devido às diferenças de perda de carga hidráulica entre as estacas, cada potência fornecia vazões ligeiramente diferentes em cada estaca. As vazões da bomba eram de aproximadamente 12,5 l/min, 25 l/min e 35 l/min, respectivamente;
- Um medidor de vazão tipo turbina modelo SVLT de 1/2" fabricado pela empresa Contech Industria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda. Este medidor é capaz de fornecer monitoramento contínuo das vazões quando acoplado ao sistema de aquisição de dados, com capacidade de registrar vazões de 5 l/min a 35 l/min;
- Sensores de temperatura na entrada e saída da estaca, a fim de possibilitar o cômputo da variação de temperatura entre entrada e saída da estaca e a potência térmica injetada.

Figura 3.34: Aparato utilizado nos ensaios TRT: (a) sistema de circulação de água e (b) sistema de aquisição de dados acoplado ao computador utilizado no monitoramento de dados.



(a)

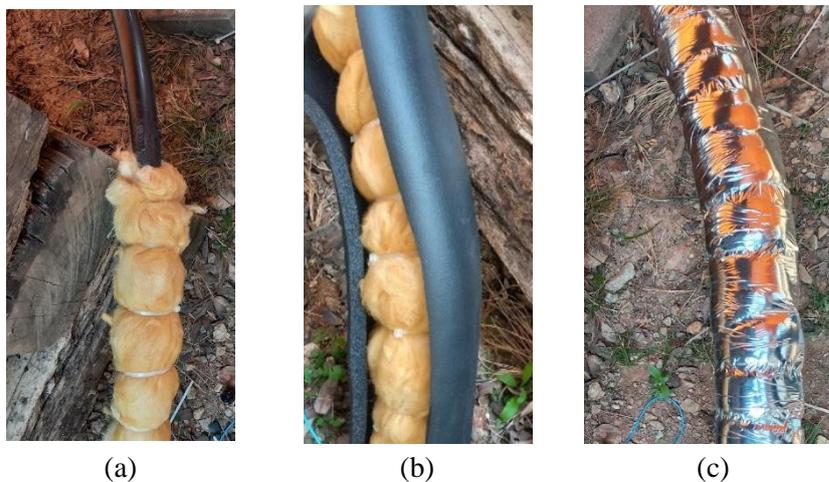


(b)

Fonte: Autora.

Os tubos e o ramal hidráulico foram isolados termicamente com uma camada de lã de vidro (Figura 3.35a), uma camada de espuma elastomérica (Figura 3.35b) e uma cobertura de fita adesiva metálica (Figura 3.35c).

Figura 3.35: Isolamento térmico dos tubos PEAD com (a) lã de vidro, (b) espuma elastomérica e (c) fita adesiva metálica.



Fonte: Autora.

A Tabela 3.7 resume as principais características dos ensaios TRT realizados, detalhados nos Itens a seguir.

Tabela 3.7: Ensaios TRT realizados nas estacas piloto.

Estaca	Ensaio	Vazão média (l/min)	Início e fim do aquecimento	Tempo de aquecimento	Tempo de resfriamento
Espiral com passo de 300 mm	S300 preliminar	14,9	20 a 23/02/2021 (14:27 às 12:28 h)	~3 dias (70 h)	-
Espiral com passo de 300 mm	S300	12,4	07 a 16/07/21 (11:25 às 12:03 h)	9 dias (216 h)	11 dias (264 h)
Espiral com passo de 600 mm	S-600	13	17 a 25/08/2021 (18:42 às 16:21 h)	~8 dias (190 h)	-
W (duplo U em série)	1-W curto	12,7	26 a 28/08/2021 (12:03 às 07:10 h)	~2dias (43 h)	-
W (duplo U em série)	1-W	12,7	20 a 28/09/2021 (17:39 às 18:51h)	~8dias (193h)	6,5 dias
Espiral com passo de 450 mm	S450	3,4-2,5	01/09/2021 (15:17 às 18:47 h)	3,5 h	-
Triplo U	3-U	9,2	03 a 11/09/2021 (13:40 às 13:52 h)	8 dias (192 h)	3 dias (71h)

3.4.2.1 Estaca S300

O primeiro ensaio TRT foi realizado na estaca S300, em fevereiro de 2021. Com 70 h de monitoramento, o computador que estava conectado ao sistema de aquisição de dados foi permanentemente desconectado do monitoramento remoto. Devido à impossibilidade de verificar o ocorrido presencialmente, a coleta de dados foi interrompida.

Neste ensaio foi utilizado um medidor de vazão modelo SVLT de 1", fabricado pela empresa Contech, com capacidade de medição de 15 a 230 l/min, e uma minibomba circuladora modelo TP-40 Thermo G3 da marca Komeco, com chaves de potência de 66 W, 92 W e 128 W. Tais equipamentos foram usados em pesquisas anteriores, mas: o medidor de vazão possuía uma capacidade superior à necessária aos ensaios e a bomba circuladora fornecia vazões muito próximas à capacidade limite inferior do medidor. Assim, nos ensaios seguintes optou-se por trocar o medidor de vazão e a bomba por equipamentos de capacidade menor e maior, respectivamente, conforme listados no item anterior.

Com o avanço da pandemia da Covid-19, os ensaios TRT só foram retomados em julho de 2021. O ensaio de aquecimento na estaca S300 foi então reiniciado, com período de aquecimento de 9 dias e 11 dias de resfriamento. O primeiro ensaio TRT realizado na estaca S300 é apresentado no Apêndice B, e referido como *S300-preliminar*, enquanto o segundo e mais longo ensaio é apresentado no Capítulo 4, onde são apresentados os principais ensaios TRT realizados.

3.4.2.2 Estaca S600

No ensaio TRT realizado na estaca S600, o período de aquecimento foi conduzido por 8 dias, e o período de resfriamento não foi registrado. Durante este ensaio ocorreram problemas frequentes de desligamento do computador utilizado no monitoramento dos dados, sempre nos períodos de maior temperatura ambiente, provavelmente causado por superaquecimento devido à sujidades presentes no interior da máquina. Inicialmente, como a razão do problema era desconhecida, muitas horas de ensaio foram perdidas. No entanto, durante os períodos de ausência de monitoramento, todo o aparato de ensaio permaneceu ligado.

3.4.2.3 Estaca I-W

O ensaio TRT na estaca em W simples foi iniciado em 26 de agosto de 2021. Com 42 h de aquecimento, o ensaio foi interrompido devido à uma inspeção da rede elétrica do CICS, que durou 2 dias, impossibilitando sua retomada em tempo. Como a estaca foi parcialmente aquecida, o ensaio foi reiniciado somente em 20 de setembro de 2021 e contabilizou 8 dias de aquecimento. O ensaio mais curto é apresentado no Apêndice B, referido como *I-W curto*, e o mais longo (oficial) no Capítulo 4.

3.4.2.4 Estaca S450

Durante o ensaio TRT na estaca com configuração em espiral S450, a imposição de uma vazão semelhante à dos demais ensaios foi dificultada por um possível problema de estrangulamento dos tubos durante a confecção ou execução da estaca, onde o leitor de vazão e a conferência em campo forneceram uma vazão muito baixa. Os resultados deste ensaio são apresentados no Apêndice B, referido como *S450*. Apesar do problema encontrado, os resultados obtidos indicaram forte relação entre a diminuição da vazão e o aumento da diferença de temperatura de entrada e saída da estaca.

3.4.2.5 Estaca 3-U

O ensaio TRT na estaca com tubos configurados em Triplo U compreendeu 8 dias de aquecimento.

3.4.2.6 Desafios na realização dos ensaios TRT

A realização de um monitoramento contínuo ao longo de vários dias durante os ensaios TRT trouxe alguns desafios, cabendo mencionar que:

- Muitos equipamentos precisam estar em bom funcionamento simultaneamente: medidor de vazão, bomba, resistências elétricas, sistema de aquisição, computador e uma quantidade significativa de sensores;
- O uso dos equipamentos por longos períodos começa a comprometer o seu funcionamento; por outro lado, pausas longas entre os usos geralmente acarreta necessidade de manutenção;
- Quedas de energia devido a manutenções periódicas na rede elétrica provocam interrupção nos ensaios;

- Computadores em meios expostos a muita poeira passam a apresentar problemas;
- Sensores expostos ao tempo por muito tempo passam a apresentar diferenças;
- Nem sempre a solução de um problema parece ter muita coerência, o que solicitou certa tentativa e erro durante a lida com o sistema de ensaio. A checagem de ligações elétricas e hidráulicas foi uma constante durante os ensaios.

3.4.3 Ensaio termomecânico

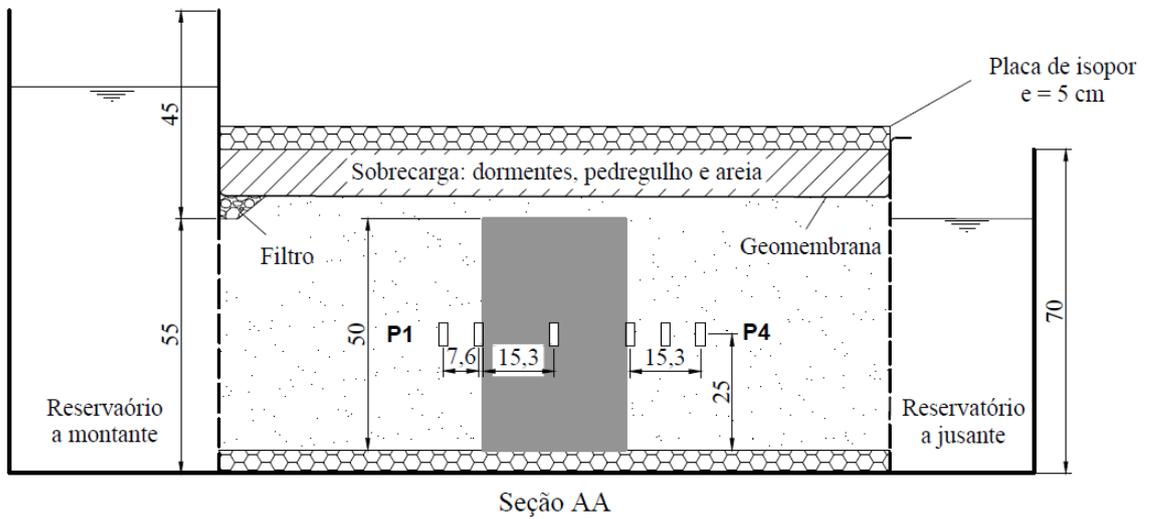
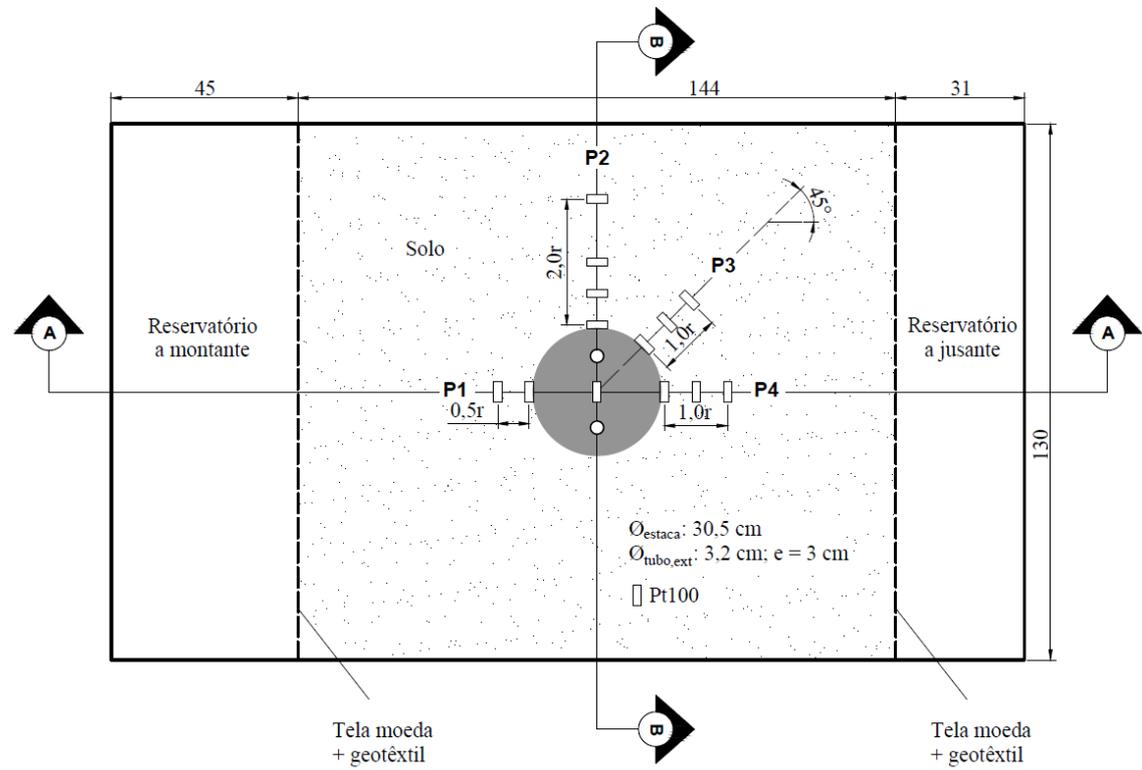
Após a realização da prova de carga estática, com total descarregamento e estabilização dos deslocamentos, a estaca em triplo U foi levada até a carga de serviço. Em seguida, o carregamento térmico foi aplicado até que a temperatura média do fluido na entrada e saída da estaca atingisse cerca de 35°C, o que corresponde aproximadamente à máxima temperatura de fluido de entrada às quais as estacas do edifício CICS estarão submetidas em condições de operação da bomba de calor. Após 24 h de aquecimento, a estaca foi então resfriada com a carga de serviço mantida. Este resfriamento foi forçado pela circulação de água fria no interior da estaca, a fim de acelerar o resfriamento da estaca. Durante este ensaio, a carga de serviço foi mantida pelo acionamento de uma bomba elétrica, à medida que a carga decaía. Assim, foram 29 h de acompanhamento presencial contínuo. A vazão média da água circulante nos tubos registrada foi de 10,9 l/min.

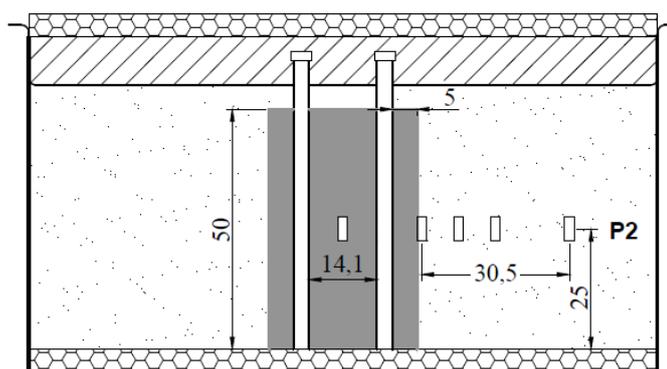
3.5 Ensaio em seção de estaca trocadora de calor

Um modelo experimental foi construído para avaliar os efeitos da saturação e do fluxo de água subterrânea no comportamento térmico de estacas trocadoras de calor em areia. O modelo consistiu em um segmento de estaca com tubo configurado em U simples, inserida em uma caixa preenchida com solo arenoso. A caixa possui reservatórios a montante e a jusante para permitir o estabelecimento de fluxo de água, como ilustra a Figura 3.36.

As temperaturas da estaca, do solo no entorno, e do ambiente foram registradas por meio de sensores de temperatura do tipo Pt100, acoplados a um sistema de aquisição de dados. A estaca foi instrumentada com um sensor no centro a meia altura. No solo, os sensores foram posicionados em distâncias proporcionais ao raio da estaca, r : a 0r, 0,5r, 1,0r e 2,0r, alinhados nas direções P1, P2, P3 e P4. Nos ensaios com fluxo de água, a temperatura da água dos reservatórios também foi registrada. Telas do tipo moeda e geotêxteis impediram que o solo escapasse para os reservatórios.

Figura 3.36: Aparato do modelo experimental.





Seção BB

Fonte: Autora.

3.5.1 Concepção do modelo

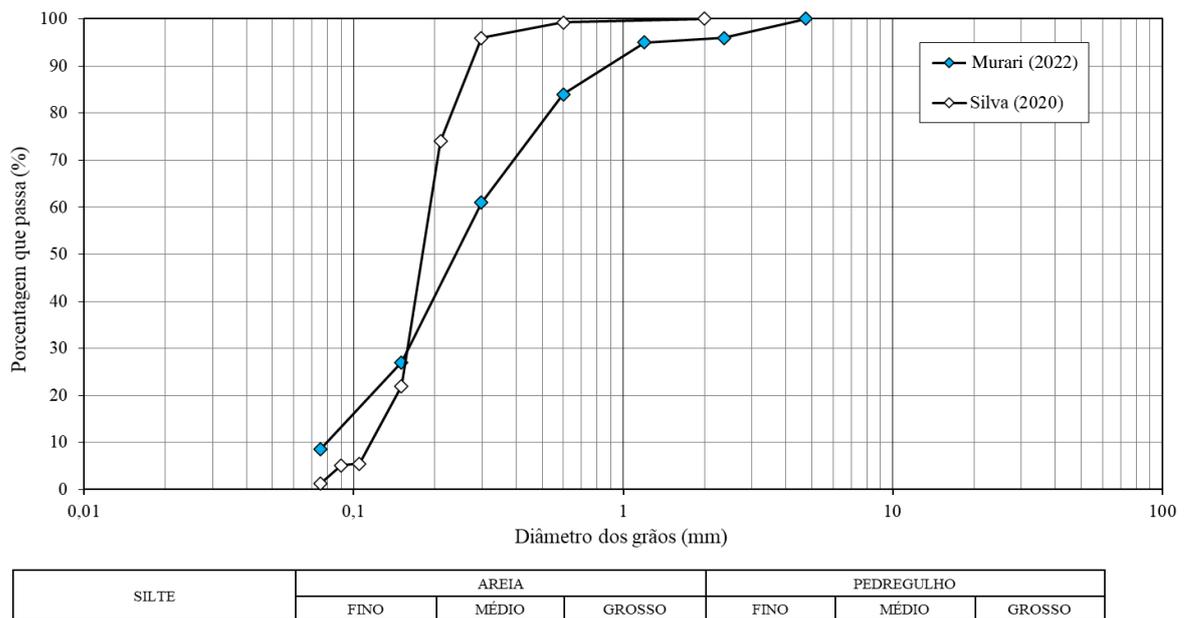
O principal requisito para a concepção do modelo era construir uma caixa que permitisse a simulação do fluxo de água subterrânea através de uma seção de estaca trocadora de calor por um certo tempo. Assim, o projeto do modelo experimental levantou questões sobre o tipo de solo, material e dimensões da caixa, e sistema de entrada e saída de água a serem utilizados.

Inicialmente, a caixa pré-concebida deveria ter um compartimento central com seção quadrada onde seriam colocados a estaca e o solo. O fluxo de água subterrânea seria mantido por meio de dois reservatórios laterais acoplados a um sistema de entrada e saída de água. A estaca teria cerca de 30 cm de diâmetro e 50 cm de altura, e o compartimento central da caixa uma seção de 1,30 m de lado. Os reservatórios laterais deveriam ter dimensões que permitissem inspeções e ajustes de acordo com a necessidade dos ensaios, pensados com 45 cm a princípio. O solo deveria ser arenoso, tanto devido à maior facilidade de montagem e repetições dos experimentos, como por consistir no tipo de solo dominante do subsolo do CICS, principal objeto de estudo desta pesquisa. Assim, a principal incógnita no dimensionamento geométrico da caixa seria a diferença de altura entre os reservatórios a montante e a jusante (ΔH).

De acordo com a lei de Darcy, o gradiente hidráulico está relacionado à velocidade do fluxo da água subterrânea e à condutividade hidráulica. Inicialmente, o aparato de ensaio deveria ser capaz de fornecer uma faixa de velocidades de fluxo de 0 a 1,5 m/dia (0 a $1,7 \times 10^{-5}$ m/s), com base em valores relatados na literatura. Dada a faixa de velocidades de fluxo de interesse, a diferença de carga hidráulica ΔH estaria relacionada à condutividade hidráulica da areia escolhida.

Na ocasião da concepção desse experimento, o Laboratório de Geotecnia da EESC/USP dispunha de dois tipos de areia, uma utilizada no trabalho de Silva (2020) e outra no trabalho de Murari (2022). Como os dois tipos de areia estavam disponíveis na região, optou-se por escolher dentre elas a que fosse mais adequada à utilização no modelo físico, com base nas características granulométricas (Figura 3.37) e em ensaios de permeabilidade de carga constante (Figuras 3.38 e 3.39).

Figura 3.37: Análise granulométrica das areias de Silva (2020) e Murari (2022).



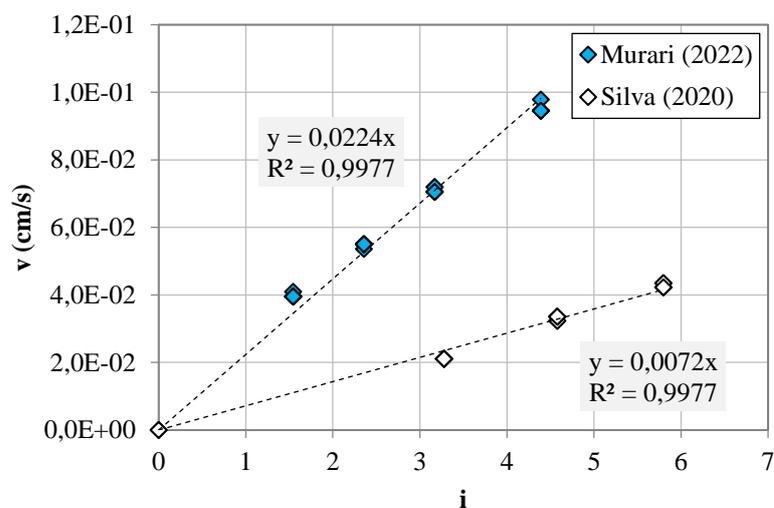
Fonte: Adaptado de Silva (2020) e Murari (2022).

Figura 3.38: Ensaio de permeabilidade de carga constante.



Fonte: Autora.

Figura 3.39: Resultados dos ensaios de permeabilidade.



Fonte: Autora.

A Tabela 3.8 resume os resultados obtidos. A condutividade hidráulica foi estimada de acordo com a correlação de Hazen e determinada através de ensaios de permeabilidade de carga constante (Figura 3.38).

Tabela 3.8: Características granulométricas e condutividades hidráulicas das areias de Silva (2021) e Murari (2022).

Areia	Características granulométricas			Condutividade hidráulica	
	D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	Correlação de Hazen (cm/s)	Ensaio de permeabilidade (cm/s)
Silva (2020)	0,11; 0,16; 0,19	1,73	1,22	1,2 x 10 ⁻²	7,2 x 10 ⁻³
Murari (2022)	0,08; 0,16; 0,29	3,75	1,20	6,4 x 10 ⁻³	2,2 x 10 ⁻²

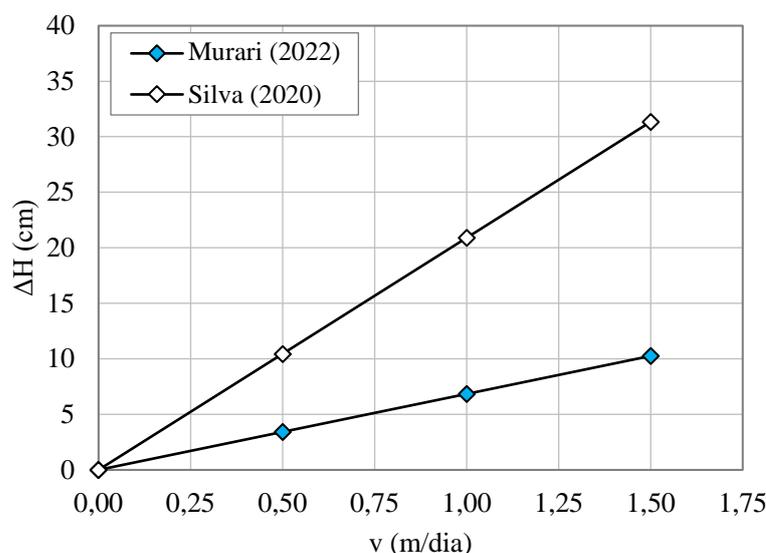
Fonte: Autora.

A areia de Silva (2020) é muito uniforme e mais uniforme que a areia de Murari (2022), pois quanto menor o coeficiente de uniformidade C_u, melhor a uniformidade de tamanho dos grãos. Ambos os tipos de areia são mal graduados. A areia de Silva (2020) era mais fina e esperava-se que apresentasse menor condutividade hidráulica, conforme confirmado pelos ensaios de permeabilidade. No entanto, a correlação de Hazen indicou o contrário, o que provavelmente está relacionado ao fato de que esta correlação considera apenas o diâmetro

efetivo dos grãos (D_{10}) e não representa a heterogeneidade da areia de Murari (2022). Por isso, foram considerados apenas os resultados dos ensaios de permeabilidade.

Finalmente, a diferença de altura entre os reservatórios a montante e a jusante, que se refere a uma faixa de gradiente hidráulica adequada (ΔH), foi estimada com base nos ensaios de permeabilidade, a faixa de velocidades (0 a 1,5 m / dia) e o comprimento da caixa submetido ao fluxo (130 cm), conforme indicado na Figura 3.40.

Figura 3.40: Pré-dimensionamento da caixa de ensaio



Fonte: Autora.

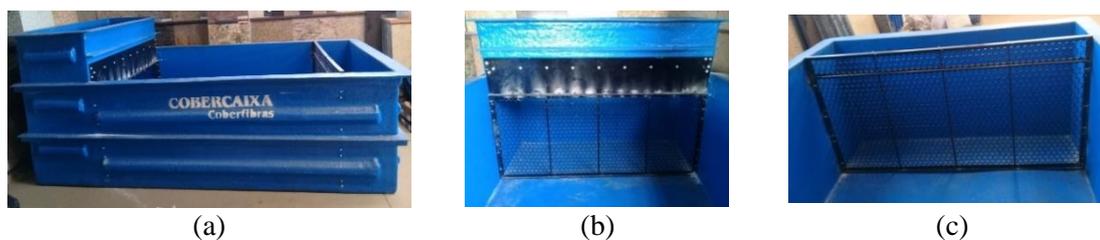
As areias de Silva (2020) e Murari (2022) forneceram valores práticos de cargas hidráulicas para fins de medição. Porém, a areia de Silva (2020) foi escolhida visto que valores maiores ofereceriam melhor precisão de medida, à medida que facilitaria a simulação de diferentes velocidades de fluxo. Além disso, por ser mais uniforme, é menos suscetível à segregação e poderia propiciar a confecção de amostras mais homogêneas.

Com base no projeto preliminar, foi considerada uma diferença de 40 cm de altura entre o reservatório a montante e a jusante. O reservatório a montante tinha 1 m e o de jusante 0,70 m de altura, adotando uma folga de 10 cm no topo da caixa. O compartimento central era quadrado com 130 cm de lado e reservatórios laterais com 0,45 m de largura. No entanto, a caixa sofreu algumas modificações ao ser adaptada aos testes, e as dimensões finais diferiram ligeiramente, conforme apresentado na Figura 3.36.

A caixa de ensaio foi construída pela empresa Coberfibras e confeccionada em fibra de vidro. As paredes da caixa foram reforçadas com chapas de metal para proporcionar condições

de resistência e durabilidade adequadas aos ensaios com areia inundada. Grades em tela moeda atuaram como interface entre o solo e os reservatórios e receberam pintura automotiva para garantir proteção contra umidade. A Figura 3.41 apresenta as vistas reais da caixa como executada, com as grades instaladas.

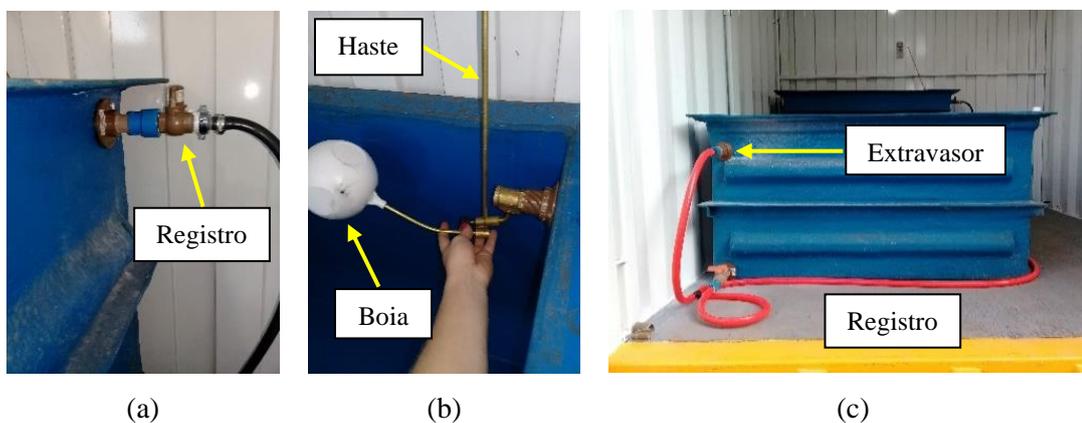
Figura 3.41: Caixa de ensaio: (a) vista lateral, (b) grade a montante e (c) grade a jusante.



Fonte: Autora.

Os ensaios com fluxo de água exigiram a instalação de um sistema de entrada e saída de água de modo a permitir o estabelecimento de diferentes velocidades de fluxo ou gradientes hidráulicos constantes. O sistema de entrada consistiu em um registro e uma mangueira de jardim acoplados a uma boia. A boia foi conectada a uma haste, que possibilitava a regulação do nível d'água em diferentes alturas, facilitando a imposição de diferentes gradientes hidráulicos. O sistema de saída abrangeu um extravasor na parte superior para manter o nível da água no mesmo nível da superfície do solo e um registro na parte inferior para limpeza, mantida fechada nos testes. Essas aberturas foram acopladas a mangueiras direcionadas para fora da caixa e do container. Esta atividade exigiu suporte técnico e o trabalho final é mostrado na Figura 3.42.

Figura 3.42: Sistema de entrada e saída de água da caixa: (a) entrada de água a montante, (b) boia com haste regulável e (c) saída do reservatório a jusante.



Fonte: Autora.

A água que alimentava o reservatório era proveniente de uma torneira instalada na parede da Creche da EESC/USP que fica em contato com o Campo Experimental. Embora a vazão disponível tenha sido variável ao longo do dia, por ser proveniente de um reservatório de água que abastece outras edificações da USP, foi suficiente para manter o gradiente hidráulico constante ao longo dos testes. No entanto, houve muita variação da temperatura da água no reservatório a montante, uma vez que a caixa d'água que abastece essa torneira sofre influência da temperatura ambiente, como relatado nos resultados dos experimentos com fluxo.

3.5.2 Caracterização da areia

Assim como a areia utilizada por Silva (2020), a areia utilizada nos ensaios é proveniente de uma cava em Analândia-SP, cidade localizada a cerca de 45 km de São Carlos. Foram adquiridos 2 m³ de areia (Figura 3.43a) sendo necessário cerca de 1 m³ para os ensaios. Como a areia comprada vem úmida, esta foi seca antes da realização dos ensaios. Dada a significativa quantidade de areia necessária e a distância entre o local de ensaio e o Departamento de Geotecnia, que dispunha das estufas Geotécnicas, optou-se por secar grande parte da areia ao ar (Figura 3.43b). Apenas uma pequena parte foi seca em estufa (Figura 3.43c). Após alguns meses de trabalho árduo, principalmente devido à falta de suporte técnico durante a pandemia de Covid-19, a areia foi finalmente seca, conforme mostrado nos *bags* da Figura 3.43d.

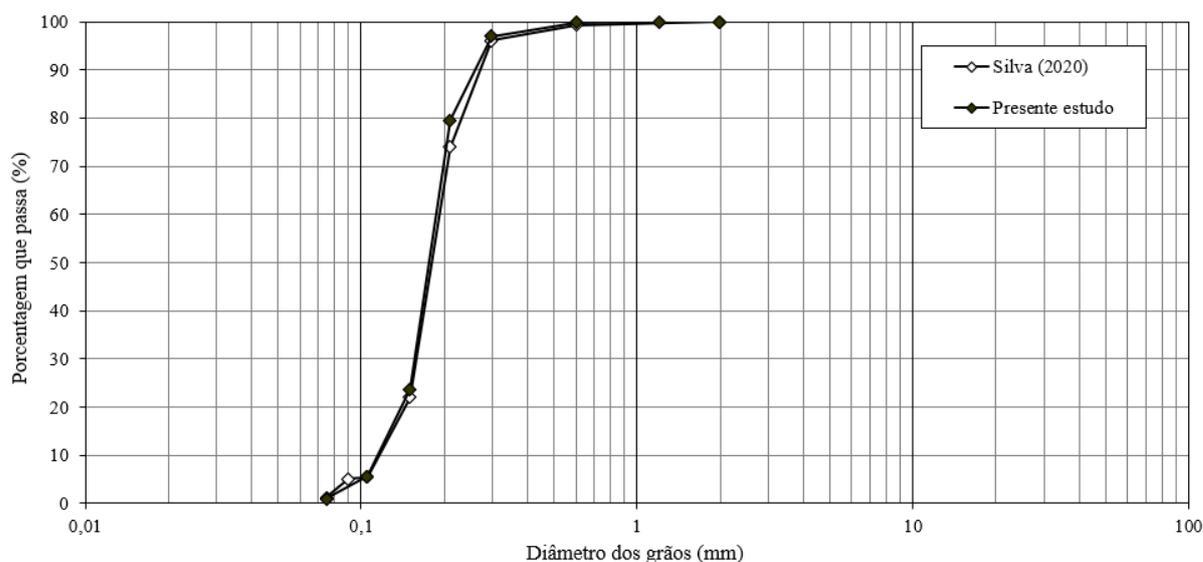
Figura 3.43: Areia de Analândia: (a) areia úmida, (b) secagem ao ar, (c) estufa geotécnica utilizada, e (d) areia seca armazenada em bags.



Fonte: Autora.

Uma análise granulométrica foi conduzida numa amostra da areia adquirida. O resultado foi comparado com o obtido para a areia de Silva (2020), conforme apresentado na Figura 3.44. Concluiu-se a partir desta comparação que as areias são as mesmas. Assim, optou-se por utilizar neste trabalho a caracterização realizada por Silva (2020), apresentada na Tabela 3.9.

Figura 3.44: Análise granulométrica da areia de Silva (2020) da areia utilizada no presente estudo.



SILTE	AREIA			PEDREGULHO		
	FINO	MÉDIO	GROSSO	FINO	MÉDIO	GROSSO

Fonte: Autora.

Tabela 3.9: Características da areia utilizada.

Ensaio	Propriedade	Valor
Picnômetro	Densidade dos grãos (G_s)	2,67
Análise granulométrica	Diâmetro efetivo da partícula (D_{10})	0,11 mm
	Diâmetro médio da partícula (D_{50})	0,18 mm
	Coefficiente de uniformidade (C_u)	1,73
	Coefficiente de curvatura (C_c)	1,22
Índice de vazios	Peso específico seco máximo ($\gamma_{d, \max}$)	17,66 kN/m ³
	Peso específico seco mínimo ($\gamma_{d, \min}$)	14,35 kN/m ³
	Índice de vazios máximo (e_{\max})	0,828
	Índice de vazios mínimo (e_{\min})	0,482

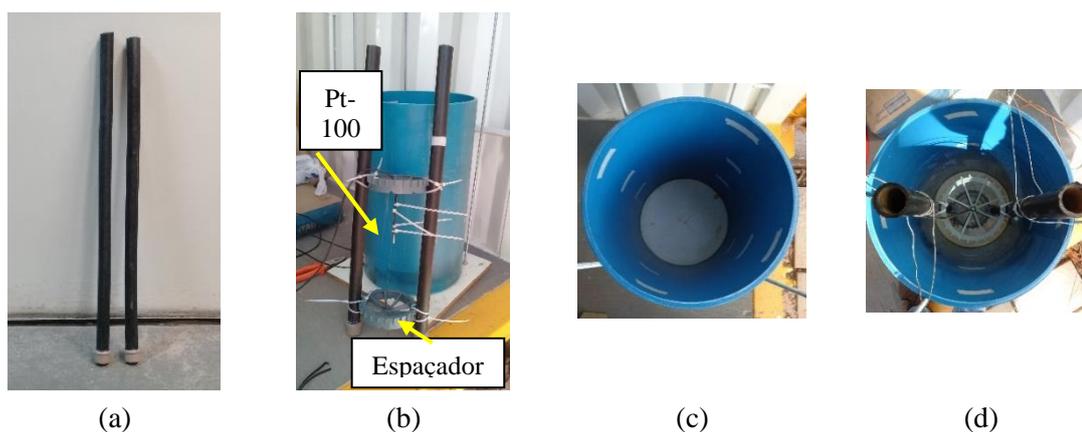
Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2021).

3.5.3 Execução da estaca

A construção do segmento de estaca seguiu 3 etapas principais: (1) preparação do aparato, (2) concretagem e (3) cura da estaca, conforme detalhado a seguir:

1) Dois segmentos de tubo PEAD com 32 mm de diâmetro externo e 26 mm de diâmetro interno foram fechados em um dos extremos com um *cap* de PVC e enchidos com água por sete dias para garantir que não haveria vazamentos posteriormente (Figura 3.45a). Para medir a temperatura no interior da estaca, um sensor Pt-100 foi fixado a um arame preso em 2 espaçadores de estacas, utilizados para manter os tubos espaçados durante a concretagem (Figura 3.45b). A forma da estaca consistiu em um segmento de tubo de PVC de 30,5 cm colado em uma base de compensado. O tubo de PVC foi dividido em três camadas para facilitar a densificação mecânica do graute durante a concretagem (Figura 3.45c), como uma adaptação à norma NBR 5738: 2016. Por fim, os tubos PEAD foram presos à hastes presas no compensado, a fim de evitar que se movessem durante o concretagem (Figura 3.45d).

Figura 3.45: Preparação da estaca de modelo: (a) teste de estanqueidade dos tubos PEAD, (b) arranjo dos tubos com espaçadores e Pt-100, (c) fôrma da estaca dividida em camadas e (d) tubos presos e posicionados na fôrma.

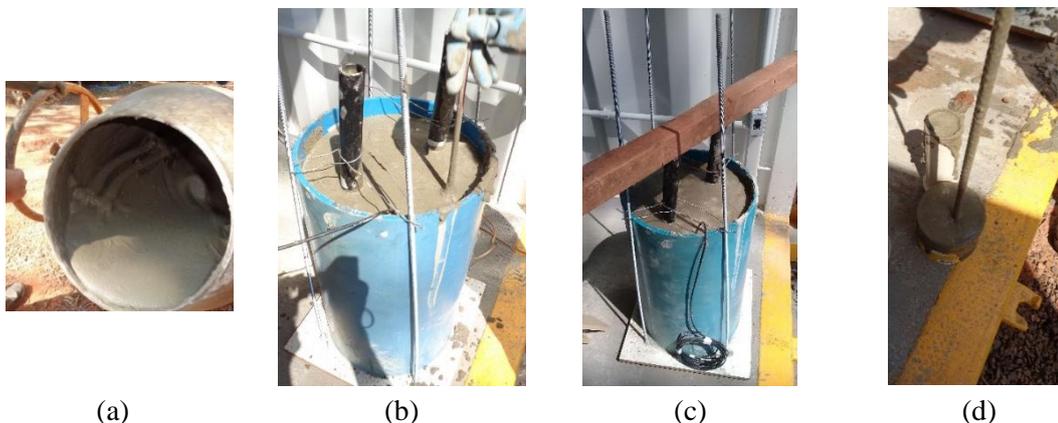


Fonte: Autora.

2) O graute foi preparado em betoneira (Figura 3.44a), e sua densificação foi realizada com uma barra de aço em três camadas (Figura 3.46b). Terminada a concretagem, um pedaço de madeira foi apoiado no topo dos tubos para impedir que flutuassem durante o enrijecimento do graute (Figura 3.46c). Dois corpos de prova foram preparados para fins de determinação da condutividade térmica do graute: um foi moldado no tamanho padrão para ensaio do tipo *needle probe* e um molde extra sem padrão de tamanho (Figura 3.46d).

A formulação do graute utilizada para o concreto da seção da estaca foi de 689 kg de cimento, 1687 kg de areia e 460 l de água para cada metro cúbico de mistura.

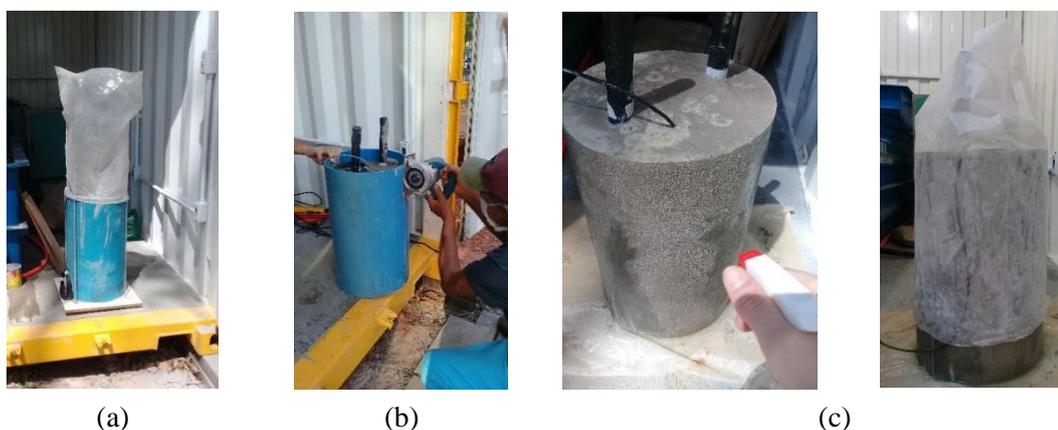
Figura 3.46: Concretagem da estaca: (a) mistura do groute na betoneira, (b) densificação do groute, (c) madeira apoiada nos tubos para evitar sua flutuação e (d) amostras do groute.



Fonte: Autora.

3) Após a concretagem, a estaca foi coberta com um saco plástico para evitar a perda de umidade (Figura 3.47a) por dois dias. Em seguida, a estaca foi desmoldada com o corte da fôrma de PVC (Figura 3.47b). Por fim, a estaca foi submetida à cura úmida por 3 dias (Figura 3.47c).

Figura 3.47: Cura da estaca: (a) forma coberta após concretagem, (b) desmolde da estaca e (c) cura úmida.



Fonte: Autora.

3.5.4 Programa de ensaios

O programa experimental compreendeu cinco ensaios efetivos realizados em diferentes condições de saturação e fluxo: um em areia seca, um em areia inundada e três ensaios em diferentes velocidades de fluxo. Além desses ensaios efetivos, foram feitos ensaios preliminares que contribuiriam para orientar o tempo de ensaio e guiar melhorias no aparato experimental. A

Tabela 3.10 resume os principais ensaios realizados em ordem cronológica. Os ensaios preliminares são discutidos nos Itens 3.5.6, 3.5.7 e 3.5.8, junto com as melhorias realizadas com base nesses resultados.

Tabela 3.10: Ensaios realizados.

Ensaio (identificação)	Início e fim do ensaio	Tempo de aquecimento	Tempo de resfriamento	Temperatura inicial da estaca (°C)
1. Seco (ED)	17 a 25/11/2020	~3 dias (75 h)	~5 dias (111 h)	22,8
2. Saturado (ES)	9 a 13/12/2020	~3 dias (76 h)	~3 dias (66 h)	22,5
3. Fluxo 4 cm (EF4) v = 0,4 m/dia	24 a 30/08/2021	3 dias (73h)	3 dias (76h)	22,2
4. Fluxo 8 cm (EF8) v = 0,8 m/dia	30/08/2021 a 5/09/2021	3 dias (73h)	3 dias (72h)	21,7
5. Fluxo 12cm (EF15) v =1,5 m/dia	17 a 23/09/2021	3 dias (61h)	3 dias ()	23,4

Fonte: Autora.

Diferente dos ensaios TRT nas estacas do CICS, nos ensaios em modelo reduzido aplicou-se uma temperatura constante na água dentro dos tubos instalados na estaca, ao invés de uma potência constante. Esta condição de temperatura constante é equivalente à situação em operação na qual a estaca trocadora de calor é submetida em sistemas de bombas de calor. Neste caso, as temperaturas na estaca aumentam até um certo limite, em função da condição de saturação e fluxo do meio.

3.5.5 Montagem dos ensaios

Os ensaios foram realizados em espaço climatizado para que a temperatura ambiente afetasse minimamente as respostas de temperatura obtidas. Devido à inexistência de uma sala climatizada que comportasse a caixa de ensaio no Departamento de Geotecnia da EESC/USP, foi alugado um contêiner com dimensões de 3 m x 2,40 m equipado com aparelho de ar-condicionado, instalado no Campo Experimental de Fundações da mesma instituição. Conforme a instalação do container no Campo, uma de suas laterais e a parte frontal ficavam

expostas ao sol vespertino (Figura 3.48a). A caixa de ensaio foi aproximadamente encostada na lateral do container onde predominava sombra (Figura 3.48b).

Figura 3.48: Container utilizado durante a realização dos ensaios: (a) posicionamento do container no Campo Experimental e (b) caixa instalada no container.



Fonte: Autora.

A montagem do primeiro ensaio, em areia seca, consistiu nas seguintes atividades:

- Inicialmente, foram instaladas mantas geotêxteis junto às grades da caixa, com o objetivo de impedir a passagem de areia para os reservatórios, ou seja, para servirem apenas como interface filtrante. O tipo de geotêxtil foi selecionado considerando a granulometria e a permeabilidade da areia utilizada, e possui abertura aparente dos poros menor que 0,1 mm e permeabilidade de 0,2 cm/s. As mantas foram fixadas por meio de costura e manta asfáltica adesiva, de acordo com a Figura 3.49a.

- Uma placa de isopor com 5 cm de espessura foi colocada na base da caixa para evitar troca de calor entre a base do modelo e o ambiente (Figura 3.49b). O segmento de estaca foi então centrado na caixa sobre a placa de isopor, e a caixa foi marcada em 4 camadas (Figura 3.49c), de modo a permitir o controle do volume de areia depositada. A areia foi depositada na caixa com o auxílio de um balde (Figura 3.49d), que foi pesado a cada lançamento. A areia foi compactada de modo que cada camada tivesse aproximadamente a mesma massa específica (Figura 3.49e).

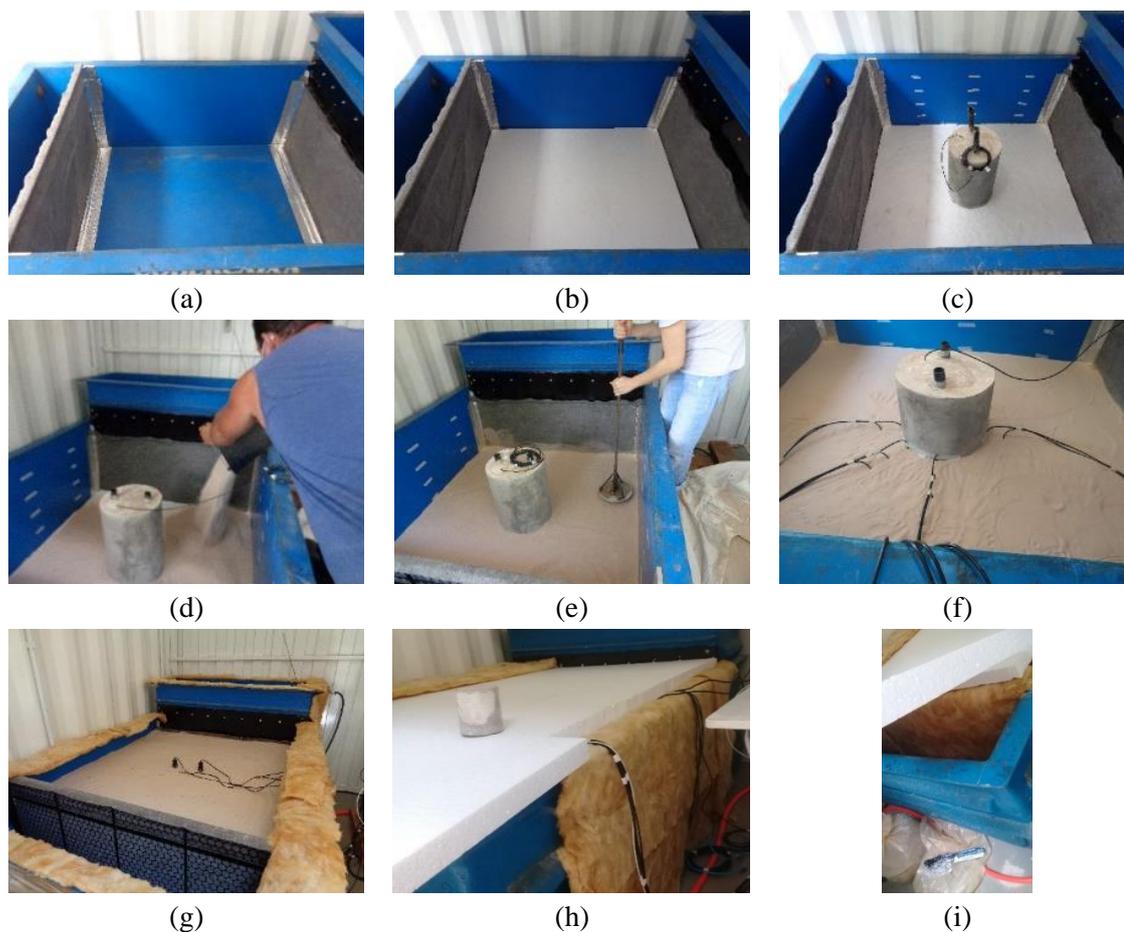
- Os sensores de temperatura foram posicionados no solo a meia altura da estaca, após a finalização da segunda camada de areia (Figura 3.49f). As duas camadas restantes foram sequencialmente depositadas (Figura 3.49g).

- Findada a deposição e compactação do solo, dois aquecedores de aquário foram instalados no interior dos tubos PEAD previamente preenchidos com água (Figura 3.49g);

- Mantas de lã de vidro foram fixadas à lateral da caixa que acreditava-se estar mais sujeita a variações da temperatura ambiente. O outro lado da caixa não foi coberto pois estava em contato quase direto com uma parede do container que não ficava exposta ao sol. O topo da caixa foi coberto com uma placa de isopor também de 5 cm de espessura. As grades também foram cobertas com mantas de lã de vidro (Figura 3.49h e 3.49i).

Nesses ensaios o isolamento térmico é essencial, de modo a fornecer respostas de temperatura independentes das variações de temperatura ambiente, que foi registrada por meio de um sensor instalado próximo à caixa.

Figura 3.49: Montagem do modelo para o ensaio seco: (a) instalação do geotêxtil, (b) placa de isopor no fundo da caixa, (c) estaca centrada no modelo, (d) deposição da areia em camadas, (e) compactação das camadas, (f) instalação dos sensores de temperatura no solo, (g) aquecedores de aquário no interior dos tubos PEAD, (h) lã de vidro na lateral da caixa e (i) lã de vidro na caixa.



Fonte: Autora.

Os aquecedores utilizados para aquecer a estaca foram previamente calibrados para que mantivessem a temperatura de 32°C na água dentro dos tubos durante a fase de aquecimento

(Figura 3.50). Esta temperatura foi definida em função da temperatura máxima usualmente atingida durante a operação das estacas trocadoras de calor (até 35 °C aproximadamente). Para a calibração, os aquecedores foram inseridos em uma proveta com água e ligados até atingirem a temperatura desejada, que foi registrada com um termômetro.

Figura 3.50: Calibração de aquecedores de aquário.



Fonte: Autora.

Os sensores de temperatura foram conectados a um sistema de aquisição de dados e um *software* foi utilizado para realizar o registro das temperaturas ao longo do tempo. Foi usado sistema de aquisição multicanais PMX, fabricado pela empresa Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH – HBM. Para o controle dos sistemas de aquisição foi utilizado o software CatmanEasy 4.5, também desenvolvido pela HBM. Este software permite o processamento, registro gráfico, visualização e tratamento dos dados após a aquisição. Devido à ausência de rede de internet dentro do container, não foi possível realizar o monitoramento remoto do ensaio, exigindo visitas constantes ao Campo Experimental a fim de checar o andamento dos resultados.

A montagem acima descrita foi realizada antes da execução do primeiro ensaio. No entanto, à medida que os ensaios foram sendo realizados, algumas adaptações foram implementadas no aparato experimental.

3.5.6 Ensaio em areia seca

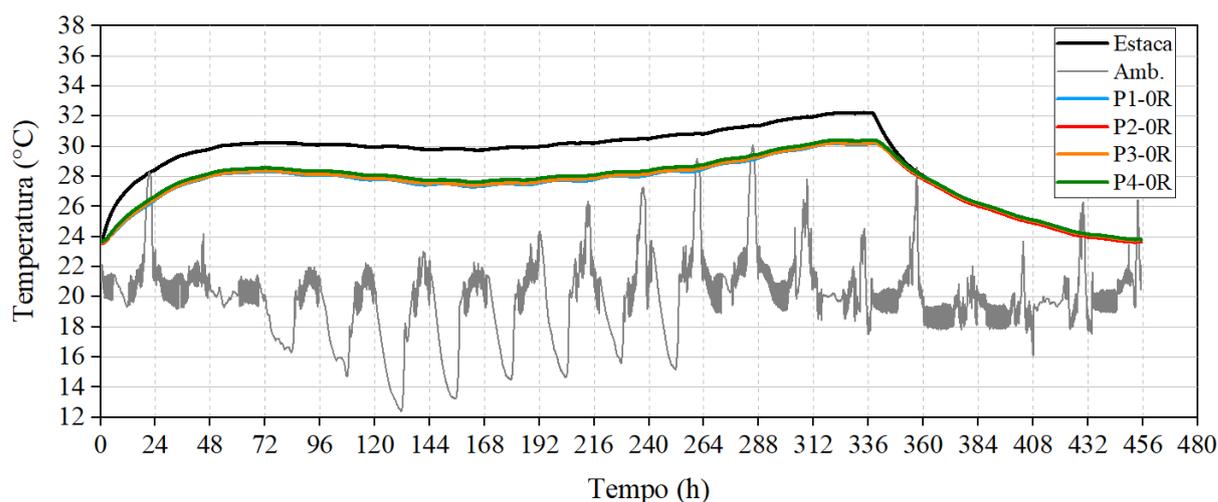
O primeiro ensaio foi conduzido em areia seca e será referido como *preliminar*. Foi iniciado em 27 de outubro de 2020 e findado em 15 de novembro do mesmo ano. A Figura 3.51 apresenta os resultados de temperatura obtidos na estaca, nos sensores no solo a 0R e no ambiente. A estabilização das temperaturas ocorreu em aproximadamente três dias de

aquecimento, no entanto, as temperaturas diminuíram a partir desse período e aumentaram a partir de 192 h. Essas variações foram mais pronunciadas com a proximidade dos sensores das paredes da caixa, como demonstrado nos resultados de temperatura obtidos nos sensores nas posições 0,5R e 1,0R, nas Figuras 3.52 e 3.53, respectivamente. As variações de temperatura foram nitidamente influenciadas pela temperatura ambiente.

A fase de aquecimento foi conduzida até cerca de 14 dias, com o intuito de compreender a evolução das respostas de temperatura com o tempo, avaliar a adequabilidade da montagem do ensaio e ajustar o tempo de aquecimento dos ensaios seguintes.

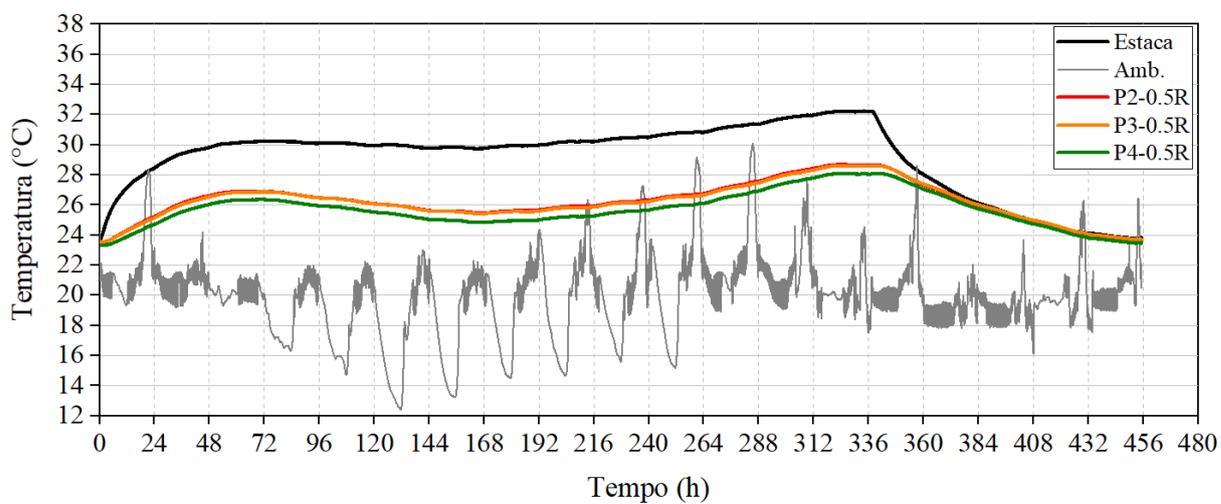
Alguns sensores de temperatura, como o P1-0R e o P4-1R, iniciaram a fase de aquecimento com uma temperatura diferente dos sensores localizados na mesma distância radial. Entretanto, esses sensores apresentaram comportamento aproximadamente paralelo aos sensores da mesma distância radial, o que sugeriu que as variações de temperatura obtidas seriam semelhantes entre eles. As respostas de temperatura foram então analisadas em termos de variações, apresentadas na Figura 3.54, que confirma a semelhança de comportamento entre sensores posicionados na mesma distância radial. Além disso, ao se comparar as variações de temperatura obtidas na estaca e no solo, nas diferentes distâncias radiais, o efeito da temperatura ambiente fica ainda mais evidente.

Figura 3.51: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 0R.



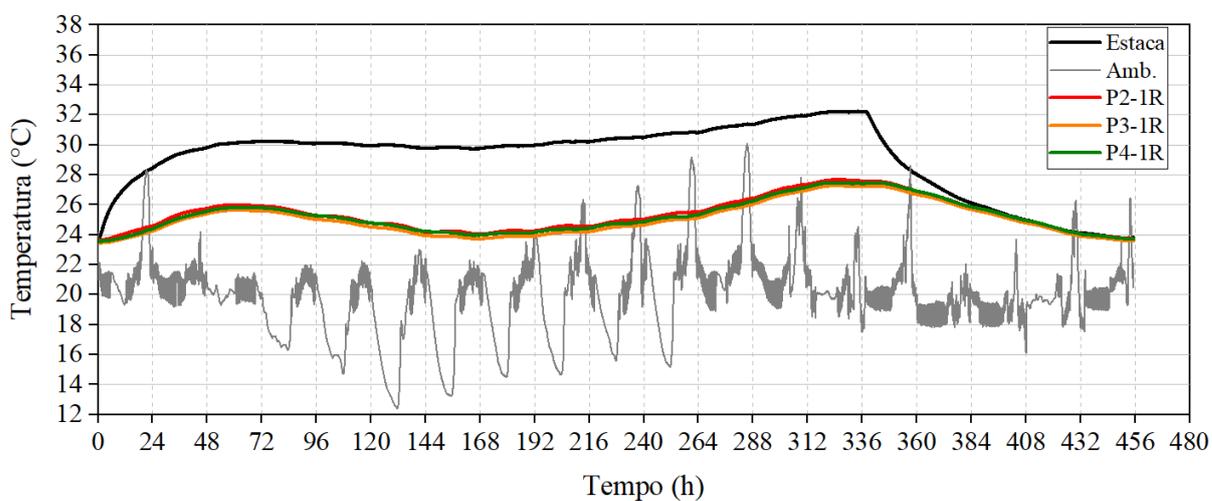
Fonte: Autora.

Figura 3.52: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 0,5R.



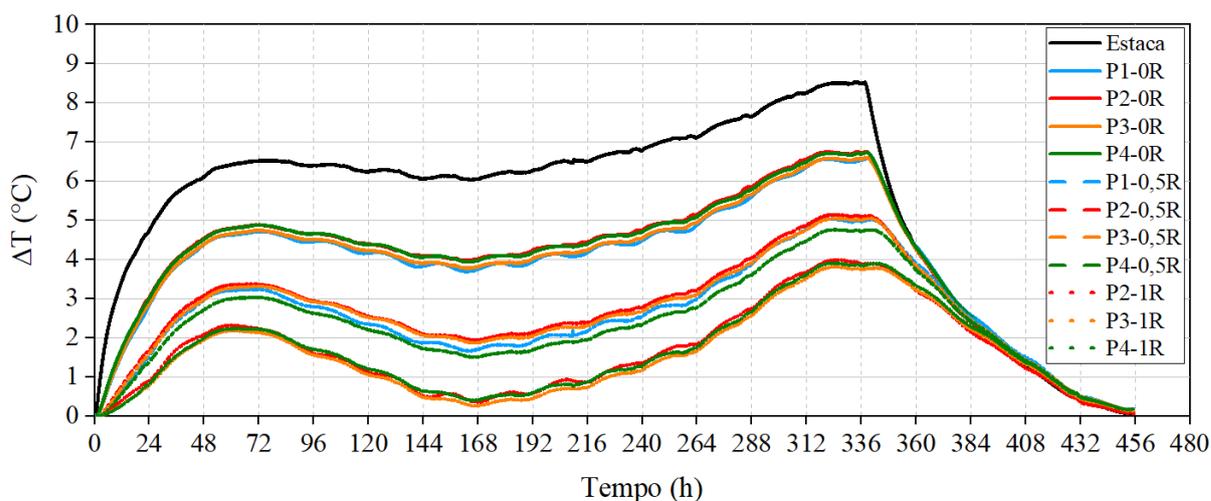
Fonte: Autora.

Figura 3.53: Ensaio preliminar em areia seca – temperatura da estaca, do ambiente e dos sensores a 1R.



Fonte: Autora.

Figura 3.54: Ensaio preliminar em areia seca - variação de temperatura na estaca e no solo.



Fonte: Autora.

Este ensaio demonstrou que a temperatura ambiente afetou significativamente os resultados, principalmente após 70 h de aquecimento, onde as variações de temperatura ambiente tornaram-se mais pronunciadas. Os sensores foram tão mais afetados pela temperatura ambiente quanto mais próximos da parede da caixa. Assim, com base neste resultado preliminar, foi realizado um reforço no isolamento térmico do experimento a fim de reduzir os efeitos da temperatura ambiente no comportamento térmico do solo e da estaca. O isolamento térmico foi melhorado cobrindo-se a manta de lã de vidro da lateral da caixa com fita metálica adesiva, como apresentado na Figura 3.55:

Figura 3.55: Reforço no isolamento térmico do experimento.



Fonte: Autora.

Os resultados do ensaio oficial realizado em areia seca após esta melhoria foram satisfatórios e são apresentados no Capítulo 6. Terminado este ensaio, o próximo ensaio previsto seria na condição saturada. No entanto, a caixa de ensaio começou a apresentar vários

pontos de vazamento assim que foi inundada, o que demandou a retirada da areia e reparo dos vazamentos. Na montagem seguinte, de maneira similar ao procedimento apresentado acima, um Pt-100 foi inserido na posição P2-2R. Além disso, o equipamento de ar-condicionado foi trocado por um de maior capacidade, que proporcionou uma temperatura ambiente mais estável.

3.5.7 Ensaio em areia saturada

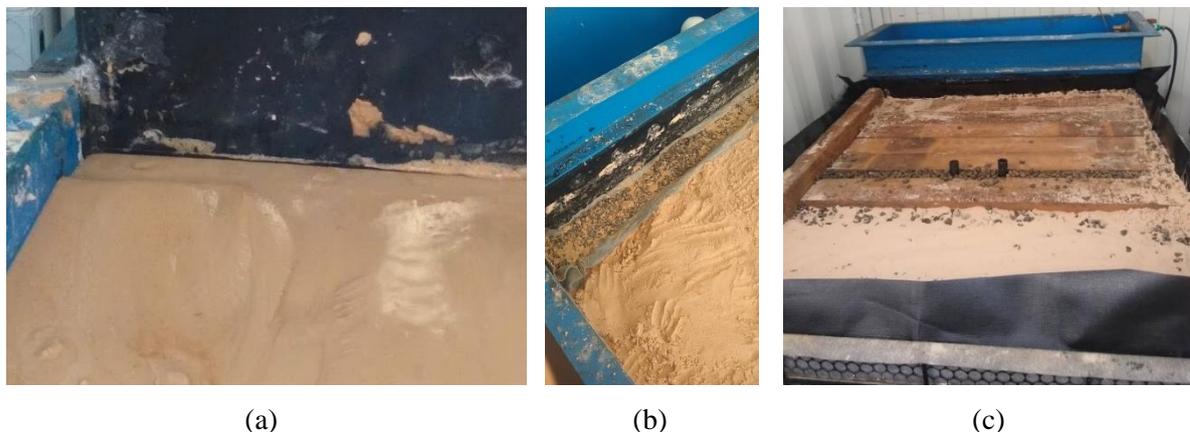
Para o ensaio com a areia na condição saturada, a caixa foi inundada e o ensaio foi iniciado com no mínimo um dia de espera, a fim de promover a saturação adequada da areia e a estabilização das temperaturas.

3.5.8 Ensaio com fluxo de água

Na realização dos ensaios com fluxo de água foram enfrentados alguns desafios. Assim que a diferença de nível de água do reservatório a montante e a jusante foi estabelecida, notou-se a ocorrência de *piping* junto à saída de água do reservatório de montante (Figura 3.56a). Esse processo ocorre quando o gradiente hidráulico atuante supera o gradiente hidráulico crítico, que relaciona o peso específico submerso da areia e o peso específico da água, e provocava erosão do solo e desordem nos caminhos de fluxo. Assim, ao invés do fluxo seguir horizontalmente, havia uma concentração de água junto à saída de água do reservatório de montante.

Inicialmente, optou-se por utilizar um filtro de britas na região de saída de água onde ocorria esse efeito, a fim de reduzir o gradiente hidráulico de saída. A segunda medida adotada consistiu em confinar o topo da camada de solo com sobrecargas, o que induziria a água a fluir horizontalmente. Para isso, uma geomembrana impermeável foi posta sobre a areia e, sobre ela, dormentes de madeira, britas e areia, como exibido na Figura 3.56. Esta solução foi efetiva.

Figura 3.56: Soluções implementadas para realização dos ensaios de fluxo: (a) Efeito de piping e escoamento superficial, (b) filtro de brita e (c) confinamento com sobrecarga.



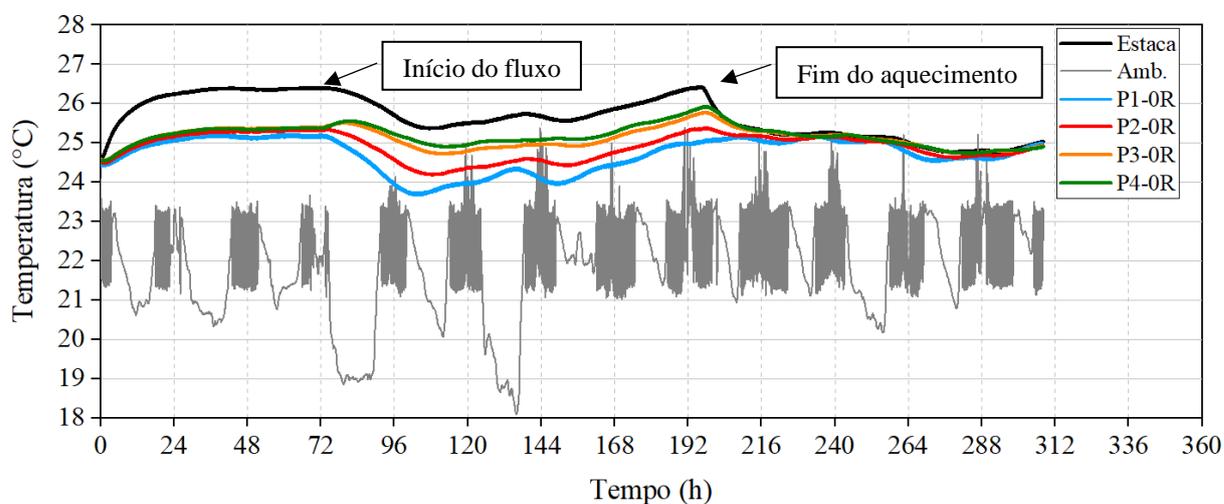
Fonte: Autora.

O primeiro ensaio com fluxo foi conduzido da seguinte maneira: aplicou-se o aquecimento na estaca por 72 h, com a areia na condição saturada e sem fluxo. Em seguida, aplicou-se um fluxo de água com velocidade igual a 0,6 m/dia. Este procedimento foi adotado com o objetivo de analisar a influência do fluxo num solo inicialmente saturado e sem fluxo, pois as temperaturas durante a fase sem fluxo já eram conhecidas pelos resultados dos ensaios em areia saturada. Essa simulação também reproduziria o efeito de um rebaixamento de lençol freático.

Após a aplicação do fluxo, a temperatura da estaca diminuiu significativamente, assim como a temperatura dos sensores P1-0R e P2-0R, como indica a Figura 3.57. Por outro lado, os sensores P3-0R e P4-0R, a jusante dos aquecedores, experimentaram um aumento de temperatura antes do decréscimo e menos pronunciado que nos sensores a P1-0R e P2-0R, o que sugere que calor foi carregado para jusante através do fluxo de água. Durante a aplicação do fluxo, notou-se que as temperaturas eram influenciadas pela temperatura ambiente, mas não diretamente.

Os aquecedores foram mantidos ligados por cerca de oito dias, para auxiliar na compreensão das respostas obtidas. A partir de 102 h de ensaio, a temperatura dos sensores a montante, da estaca e dos sensores a jusante, começou a aumentar, nesta ordem. As temperaturas então passaram a oscilar, sem uma tendência definida. A partir disso, cogitou-se que a temperatura da água que alimentava o reservatório a montante estava sendo influenciada pela temperatura do ambiente externo ao container, o que foi confirmado posteriormente.

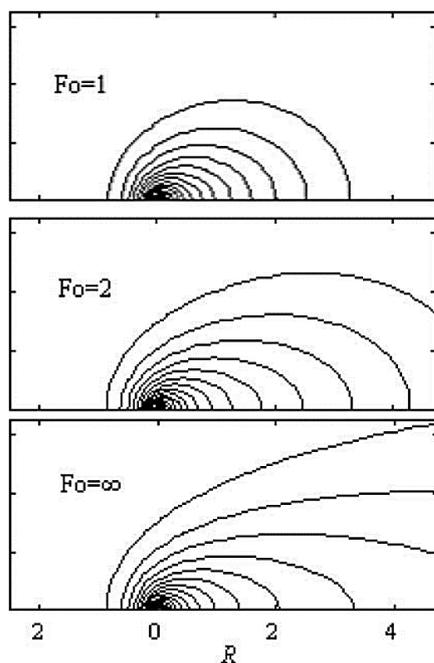
Figura 3.57: Ensaio preliminar com fluxo de água – temperatura da estaca, do ambiente e do solo a 0R.



Os resultados também foram analisados em termos de variações de temperatura, de acordo com a Figura 3.59. O sensor que apresentou maior acréscimo de temperatura após a aplicação do fluxo foi na posição P4 (a jusante da estaca), e o sensor na posição P1 (a montante) apresentou maior decréscimo de temperatura. Estes resultados confirmam o comportamento esperado de quando se tem fluxo de água no solo.

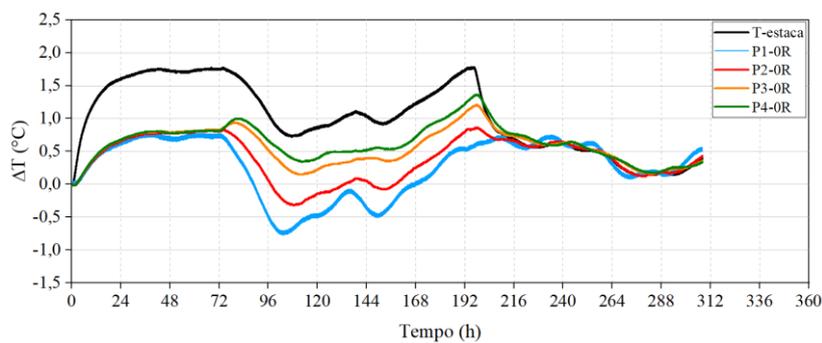
Como observado em Diao *et al.* (2004), quando a advecção da água desempenha um papel na transferência de calor, as distribuições de temperatura tornam-se assimétricas com um viés a jusante do aumento da temperatura (Figura 3.58). As temperaturas no solo foram afetadas pelo movimento da água devido ao calor transportado a jusante pela advecção da água, o que também causou o aumento da temperatura na posição P4.

Figura 3.58: Isotermas de uma fonte linear em um meio infinito com advecção.

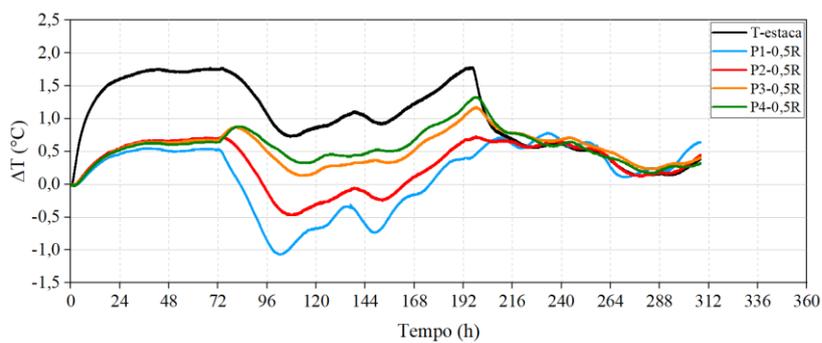


Fonte: Diao *et al.* (2004).

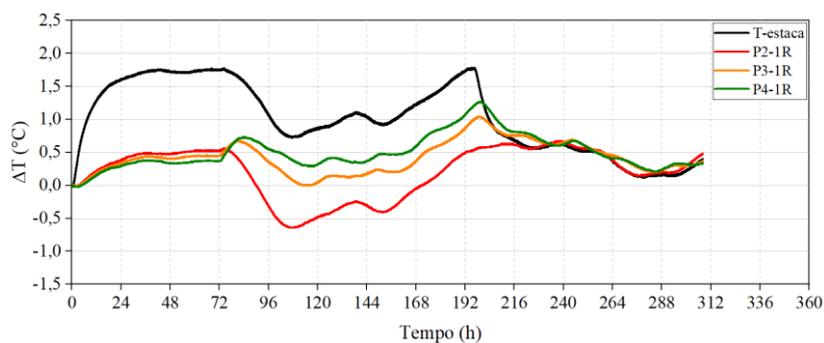
Figura 3.59: Ensaio preliminar com fluxo de água – variação de temperatura da estaca e do solo nas diferentes distâncias radiais.



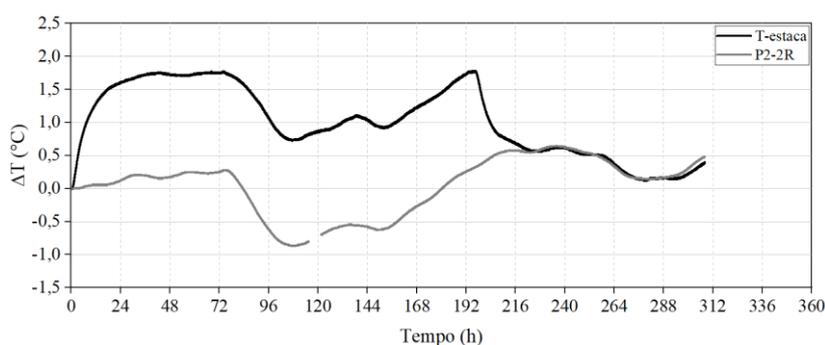
(a) 0R



(b) 0,5R



(c) 1R



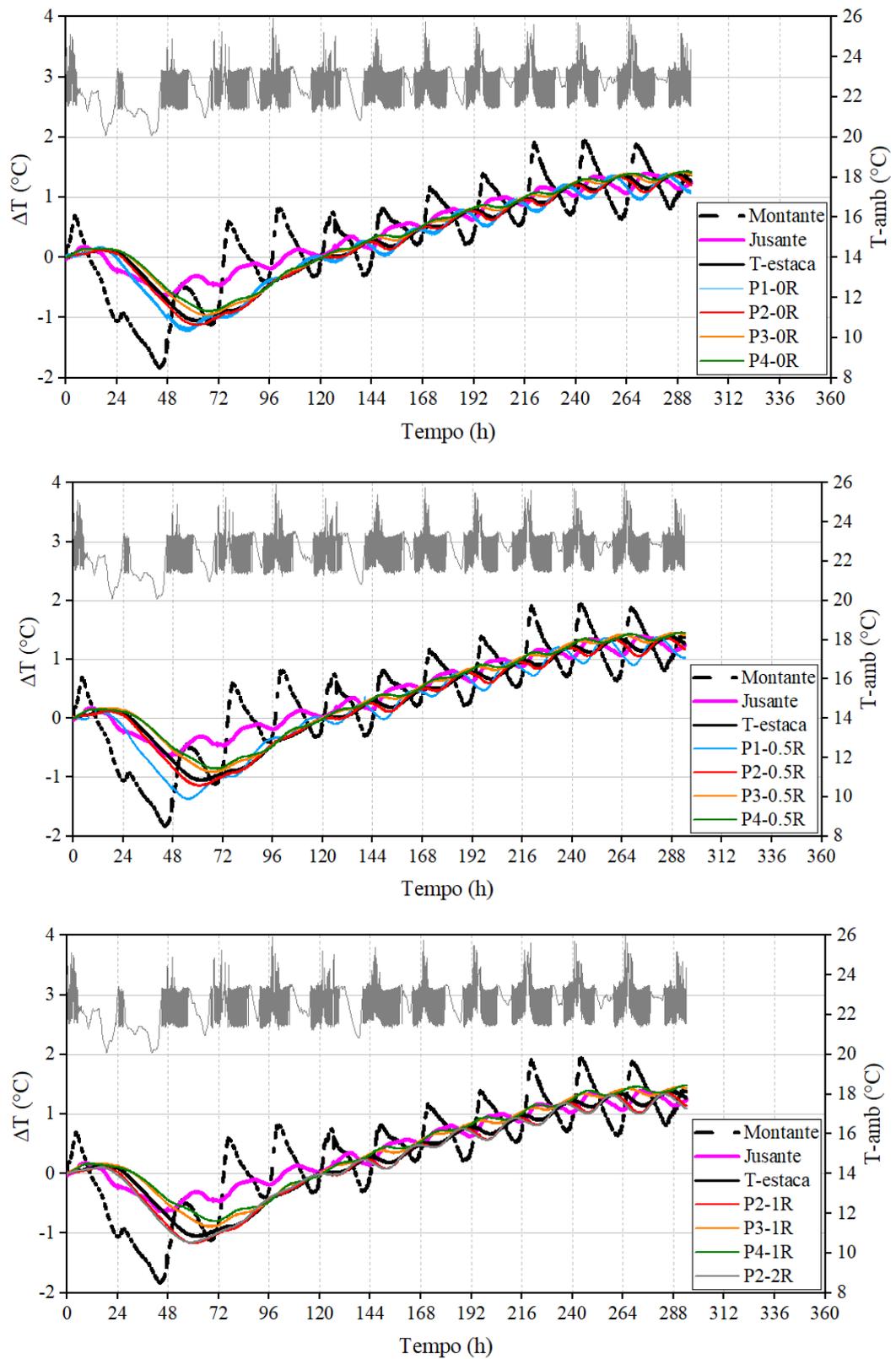
(d) 2R

Fonte: Autora.

Considerando os resultados obtidos neste ensaio preliminar com fluxo, ficou clara a necessidade de conhecer a temperatura da água dos reservatórios durante os ensaios para possibilitar uma interpretação mais assertiva dos resultados. Assim, um sensor de temperatura foi instalado em cada reservatório, dentro da água e próximo às grades.

Em seguida, foi realizado um ensaio com fluxo de água e sem aquecimento para verificar se a temperatura da água dos reservatórios variava e se afetava temperatura do solo e da estaca. A aquisição deste ensaio foi iniciada assim que o fluxo foi ligado, e o fluxo ainda não estava estável e bem estabelecido. Os resultados obtidos são apresentados em termos de variação de temperatura na Figura 3.60. A partir de 120 h de ensaio nota-se uma relação muito próxima entre a variação de temperatura dos reservatórios e dos sensores na estaca e no solo. Os resultados demonstram nitidamente que a temperatura da água que alimenta o fluxo, varia e afeta as respostas de temperatura da estaca e dos sensores.

Figura 3.60: Efeito da variação da temperatura dos reservatórios no sistema na estaca e no solo nas diferentes distâncias radiais.



Fonte: Autora.

A variação da temperatura dos reservatórios mostrou ser afetada pelo ambiente externo ao container, pois o ar-condicionado foi capaz de manter a temperatura ambiente em torno de um valor constante, sem tendências de acréscimo ou diminuição significativas, enquanto a temperatura da água no reservatório a montante apresentou nítida tendência de crescimento com o tempo.

A mangueira que conduzia a água continuamente ao ensaio de fluxo ficava do lado de fora do container e exposta ao sol, aquecendo e resfriando a água em seu interior ao longo do dia. Assim, a mangueira foi revestida com um tubo isolante elastomérico e com uma fita adesiva metálica refletiva, como demonstrado na Figura 3.61. Além disso, foram instalados aquecedores de aquário no reservatório a montante, de modo a minimizar as variações de temperatura da água. No entanto, esta solução só se fazia eficiente quando a temperatura da água que abastecia o reservatório era igual ou inferior à temperatura alvo, em torno de 22°C.

Figura 3.61: Localização e isolamento térmico da mangueira que alimentava o reservatório a montante.



Fonte: Autora.

4 EFEITO DA CONFIGURAÇÃO DOS TUBOS TROCADORES DE CALOR NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS ESTACAS

A eficiência das estacas trocadoras de calor com diferentes configurações de tubos foi avaliada por meio de ensaios de resposta térmica (TRTs), que permitiram o cômputo da resistência térmica e da eficiência na troca de calor de cada uma das estacas. Além disso, a instrumentação da estaca em diferentes profundidades contribuiu para a avaliação do comportamento térmico da estaca nas diferentes camadas de solo atravessadas, assim como da influência desse comportamento na temperatura das estacas vizinhas. Das quatro estacas ensaiadas, somente na estaca com configuração em espiral com passo de 300 mm (S300) foi monitorada a fase de resfriamento. A Tabela 4.1 reúne as principais características de cada estaca ensaiada.

Tabela 4.1: Características das estacas ensaiadas.

Estaca (identificação)	Cota de ponta da estaca (m)	Altura dos tubos, H (m)	Comprimento dos tubos, L (m)	Profundidade dos sensores Pt-100 (m)
W simples (1-W)	15,0	10,4	42	3,5; 5,5; 8,5 e 11,5
Triplo U em série (3-U)	15,0	10,4	63	1,3; 3,5; 5,5 (em 3 posições), 8,0; 10,5 e 14
Espiral 600 mm (S600)	15,0	10,6	32	3,5; 5,5; 8,5 e 11,5
Espiral 300 mm (S300)	15,0	10,6	61	1,5; 3,5; 5,5; 8,5 e 11,5

Fonte: Autora.

4.1 Resultados gerais

Durante os TRTs, a vazão e os valores de temperatura de fluido de entrada e saída foram registrados e usados para estimar a potência térmica injetada no solo, q_l , calculada pela Equação 2.

Os valores médios da potência térmica injetada e vazões durante os TRTs encontram-se resumidos na Tabela 4.2. Para o caso de estaca 3-U, a vazão foi aproximadamente 25% menor em comparação com as outras estacas. Isso aconteceu provavelmente devido a um

superaquecimento da bomba circuladora que levou à redução de seu desempenho. A potência média injetada das estacas foi de aproximadamente 1500 W.

Tabela 4.2: Condições dos ensaios TRT.

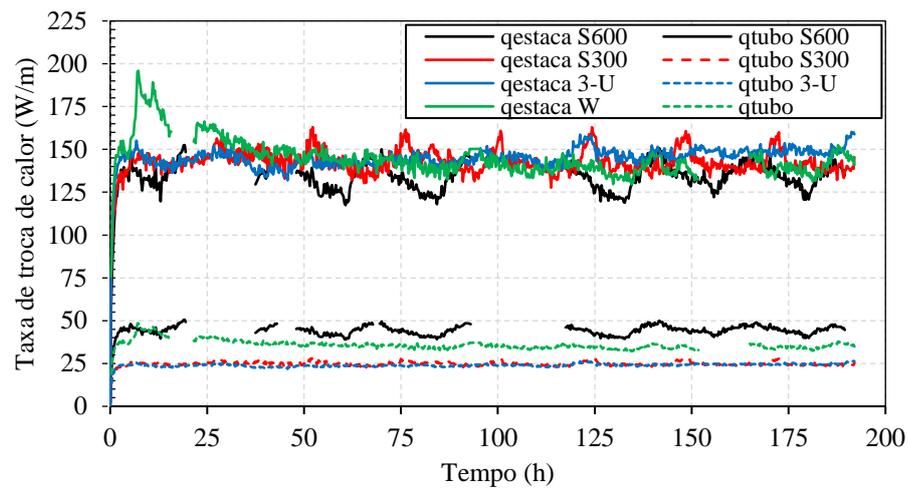
Estaca	Potência térmica injetada, Q (W)	Vazão (m ³ /h)
1-W	1481	0,77
3-U	1512	0,55
S600	1422	0,78
S300	1517	0,75

Fonte: Autora.

A Figura 4.1 apresenta os resultados de potência linear (taxa de troca de calor por metro de estaca), (W/m), definida como a taxa troca de calor normalizada pelo comprimento da estaca preenchido com tubos trocadores de calor (H), referida como q_{estaca} , e normalizada pelo comprimento dos tubos, q_{tubo} . Conforme mostrado nas Figura 4.1 e A Figura 4.2 apresenta a variação das temperaturas médias do fluido trocador de calor e do ambiente durante os TRTs. A temperatura ambiente atinge variações de aproximadamente 15°C, e parecem afetar os resultados da temperatura do fluido que circula nas estacas. No entanto, essa influência não prejudica a resposta geral de temperatura do fluido.

Figura 4.2 para as estacas S600 e 1-W, os dados dos ensaios não foram registrados ao longo de todo o período devido à falhas na aquisição de dados causadas por desligamento no computador. O valor médio de q_{estaca} se situa em torno de 142 W/m. No ensaio na estaca em W, acredita-se que tenha havido algum problema passageiro nos sensores de temperatura. Por outro lado, os valores de q_{tubo} apresentam maior dispersão, onde ensaios em estacas com comprimentos de tubo semelhantes se aproximam.

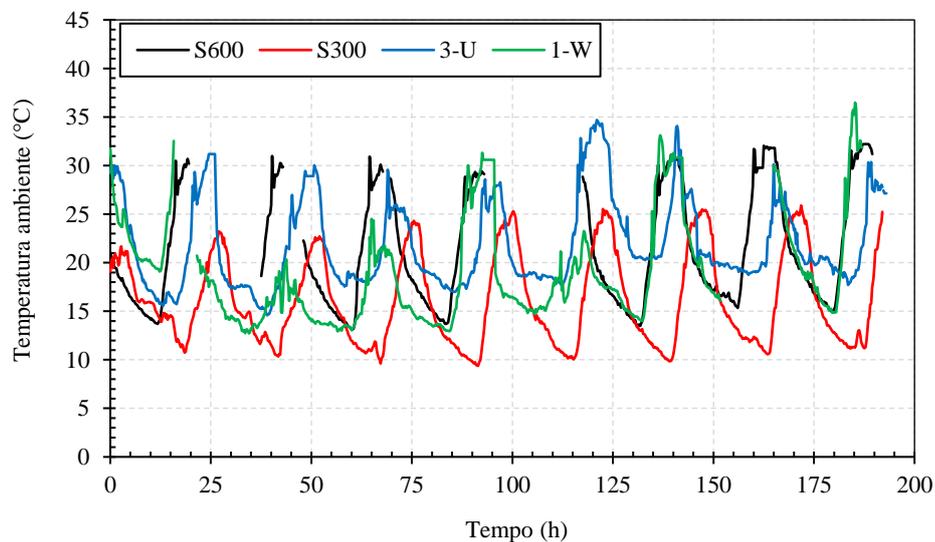
Figura 4.1: Taxa de troca de calor por comprimento de tubo, q_{tubo} , e por comprimento de estaca, q_{estaca} .



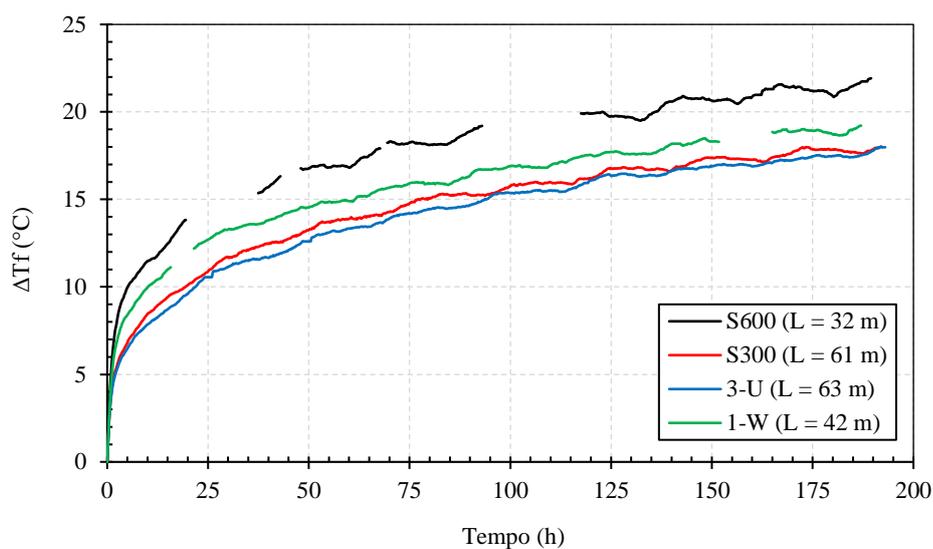
Fonte: Autora.

A Figura 4.2 apresenta a variação das temperaturas médias do fluido trocador de calor e do ambiente durante os TRTs. A temperatura ambiente atinge variações de aproximadamente 15°C, e parecem afetar os resultados da temperatura do fluido que circula nas estacas. No entanto, essa influência não prejudica a resposta geral de temperatura do fluido.

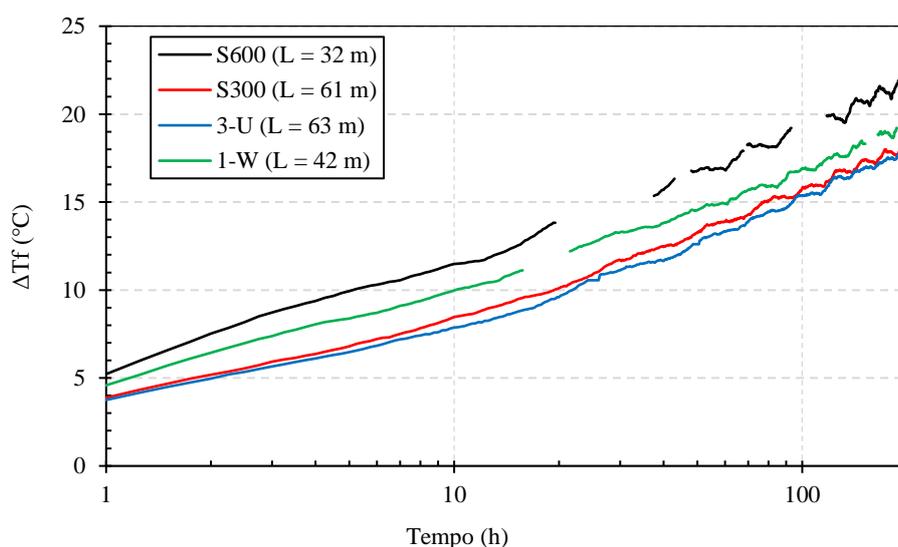
Figura 4.2: Variação de temperatura: (a) ambiente, (b) média do fluido ao longo do tempo e (c) média do fluido ao longo do logaritmo do tempo.



(a)



(b)



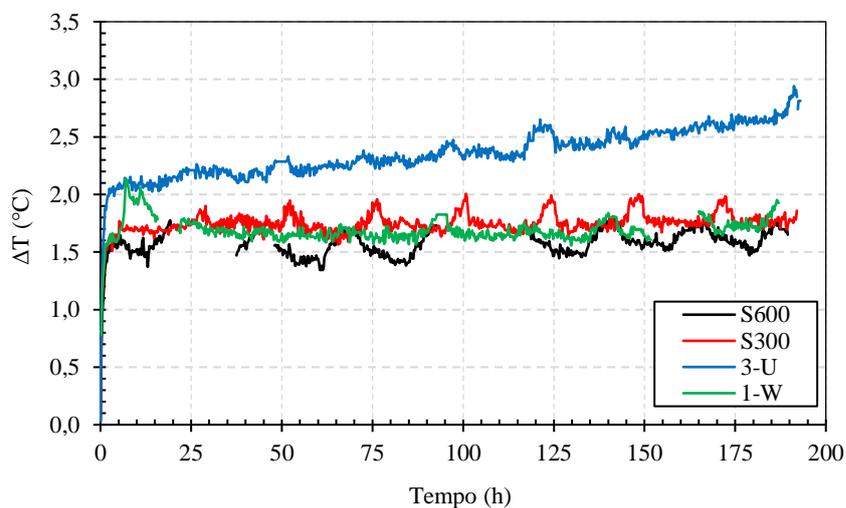
(c)

Fonte: Autora.

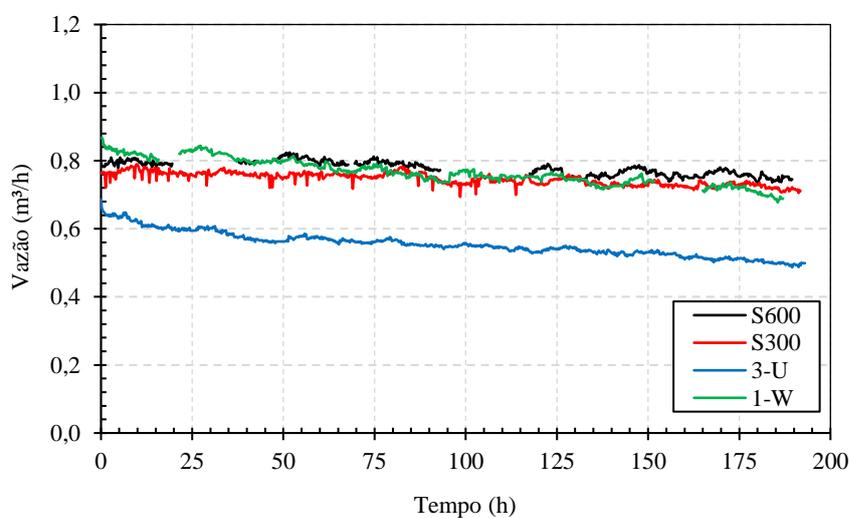
Na Figura 4.3 são apresentadas as medidas da diferença de temperatura entre a entrada e a saída do fluido que circulava nas estacas, e da vazão aplicada durante os ensaios. Comparando os resultados da Figura 4.2a nas estacas S600, S300 e 1-W, pode-se concluir que o comprimento do tubo não afeta essa diferença de temperatura, o que é claramente influenciado pela vazão do fluido que circula nos tubos. Os resultados apresentados na Figura 4.3a e as medidas de vazão apresentadas na Figura 4.3b indicam que a diferença de temperatura entre a entrada e a saída diminui com o aumento da vazão, conforme observado em Miyara *et al.* (2011) e Carotenuto *et al.* (2017). A Figura 4.3 também indica que para a estaca 3-U a diminuição da

vazão durante o ensaio é proporcional ao aumento da diferença de temperatura do fluido, corroborado pelo resultado apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.3: Ensaios TRT: (a) diferença de temperatura entre a entrada e a saída da estaca e (b) variação da vazão ao longo do tempo.



(a)



(b)

Fonte: Autora.

4.2 Temperatura do fluido

As A Figura 4.2 apresenta a variação das temperaturas médias do fluido trocador de calor e do ambiente durante os TRTs. A temperatura ambiente atinge variações de

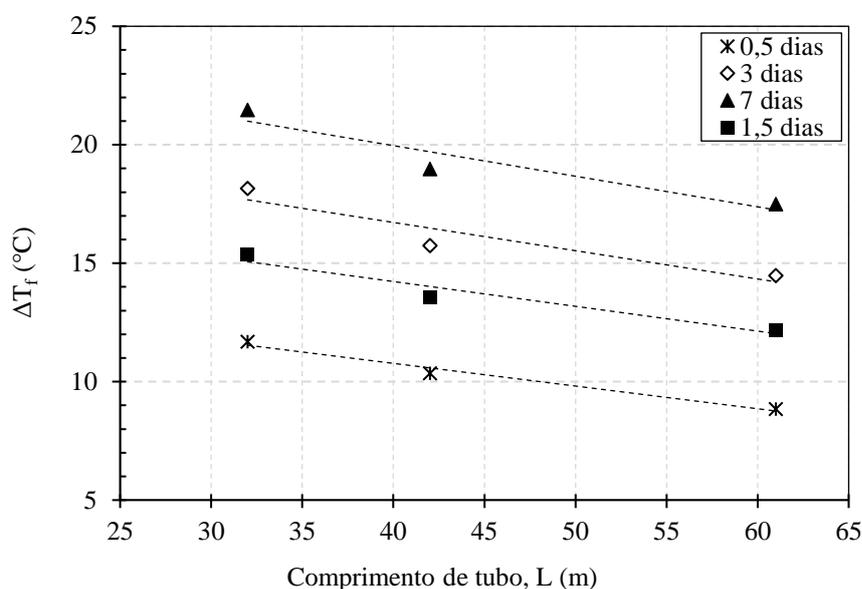
aproximadamente 15°C, e parecem afetar os resultados da temperatura do fluido que circula nas estacas. No entanto, essa influência não prejudica a resposta geral de temperatura do fluido.

Figura 4.2b e 4.2c indicam que a temperatura média do fluido varia com a configuração do tubo trocador de calor. A diferença relativa da temperatura do fluido mostra que a configuração do tubo afeta a resistência térmica da estaca, conforme observado em Hu *et al.* (2014). Os trocadores de calor das estacas S300 e 3-U apresentam as menores temperaturas médias do fluido em relação aos trocadores de calor em 1-W e S600, indicando que as estacas com maior volume (ou densidade) de tubos podem transferir mais calor para o solo.

A variação da temperatura do fluido durante os ensaios nas estacas 3-U e S300 (configurações com comprimentos de tubo semelhantes) é muito similar, conforme mostrado nas Figuras 4.2b e 4.2c. No entanto, a configuração em espiral utiliza número reduzido de conexões para a formação dos *loops* em comparação com o caso 3-U, conforme discutido no Capítulo 3. A Figura 4.2 também mostra que a temperatura média do fluido é ligeiramente mais baixa durante o ensaio na estaca 3-U em comparação com a S300. Isso ocorreu porque os valores de temperatura de saída do fluido foram ligeiramente menores para o ensaio na estaca 3-U devido à menor vazão utilizada. Para os outros três ensaios, os valores de vazão foram semelhantes, conforme ilustrado na Figura 4.3.

A Figura 4.4 compara o aumento na temperatura média do fluido com o comprimento do tubo dentro das estacas testadas em condições de vazão semelhantes. Nota-se que a temperatura do fluido tende a diminuir linearmente com o aumento do comprimento do tubo na estaca. Uma maior troca de calor ocorre quando a superfície de contato entre o tubo trocador de calor e o solo é maior (PARK *et al.*, 2015) e, conseqüentemente, a temperatura média do fluido é menor durante o ensaio de aquecimento. Os resultados obtidos para a estaca 3-U não foram incluídos na Figura 4.4, pois a vazão aplicada afetou os resultados da temperatura de saída e, conseqüentemente, a temperatura média do fluido, conforme mencionado anteriormente.

Figura 4.4: Efeito do comprimento de tubo no aumento da temperatura do fluido durante os ensaios TRT.



Fonte: Autora.

4.3 Eficiência na troca térmica

A eficiência térmica das quatro diferentes configurações de tubo trocador de calor investigadas no presente estudo pode ser comparada avaliando-se a relação entre a potência térmica injetada e o incremento de temperatura do fluido obtido nos ensaios TRT, conforme apresentado em Park *et al.* (2019). Park *et al.* (2015) compararam o desempenho térmico geral de estacas trocadoras de calor equipadas com diferentes configurações de tubos usando as Equações (54) e (55) para estimar a eficiência de troca de calor (e_f), relativa ao comprimento ativo da estaca, H , e ao comprimento do tubo, L , respectivamente, usando dados de ensaios TRT com duração de aproximadamente 50 horas.

$$e_{f_{tubo}} = \frac{Q}{S \times H} \quad (54)$$

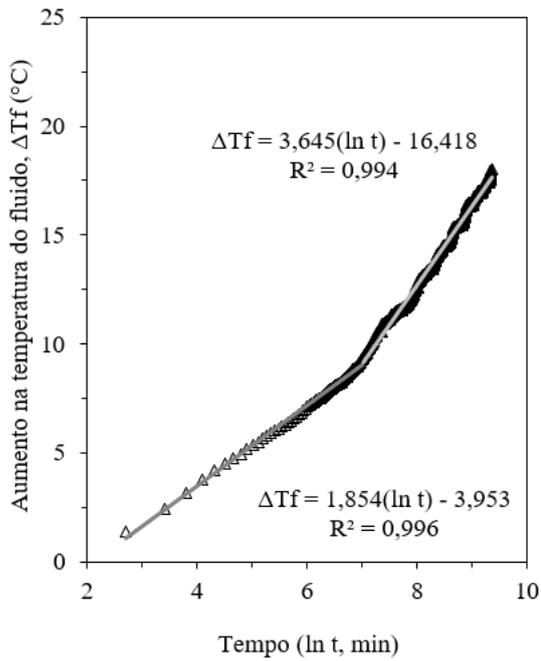
$$e_{f_{estaca}} = \frac{Q}{S \times L} \quad (55)$$

onde Q é potência térmica e S é a inclinação representada pela relação entre a temperatura do fluido e o logaritmo natural do tempo, como mostram as curvas da Figura 4.5.

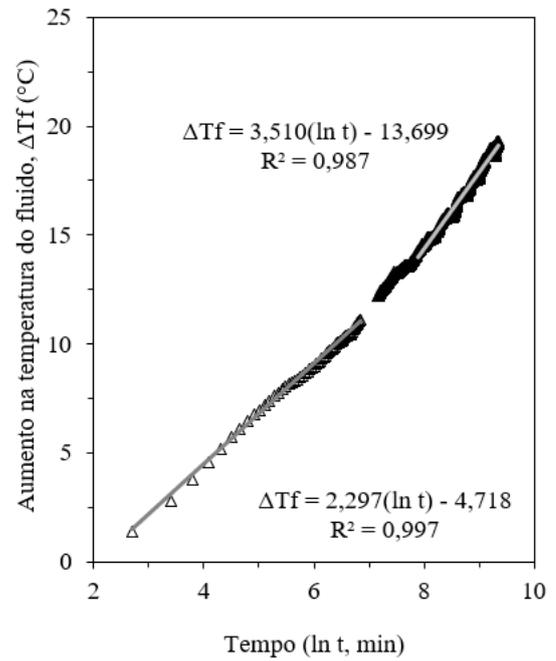
A Figura 4.5 ilustra a inclinação inicial e final das curvas dos ensaios e os resultados estimados de eficiência térmica são apresentados na Tabela 4.3. A eficiência também é apresentada como a *razão* entre a eficiência de cada caso em relação ao resultado obtido para a estaca 3-U. De acordo com a Figura 4.5, é possível notar que as inclinações finais das curvas são semelhantes para todas as estacas. No entanto, ao se comparar a inclinação inicial da curva, o valor obtido para a estaca S600 é consideravelmente maior em relação à 3-U e à S300. Esses resultados indicam que o efeito da superfície de contato entre o tubo trocador de calor e o solo é mais significativo durante as primeiras horas de aquecimento.

Inicialmente, os resultados de eficiência do furo apresentados na Tabela 4.3 são maiores em relação à eficiência do tubo para todas as estacas (e influenciados pelo volume de tubo), porém esses valores diminuem após aproximadamente 20 horas de aquecimento. No final do ensaio, os valores da eficiência do furo foram semelhantes para todas as estacas, sendo menores para a estaca S600, construída com metade do volume dos tubos em relação às estacas 3-U e S300. Por outro lado, a diferença relativa entre os resultados da eficiência dos tubos para as estacas com comprimentos maiores (3-U e S300) e menores (1-W e S600) aumenta após este período, indicando que uma maior interferência térmica ocorre após algumas horas de aquecimento. Esses valores próximos de eficiência do furo após um certo período ocorrem devido à interferência térmica entre *loops* de tubos adjacentes, o que diminui a eficiência de troca de calor em estacas com configuração de tubo mais densa, conforme indicado pelos resultados de eficiência de tubo na Tabela 4.3.

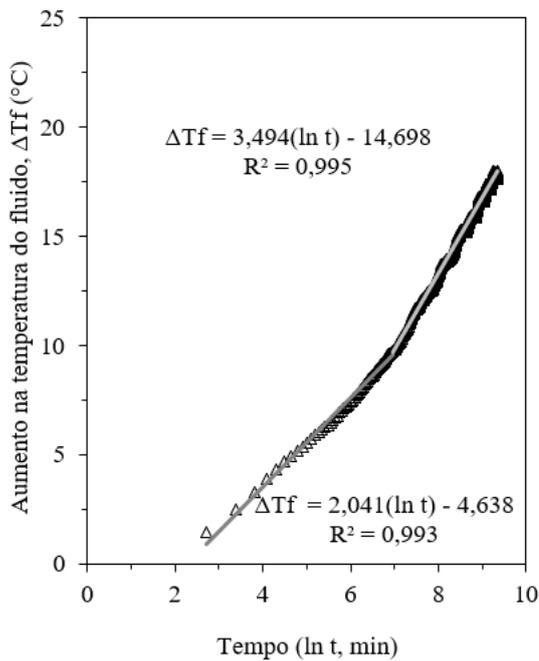
Figura 4.5: Relação entre o aumento da temperatura do fluido e o logaritmo natural do tempo.



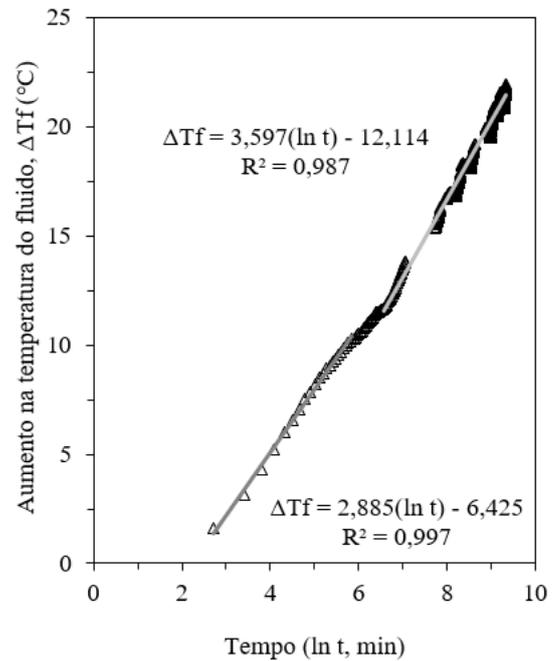
a) 3-U



b) 1-W



c) S300



d) S600

Fonte: Autora.

Tabela 4.3: Eficiência relativa na troca térmica.

Estaca	Comprimento de tubo/Altura ativa da estaca	Q*(W)	Inclinação inicial, S_0				Inclinação final, S_f			
			ef_{furo}		ef_{tubo}		ef_{furo}		ef_{tubo}	
			Valor	Razão	Valor	Razão	Valor	Razão	Valor	Razão
3-U	63 m / 10,4 m	1513	78,5	1,00	13,0	1,00	39,9	1,00	6,6	1,00
1-W	42 m / 10,4 m	1481	62,0	0,79	15,4	1,19	40,6	1,02	10,0	1,52
S300	61 m / 10,6 m	1517	70,1	0,89	12,2	0,94	41,0	1,03	7,1	1,08
S600	32 m / 10,6 m	1422	46,5	0,59	15,4	1,19	37,3	0,93	12,4	1,88

Fonte: Autora.

O efeito da interferência térmica aumentou com o tempo durante os ensaios, conforme indicado pela comparação dos resultados relativos da eficiência do tubo (*razão*) obtidos na fase inicial e final. Inicialmente, o ef_{tubo} da estaca S600 era 26% maior do que na espiral 300 mm (S300); entretanto, durante a última fase do ensaio, o valor de ef_{tubo} obtido para S600 se tornou 75% maior em comparação ao valor encontrado para a S300. Para a configuração mais densa, correspondente à estaca S300, o resultado de ef_{furo} foi apenas 10% maior do que para o caso S600, que possui a metade do volume de tubo em relação à S300. Portanto, os resultados dos ensaios demonstram que o ef_{furo} não é diretamente proporcional ao volume de tubo dentro da estaca devido à interferência térmica entre os *loops*. Assim, os resultados do ef_{tubo} podem ser um indicador de interferência térmica e eficiência econômica (considerando os custos do material da tubulação) conforme proposto em Park *et al.* (2015).

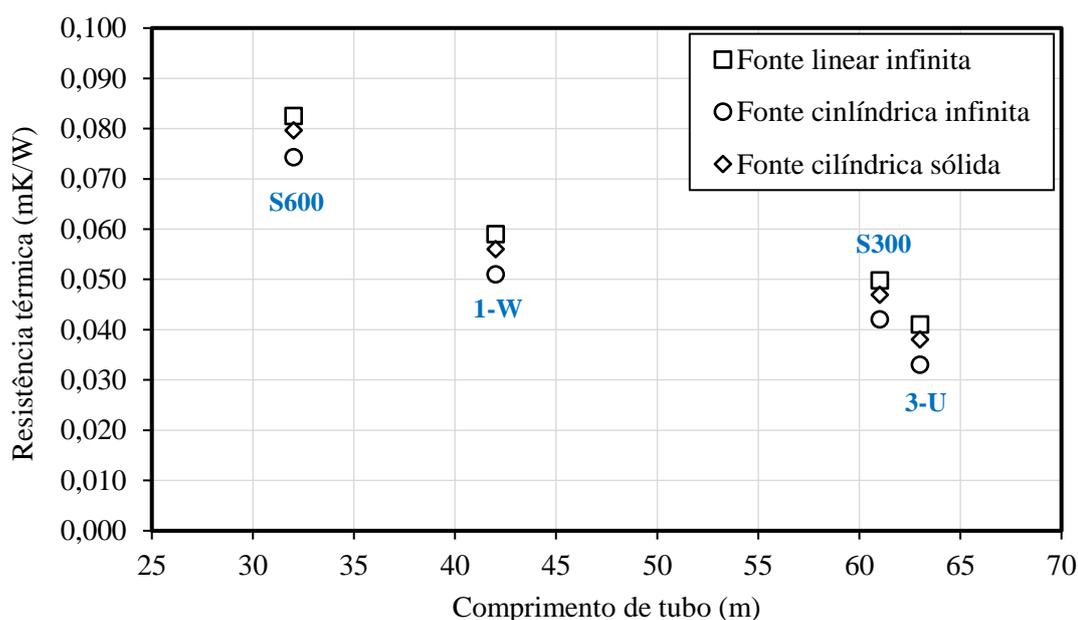
Os resultados semelhantes de ef_{furo} para as estacas 3-U e 1-W após determinado período, e o fato de que o valor de ef_{tubo} obtido para a estaca 1-W foi 52% maior em comparação com a estaca 3-U (devido ao efeito de interferência térmica), mostram que a estaca 3-U, que tem comprimento de tubo 50% maior, não é vantajosa em comparada à estaca 1-W, considerando o diâmetro de estaca testado no presente estudo.

Portanto, para o diâmetro da estaca investigado, considerando que o ef_{furo} quase não foi influenciado pelo comprimento do tubo da estaca, e que o ef_{tubo} é significativamente maior para as estacas com comprimentos menores de tubo devido à interferência térmica, estacas com tubos em 1-W e S600 parecem ser mais vantajosas em comparação às que têm maior densidade de tubos, como a S300 e 3-U. Essas observações podem ser úteis na otimização dos projetos, considerando a influência do tempo de instalação e os custos dos materiais necessários à cada tipo de estaca investigada.

4.4 Resistência térmica

As diferentes configurações dos tubos dos trocadores de calor podem influenciar a resistência térmica das estacas. Para o presente trabalho a resistência térmica das estacas testadas foi estimada utilizando três modelos: o da fonte linear infinita (ILS), fonte cilíndrica infinita (ICS) e fonte cilíndrica infinita sólida (ISCS), descritos no Item 2.6.3 deste trabalho. Os resultados apresentados na Figura 4.6 indicam claramente que a resistência térmica diminui com o aumento do comprimento de tubo utilizado na estaca. Desta forma, quanto maior o comprimento de tubo utilizado, melhor a transferência térmica do fluido trocador de calor para o solo circundante à estaca. Os três modelos forneceram valores semelhantes, e os métodos clássicos da fonte linear e cilíndrica infinita apresentaram-se como limite superior e inferior, respectivamente.

Figura 4.6: Efeito do comprimento de tubo na resistência térmica das estacas ensaiadas.



Fonte: Autora.

Na Tabela 4.5 são resumidos os valores obtidos. A resistência térmica na estaca 3-U foi aproximadamente metade da resistência obtida para a estaca S600, que possui aproximadamente metade do comprimento de tubo. Isto foi observado no trabalho de Loveridge & Powrie (2014), que obtiveram uma resistência térmica para configuração em U simples aproximadamente o dobro da resistência para o caso em duplo U, considerando o comprimento das estacas ensaiadas nesta pesquisa (75 cm). No entanto, o trabalho destes autores também

indicou que se o recobrimento de concreto em relação aos tubos for grande, como é o caso de estacas com tubos instalados no centro da armação, a quantidade de tubos exerce reduzida influência sobre a resistência térmica.

Tabela 4.4: Resultados de resistência térmica.

Configuração dos tubos	Comprimento de tubo (m)	Resistência térmica*		
		[K·m·W ⁻¹]		
		ILS	ICS	ISCS
1-W (W simples)	42	0,059	0,051	0,056
3-U (Triplo-U em série)	63	0,041	0,033	0,038
S600 (Espiral-600mm)	32	0,082	0,074	0,080
S300 (Espiral-300mm)	61	0,050	0,042	0,047

Fonte: Autora.

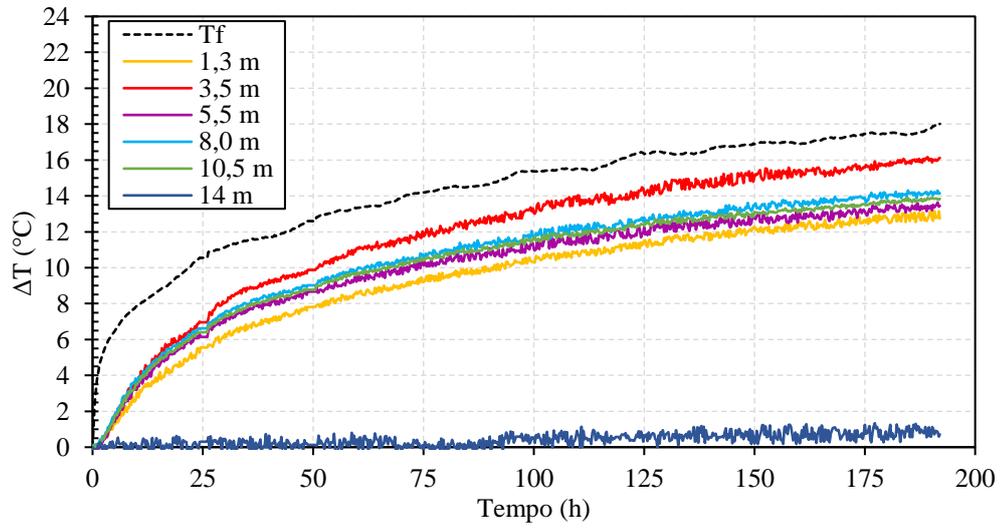
Apesar da resistência térmica da estaca consistir um fator importante para avaliar a eficiência na troca térmica de estacas trocadoras de calor, outros parâmetros como condutividade térmica do solo e proximidade (interferência) entre os tubos também podem exercer influência importante. Deste modo não é possível afirmar que a resistência térmica varia linearmente e que é inversamente proporcional ao comprimento dos tubos trocadores de calor.

4.5 Temperatura da estaca

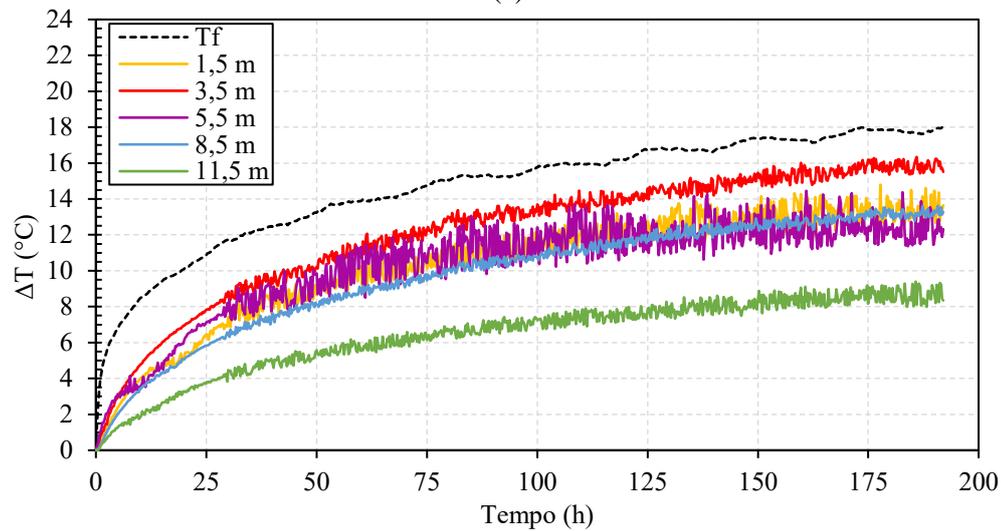
Na Figura 4.7 são apresentadas as variações de temperatura da estaca ao longo do tempo durante os ensaios TRT realizados para este estudo, obtidas a partir de sensores de temperatura instalados nas armações, nas estacas S300, S600 e 1-W, e na barra central soldada na armação, na estaca 3-U.

Essa figura mostra que os resultados de temperatura do fluido (T_f) e das estacas (T_c) são mais próximos para os casos de estacas com maior volume de tubos (3-U e S300), conforme esperado. A evolução da temperatura na estaca é semelhante nas profundidades de 5,5 e 8,5 m. No final do período de aquecimento, o aumento de temperatura na estaca 3-U a 14 m é da ordem de 1°C, enquanto a 10,5 m, próximo à profundidade atingida pelos tubos, é de aproximadamente 14°C. Por outro lado, a temperatura da estaca varia ao longo da profundidade para todos os casos, de acordo com a condutividade térmica das diferentes camadas do solo atravessadas. Esse efeito é melhor ilustrado na Figura 4.8.

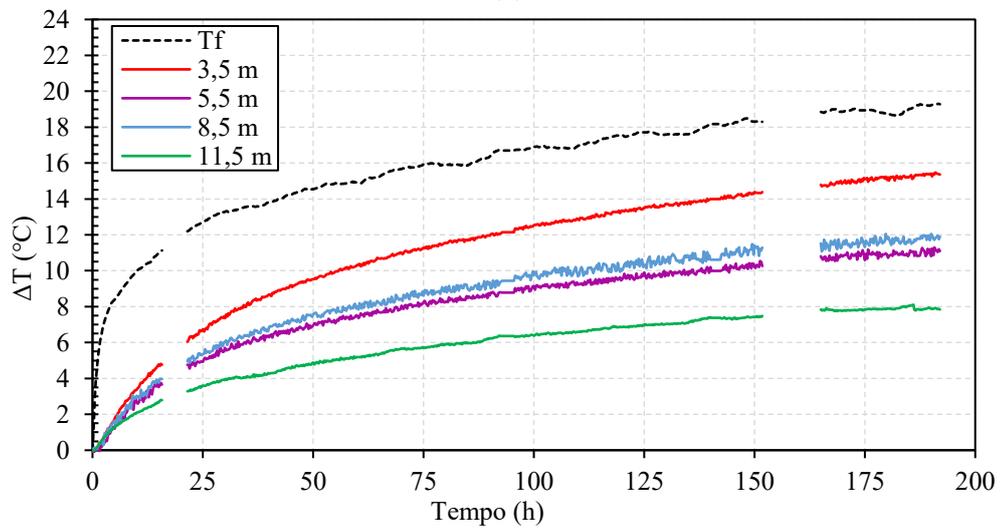
Figura 4.7: Temperatura do fluido e da estaca durante os ensaios TRT: (a) 3-U; (b) 1-W; (c) S300; e (d) S600.



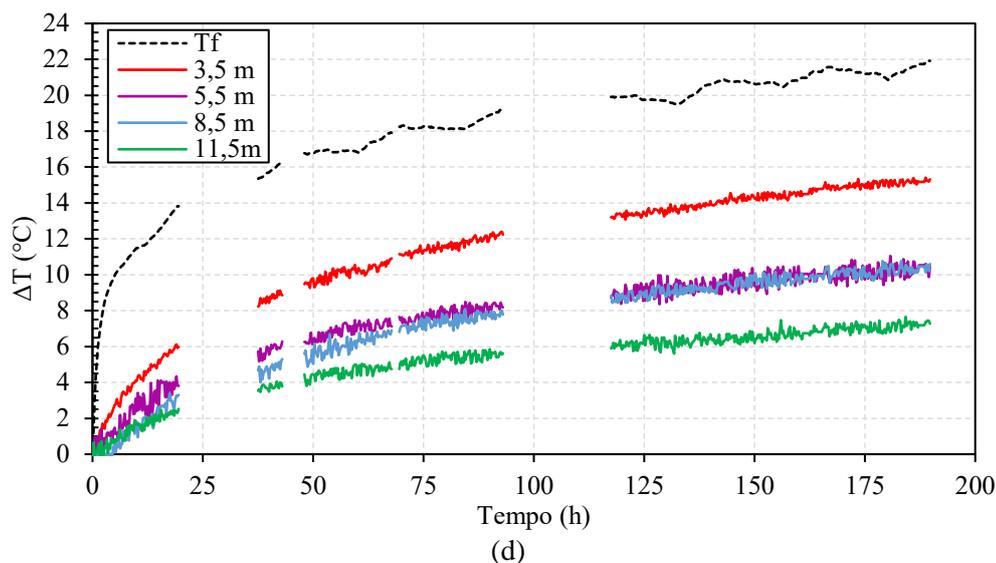
(a)



(b)



(c)

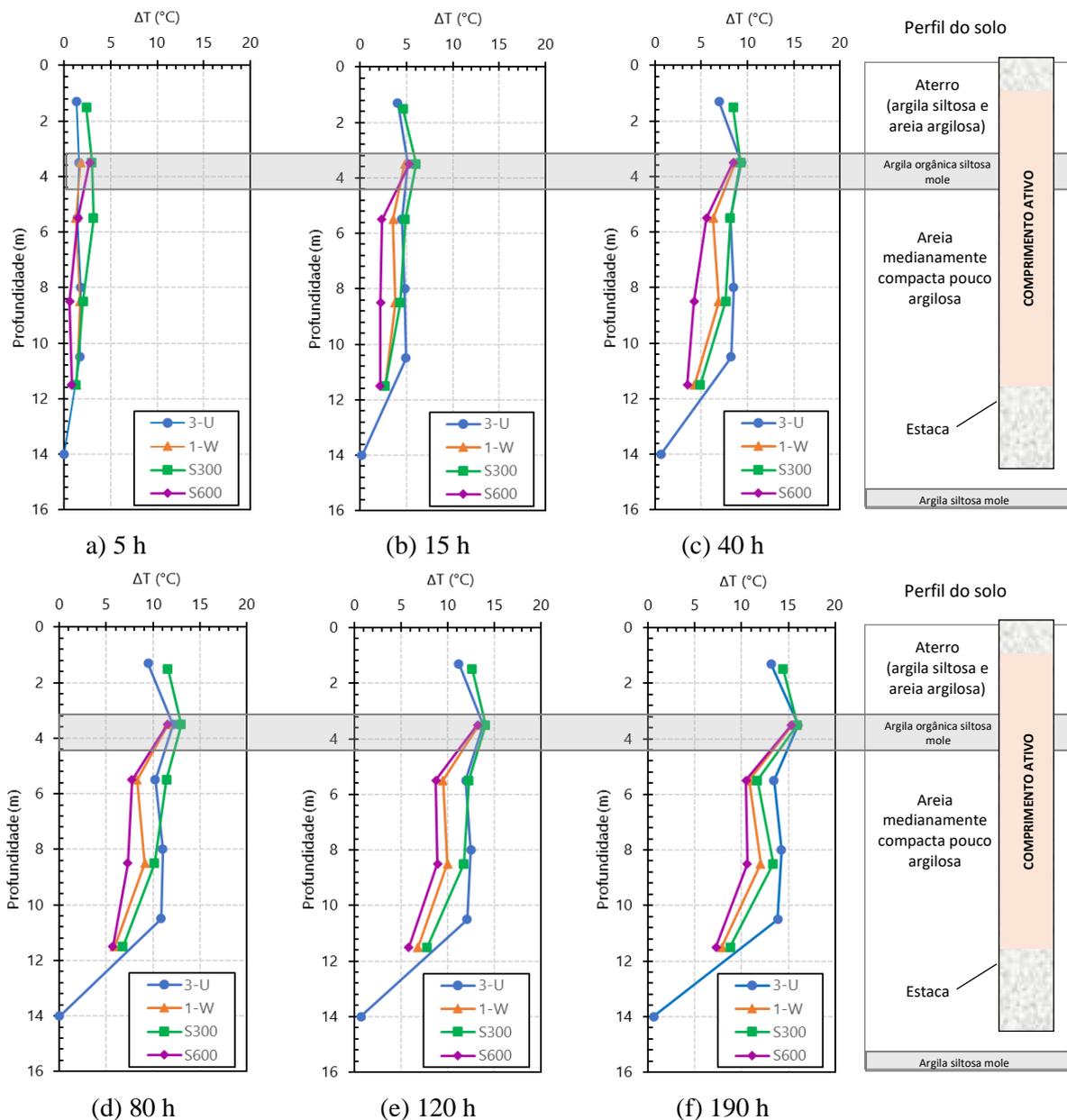


Fonte: Autora.

Na Figura 4.8 são apresentados os perfis de temperatura da estaca em diferentes momentos do ensaio. É possível notar que para todas as profundidades medidas, a temperatura da estaca é maior para os casos com maior volume de tubo. No entanto, o aumento da temperatura da estaca em 3,5 m é semelhante para todos os casos testados. Nesta profundidade, uma camada de argila orgânica mole com baixa condutividade térmica dificulta a transferência de calor da estaca para o solo circundante.

A presença de uma camada isolante termicamente provoca um aumento de temperatura na seção da estaca, podendo afetar o comportamento termo-hidromecânico geral da estaca, visto que a tensão induzida termicamente varia com o incremento da temperatura da estaca. As variações de temperatura ao longo do comprimento ativo da estaca (com tubos) devido à camada “isolante” são mais importantes para a estaca S600 (com menor volume de tubos). Por exemplo, como mostrado na Figura 4.8f, após 190 horas de aquecimento, a temperatura da estaca em 3,5 m é cerca de 5°C mais alta do que a temperatura em 5,5 m.

Figura 4.8: Perfil de temperatura da estaca em diferentes tempos: a) 5 h; b) 15 h; c) 40 h; d) 80 h; e) 120 h; e f) 190h.



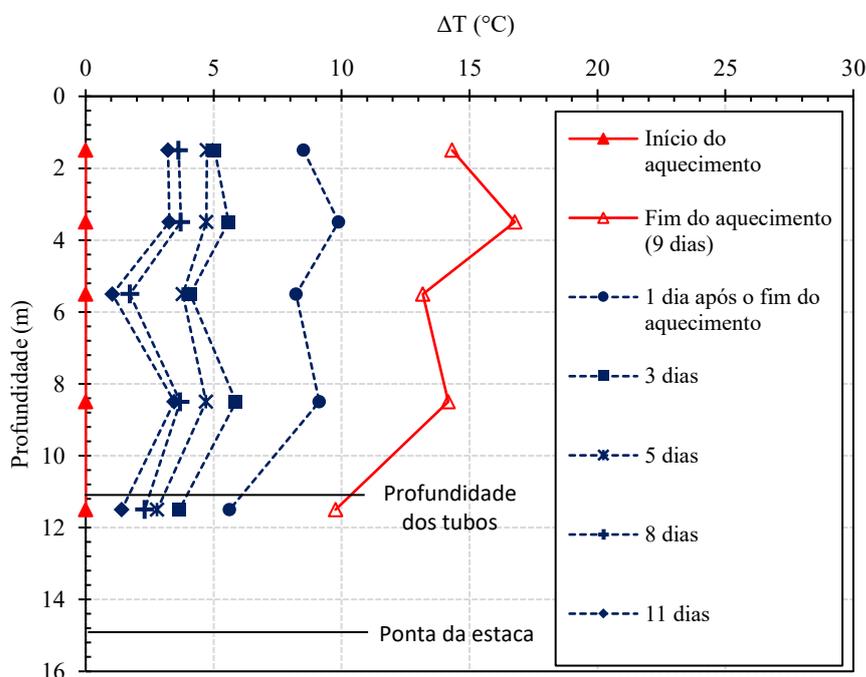
Fonte: Autora.

Para todas as estacas testadas, o incremento de temperatura no final do comprimento ativo (na profundidade de 11,5 m) é inferior em relação ao comprimento restante. Isso ocorre porque abaixo dessa profundidade não existem tubos trocadores de calor que afetem a temperatura da estaca. Apenas para o tipo 3-U um sensor de temperatura foi instalado próximo à ponta da estaca, a 2,5 m abaixo do comprimento ativo (a -14,0 m), e os resultados ilustrados

na Figura 4.8 mostram que após 190 horas de aquecimento a temperatura da estaca não era afetada nesta zona.

O ensaio TRT realizado na estaca S300 teve um dia a mais de aquecimento que os demais, e somente neste caso a recuperação térmica natural foi monitorada durante 11 dias, tendo mantido a mesma vazão aplicada durante a fase de aquecimento. O objetivo deste monitoramento foi fornecer informações sobre a recuperação térmica ao longo da profundidade da estaca. Os resultados apresentados na Figura 4.9 indicam que após 5 dias de recuperação o perfil de temperatura da estaca não foi afetado pela camada de argila (temperaturas semelhantes foram observadas em 3,5 e 8,5 m), como ocorreu durante a fase de aquecimento. No entanto, a taxa de diminuição da temperatura na profundidade de 5,5 m foi relativamente maior em comparação com o resto da estaca. Neste caso, a temperatura inicial da estaca foi quase recuperada após 11 dias. A investigação do subsolo detalhada no item 3.2 revelou que a condutividade hidráulica e a velocidade do fluxo da água subterrânea são maiores na camada de areia de 5,0 a 6,0 m. Esta pode ser a razão de uma recuperação mais rápida da temperatura medida na armação da estaca a 5,5 m de profundidade.

Figura 4.9: Perfil de temperatura da estaca S300 após o término da fase de aquecimento.

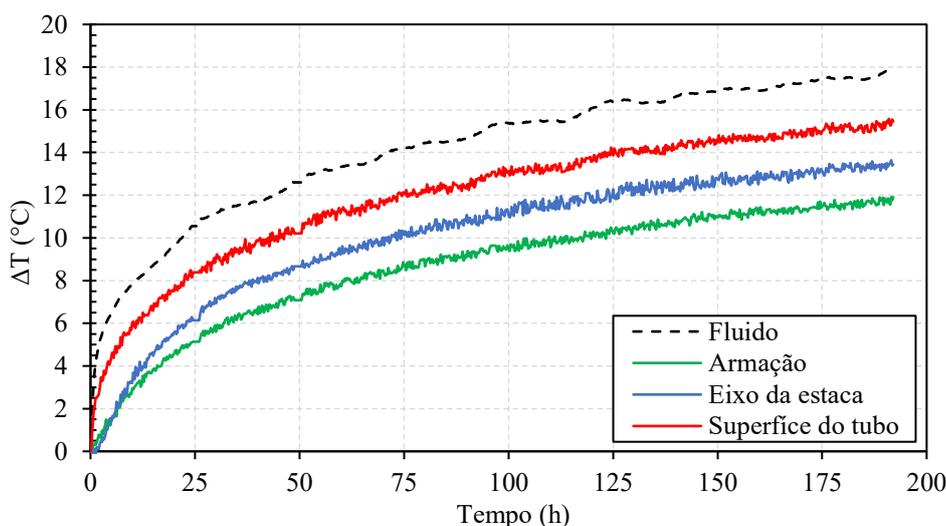


Fonte: Autora.

Para ilustrar a distribuição de temperatura em uma seção na profundidade média do comprimento ativo da estaca, para a estaca em 3-U, sensores de temperatura foram instalados em diferentes posições na profundidade de 5,5 m (no centro, na interface entre o concreto e o tubo, e na armação), conforme apresentado na Figura 3.26.

A Figura 4.10 compara a evolução da temperatura nessa seção da estaca durante o ensaio de aquecimento, e mostra que após alguns dias as diferenças entre as temperaturas do fluido e nas diferentes posições no interior da estaca são constantes. Além disso, a temperatura no centro da estaca é maior comparada à região da armação, conforme observado em simulações numéricas (Wu *et al.*, 2021, Moradshahi *et al.*, 2021). Esta observação é importante para a avaliação da resposta termomecânica de estacas trocadoras de calor. Conforme observado em Moradshahi *et al.* (2021), a temperatura e as tensões térmicas são mais altas no centro da estaca e reduzidas com o aumento da distância radial até a borda da estaca.

Figura 4.10: Distribuição de temperatura na estaca 3-U na seção a 5,5 m durante o ensaio TRT.



Fonte: Autora.

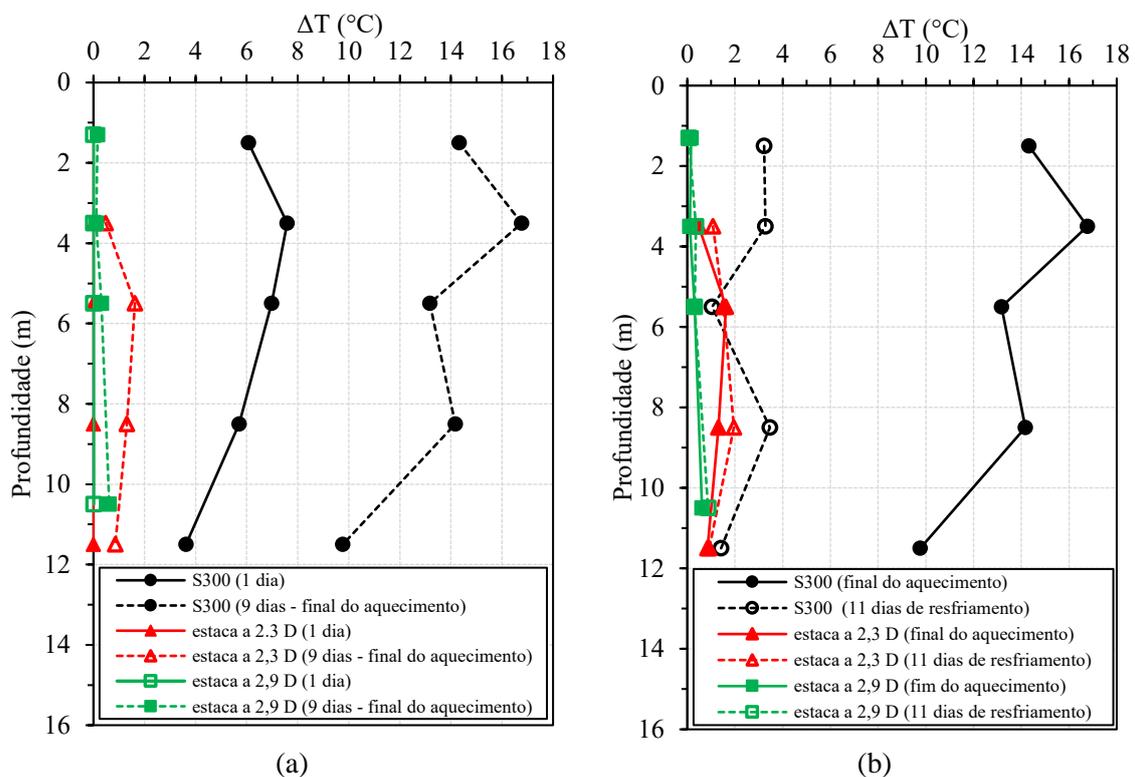
4.6 Interação térmica com estacas vizinhas

Durante a transferência de calor da estaca para o solo, a temperatura no terreno circundante aumenta e pode afetar as estacas próximas. Assim, a interação térmica entre estacas próximas deve ser levada em consideração para o projeto de grupos de estacas trocadoras de calor.

Para entender a influência da operação de uma única estaca nas estacas vizinhas, durante o TRT na estaca S300, sensores de temperatura nas estacas 1-W e 3-U foram monitorados. As

distâncias horizontais das estacas vizinhas à estaca testada foram iguais a $2,3D$ e $2,9D$, sendo D o diâmetro da estaca. A Figura 4.11 mostra os resultados medidos das temperaturas nas estacas próximas durante as fases de aquecimento e resfriamento do ensaio TRT na estaca S300. Esta figura mostra que após 9 dias de aquecimento, a temperatura da estaca a uma distância horizontal de $2,9D$ (eixo a eixo) praticamente não mudou. No entanto, a estaca presente a uma distância de $2,3D$ apresentou um pequeno aumento de temperatura, principalmente na profundidade de $5,5\text{ m}$ ($\sim 2^\circ\text{C}$), onde ocorre a camada de maior condutividade térmica e hidráulica do solo e velocidade de fluxo da água subterrânea. Além disso, durante a fase de aquecimento, a temperatura da estaca mais próxima ($2,3D$) não mudou na camada de argila (profundidade de $3,5\text{ m}$), e apresentou um pequeno aumento durante a fase de recuperação, indicando um atraso do fluxo de calor devido à baixa condutividade térmica do solo desta camada. Portanto, a temperatura nas estacas próximas pode aumentar inicialmente ao longo das camadas de solo de maior capacidade de transferência de calor (maior condutividade térmica). Além disso, o aumento da distância horizontal entre a estaca aquecida e as estacas próximas pode evitar o aumento da temperatura das estacas próximas.

Figura 4.11: Temperatura na estaca ensaiada (S300) e nas estacas vizinhas nas distâncias horizontais de $2,3 D$ e $2,9 D$, sendo D o diâmetro da estaca, nas fases de (a) aquecimento e (b) resfriamento do ensaio TRT.



Fonte: Autora.

5 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DA ESTACA EM TRIPLO U

O comportamento termomecânico da estaca piloto em triplo U foi avaliado com base em três ensaios realizados na estaca *in situ*: um ensaio de prova de carga estática (carregamento mecânico), um ensaio térmico do tipo TRT, com a aplicação de fluxo de calor constante na estaca, e um ensaio termomecânico, que combinou a aplicação da carga mecânica de serviço e o carregamento térmico. Neste capítulo, considerou-se os esforços de compressão como positivos e os de tração negativos.

5.1 Prova de carga estática - PCE

Uma prova de carga estática foi realizada na estaca piloto em Triplo U (3-U), instrumentada com *straingages* ao longo do comprimento, com o objetivo de avaliar o comportamento carga *versus* recalque da fundação, e a mobilização da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade, na condição de serviço e na carga máxima aplicada, que neste caso foi igual a 1,6 vezes a carga de serviço.

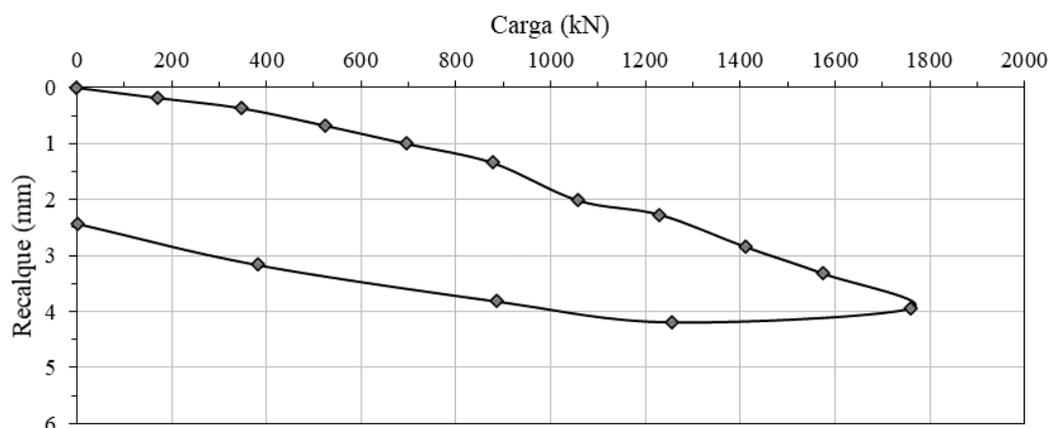
O comportamento termomecânico de fundações por estacas termoativas depende da distribuição da resistência por atrito lateral ao longo da estaca e da resistência de ponta. Deste modo, a realização da prova de carga para se obter estas parcelas se torna fundamental para o entendimento da resposta da fundação quando submetida a cargas térmicas.

5.1.1 Curva carga *versus* recalque

A curva carga *versus* recalque obtida no ensaio de prova de carga é apresentada na Figura 5.1. Na carga máxima aplicada de 1760 kN, atingiu-se um deslocamento do topo da estaca igual a 3,9 mm, correspondente a 0,5% do diâmetro da estaca.

Figura 5.1: Curva carga *versus* recalque resultante do ensaio de prova de carga estática na estaca

Triplo U.

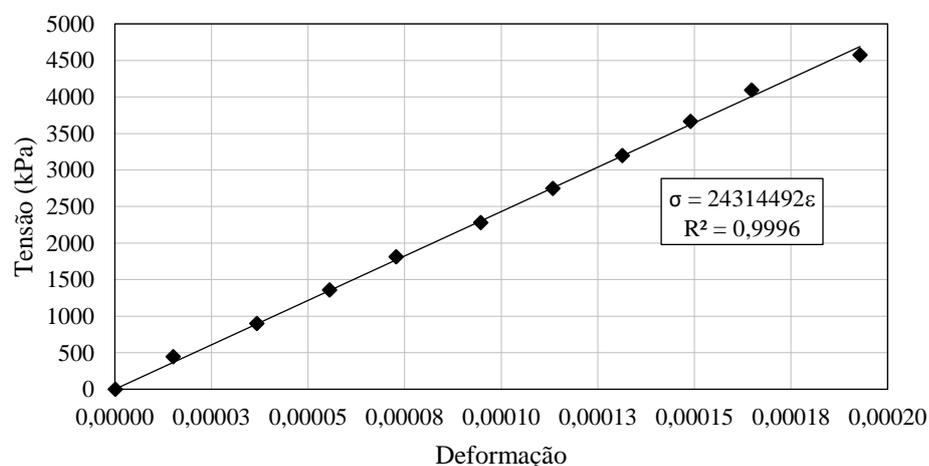


Fonte: Autora.

5.1.2 Diagrama de mobilização da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade

A fim de determinar a carga atuante nas seções instrumentadas da estaca, calculou-se o módulo de elasticidade por meio das leituras da instrumentação posicionada na seção de referência, localizada próxima ao topo da estaca, a 1,3 m de profundidade da superfície do terreno. O módulo foi obtido através da relação entre a tensão, medida pela célula de carga instalada na cabeça da estaca, e a deformação, fornecida pela barra instrumentada instalada seção de referência, como apresentado na Figura 5.2. Segundo o ajuste linear dos dados, o módulo encontrado foi de 24,3 GPa, e reflete a rigidez de uma seção real da estaca, composta por concreto, armadura e tubos.

Figura 5.2: Curva tensão *versus* deformação na seção de referência da estaca Triplo U.

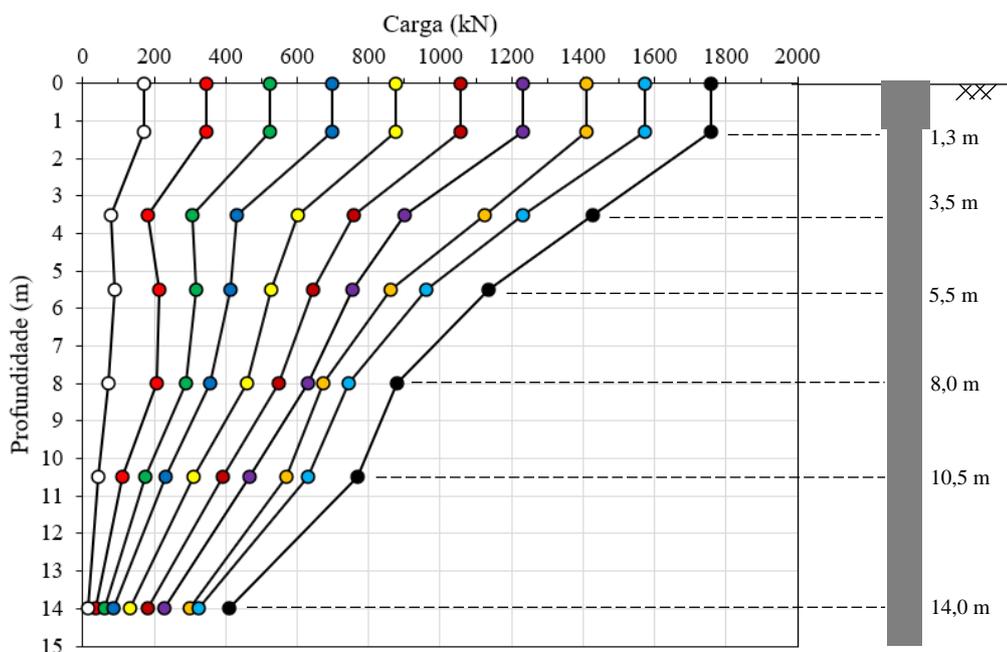


Fonte: Autora.

Determinado o módulo de elasticidade, a carga axial transmitida ao longo da profundidade da estaca foi obtida pelo produto entre o módulo, a deformação fornecida pelas barras instrumentadas, e a área da seção transversal da estaca, de acordo com a Figura 5.3. Para esta determinação, a área da estaca foi considerada em seção cheia, pois os tubos ocupam apenas cerca de 1% da área e o diâmetro da estaca varia em função do processo executivo adotado em estacas hélice contínua, como mostram os relatórios de execução apresentados no Anexo B.

Da carga máxima aplicada no topo da estaca, apenas 23% chega nos 14 m de profundidade, nível instrumentado mais próximo da ponta (15 m). Sendo assim, 77% foi mobilizada por atrito lateral até a carga de ~1800 kN. Sob a carga de serviço (admissível), igual a 1230 kN, 81% da carga aplicada foi resistida por atrito lateral.

Figura 5.3: Diagrama de transferência de carga ao longo da profundidade na estaca Triplo U.



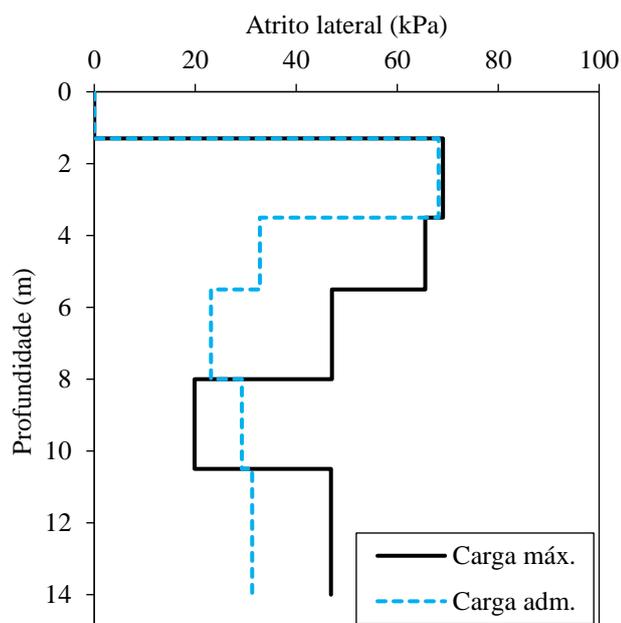
Fonte: Autora.

A Figura 5.4 apresenta os diagramas de atrito lateral unitário resultante das cargas axiais desenvolvidas na estaca no estágio correspondente à carga admissível e na carga máxima aplicada, igual a 1,6 vezes a carga admissível. Da aplicação da carga admissível até a carga máxima, o atrito lateral é mobilizado progressivamente ao longo das camadas, exceto para a camada entre 8 e 10,5 m, que apresentou uma redução na mobilização de atrito. A camada mais superficial, de 1,3 a 3,5 m, sofre a maior mobilização de atrito comparada às outras camadas.

Como apenas 0,5% do diâmetro da estaca foi deslocado na prova de carga, a resistência por atrito lateral em profundidades maiores que 4 m (Figura 5.4) provavelmente não foi

completamente mobilizada na carga máxima do ensaio. Geralmente considera-se que a resistência lateral total da estaca é atingida quando o recalque corresponde a $\sim 2\%$ do diâmetro da estaca.

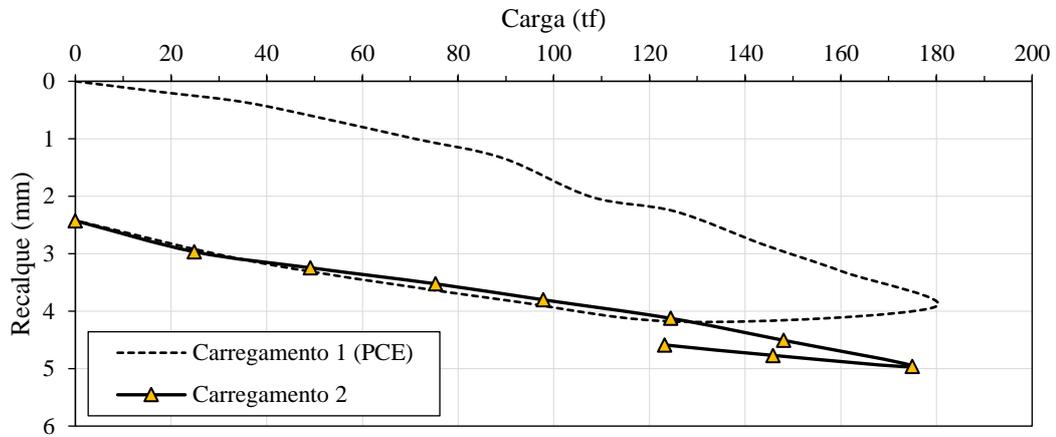
Figura 5.4: Diagrama de atrito lateral unitário desenvolvida ao longo da estaca, para a carga admissível (1230 kN) e carga máxima aplicada (1760 kN).



Fonte: Autora.

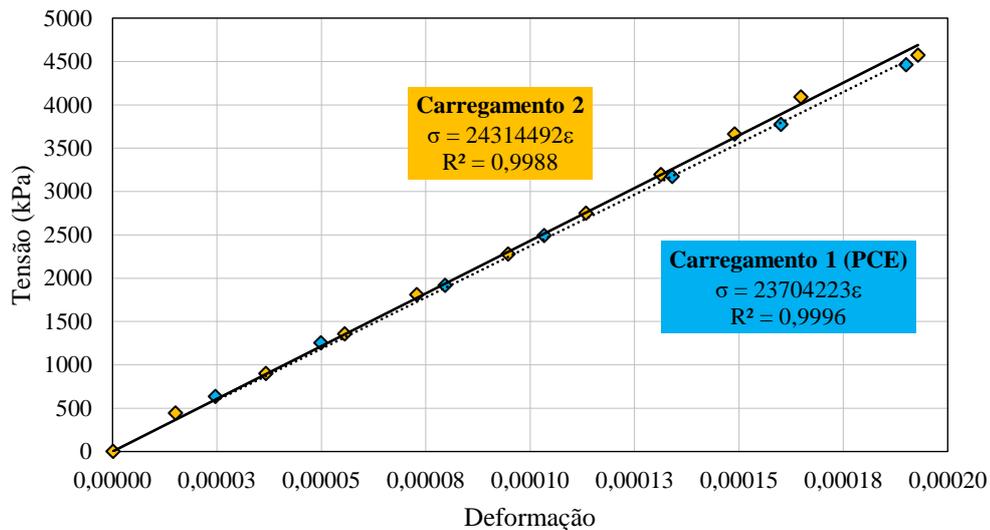
Antes de realizar os ensaios térmico e termomecânico, a estaca foi novamente carregada e descarregada até a carga de serviço, de acordo com a Figura 5.5. Com esse novo carregamento (carregamento 2), verificou-se uma pequena alteração do módulo de elasticidade da estaca. A Figura 5.6 indica que houve uma pequena perda de rigidez, com o módulo passando de 24,3 GPa para 23,7 GPa, que foi então adotado no cômputo das cargas axiais e tensões de atrito lateral desenvolvidas durante os ensaios térmico e termomecânico, apresentados nos itens seguintes.

Figura 5.5: Carregamento e descarregamento até a carga de serviço na estaca Triplo U para realização do ensaio termomecânico.



Fonte: Autora.

Figura 5.6: Comparativo entre as curvas tensão *versus* deformação da seção de referência da estaca Triplo U durante a PCE (carregamento 1) e o carregamento mecânico (carregamento 2).



Fonte: Autora.

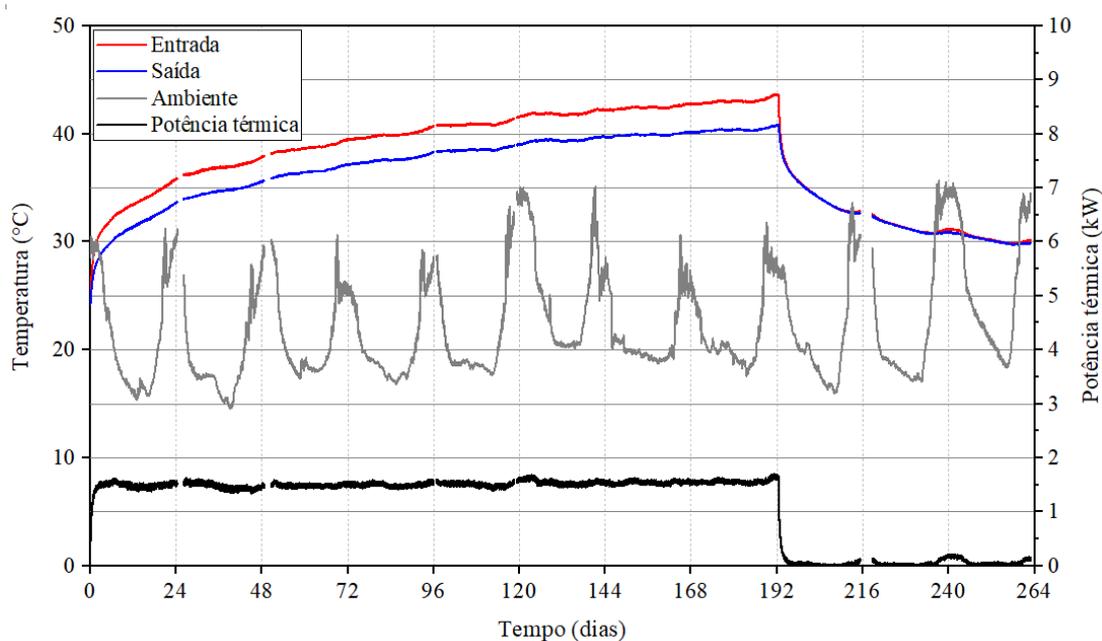
5.2 Ensaio de carregamento térmico

Sem carga mecânica aplicada no topo da estaca, foi realizado um ensaio de carregamento térmico na estaca triplo U através da aplicação de uma potência térmica constante no fluido trocador de calor que circula na estaca, por oito dias (192h), e o resfriamento da estaca foi registrado por três dias. A potência térmica permaneceu em torno de 1,5 kW durante todo o

ensaio. As variações da temperatura ambiente afetaram discretamente os resultados de temperatura de entrada e saída da estaca, como mostra a Figura 5.7.

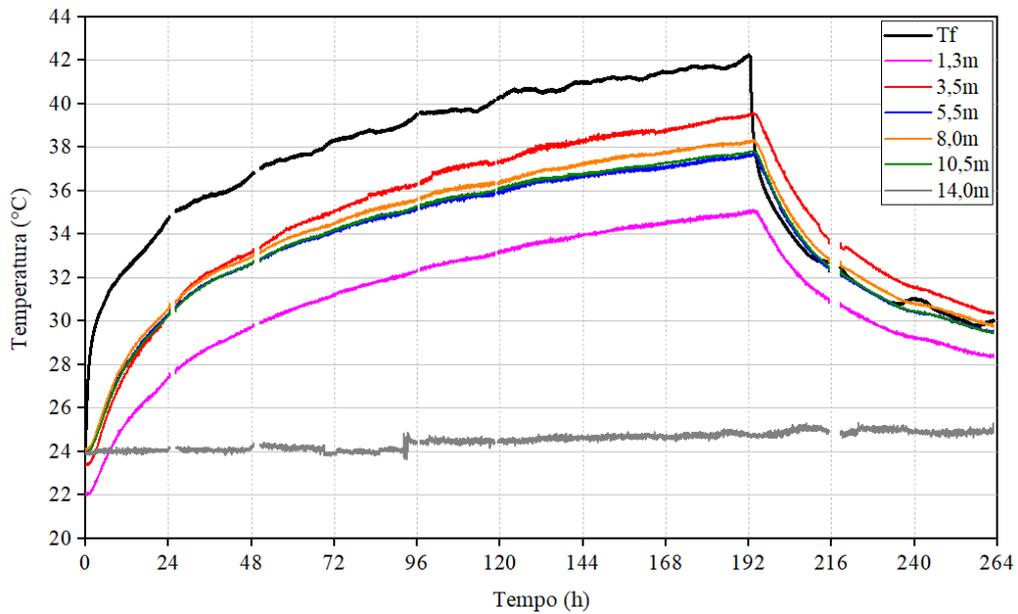
Em 8 dias de aquecimento, a temperatura média do fluido trocador de calor atingiu 42°C (Figura 5.8), o que representou um aumento de 18°C em relação à temperatura inicial (Figura 5.9). A seção instrumentada a 3,5 m experimentou o maior aumento de temperatura, como esperado, devido à presença da camada argilosa (solo com menor condutividade térmica). Nas profundidades de 5,5; 8,0 e 10,5 m o aumento de temperatura foi semelhante, corroborando à investigação do subsolo descrita no Item 3.2, que indicou a presença de um espesso pacote arenoso nestas profundidades. O menor aumento de temperatura foi registrado a 1,3 m de profundidade, correspondente à camada de aterro, influenciada pela temperatura externa devido à proximidade da superfície do terreno.

Figura 5.7: Temperatura de entrada e saída da estaca, ambiente e potência térmica durante a fase de aquecimento na estaca Triplo U.



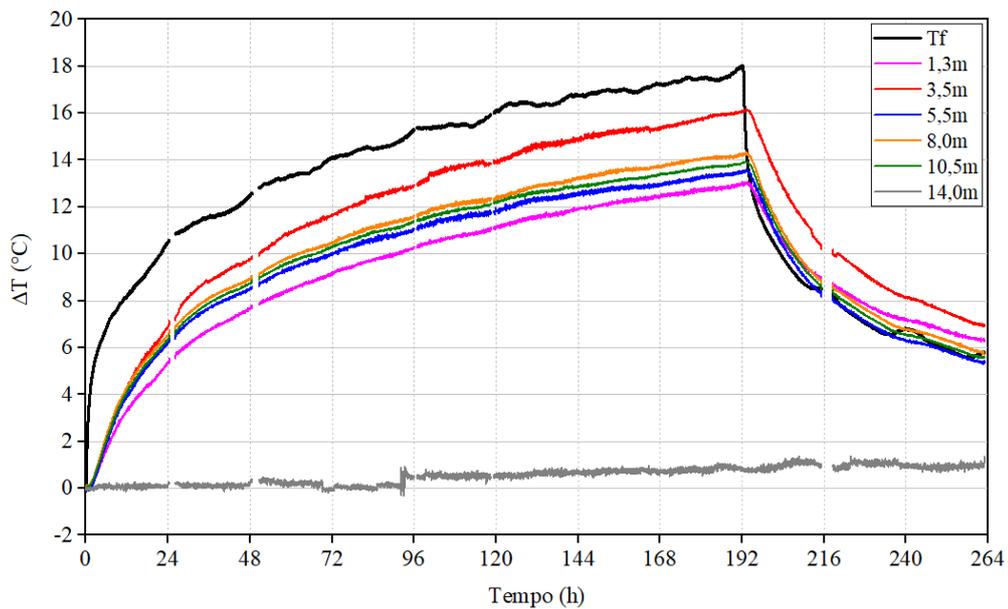
Fonte: Autora.

Figura 5.8: Temperatura absoluta no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade e temperatura média do fluido trocador de calor.



Fonte: Autora.

Figura 5.9: Variação da temperatura no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade e variação da temperatura do fluido trocador de calor.



Fonte: Autora.

Com o topo livre, espera-se que a resistência por atrito lateral na interface solo-estaca em sua parte superior restrinja o movimento da estaca para cima, gerando tensões axiais induzidas quando a estaca é aquecida, que seriam máximas a meia profundidade da estaca em

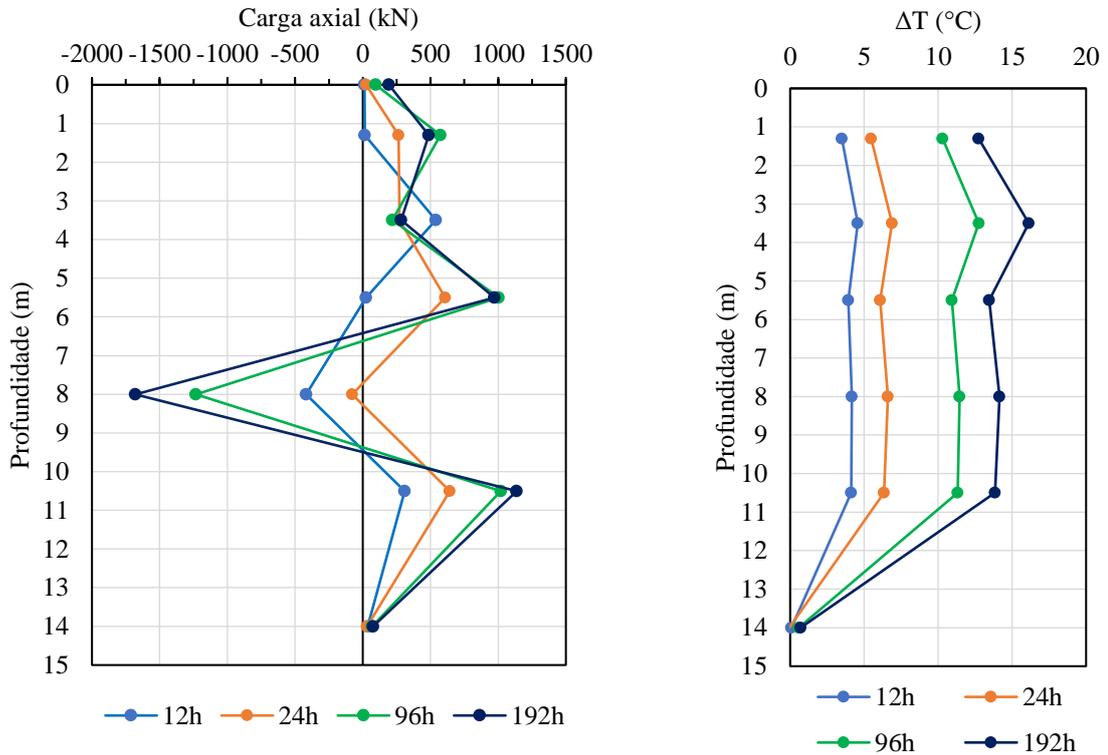
condições de resistência por atrito lateral uniforme ao longo da profundidade como indica a Figura 2.13d de Amatya *et al.* (2012), o que não é o caso da estaca neste presente estudo, que apresenta camada de aterro e de argila mole nos primeiros metros de estaca (menor resistência lateral comparada com o trecho da estaca embutido em profundidades maiores).

A distribuição das cargas axiais ao longo da profundidade, e em vários tempos de aquecimento, foram determinadas utilizando o módulo de elasticidade obtido no segundo carregamento mecânico da estaca (23,7 GPa) e o resultado é apresentado na Figura 5.10. As tensões máximas devido a expansão axial da estaca são mobilizadas a 8,0 m de profundidade (zona de maior resistência por atrito lateral impedindo a estaca de expandir), enquanto na camada próxima ao topo a estaca teve maior liberdade para se movimentar, as tensões na estaca são menores (mobilizando atrito negativo), já que a resistência por atrito lateral na parte superior da estaca é menor devido a camada de argila mole.

Na seção a 10,5 m, próxima da base dos *loops* de tubos de geotermia, provavelmente a expansão da estaca para baixo não foi permitida devido à maior resistência por atrito lateral neste trecho. Assim, foram mobilizados esforços de tração (para cima) na instrumentação já que a resistência por atrito impediu a expansão da estaca para baixo. Em 14 m de profundidade, as cargas axiais induzidas são desprezíveis.

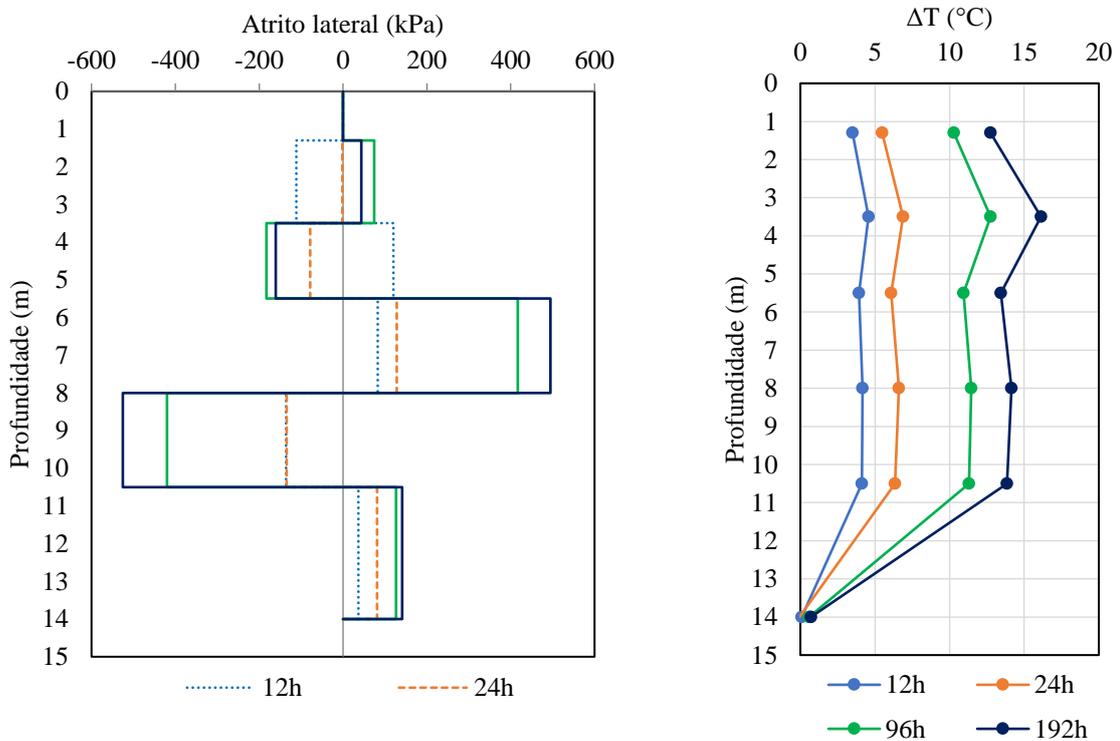
O efeito das tensões de expansão axial ao longo do comprimento estaca é complexo, e dependente da resistência das camadas de solo que envolvem a estaca e consequente diagrama de resistência por atrito lateral da fundação.

Figura 5.10: Cargas axiais induzidas na estaca devido ao carregamento térmico.



Fonte: Autora.

Figura 5.11: Atrito lateral unitário mobilizado na estaca devido ao carregamento térmico.



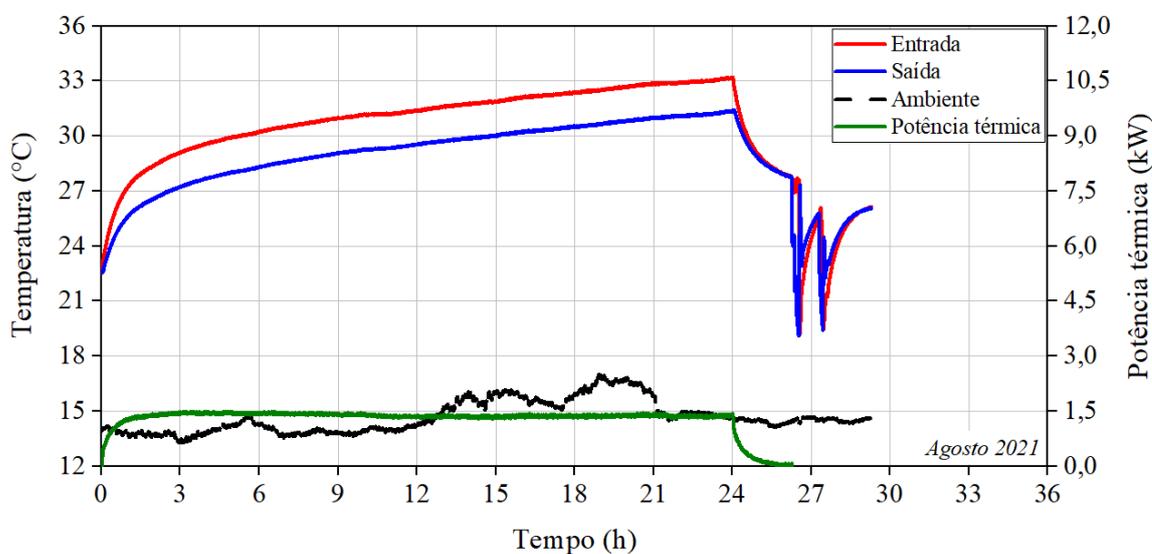
Fonte: Autora.

5.3 Ensaio de carregamento termomecânico

Um ensaio de carregamento termomecânico foi realizado na estaca piloto em Triplo U com o objetivo de avaliar o comportamento da estaca sob condições de serviço, ou seja, quando submetida à carga mecânica de serviço e às cargas térmicas de operação da bomba de calor. Neste uso, geralmente a temperatura do fluido atinge valor máximo em torno de 35°C (devido ao calor extraído do ambiente para ser rejeitado no solo). Portanto, buscou-se atingir esta temperatura durante o ensaio. A carga mecânica de serviço foi mantida durante a aplicação da carga térmica na estaca durante 24 h.

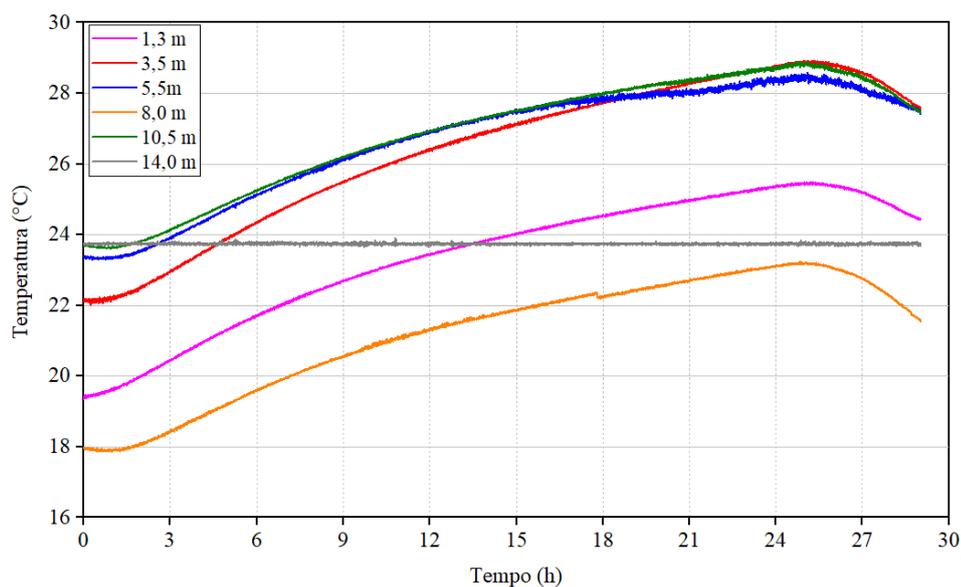
Nas Figuras 5.12 a 5.14 são apresentadas a evolução das temperaturas de entrada e saída do fluido que circula na estaca e das temperaturas desenvolvidas na estaca durante o ensaio termomecânico, nas fases de aquecimento e resfriamento.

Figura 5.12: Ensaio de aquecimento e resfriamento da estaca durante o ensaio termomecânico.



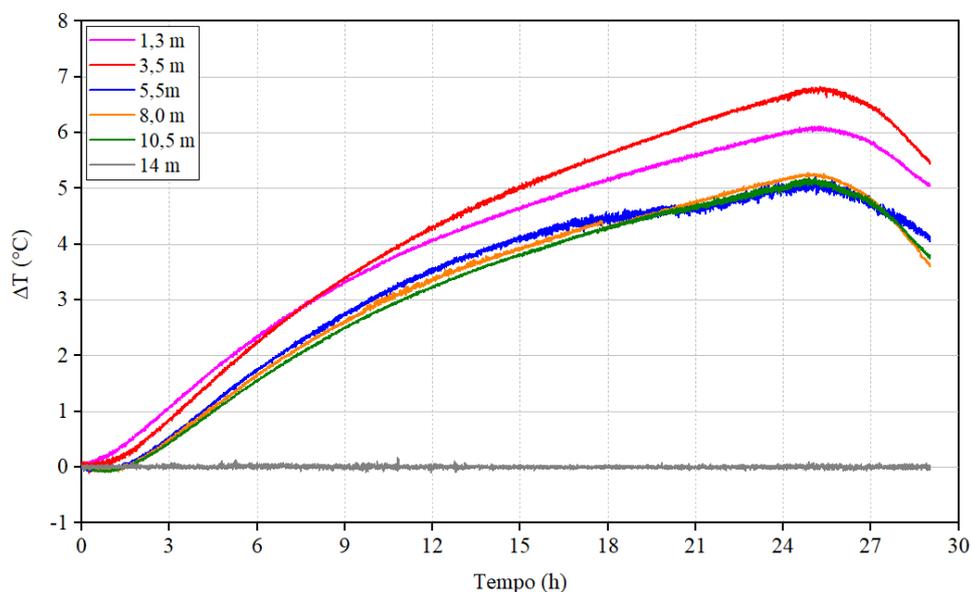
Fonte: Autora

Figura 5.13: Temperatura absoluta no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade durante o ensaio termomecânico.



Fonte: Autora.

Figura 5.14: Variação da temperatura no centro da estaca Triplo U ao longo da profundidade no ensaio termomecânico.

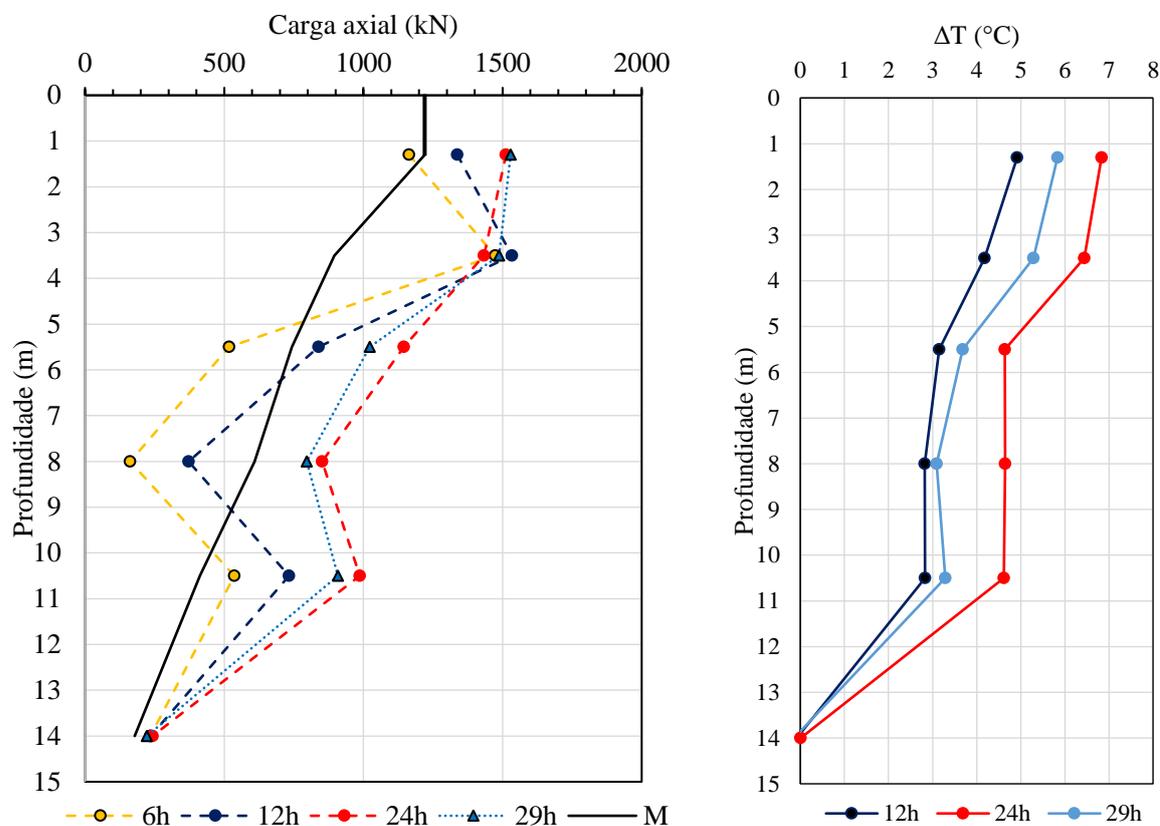


Fonte: Autora.

As cargas axiais desenvolvidas na estaca são apresentadas na Figura 5.15 nas fases de aquecimento (até 24 h) e ao final da fase de resfriamento registrada (29 h), assim como a distribuição de temperatura da estaca nos tempos correspondentes. Além disso, apresenta-se

também a curva de distribuição da carga axial mobilizada para a estaca antes da aplicação do carregamento térmico (curva M) durante carregamento de serviço.

Figura 5.15: Cargas axiais na estaca durante o carregamento termomecânico.



O aquecimento da estaca alterou o diagrama de mobilização da resistência por atrito lateral ao longo da profundidade (Figura 5.16) devido ao impedimento no topo da expansão térmica da estaca, principalmente na zona superior, acima de 3,5 m de profundidade, onde o incremento de temperatura na estaca foi maior e as cargas axiais medidas foram superiores ao valor de carga aplicada pelo macaco no topo da estaca (1221 kN).

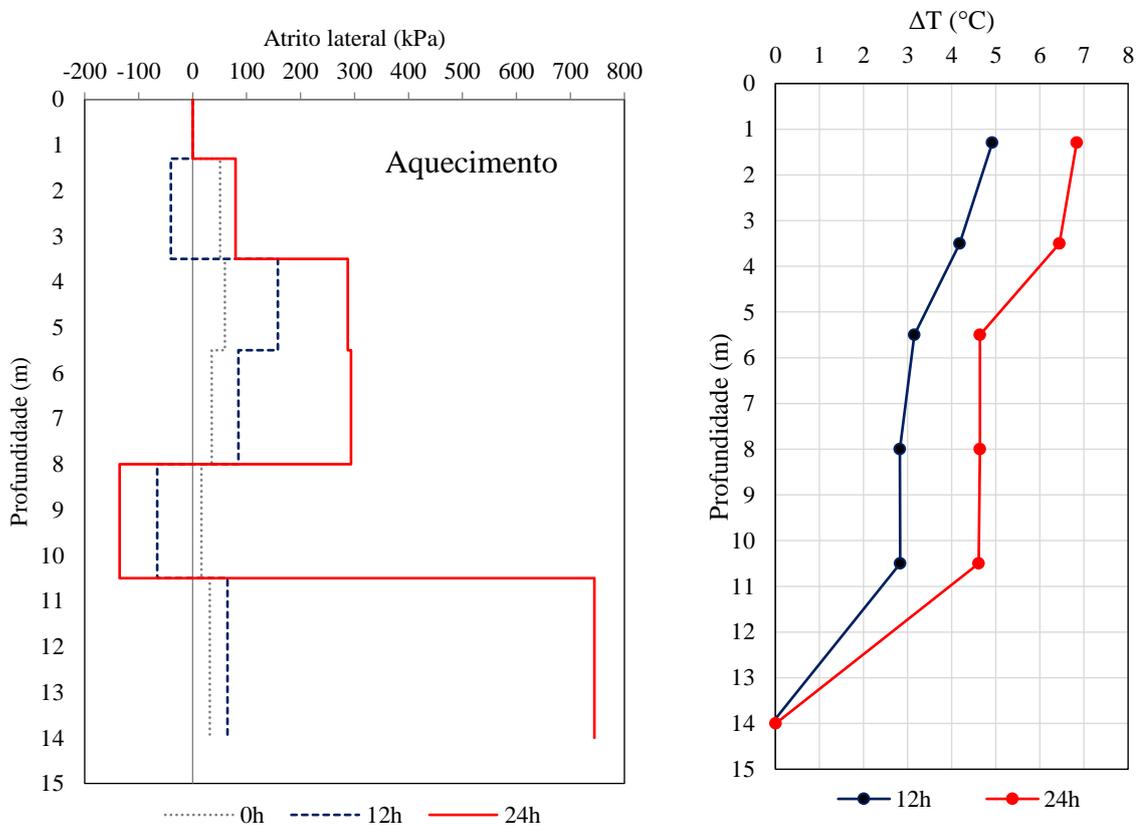
Na profundidade de 3,5 m, após um aquecimento de aproximadamente 6,5°C houve um acréscimo de carga de cerca de 270 kN (1500 – 1230 kN) na seção, indicando que o atrito negativo atuante devido a expansão restringida no topo foi de 270 kN, que somando-se a carga aplicada pelo macaco resultou em 1500 kN nesta profundidade.

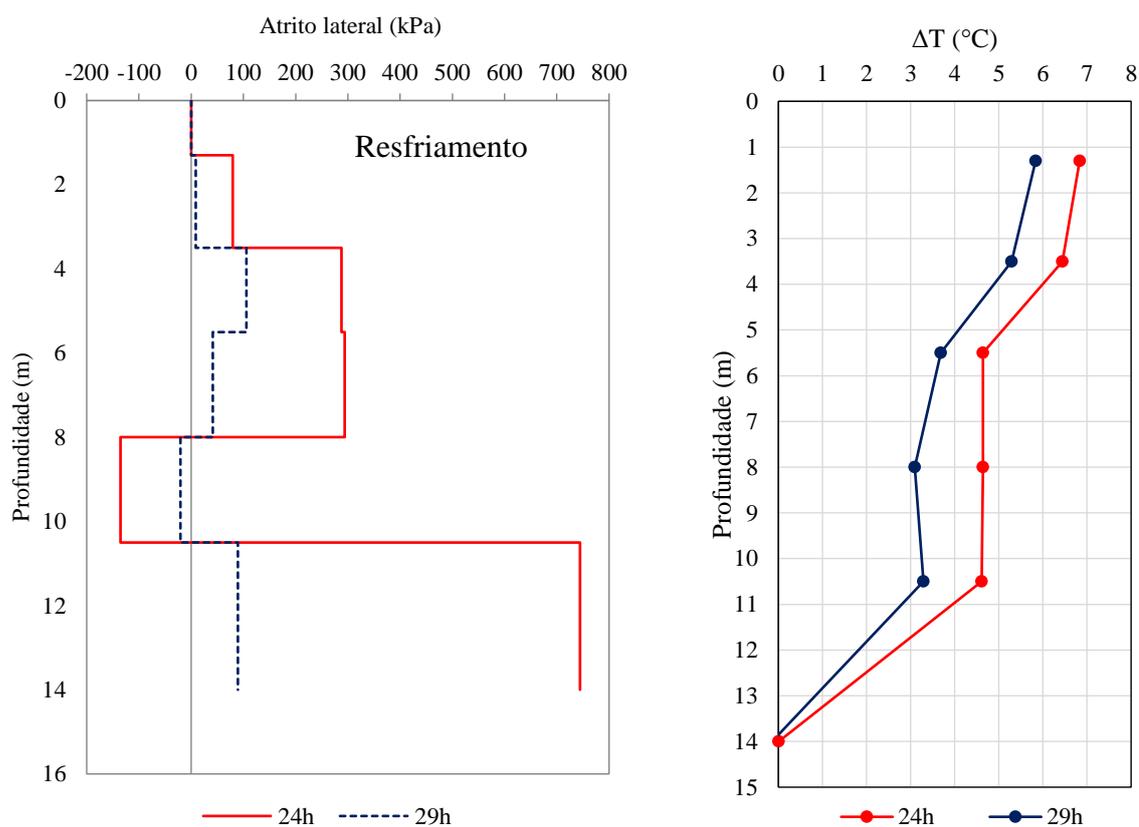
A Figura 5.16 ilustra que no final da fase de aquecimento a maior parcela de atrito lateral é mobilizada da região inferior da estaca, justamente onde não há quase acréscimo de temperatura, pois nessa zona não há quase tubo instalado. Como mostra a distribuição de carga axial ao longo da profundidade na Figura 5.15, no fim do aquecimento praticamente quase 80% da carga aplicada pelo macaco (1000 kN) chega na profundidade de 10,5 m, o que faz com que

maior resistência seja mobilizada entre 10,5 e 14 m para resistir grande parte desta carga, deixando o restante para a ponta. No entanto, o trecho entre 8,5 e 10,5 m indica atrito negativo (estaca tende a se expandir para cima neste trecho mobilizando atrito negativo). E abaixo desta profundidade a estaca se expande para baixo mobilizando atrito positivo.

Os resultados da Figura 5.16 indicam que após 5 horas de resfriamento o diagrama de atrito tende a retornar rapidamente a condição anterior a fase de aquecimento, mesmo com a redução de apenas 2°C no corpo da estaca.

Figura 5.16: Diagrama de atrito durante aquecimento e resfriamento da estaca sob carga de serviço.



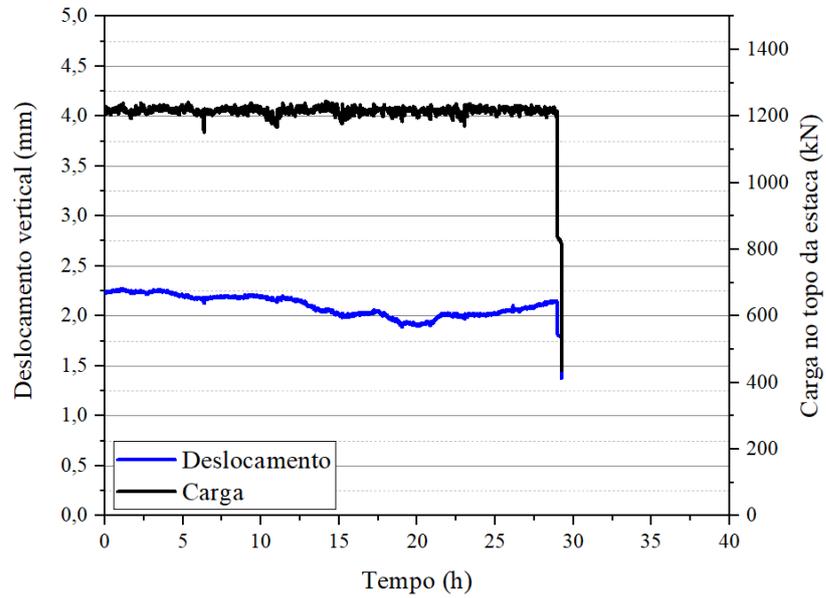


Fonte: Autora.

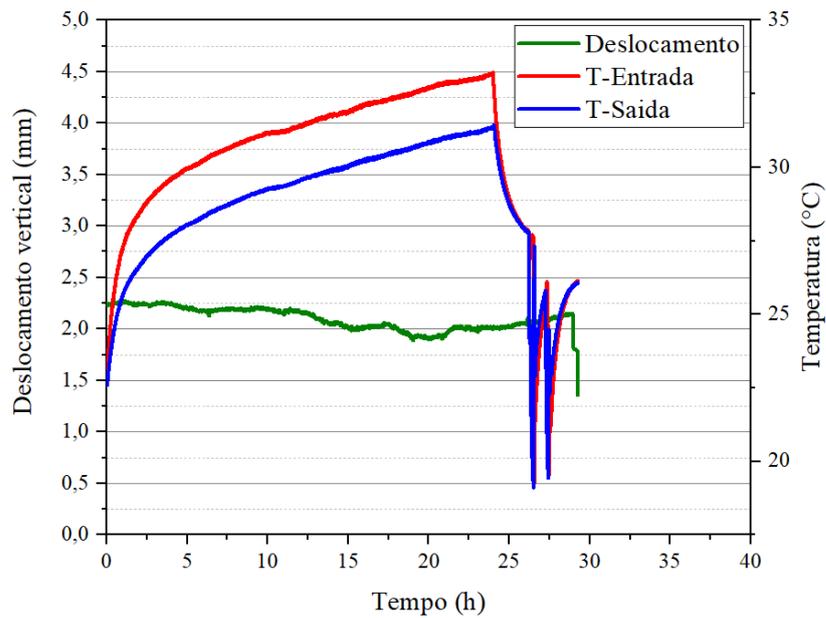
Por fim, as medidas de recalques registradas pelos LVDTs durante o carregamento em serviço da estaca (assim que se iniciou o carregamento térmico, durante aquecimento e durante resfriamento) mostram que apesar das diferenças nos diagramas de atrito mobilizados o comportamento carga-recalque da fundação não foi afetado, como mostra a Figura 5.17.

No entanto, vale ressaltar que o ensaio realizado nesta tese corresponde apenas a um único ciclo térmico na fundação trocadora de calor, e que ao longo de sua vida útil estará submetida a vários ciclos de aquecimento e resfriamento. Por essa razão, as estacas trocadoras de calor do edifício do CICS serão submetidas ao monitoramento de recalques ao longo do tempo de uso.

Figura 5.17: Deslocamento do topo da estaca durante o ensaio termomecânico: (a) carga mantida e (b) temperatura de entrada e saída da estaca.



(a)



(b)

Fonte: Autora.

6 ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO DE ESTACA TROCADORA DE CALOR

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos principais ensaios realizados em uma seção de estaca trocadora de calor (Tabela 6.1), desenvolvidos para simular em laboratório a troca térmica de uma estaca de concreto equipada com tubos na configuração em U-simples, instalada em solo arenoso seco, saturado e saturado submetido a fluxo de água subterrânea. Os resultados obtidos para uma seção de estaca podem ser estendidos para descrever a troca de calor ao longo da profundidade de estacas termoativas, conforme proposto em Akrouch *et al.* (2016).

Foram feitos um ensaio em areia seca (*ED*), um em areia saturada (*ES*), e dois ensaios com fluxo de água, com velocidades de fluxo de 0,8 m/dia (*EF8*) e 1,5 m/dia (*EF15*). O ensaio *EF4* foi fortemente afetado pelas variações de temperatura da água do reservatório a montante e é apresentado apenas no Apêndice C.

Primeiramente são analisados separadamente os ensaios *ED* e *ES* e em seguida é feita uma comparação nas respostas de temperatura obtidas. Após, são apresentados os ensaios *EF8* e *EF15*, seguidos de uma comparação entre eles. Por fim, são comparados os resultados de ensaios com a estaca inserida em areia saturada e com fluxo de água (*ES* e *EF8*).

Tabela 6.1: Ensaios em seção de estaca trocadora de calor.

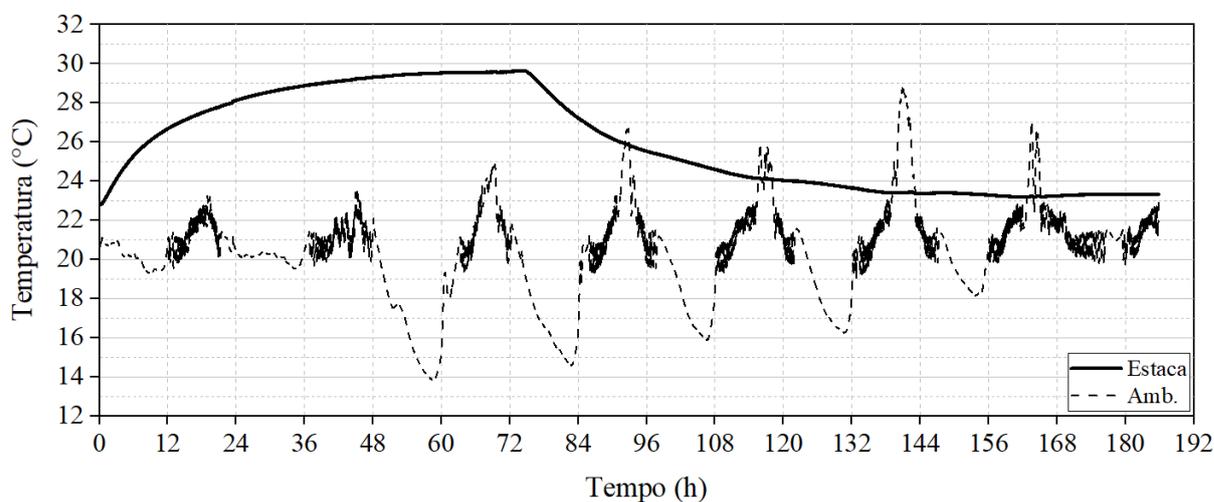
Ensaio	Temperatura inicial da estaca (°C)	Tempo de aquecimento	Tempo de resfriamento
ED	22,8	~3 dias (75 h)	~5 dias (111 h)
ES	22,5	~3dias (73 h)	~1dia (21 h)
EF8 v = 0,8 m/dia	21,7	3 dias (73h)	3 dias (72 h)
EF15 v =1,5 m/dia	23,4	2,5 dias (61h)	3 dias (74h)

Fonte: Autora.

6.1 Ensaio em areia seca – ED

No ensaio em areia seca, a estaca foi aquecida por aproximadamente três dias, tempo correspondente à estabilização da temperatura da estaca, estimado com base no primeiro ensaio realizado nesta condição. Na Figura 6.1 são apresentadas as temperaturas da estaca e do ambiente durante as fases de aquecimento e resfriamento. Em 72 h, a estaca atingiu uma temperatura de aproximadamente 29°C, três graus a menos que o valor imposto à água presente nos tubos PEAD (32°C). A fase de resfriamento também foi conduzida por três dias, e a temperatura estabilizada após este período foi ligeiramente superior à temperatura registrada antes do aquecimento, devido ao aumento progressivo da temperatura ambiente ao longo do ensaio, que gerou uma nova temperatura de estabilização do sistema. A temperatura ambiente se apresentou em torno de 20°C, mas com oscilações importantes que atingiram 14°C e 29°C ao longo do período total de ensaio. Apesar disso, as respostas de temperatura na estaca se apresentaram pouco afetadas por essas variações, como mostra a Figura 6.1, indicando que o isolamento térmico instalado na caixa foi eficiente.

Figura 6.1: Temperatura da estaca e do ambiente durante o ensaio ED.



Fonte: Autora.

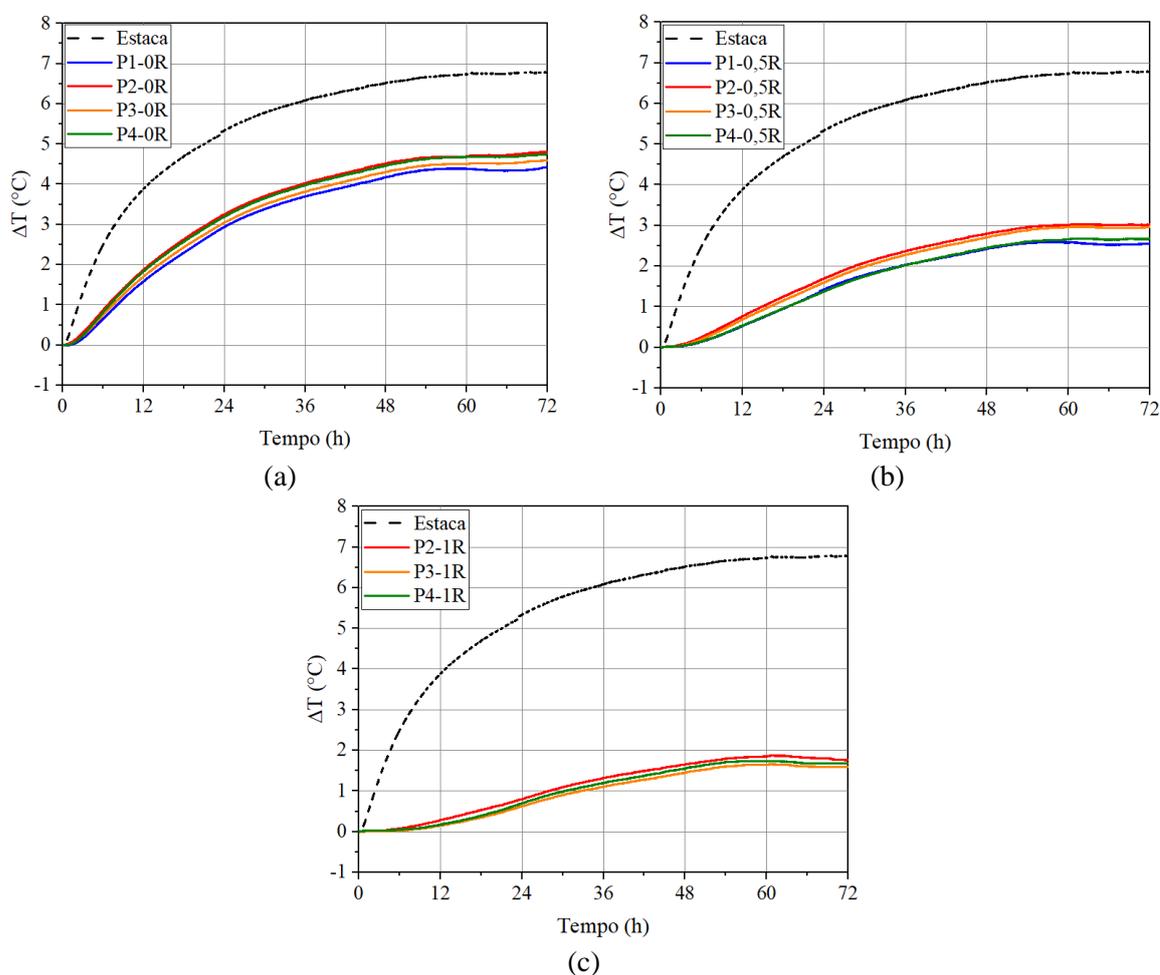
A temperatura inicial da estaca e dos sensores antes do início do aquecimento é similar, e a análise das temperaturas no solo será realizada em termos de incrementos de temperatura, conforme apresentado a seguir.

Na Figura 6.2 são apresentadas as variações de temperatura registradas no solo e na estaca nas distâncias radiais 0R; 0,5R e 1R. Na distância 0R (interface solo-estaca), a variação

de temperatura entre os sensores foi similar, apesar da maior proximidade do sensor na posição P2-0R dos tubos. O agrupamento entre as respostas térmicas dos sensores nas respectivas distâncias radiais sugere que os sensores foram posicionados de maneira adequada na montagem do experimento.

Com 72 h de aquecimento, as variações de temperatura nas distâncias 0R; 0,5 e 1R foram de 4,7; 2,8 e 1,6°C em média. Os resultados da Figura 6.2 mostram que a distribuição de temperatura no solo é simétrica em relação à origem da fonte de aquecimento em um meio sem advecção, como comentado em Diao *et al.* (2004).

Figura 6.2: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R durante o ensaio ED.



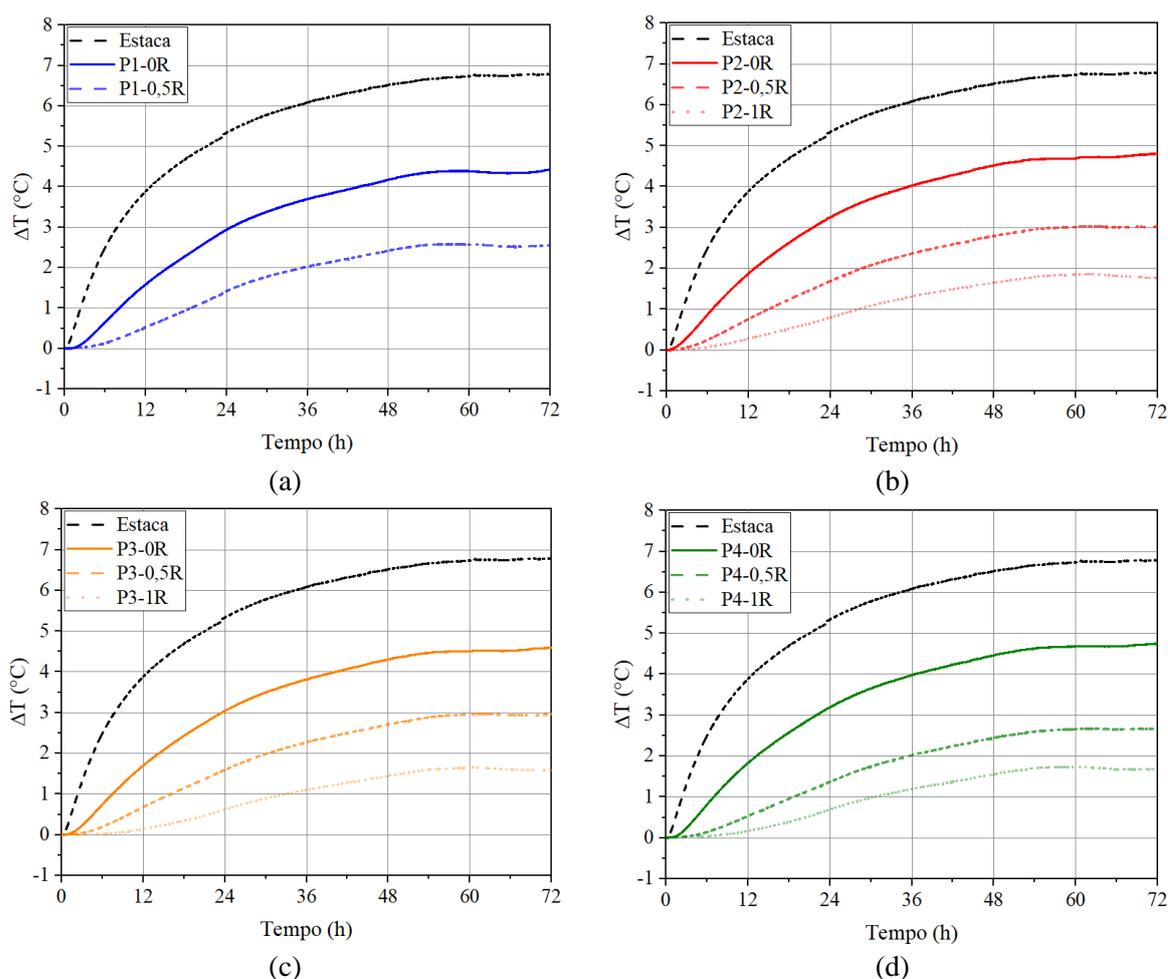
Fonte: Autora.

Como esperado, as temperaturas registradas no solo no entorno da estaca foram inferiores à temperatura registrada no centro da estaca, e tão menores quanto maior a distância radial da estaca. Como mostra a Figura 6.2a, a diferença entre a temperatura da estaca e do solo

na interface (0R) fica em torno de 2°C após a estabilização. Para o solo a uma distância igual a 1R da face da estaca, esta diferença sobe para aproximadamente 5°C . Esta grande diferença se deve à baixa condutividade térmica da areia seca, que dificulta a transferência de calor da estaca para o solo em seu entorno.

Na Figura 6.3 as variações de temperatura foram agrupadas em cada uma das direções: P1, P2, P3 e P4. Em uma mesma direção, nota-se uma diferença de temperatura considerável entre os sensores à medida que se afastam da estaca, o que indica uma dificuldade em transferir o calor injetado na estaca inserida em areia seca. Nos sensores localizados na posição P1 pode ter havido influência da temperatura ambiente, visto que estão mais próximos do aparelho de ar-condicionado instalado no container.

Figura 6.3: Variações de temperatura na estaca e no solo nas posições (a) P1, (b) P2, (c) P3 e (d) P4 durante o ensaio *ED*.



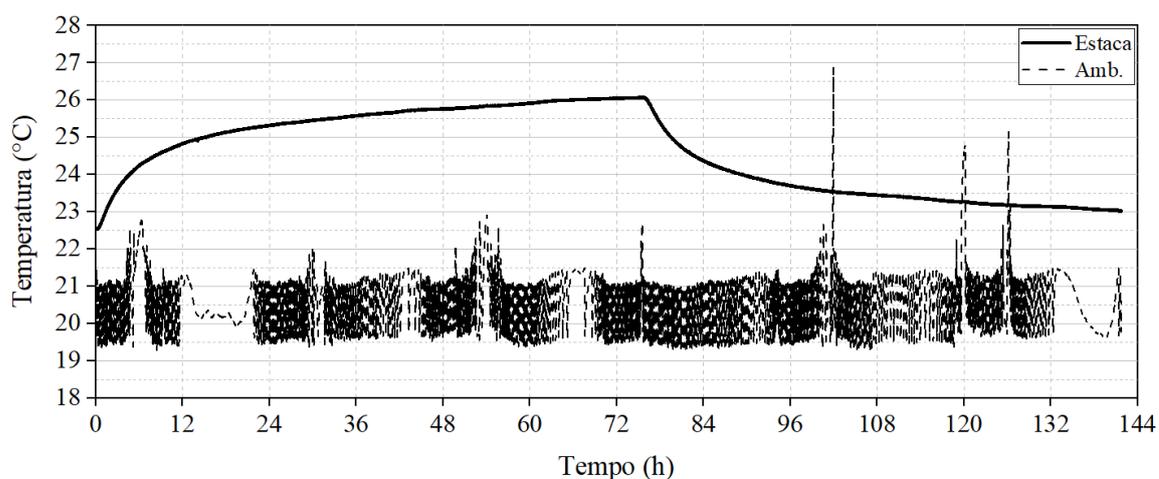
Fonte: Autora.

6.2 Ensaio em areia saturada – *ES*

Durante o ensaio realizado em areia saturada, a temperatura ambiente se manteve em torno de 20°C, apesar da ocorrência de picos de temperatura de até 27°C durante a fase de resfriamento, como apresentado na Figura 6.4.

Em 72h de aquecimento, a temperatura da estaca atingiu 26°C, 6°C a menos que a temperatura imposta à água no interior dos tubos PEAD (32°C). Essa diferença mostra que neste ensaio, devido ao efeito da saturação da areia, a temperatura da estaca aumentou bem menos comparada ao caso da areia seca, sendo que em ambos os ensaios as estacas foram submetidas à mesma temperatura de fluido em seus tubos. Isto ocorreu porque a condutividade térmica da areia saturada é consideravelmente superior à da areia seca, e, portanto, facilitou a transferência do calor de dentro da estaca para o solo circundante.

Figura 6.4: Temperatura da estaca e do ambiente durante o ensaio *ES*.



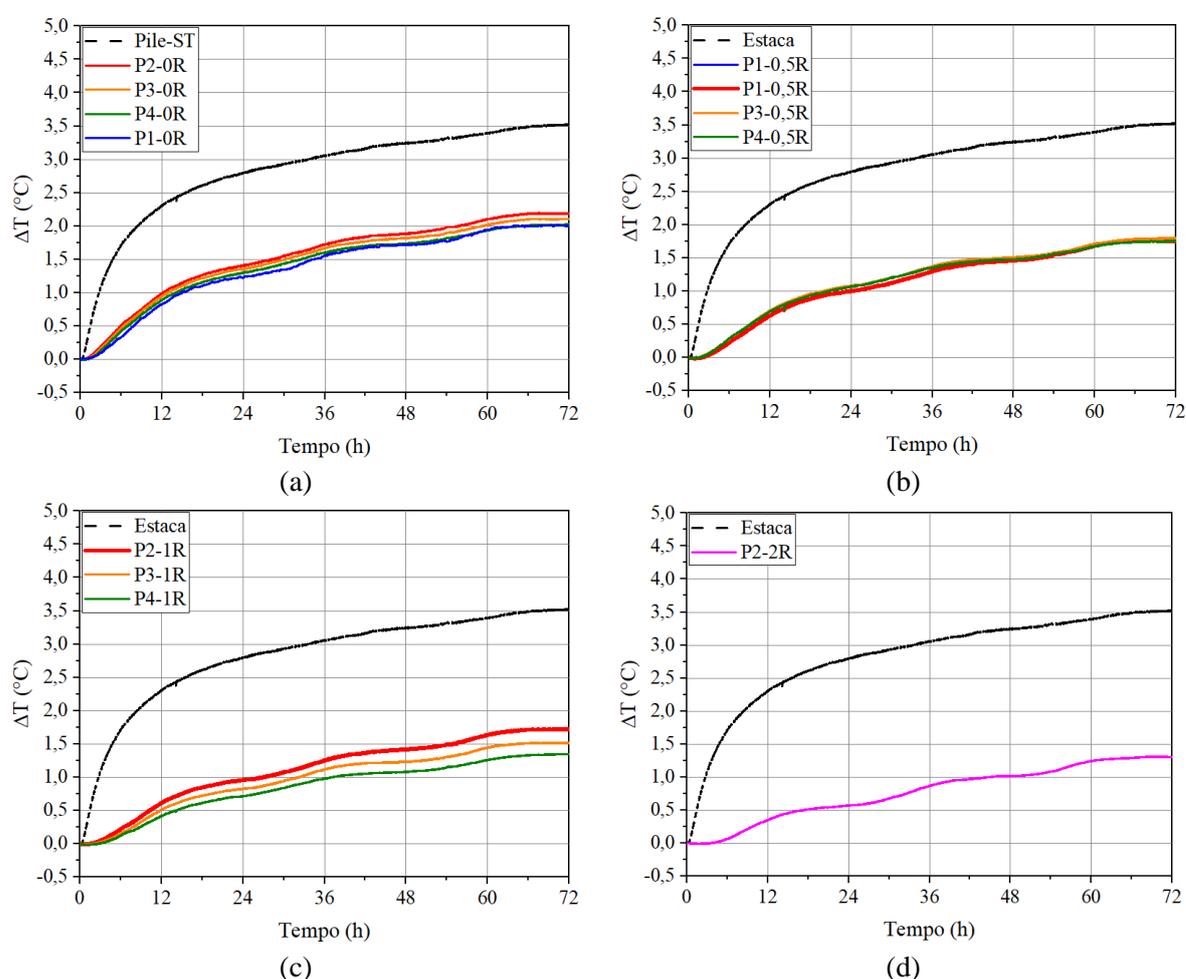
Fonte: Autora.

A Figura 6.5 apresenta as variações de temperatura obtidas no solo comparadas às geradas na estaca, para as distâncias radiais 0R; 0,5R; 1R e 2R. No final do aquecimento, a estaca experimentou um aumento de temperatura de 3,5°C. Nos sensores localizados no perímetro da estaca (0R) as variações de temperatura registradas foram semelhantes e de 2,1°C em média, 1,5°C a menos que o acréscimo registrado no centro da estaca. A 0,5R o aumento de temperatura no solo foi de 1,8°C em média, também semelhante nas diferentes posições. Por outro lado, a 1R houve maior dispersão entre as temperaturas, sendo alcançado um maior aumento no sensor alinhado aos tubos trocadores de calor, onde os aquecedores estavam inseridos; em média, os sensores nesta distância radial registraram um aumento de temperatura

de 1,5°C. No único sensor instalado a 2R, a variação de temperatura alcançada ao final do aquecimento foi de 1,3°C.

Os resultados da Figura 6.5 mostram que a diferença entre a temperatura da estaca e do solo a uma distância igual a 1R da face da estaca foi em torno de 2°C, enquanto no caso da areia seca foi de 5°C. Portanto, quando a condutividade térmica do solo é maior, a diferença entre a temperatura da estaca e do solo em seu entorno são menores.

Figura 6.5: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio *ES*.

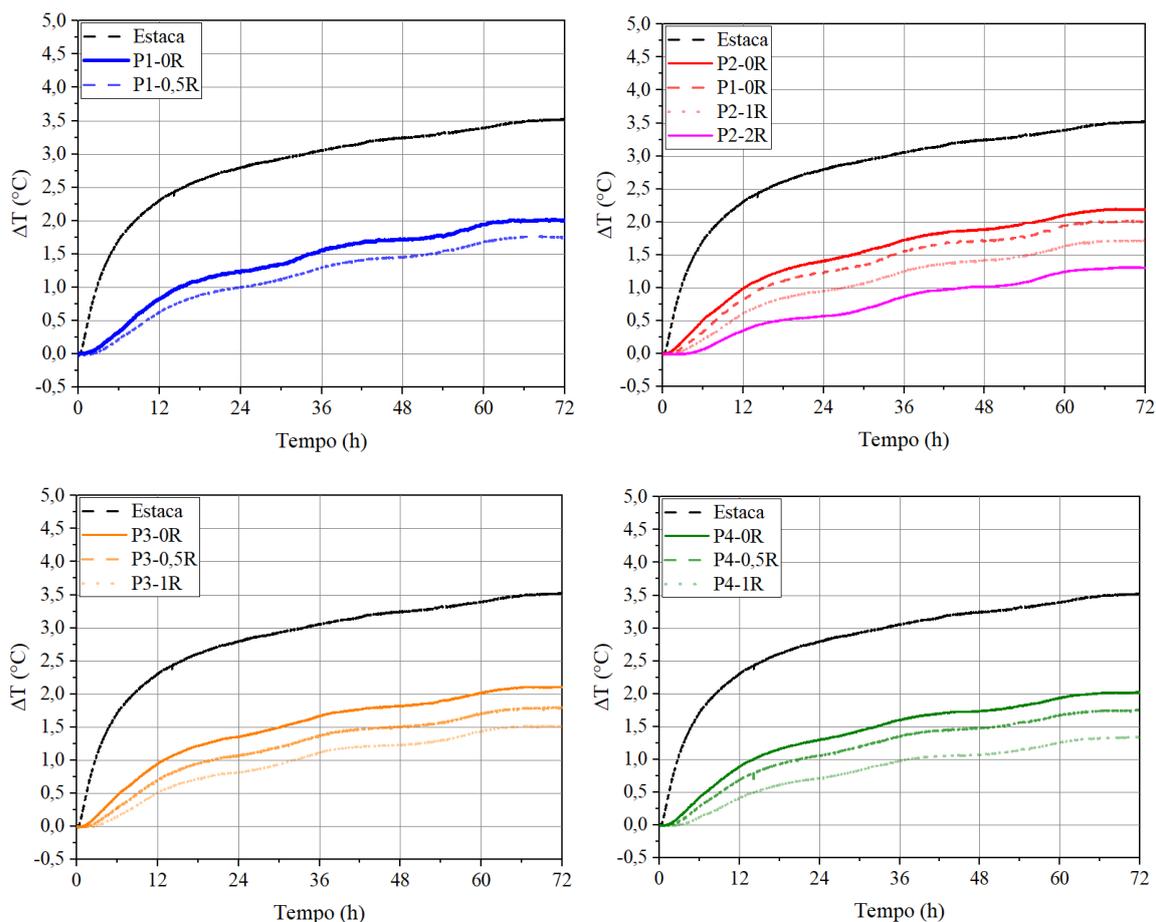


Fonte: Autora.

A Figura 6.6 apresenta as variações de temperatura geradas em cada um dos eixos definidos por P1, P2, P3 e P4. Em todas as posições verificou-se maior aumento de temperatura quanto maior a proximidade do sensor em relação à estaca. Acredita-se que as oscilações de temperatura registradas pelos sensores tenham sido causadas por pequenas variações da temperatura ambiente. Isto não ocorreu nas respostas obtidas na areia seca, provavelmente

devido à menor condutividade térmica do solo nesta condição, que dificulta a transferência de calor no meio. Neste caso de maior condutividade térmica, o efeito da proximidade do tubo trocador de calor na posição P2 fez com que a temperatura a 1R fosse um pouco maior comparada às posições P3 e P4, como mostra a Figura 6.5c.

Figura 6.6: Variações de temperatura na estaca e no solo nas posições (a) P1, (b) P2 e (c) P3 e (d) P4 durante o ensaio *ES*.



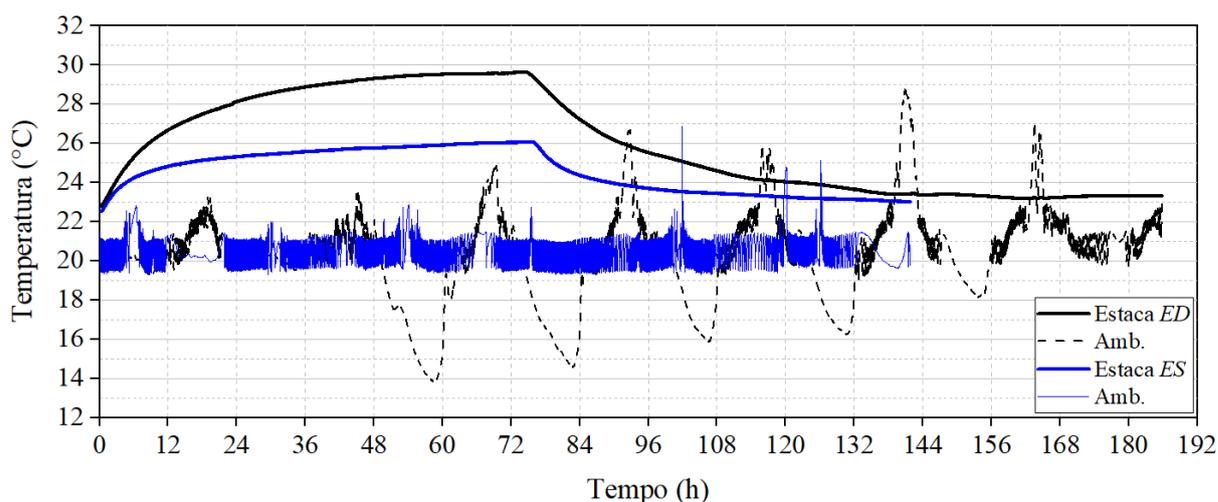
Fonte: Autora.

6.3 Comparação entre os ensaios em areia seca e saturada – *ED* e *ES*

O comportamento térmico da estaca e do solo em seu entorno nos ensaios em areia seca e saturada foi comparado através dos resultados dos ensaios descritos anteriormente. Considerando que a fase de aquecimento consistiu em injetar uma temperatura constante na estaca, as variações de temperatura resultantes na estaca e no solo são afetadas pela temperatura inicial do sistema. Como mostra a Figura 6.7, os dois ensaios foram iniciados em temperaturas semelhantes, tornando a comparação entre eles adequada.

A temperatura ambiente foi mais bem controlada no ensaio saturado, no entanto, as variações de temperatura ambiente do ensaio seco parecem não ter influenciado de maneira importante a temperatura da estaca. Em 72 h de aquecimento, a estaca inserida em solo saturado atingiu 26°C contra 29°C em areia seca. Como a temperatura injetada na estaca foi igual nos dois ensaios, essa diferença sugere que o mesmo calor injetado foi dissipado com mais facilidade para o meio saturado. No ensaio em areia seca, o tempo de resfriamento da estaca foi superior ao ensaio saturado, o que reforça a maior dificuldade da areia seca em dissipar o calor injetado. Como comentado anteriormente neste capítulo, essas diferenças se devem à grande diferença entre a condutividade térmica da areia seca e da areia saturada. A maior condutividade térmica também acelera a recuperação da temperatura inicial do solo durante o resfriamento natural na condição saturada.

Figura 6.7: Temperatura da estaca e do ambiente durante os ensaios *ED* e *ES*.



Fonte: Autora.

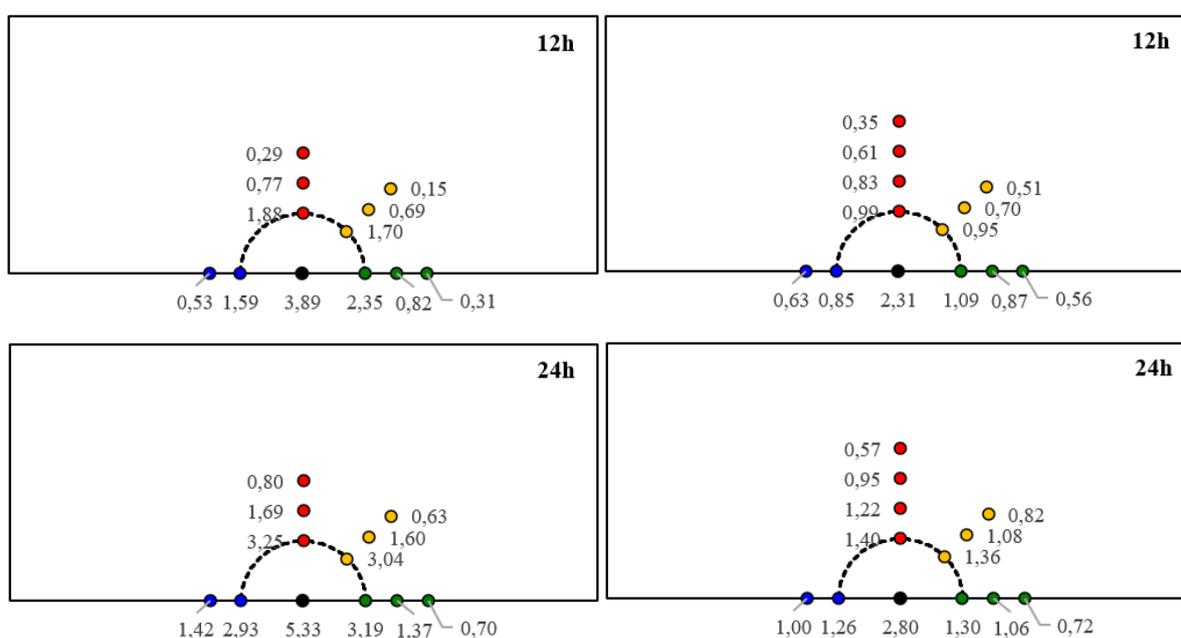
A Figura 6.8 detalha as variações de temperatura obtidas na estaca e no solo do entorno a 12, 24, 48 e 72h de aquecimento nos ensaios *ED* e *ES*. Como já mencionado acima, para o ensaio em areia seca, a diferença de temperatura entre a estaca e o solo no entorno é significativamente maior do que em areia saturada.

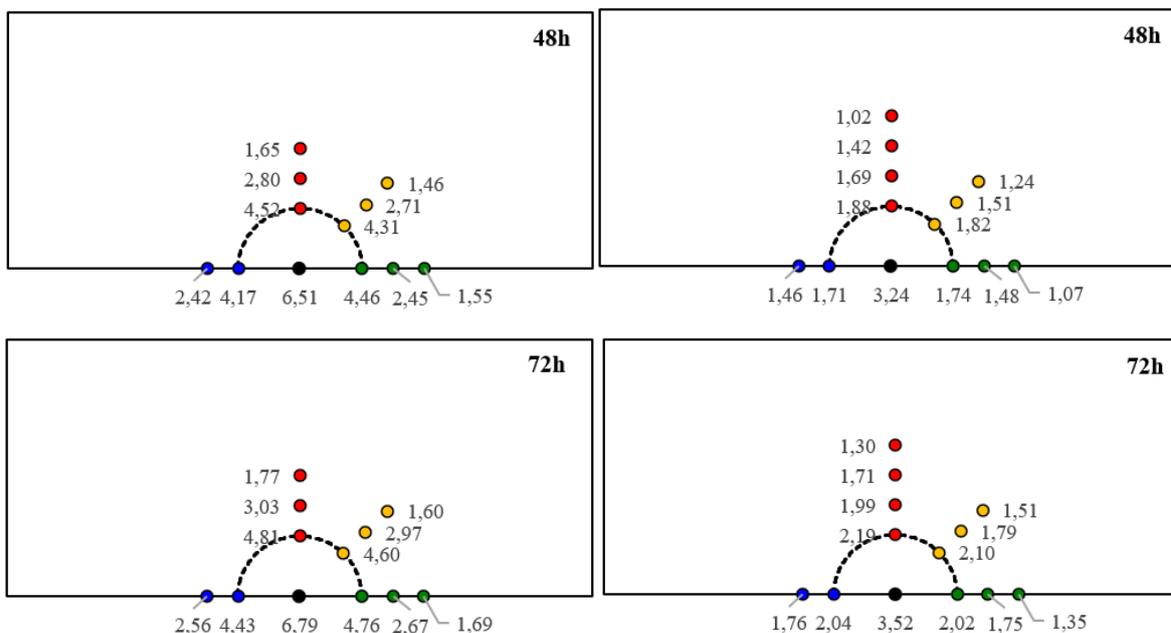
Com 12 h de aquecimento, a estaca inserida em solo saturado alcançou 65% da temperatura atingida em 72 h, e em solo seco 60%. Em 24 h, 78% e 79% foram atingidos para os ensaios em areia seca e saturada, respectivamente. Assim, nota-se que a taxa de aumento de temperatura da estaca entre os ensaios realizados nas duas condições é semelhante, mas difere na temperatura de equilíbrio a ser alcançada para o dado calor injetado. Considerando que em

72 horas a temperatura da estaca nos dois ensaios parece estar próxima da estabilidade, a estaca atinge aproximadamente 79% da temperatura máxima em 1 dia de aquecimento. Por outro lado, a variação de temperatura no solo ao longo do tempo se dá numa taxa diferente da estaca, e diferente para cada condição de saturação.

A diferença entre as temperaturas nos sensores posicionados no solo a diferentes distâncias da face da estaca é significativamente maior para o ensaio em areia seca. Com 24h de aquecimento no ensaio seco, a diferença de temperatura obtida entre a estaca e o solo na posição P2-1R é de 4,5°C contra 1,9°C em areia saturada. Isso significa que quando a estaca está inserida em solo com menor condutividade térmica (areia seca), o calor injetado na estaca tem maior dificuldade de ser dissipado no solo, provocando maior aumento da temperatura da estaca. Em outras palavras, quanto maior a diferença de temperatura obtida no meio para um dado calor injetado, maior a resistência térmica existente. Em solo saturado, onde a condutividade térmica é maior, existe maior equilíbrio entre as variações de temperatura geradas na estaca e no solo, o que significa que o meio saturado contribui para melhor dissipação do calor injetado em estacas trocadoras de calor. Assim, com a areia saturada, a diferença de temperatura entre a estaca e o solo é menor e a distribuição de temperatura é mais uniforme, enquanto em areia seca, devido à baixa condutividade térmica, o calor fica mais concentrado na estaca.

Figura 6.8: Variações de temperatura geradas no solo e na estaca durante a fase de aquecimento em areia seca (coluna esquerda) e saturada (coluna direita).



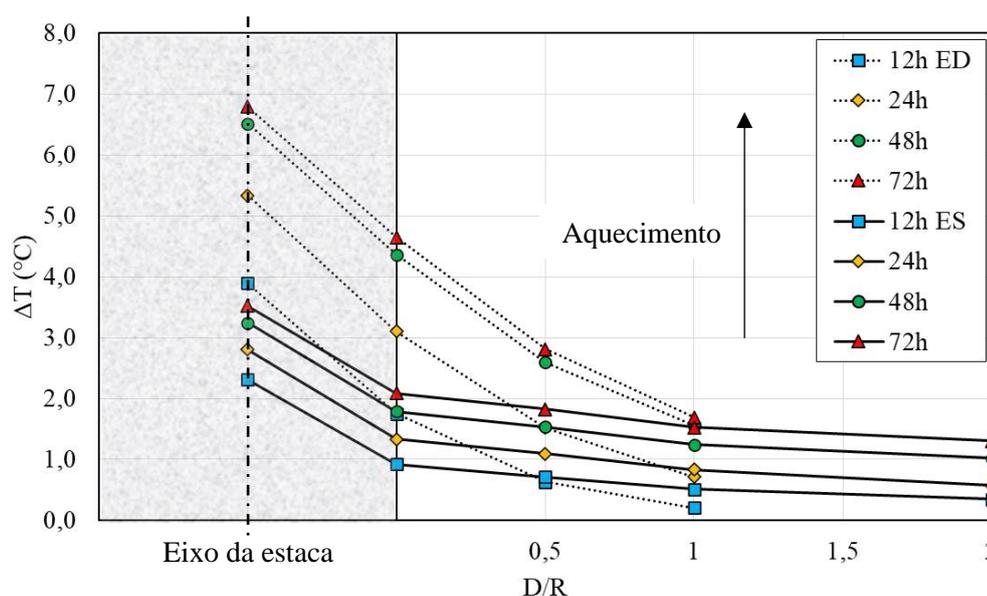


Fonte: Autora.

Na Figura 6.9 são apresentadas as variações de temperatura *média* obtidas em cada distância radial durante a fase de aquecimento, para os dois ensaios. Quanto menor a inclinação da reta, maior a velocidade de transferência de calor da estaca para o solo no entorno. A inclinação da reta do centro da estaca até a face em contato com o solo no ensaio em areia seca é de aproximadamente 1,5 vezes a obtida em areia saturada. Isso sugere que o calor fica mais aprisionado na estaca, gerando maior diferença de temperatura com a face em contato com o solo. No solo, por outro lado, de 0R até 1R, a inclinação da curva no ensaio em areia seca é de 4,8 e 5,4 vezes maior que no ensaio saturado, considerando as medidas obtidas em 24 e 72 h, respectivamente. Este fato indica que a saturação da areia provocou um aumento significativo na condutividade térmica do solo, como esperado com base em resultados de condutividade térmica do solo disponíveis na literatura.

No ensaio seco, a curva que une o centro da estaca ao solo na distância radial 1R é tão mais próxima de uma reta quanto maior o tempo de aquecimento. Além disso, a inclinação (negativa) aumenta, com uma diferença de temperatura cada vez maior entre estes extremos. No ensaio saturado, a curva dentro do solo é mais abatida, indicando uma maior uniformidade entre as temperaturas ao longo das distâncias radiais consideradas.

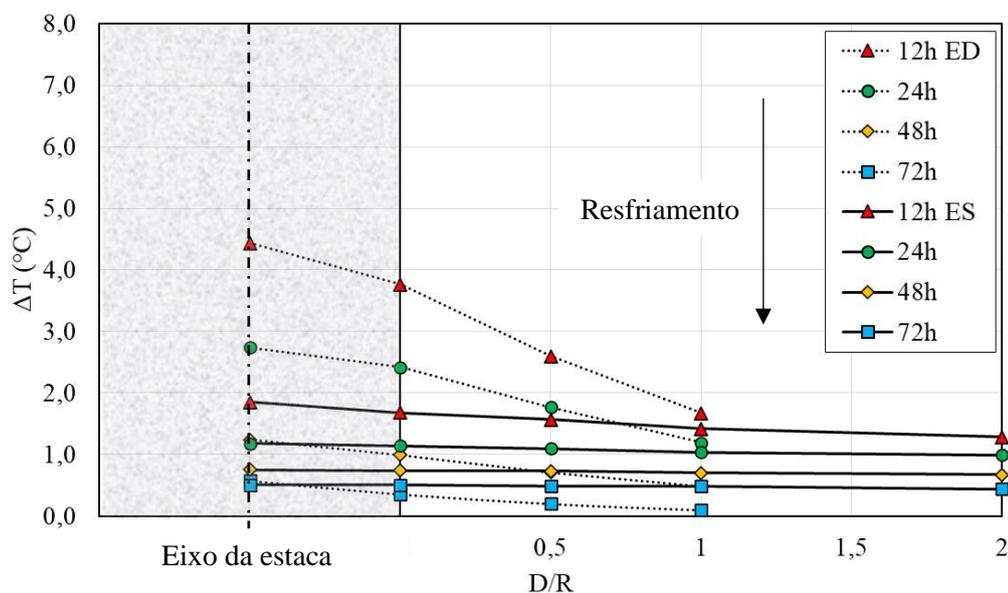
Figura 6.9: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de aquecimento.



Fonte: Autora.

Durante o resfriamento (Figura 6.10), a estaca em areia seca apresenta decréscimo de temperatura similar à areia saturada em 72 h, com decréscimos ainda superiores no solo.

Figura 6.10: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de resfriamento.



Fonte: Autora.

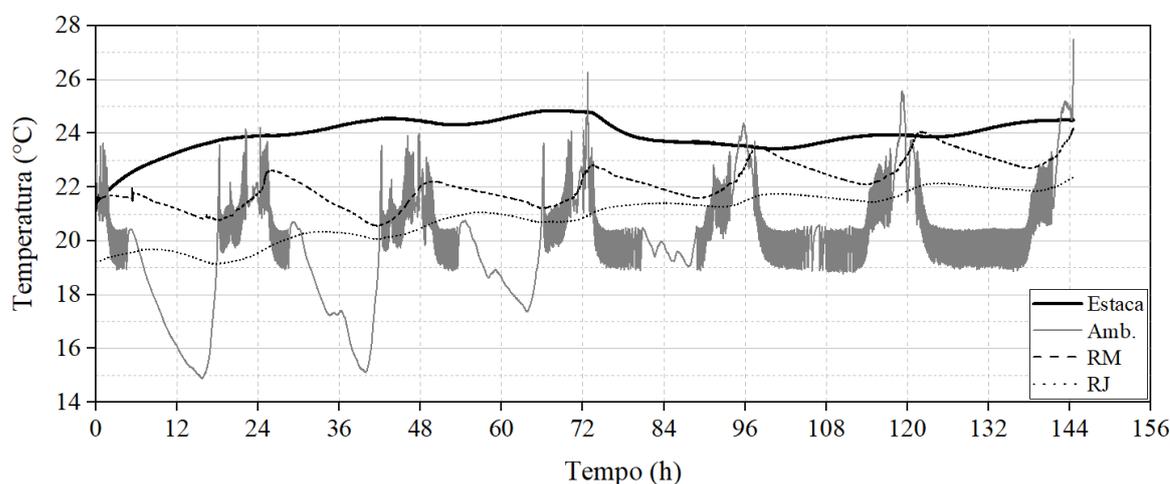
Espera-se que o desenvolvimento de menores gradientes térmicos seja mais favorável ao comportamento estrutural de fundações por estacas. Através da análise das temperaturas desenvolvidas no sistema solo-estaca em solo arenoso seco e saturado, percebe-se uma grande vantagem do meio saturado em relação ao seco, que propicia uma maior uniformidade entre as

temperaturas no solo e um valor menor na temperatura da estaca, para uma dada temperatura imposta ao sistema. As menores variações de temperatura na estaca são também favoráveis ao comportamento termomecânico da fundação, visto que as tensões induzidas termicamente aumentam com o incremento da temperatura na estaca.

6.4 Ensaio com fluxo – *EF8* ($v = 0,8$ m/dia)

De maneira semelhante aos ensaios descritos anteriormente, o ensaio com fluxo de água consistiu na injeção de calor com regulagem da temperatura no fluido em 32°C , por três dias, seguido de resfriamento. Durante este ensaio foi imposto ao meio arenoso uma velocidade de fluxo de aproximadamente $0,8$ m/dia. As respostas de temperatura obtidas na estaca, no ambiente e nos reservatórios de montante (RM) e jusante (RJ) são apresentadas na Figura 6.11. O tempo decorrido entre o pico de temperatura do reservatório e o pico de temperatura na estaca foi de aproximadamente 17 h. Considerando a distância entre a saída de água do RM e o centro da estaca igual a 72 cm, esse tempo corresponde uma velocidade de 1 m/dia, não muito distante da velocidade de fluxo imposta.

Figura 6.11: Temperatura da estaca, do ambiente e dos reservatórios (RM e RJ) durante o ensaio *EF8*.



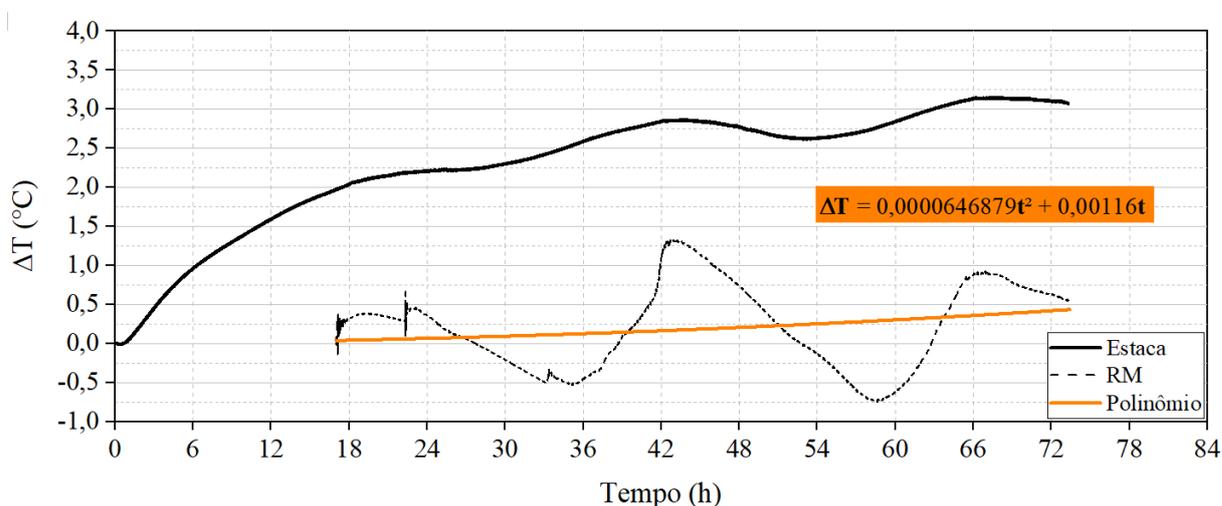
Fonte: Autora.

Com base na experiência obtida nos ensaios preliminares com fluxo, a temperatura dos reservatórios que alimentavam o fluxo de água contínuo do ensaio variava ao longo do dia e influenciava as temperaturas obtidas na estaca e no solo. Verificou-se que na ausência de aquecimento, as variações de temperatura obtidas no reservatório a montante (RM) eram semelhantes às variações ocasionadas no solo e na estaca, porém menos acentuadas. Além

disso, o efeito da variação de temperatura no reservatório era sentido de maneira diferente pelos sensores após um certo intervalo de tempo.

Com o objetivo de reduzir o efeito da variação de temperatura dos reservatórios sobre as temperaturas obtidas na estaca e no solo, os picos de temperatura do RM foram alinhados aos picos da temperatura da estaca, defasando-os em 17 h. Em seguida, um ajuste com polinômio de grau 2, com intercepto em zero, foi aplicado na curva de temperatura do RM, a fim de fornecer uma curva de variação média. O resultado desse ajuste para a fase de aquecimento é apresentado na Figura 6.12. A distribuição de temperatura fornecida pelo ajuste polinomial foi então subtraída das variações de temperatura obtidas na estaca e no solo.

Figura 6.12: Ajuste da variação de temperatura do reservatório a montante para o ensaio *EF8*.

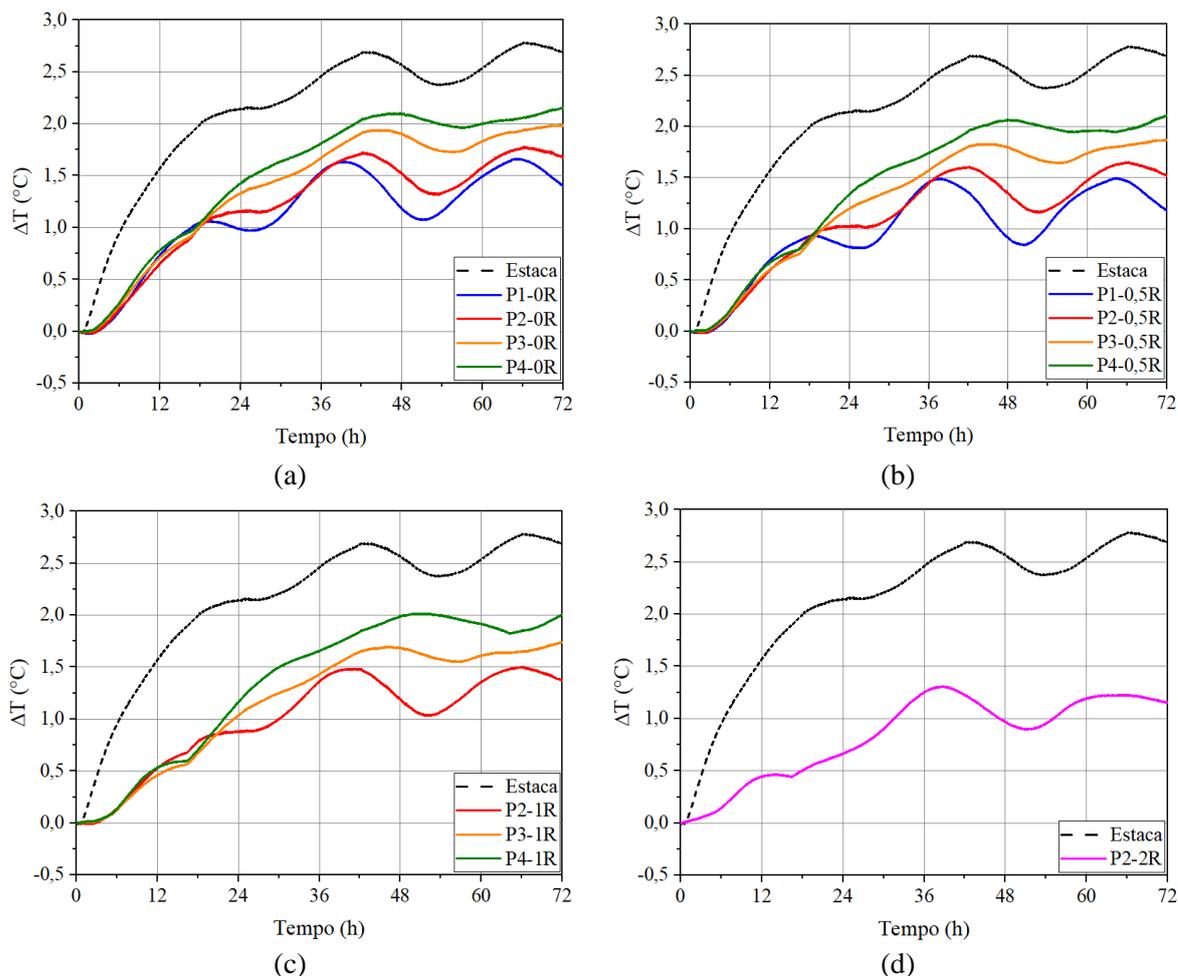


Fonte: Autora.

A Figura 6.13 apresenta os resultados de variação de temperatura na estaca e no solo com os valores já ajustados. Nas primeiras 18 h de aquecimento, as variações de temperatura na mesma distância radial são semelhantes e acredita-se que tenham sido pouco afetadas pelas variações da água a montante. A partir disso, começa a haver uma considerável diferenciação entre eles: para uma mesma distância radial, o solo monitorado a montante dos tubos PEAD (posição P1) experimenta as menores variações de temperatura e a jusante (posições P3 e P4) as maiores. O solo monitorado na direção dos tubos (posição P2) tem variação de temperatura intermediária entre a porção a montante e a jusante. Nota-se que o solo a montante é o mais afetado pelas variações de temperatura do reservatório, devido à proximidade entre eles, enquanto nos sensores a jusante as respostas são mais amortecidas e mais afetadas pelo calor

injetado na estaca. As variações de temperatura do reservatório são sentidas primeiramente em P1, P2, P3 e por último em P4.

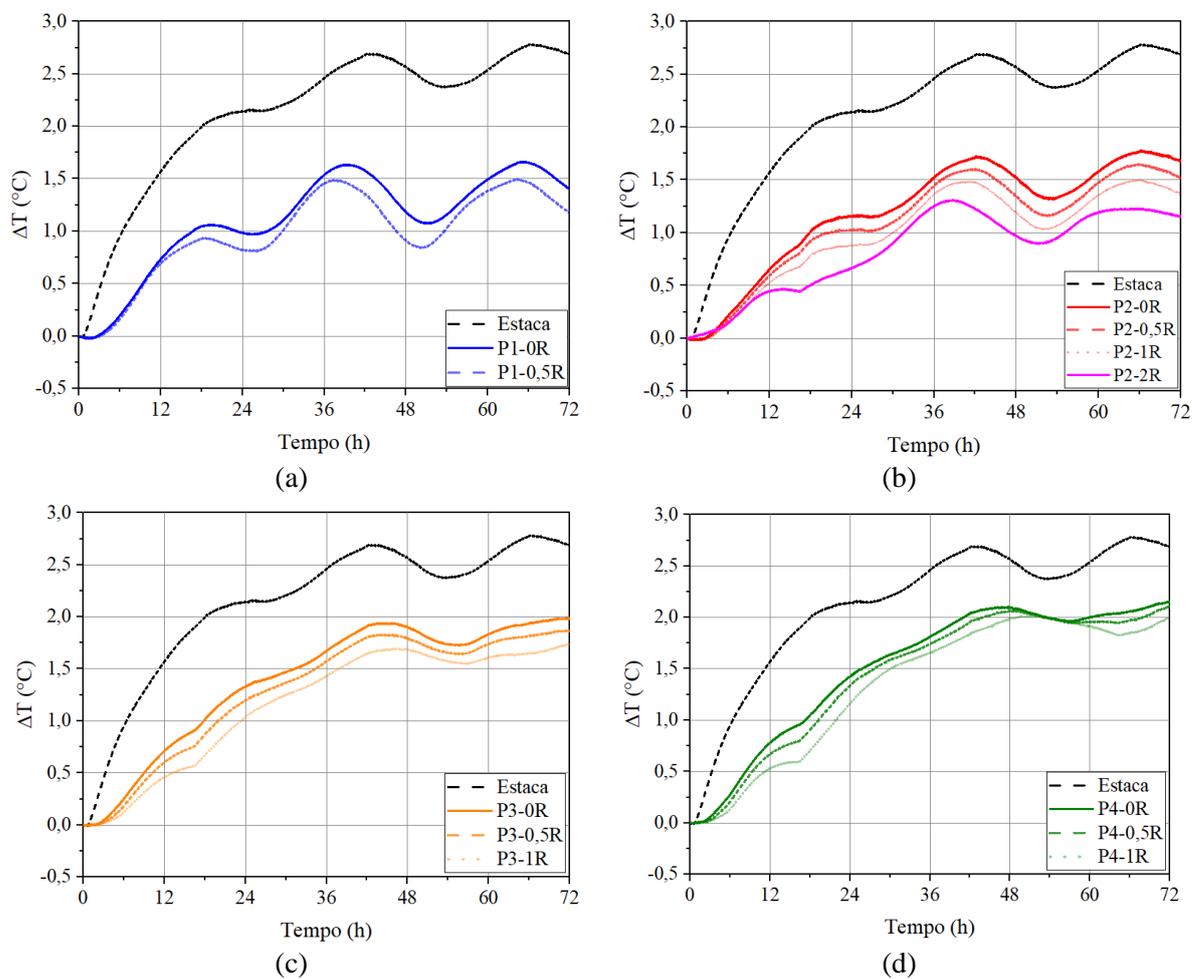
Figura 6.13: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio *EF8*.



Fonte: Autora.

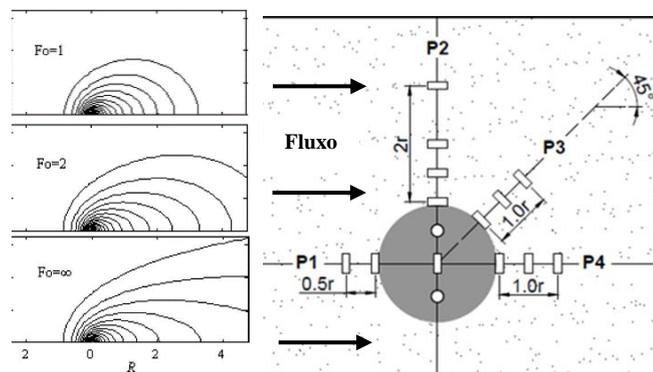
Quando se compara as variações de temperatura obtidas em cada um dos eixos, P1, P2, P3 e P4 (Figura 6.14), nota-se que os resultados são menores à medida que se afasta da estaca. Os sensores mais a jusante, localizados em P4, experimentam o maior aumento de temperatura. A presença do fluxo de água contínuo no solo faz com que o calor injetado na estaca seja carregado a jusante e provoca diferenciação das temperaturas dos sensores nas diferentes posições (menores temperaturas em P1, e maiores em P4) como ilustrado na Figura 6.15, que mostra o efeito da advecção no sentido de fluxo igual ao do ensaio.

Figura 6.14: Variações de temperatura no solo e na estaca nas posições (a) P1, (b) P2 e (c) P3 e (d) P4, durante o ensaio *EF8*.



Fonte: Autora.

Figura 6.15: Adveção devido ao fluxo de água.

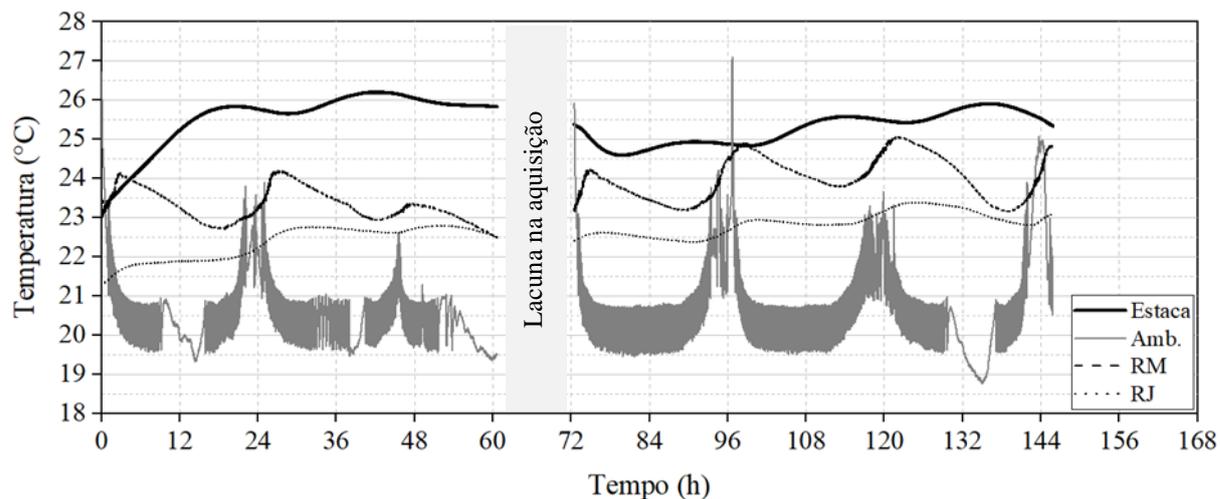


Fonte: Diao *et al.* (2004) e Autora.

6.5 Ensaio com fluxo – *EF15* ($v = 1,5$ m/dia)

Para este ensaio com fluxo, o gradiente foi ajustado e a velocidade foi aumentada para 1,5 m/dia. Entre 60 e 72 h de aquisição não houve disponibilidade de dados devido a um erro ocorrido no *software* do sistema de aquisição, como mostra a lacuna indicada na Figura 6.16.

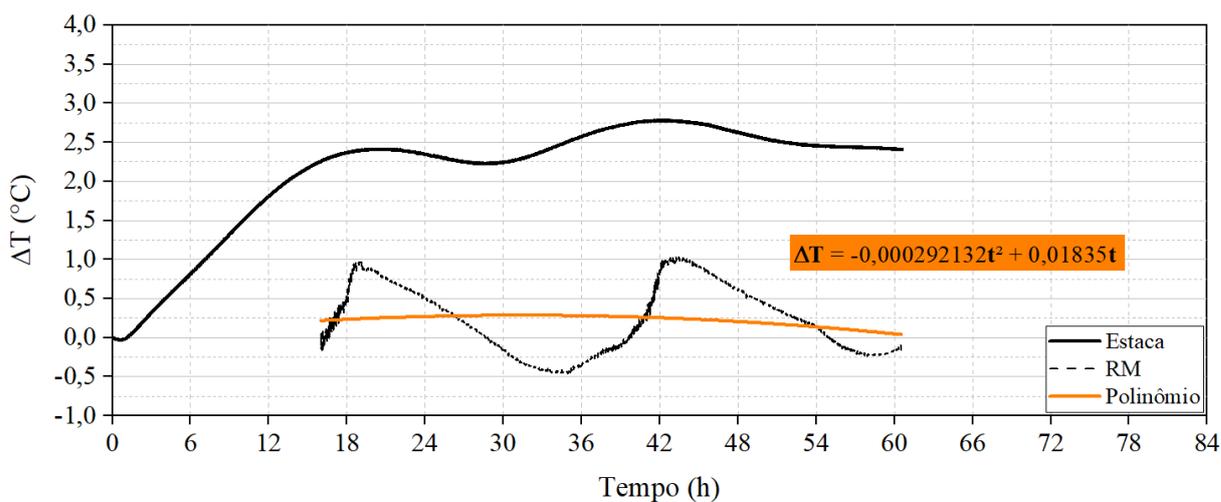
Figura 6.16: Temperatura da estaca, do ambiente e dos reservatórios durante o ensaio *EF15*.



Fonte: Autora.

A curva de variação de temperatura do reservatório de montante durante a fase de aquecimento foi ajustada de maneira análoga ao realizado no ensaio de fluxo *EF8*, como apresentado na Figura 6.17.

Figura 6.17: Ajuste da variação de temperatura do reservatório a montante no ensaio *EF15*.



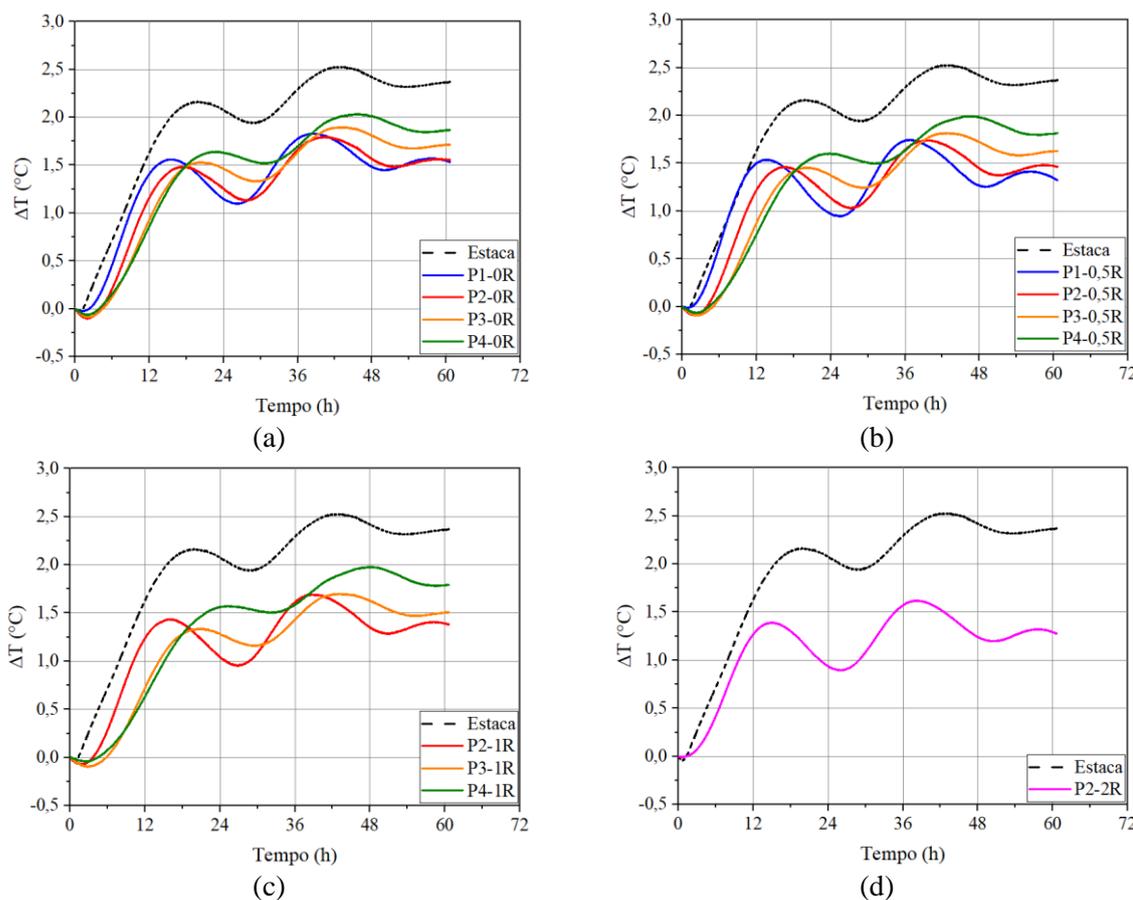
Fonte: Autora.

Na análise das respostas de temperatura obtidas no solo em cada distância radial (Figura 6.18), percebe-se uma apreciável influência das variações de temperatura do RM sobre os

resultados. O aumento de temperatura do RM é sentido primeiramente pelo solo a montante e posteriormente no solo a jusante. A partir de 36 h de aquecimento é possível notar uma melhor diferenciação entre a variação de temperatura no solo, com os sensores a jusante sofrendo os maiores acréscimos de temperatura em cada distância radial. Por outro lado, a temperatura dos sensores a montante e na posição P2 parecem convergir.

O efeito do aumento da temperatura água do RM nas temperaturas da estaca e do solo pode ser comparado ao efeito da pluma de calor vinda de uma estaca vizinha a montante trazendo calor na direção do fluxo. Pelos resultados, observa-se que um fluxo de água com temperatura maior ou menor do que a do solo, atravessando a estaca termoativa afeta consideravelmente a temperatura da estaca (aumentando ou diminuindo). Ou seja, a temperatura da água em movimento exerce importante influência na temperatura da estaca termoativa submetida a um fluxo de água subterrânea. Deste modo as plumas de calor oriundas de estacas vizinhas em terreno com elevada velocidade de fluxo irão aumentar a temperatura da estaca atingida durante o período de sua passagem.

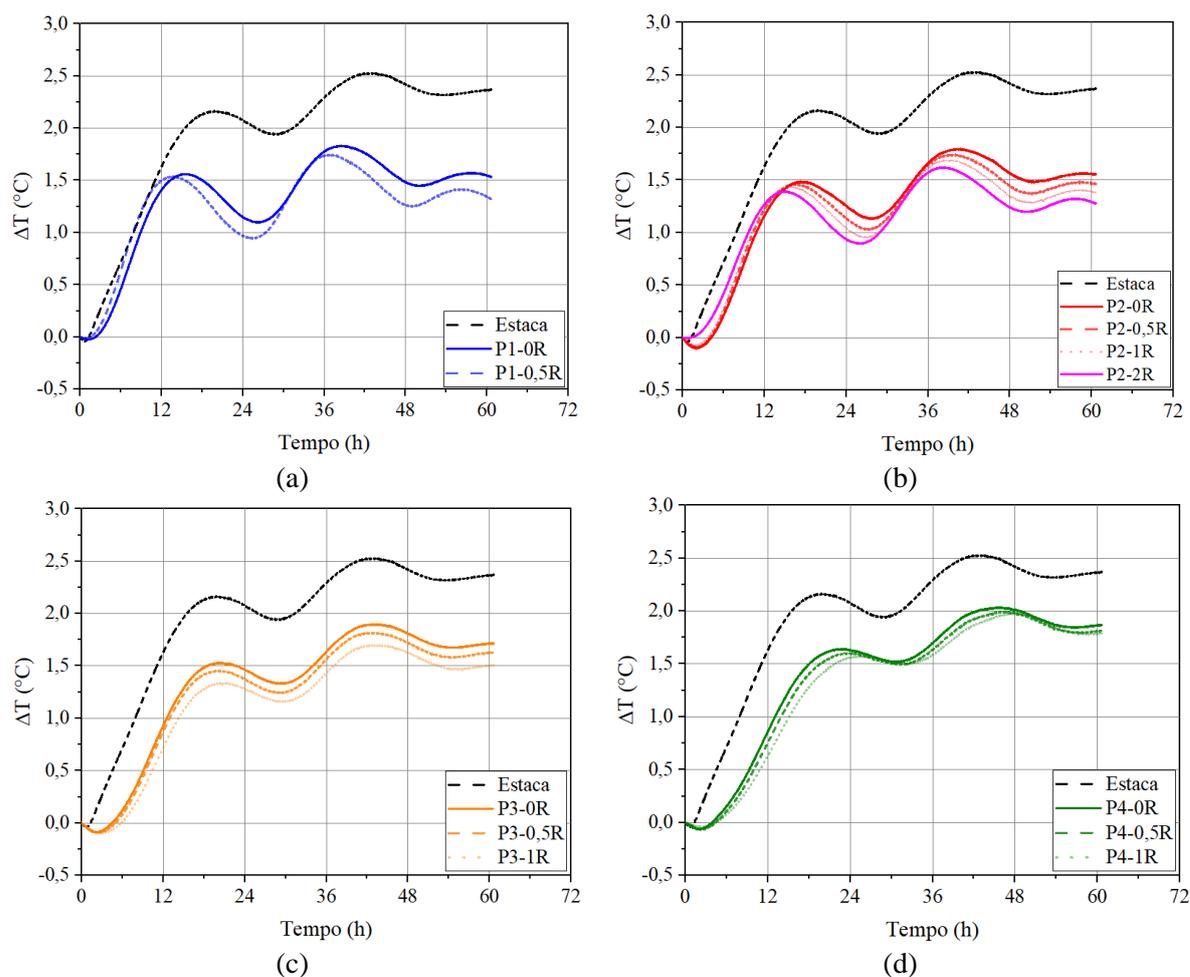
Figura 6.18: Variação de temperatura na estaca e no solo nas distâncias radiais (a) 0R, (b) 0,5R, (c) 1R e (d) 2R, durante o ensaio *EF15*.



Fonte: Autora.

Comparado as distribuições de temperatura obtidas em cada uma das posições P1, P2, P3 e P4 (Figura 6.19), percebe-se que variações de temperatura são semelhantes, o que pode estar associado à presença de uma velocidade de fluxo maior, onde o calor seria carregado com maior rapidez no interior do solo.

Figura 6.19: Variações de temperatura no solo e na estaca nas posições (a) P1, (b) P2 e (c) P3 e (d) P4, durante o ensaio *EF15*.



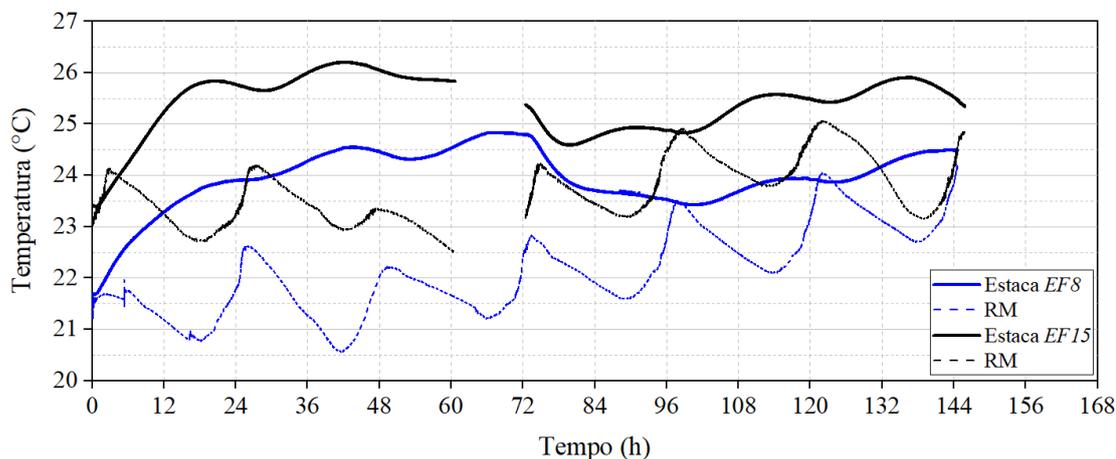
Fonte: Autora.

6.6 Comparação entre os ensaios com fluxo – *EF8* e *EF15*

No ensaio com maior velocidade de fluxo, a temperatura da estaca antes do início do aquecimento era $1,7^{\circ}\text{C}$ maior do que no ensaio com velocidade mais baixa, de acordo com os resultados apresentados na Figura 6.20. Apesar do objetivo de iniciar os ensaios na mesma temperatura, nos ensaios de fluxo isso se tornava ainda mais difícil de controlar, já que a temperatura do solo e da estaca eram fortemente afetadas pela temperatura da água do

reservatório, que por sua vez era afetada pelas condições climáticas externas ao container de ensaio.

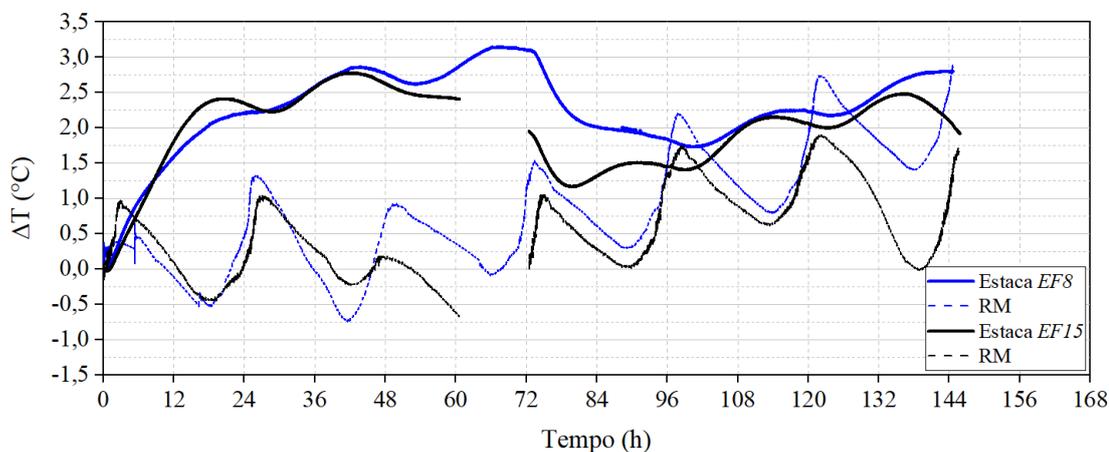
Figura 6.20: Temperatura da estaca e da água do reservatório a montante durante os ensaios de fluxo *EF8* e *EF15*.



Fonte: Autora.

Por outro lado, quando as temperaturas da estaca e do RM foram comparadas em termos de variação de temperatura (Figura 6.21), foram encontrados valores semelhantes em ambos os ensaios. Nas primeiras 20 h de aquecimento, a temperatura do RM no ensaio *EF8* foi mais estável que no *EF12*, atingindo variações de até 0,5°C contra 1°C no ensaio *EF12*. Assim, durante essa fase, as respostas obtidas no ensaio com menor velocidade se mostram mais confiáveis.

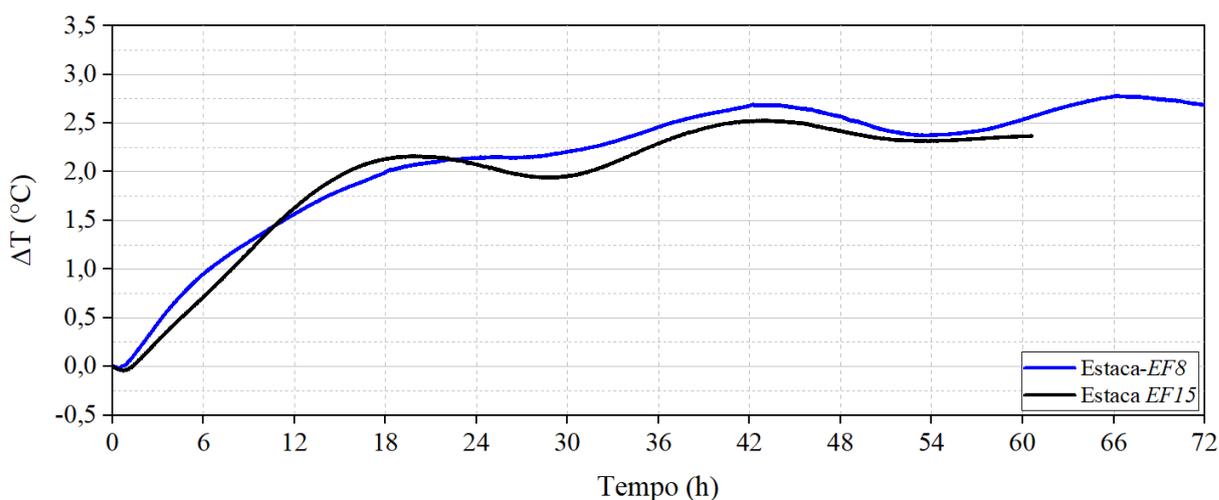
Figura 6.21: Variação de temperatura da estaca e da água do reservatório a montante durante os ensaios de fluxo *EF8* e *EF15*.



Fonte: Autora.

Com o ajuste polinomial nas curvas de RM, as variações de temperatura na estaca ainda são semelhantes, como mostra a Figura 6.22. Apesar da semelhança, a estaca inserida em meio com maior velocidade de fluxo apresentou uma variação de temperatura inferior ao meio com menor velocidade, como se poderia esperar.

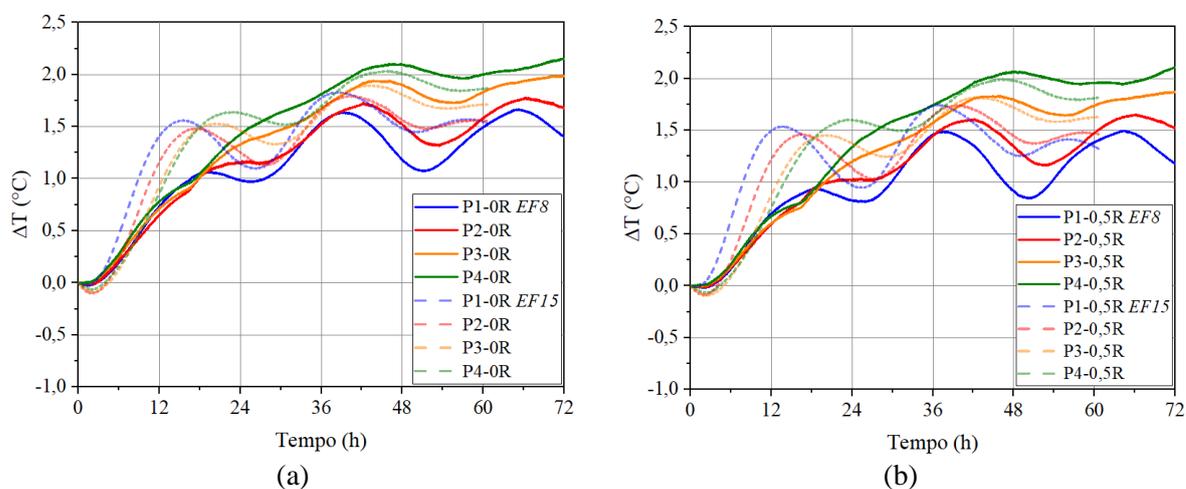
Figura 6.22: Variação de temperatura da estaca durante os ensaios de fluxo EF8 e EF15.

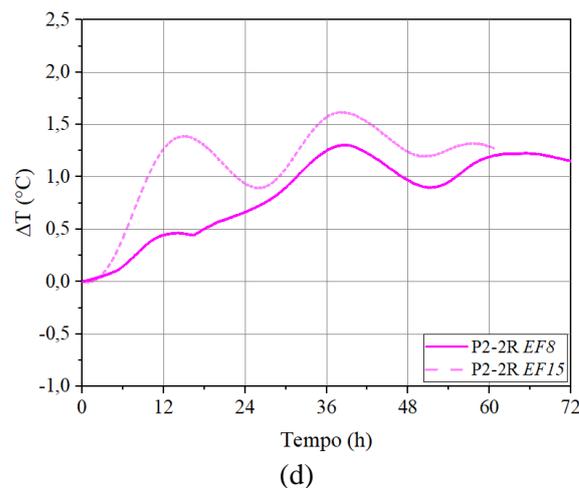
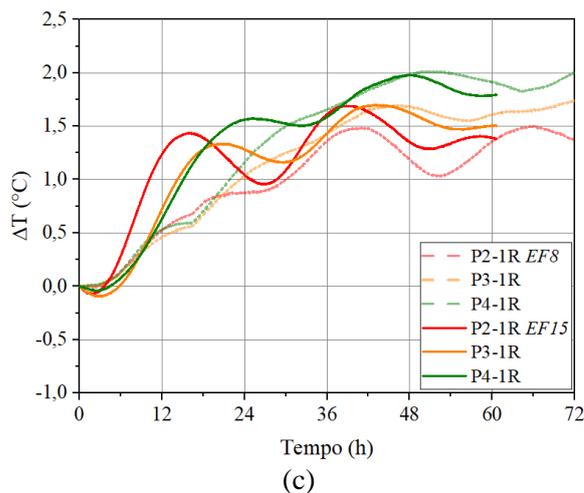


Fonte: Autora.

Quando se compara as variações de temperatura destes ensaios de fluxo (Figura 6.23) em cada posição radial, não é possível indentificar uma diferença clara entre eles, excepto pelo trecho inicial, onde o ensaio *EF15* é mais afetado pelo aumento da temperatura do reservatório.

Figura 6.23: Variação de temperatura no solo nos ensaios *EF8* e *EF15*.





Fonte: Autora.

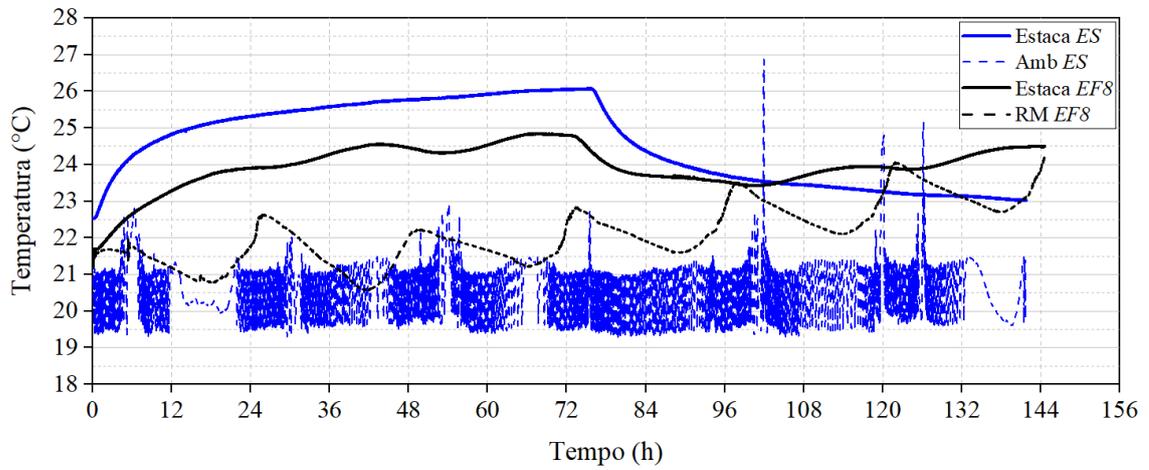
Assim, não é possível afirmar que houve diferença na transferência de calor da estaca e do solo com o aumento da velocidade de fluxo de água de 0,8 m/dia para 1,5 m/dia. A variação na temperatura de água dos reservatórios tornou essa avaliação complexa e uma investigação numérica pode ser útil para avaliar os resultados obtidos, como listado nas sugestões para trabalhos futuros apresentadas no Capítulo 7.

Desses ensaios, o *EF8* mostrou ser menos afetado pela variação da temperatura da água do reservatório a montante, principalmente nas primeiras 18 h de aquecimento. Este ensaio foi então escolhido para a análise da influência do fluxo no comportamento térmico da estaca e do solo em comparação com o ensaio em solo apenas saturado.

6.7 Comparação entre os ensaios saturado e com fluxo – *ES* e *EF8*

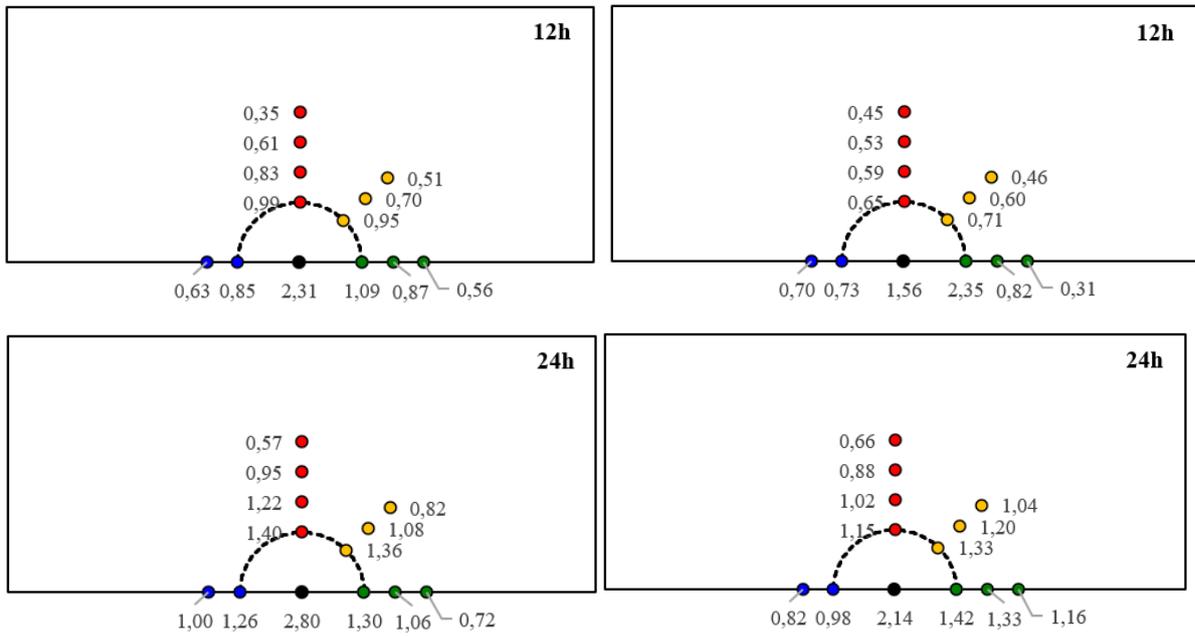
No ensaio com fluxo, a estaca esquenta menos, mas a temperatura do solo no entorno é maior. Além disso a distribuição de temperatura no solo em torno da estaca é assimétrica no caso com fluxo, apresentando maiores temperaturas a jusante (posição P4), como mostram os resultados apresentados nas Figuras Figura 6.24, Figura 6.25 e Figura 6.26.

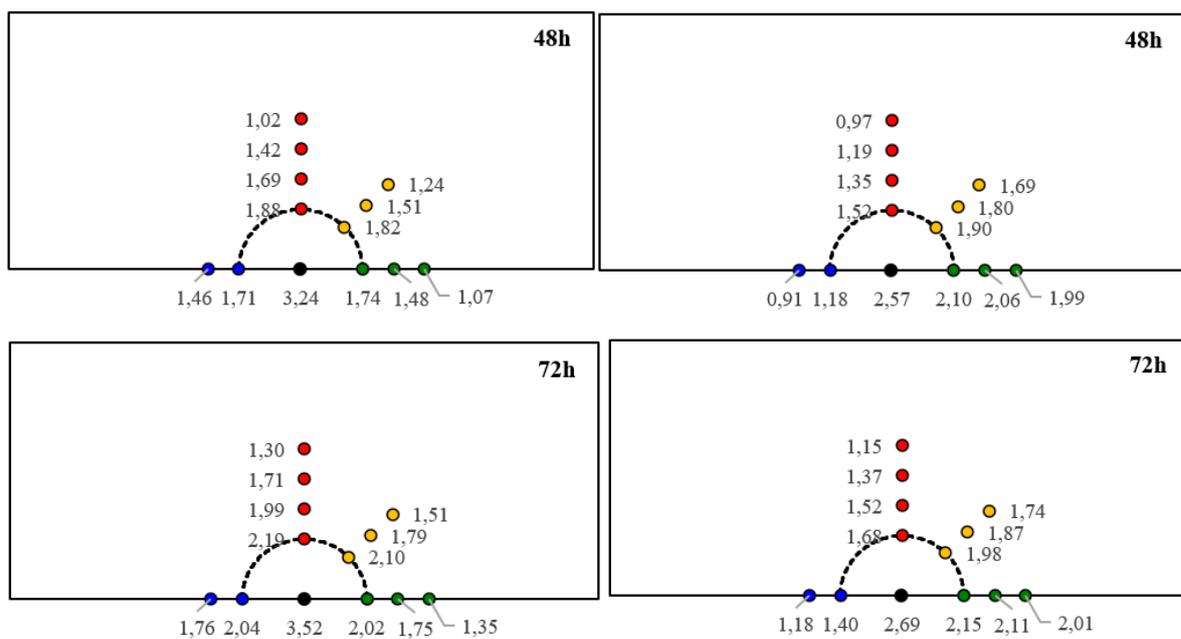
Figura 6.24: Temperatura da estaca e do ambiente no ensaio *ES* e temperatura da estaca e da água do reservatório de montante no ensaio *EF8*.



Fonte: Autora.

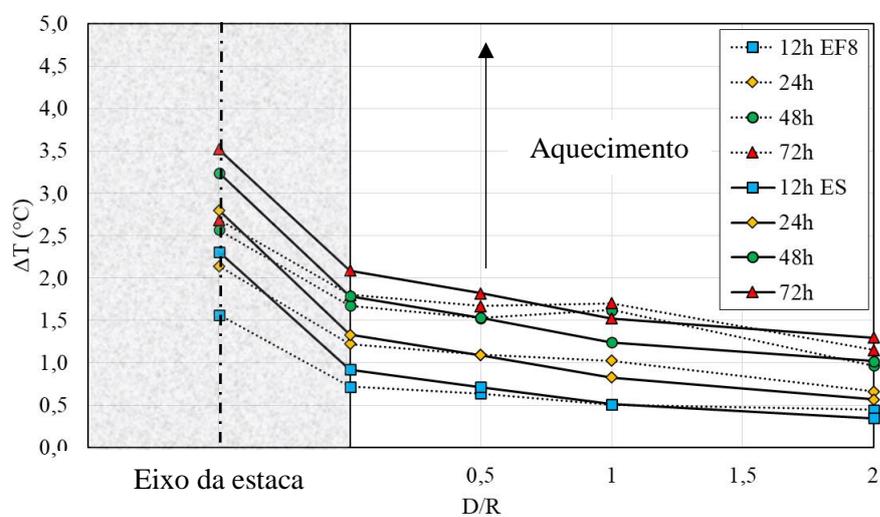
Figura 6.25: Variações de temperatura geradas no solo e na estaca durante a fase de aquecimento nos ensaios saturado (coluna esquerda) e com fluxo (coluna direita).





Fonte: Autora.

Figura 6.26: Variação da temperatura radial média em 12, 24, 48 e 72 h de aquecimento nos ensaios EF8 e ES.



Fonte: Autora.

7 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho são categorizadas de acordo com os três principais conjuntos de experimentos realizados, como descrito a seguir.

7.1 Ensaio TRT realizados nas estacas piloto

- O aumento na temperatura do fluido é maior para estacas equipadas com menor quantidade de tubo devido à maior resistência térmica do trocador de calor neste caso.
- A eficiência da troca de calor da estaca (ef_{furo}) só é afetada pela quantidade de tubo durante as primeiras horas de ensaio. Após um certo período, o efeito do volume de tubo dentro da estaca na sua eficiência térmica torna-se irrelevante devido à interferência térmica entre tubos durante a troca de calor.
- Os resultados das eficiências relativas da estaca e do tubo (ef_{furo} e ef_{tubo}) indicam que para as estacas investigadas as configurações menos densas (área de tubos/seção de estaca) parecem ser mais vantajosas.
- A resistência térmica da estaca diminui com o volume de tubo instalado na armação da estaca.
- A temperatura da estaca aumenta com o volume de tubos instalados em seu interior.
- A seção da estaca instalada na camada de argila orgânica apresentou temperaturas mais elevadas em relação ao restante da estaca, devido à baixa condutividade térmica do solo desta camada. Este efeito da condutividade térmica do solo também afeta as temperaturas das estacas próximas e o tempo de recuperação das estacas testadas.
- Esta conclusão acima mostra que os ensaios TRT em estacas instrumentadas com sensores de temperatura ao longo da profundidade podem ser úteis para avaliar a variação da condutividade térmica do solo das camadas do solo.

7.2 Ensaio de carregamento termomecânico

As medidas de recalques registradas pelos LVDTs durante o carregamento de serviço somado ao carregamento térmico na estaca (assim que se iniciou o carregamento térmico, durante aquecimento e durante resfriamento) mostram que apesar das diferenças nos diagramas de atrito mobilizados o comportamento carga-recalque da fundação não foi afetado após um único ciclo de carregamento térmico.

Os resultados também mostram que a mobilização de resistência por atrito lateral ao longo da profundidade da fundação por estaca é alterada pelo efeito das cargas térmicas na estrutura da estaca (expansão axial e radial), e esta alteração depende das camadas de solo (e suas características de resistência) no entorno da estaca.

7.3 Ensaio em modelo de seção de estaca trocadora de calor

O comportamento térmico de estaca trocadoras de calor depende de maneira importante do meio geológico em que estarão inseridas. Em meios com menor condutividade térmica, a exemplo do resultado em areia seca, a estaca apresenta aumento de temperatura mais significativo, e o calor tem maior dificuldade de ser transferido para o solo no entorno, ficando mais concentrado próximo à estaca. Por outro lado, em meios com maior condutividade térmica, como no ensaio com areia saturada, o aumento de temperatura da estaca é menor, assim como é menor a diferença de temperatura entre a estaca e o solo ao redor, indicando uma maior homogeneidade nas distribuições de temperatura entre a estaca e o solo. Nos ensaios sem fluxo de água, a variação de temperatura em cada uma das distâncias radiais é similar (distribuição simétrica em relação a fonte de calor), e não há uma diferença importante entre a porção de solo alinhada aos tubos trocadores de calor das demais.

Nos ensaios com fluxo de água, o calor é carregado na direção do fluxo, e os sensores posicionados mais a jusante experimentam os maiores acréscimos de temperatura durante a fase de aquecimento da estaca, enquanto os a montante os menores. Como explicitado durante a apresentação dos resultados, os experimentos com fluxo foram fortemente influenciados pelas variações de temperatura do reservatório a montante, dificultando a avaliação das respostas de temperatura. No entanto, esse efeito da temperatura do reservatório a montante pode ser interpretado como o movimento de pluma de calor vinda de estaca termotativa vizinha a montante em terreno com fluxo de água subterrânea, que causaria o aumento da temperatura da estaca atravessada pela pluma.

7.4 Sugestões para pesquisas futuras

- Modelagem numérica dos resultados experimentais desta pesquisa para calibrar modelo para extrapolação e simulação de comportamento térmico ao longo de anos de uso do sistema trocador de calor por estacas neste local estudado.

- Simulação numérica dos resultados de TRT considerando o efeito da velocidade de fluxo na camada de areia que envolve as estacas estudadas.
- Realização de ensaios de performance térmica (TPT) para entender a capacidade de troca térmica da estaca durante o uso da bomba de calor.
- Realização de ensaios termomecânicos com maior número de ciclos de carregamento e descarregamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, S. L.; OLGUN, C. G.; MARTIN, J. R. Design and Operational Considerations of Geothermal Energy Piles. In: *Geo-frontiers 2011: Advances in geotechnical engineering*. 2011. p. 450-459.

ABUEL-NAGA, H. et al. Energy piles: current state of knowledge and design challenges. **Environmental Geotechnics**, v. 2, p. 195–210, 2014.

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. 207-2020, 2016.

AMATYA, B. L. et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles. **Géotechnique**, v. 62, p. 503–519, 2012.

American Society for Testing and Materials. **ASTM-D5334**. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. 2005.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). **Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications**. Atlanta, EUA, 2011.

ANGELOTTI, A.; LY, F.; ZILLE, A. On the applicability of the moving line source theory to thermal response test under groundwater flow: considerations from real case studies. **Geothermal Energy**, v. 6, n. 12, p. 1-17, jul. 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16903**: Solo — Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15495-1**: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados - Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AUSTIN, W. A.; YAVUZTURK, C.; SPITLER, J.D. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. **ASHRAE Transactions**. p. 356–379, 2000.

BANDEIRA NETO, L. A. **Estudo experimental da resposta térmica de fundações por estacas trocadoras de calor em solo não saturado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

BANKS, D. **An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling**. 1. ed. Blackwell Publishing, 2008.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2018** - Relatório Final. 2018.

BERNIER, M. A. Ground-Coupled Heat Pump System Simulation. **ASHRAE Transactions**. v. 107, p. 605–616, 2001.

BOURNE-WEBB, P. J.; AMATYA, B.; SOGA, K. A framework for understanding energy pile behaviour. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, v. 166, p. 170–177, 2012.

BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. **Géotechnique**, v. 56, n. 2, p. 81–122, 2006.

BRANDL, H. Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 9 – 18, 2013.

BOËNNEC, O. Piling on the Energy. **Geodrilling International**, 150, p. 25–28, 2009.

BURLON, S. et al. Towards a design approach of bearing capacity of thermo-active piles. *In: European Geothermal Congress*, 2013, Pisa. p. 1-6.

CAROTENUTO, A. et al. Energy piles for ground source heat pump applications: Comparison of heat transfer performance for different design and operating parameters. **Applied Thermal Engineering**, v. 124, p. 1492–1504, 2017.

CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C. **Heat conduction in solids**. Oxford: Clarendon Press; 1947.

CEN/TC 341 N 525. Geotechnical investigation and testing - Geothermal testing - Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger, 2011.

CHIASSON, A.; REES, S.; SPITLER, J. A. preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems. **ASHRAE Transactions**, v. 106, p. 380–393, 2000.

Centro de Inovação em Construção Sustentável - CICS. Disponível em: <https://cics.prp.usp.br/>. Acesso em agosto de 2021.

CINTRA, J. C. A., et al. **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

CLAESSON, J.; HELLSTRÖM, G. Analytical studies of the influence of regional groundwater flow on the performance of borehole heat exchangers. **Proc. of the 8th International Conference on Thermal energy storage**, Terrastock, v. 28, p. 0–7, 2000.

CONSULTRIX. Projeto de fundações do CICS. 2019.

CUI, P.; LI, X.; MAN, Y.; FANG, Z. Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils. **Applied Energy** 88 (11) (2011) 4113-4119.

DELERABLÉE, Y. **Intégration thermique et mécanique des géostructures thermiques: de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la cité**. 2019. Tese de doutorado. Université Paris-Est. 313p.

DIAO, N.; LI, Q.; FANG, Z. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 43, n. 12, p. 1203–1211, 2004.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. New York, Wiley & Sons, 1990.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. New York, Wiley & Sons, 1998.

ENGESOLOS. Resultados de ensaios. 2019.

EPE. **Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Nota Técnica EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2018.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. Waveland Press, 2018.

FINKE, K. A.; MAYNE, P. W.; KLOPP, R. A. Piezocone Penetration Testing in Atlantic Piedmont Residuum. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, p. 48-54, 2001.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. 1979.

FROMENTIN, A. et al. Pieux échangeurs: conception et règles de pré-dimensionnement. **Revue Française de Génie Civil**, v. 3, n. 6, p. 387–421, 1999.

FROMENTIN, A.; PAHUD, D. Recommandation pour la réalisation d'installation pieux échangeurs. n. 120, 1997.

GEHLIN, S. E. A.; HELLSTROM, G. Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation. **ASHRAE Transactions**. p. 135–146, 2003.

GEHLIN, S. **Thermal Response Test - Method Development and Evaluation**. 2002. Luleå University of Technology. Sweden, 142p.

GEHLIN, S. **Thermal response test: in situ measurements of thermal properties in hard rock**. 1998. Licenciante Thesis. Luleå University of Technology.

Geo-Heat Center. Geo-heat Center Quarterly Bulletin. Encyclopedia of Earth Sciences Series, p. 411–414, 2001.

GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R.; RIYIS, M. T. **Investigação Geoambiental**. Geotecnia Ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**. v. 21, p. 7–20, 2007.

GOOGLE EARTH. Acesso em Agosto de 2021.

HEATH, R. C. **Basic ground-water hydrology: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220**, 86 p, 2004.

HU, P. et al. A composite cylindrical model and its application in analysis of thermal response and performance for energy pile. **Energy and buildings**, v. 84, p. 324-332, 2014.

HVORSLEV, M. J. **Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations**. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951.

IEA, International Energy Agency. **The Future of Cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning**. Report. 2018.

INCOTEP. Disponível em: <https://incotep.com.br/en/>. Acesso em agosto de 2021.

INCROPERA, F. P., et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INFRAROI. Disponível em: <http://infraroi.com.br/intercement-e-usp-testam-na-pratica-novo-concreto-que-reduz-consumo-de-agua-em-52/>. Acesso em agosto de 2021.

INGERSOLL, L.R., ZOBEL, O. J., INGERSOLL, A.C. **Heat Conduction with Engineering and Geological Applications**, 2. ed. New York, NJ: McGraw-Hill.Press, 1954.

IRITANI, M. A. **Potencial Hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo**. 1993. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 1993.

KELVIN, SIR W. T. **Mathematical and Physical Papers**, Vol. 1, Cambridge, UK: Cambridge University, 1882.

KNELLWOLF, C.; PERON, H.; LALOU, L. Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 10, p. 890–902, 2011.

KRAM, M. L. et al. **Detailed hydraulic assessment using a high-resolution piezocone coupled to the GeoVIS**. Technical Report TR2291-ENV. NAVFAC: Port Hueneme, 2008. 70 p.

LALOU, L.; MORENI, M.; VULLIET, L. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, n. 2, p. 388–402, 2003.

LHENDUP, T.; AYE, L.; FULLER, R. J. In-situ measurement of borehole thermal properties in Melbourne. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, n. 1, p. 287–295, 2014.

LOPES, H. L. **Sistemas geotérmicos de baixa entalpia - estudos de caracterização térmica**. 2014. Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 140p.

LOPES, F. R. **Percolação nos solos** (Notas de aula). 2007.

LOVERIDGE, F. **The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems**. 2012. Tese (Doutorado). University of Southampton, 2012.

LOVERIDGE, F., POWRIE, W. Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. **Energy**, v. 57, p. 554-564, 2013.

LOVERIDGE, F.; POWRIE, W. Pile heat exchangers: thermal behaviour and interactions. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, v. 166, n. 2, p. 178–196, 2012.

LOW, J. E.; LOVERIDGE, F. A.; POWRIE, W.; NICHOLSON, D. A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. **Acta Geotechnica**. v. 10, p. 209-218, 2015.

LUND, J., et al. Geothermal (ground-source) heat pumps: a world overview. **Geo-Heat Center Quarterly Bulletin**, 2004, 25.3.

LUO, J. et al. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 160–175, 2016.

MAN, Y. et al. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 13–14, p. 2593–2601, 2010.

MARAGNA, C., LOVERIDGE, F. A New Approach for Characterizing Pile Heat Exchangers Using Thermal Response Tests. **Energies** 14 (12) (2021) 3375.

LALOUI, L.; ROTTA LORIA, A. F. **Analysis and Design of Energy Geostructures: Theoretical Essentials and Practical Application**. Academic Press, 2020.

MEHRIZI, A. A. et al. Energy pile foundation simulation for different configurations of ground source heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 70, p. 105–114, 2016.

MELO, E. O. D. E. **Análise do comportamento de estacas pré-moldada e mista, instrumentadas, em solo sedimentar da região do Recife/PE**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

MICHELS-BRITO, A. et al. The climate change potential effects on the run-of-river plant and the environmental and economic dimensions of sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 147, 2021.

MIMOUNI, T.; LALOUI, L. Behaviour of a group of energy piles. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 12, p. 1913–1929, 2015.

MIYARA, A. et al. Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. **Renewable Energy** v. 36, p. 764-771, 2011.

MONZÓ, P. **Comparison of different Line Source Model approaches for analysis of thermal response Test in a U-pipe Borehole Heat Exchanger**. 2011. Dissertação (Mestrado) - KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration, Estocolmo, 2011.

MORADSHAHI, A. et al. Cross-sectional thermo-mechanical responses of energy piles. **Computers and Geotechnics**, v. 138, 2021.

MORAIS, T. S. O. **Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical**. 2019. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MORAIS, T. S. O.; TSUHA, C. H. C.; SINGH, R. M. Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. **Energy & Buildings**, v. 216, 2020.

MURARI, M. C. F. **Estudo do comportamento de fundações por estacas tubulares metálicas utilizadas em sistemas geotérmicos superficiais**. 2022. Tese (Doutorado em

Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

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**, v. 8, n. 2, p. 59–73, 2014.

OLIVEIRA, C. C., RUPP, R. F., GHISI, E. Influence of environmental variables on thermal comfort and air quality perception in office buildings in the humid subtropical climate zone of Brazil. **Energy and Buildings**, v. 243, 2021.

PAREZ, L.; FAURIEL, R. Le piézocône - améliorations apportées à la reconnaissance des sols. **Revue Française de Géotechnique**, v. 44, p. 13–27, 1988.

PARK, C. et al. Chauchois, H. Choi. Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. **Applied thermal engineering**, v. 90, p. 1061-1071, 2015.

PARK, S. et al. Effect of thermal interference on energy piles considering various configurations of heat exchangers. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 381-401, 2019.

PEDE, M. A. Z. **Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo**. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, 2004.

PESSIN, J., et al. Avaliação Experimental do Fluxo de Água Subterrânea para Projetos de Sistemas Geotérmicos por Estacas Trocadoras de Calor. *In: Cobramseg 2022*.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PNE 2050 – **Plano Nacional de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2020.

RAYMOND, J. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. **Ground Water**. v. 49, p. 932–945, 2011.

RAYMOND, J. et al. A Novel Thermal Response Test Using Heating Cables. **Proceedings World Geothermal Congress**. p 1-8, 2010.

REES, S. W. et al. Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 4, p. 213–265, 2000.

RIYIS, M. T. et al. A importância da amostragem de solo de perfil completo (ASPC) para a investigação de alta resolução em áreas contaminadas. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 4, 2019.

ROHRICH, THOMAS & Waterloo Hydrogeologic, Incorporated. **Aquifertest Pro User's Manual: Graphical Analysis and Reporting of Pumping & Slug Test Data**. 270 p, 2002.

ROULEAU, J.; GOSSELIN, L.; RAYMOND, J. New concept of combined hydro-thermal response tests (H/TRTS) for ground heat exchangers. **Geothermics**, v. 62, p. 103–114, 2016.

RUSSO NETO, L. **Interpretação de deformação e recalque na fase fundação em estaca cravada**. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANI, A. K. et al. Pipe–pipe thermal interaction in a geothermal energy pile. **Geothermics**, v. 81, p. 209–223, 2019.

SANTOS, M. J. A. P. DOS. **Interação solo x estrutura: análise de um caso de obra com acompanhamento dos recalques desde o início da construção**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SIGNORELLI, S. et al. Numerical evaluation of thermal response tests. **Geothermics**, v. 36, p. 141–166, 2007.

SILVA, D. M. **Estudo em câmara de calibração do comportamento de fundações por estacas helicoidais em areia muito compacta**. 2020. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2020.

SILVA, D. M.; TSUHA, C. H. C. Experimental investigation on the installation and loading performance of model-scale deep helical piles in very dense sand. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 8, n. 9, 2021.

SIVAK, M. Potential energy demand for cooling in the 50 largest metropolitan areas of the world: Implications for developing countries. **Energy Policy**, v. 37, p. 1382–1384, 2008.

SMITH, M., PERRY, R. In situ testing and thermal conductivity testing. *In: Proceedings of the GeoExchange Technical Conference and Expo*, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA, p. 158–173, 1999.

SYNTEC. Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. **Revue Française de Géotechnique**, n. 149, 2017.

TAKEASHI, M. Acervo pessoal. 2019, 2020.

TAKEYA, T. **Análise experimental de estruturas (Notas de aula)**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas. 50 p, 2001.

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 Low-Carbon Technologies**, v. 9, p. 284–295, 2012.

VILELA, M. M. **Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica à baixa profundidade**. 2004. Tese (Doutorado), Programa interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 278 p, 2004.

WAGNER, V. et al. Geothermics Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers. **Geothermics**, v. 46, p. 22–31, 2012.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 15–25, 2005.

WILLIAMS, G.P.; GOLD, L.W. **CBD-180. Ground Temperatures**. Institute for Research in Construction- National Research Council Canada. 1976.

WU, D., LIU, H., KONG, G., ROTTA LORIA, A.F. Thermo-mechanical behavior of a full-scale energy pile equipped with a spiral pipe configuration. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 58, 2021.

YOU, S.; CHENG, X.; YU, C.; DANG, Z. Effects of groundwater flow on the heat transfer performance of energy piles: Experimental and numerical analysis. **Energy and Buildings**, v. 155, p. 249–259, 2017.

YUN, T. S.; SANTAMARINA, J. C. Fundamental study of thermal conduction in dry soils. **Granular Matter**, v. 10, n. 3, p. 197–207, 2008.

ZARRELLA, A. *et al.* Thermal response testing results of different types of borehole heat exchangers: an analysis and comparison of interpretation methods. **Energies**, v. 10, p.1-18, 2017.

ZARRELLA, A.; CARLI, M. DE; GALGARO, A. Thermal performance of two types of energy foundation pile: Helical pipe and triple U-tube. **Applied Thermal Engineering**, v. 61, p. 301–310, 2013.

ZENG, H. Y.; DIAO, N. R.; FANG, Z. H. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 31, p. 558–567, 2002.

ZHANG, C. et al. A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 851–867, 2014.

ZHANG, W.; YANG, H.; LU, L.; FANG, Z. The analysis on solid cylindrical heat source model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow. **Energy**, v. 55, p. 417–425, 2013.

APÊNDICE A - Procedimento utilizado para a instrumentação de segmentos de barra de aço CA-50 de 1/2”

Etapa 1 – Preparação da superfície das barras

1. Lixação da superfície: após a remoção das nervuras das barras de aço, foi feita a preparação da superfície de modo a permitir a colagem eficiente dos extensômetros. A remoção das nervuras das barras foi feita por meio de torno mecânico, que deixa ranhuras em sentido preferencial. Para a colagem dos extensômetros a superfície deve estar uniforme. Para isso, as barras foram lixadas inicialmente com lixas tipo roseta n° 60 e depois n° 120, acopladas em furadeira. O acabamento foi feito com lixa do tipo folha n° 120, fazendo movimentos circulares.



2. Limpeza da superfície: a limpeza foi feita com gaze e álcool isopropílico até que a gaze saísse limpa. O trabalho foi finalizado passando a gaze na barra em um sentido. Deve-se ter cuidado para não arrastar sujeira do trecho de barra com nervura para a seção a ser instrumentada.



3. Marcação na barra: foi realizada de modo a orientar a colagem dos extensômetros e terminais. Para isso foi utilizado um pincel retroprojektor.

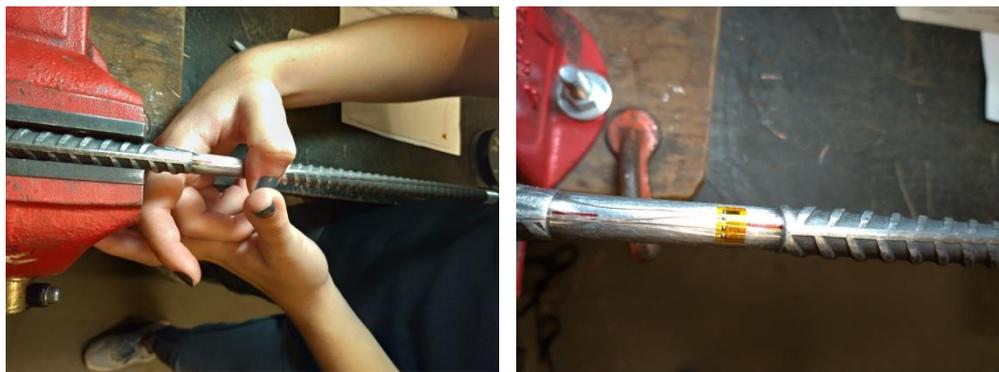


Etapa 2 – Colagem dos extensômetros e terminais e soldagem dos cabos

4. Checagem da resistência elétrica dos extensômetros escolhidos: antes da colagem dos extensômetros, deve-se verificar se sua resistência elétrica está compatível com a especificada pelo fabricante, procedimento feito com um multímetro.

5. Colagem dos extensômetros na barra: inicialmente o extensômetro foi posicionado sobre uma superfície limpa e sobre ele colada um pedaço de fita adesiva tipo durex. Em seguida, o conjunto fita adesiva + extensômetro foi colado na barra, considerando as marcas feitas na barra e as marcas de alinhamento que o extensômetro possui. Teve-se o cuidado de não colar o extensômetro sobre a marca feita com o pincel retroprojeter. Deixando colado apenas um dos extremos da fita na barra, o extensômetro foi levado e por baixo dele depositou-se cola à base de cianoacrilato (super bonder). Em seguida, pressionando o extensômetro contra a barra, segurou-se com o polegar cerca de 1 minuto, sem mover ou levantar o dedo. Após a remoção da fita, verificou-se se o extensômetro ficou aderido à barra.





6. Colagem dos terminais: a colagem dos terminais foi realizada como descrito no item 5.



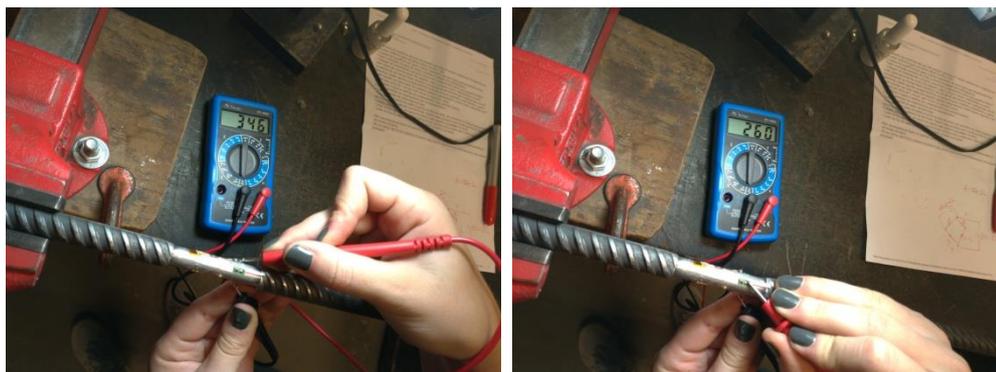
7. Deposição dos pontos de solda nos terminais: com o ferro de solda bem quente, e encostando-o nas adjacências do terminal, encostou-se estanho na ponta do ferro e então uma gota de estanho ficou aderida ao terminal. Teve-se o cuidado para que o estanho não fosse depositado fora do terminal, o que poderia provocar curto-circuito.



8. Soldagem dos rabichos dos extensômetros nos terminais: para a formação do circuito em ponte completa de Weatstone, os rabichos dos extensômetros devem ser apropriadamente soldados nos terminais. Antes disso, a ponta dos rabichos foi banhada com estanho, de modo a

permitir uma soldagem eficiente. Por fim, a ponta dos rabichos foi soldada nos terminais, aquecendo o ponto de solda já depositado no terminal com o ferro de solda e encostando o rabicho.

9. Verificação da resistência do circuito: foi realizada a verificação da resistência elétrica do circuito de modo a checar seu funcionamento.



10. Soldagem dos fios do cabo nos terminais: a escolha dos cabos utilizados para esta instrumentação levou em conta o ambiente agressivo a que as barras estarão submetidas em campo, onde serão instaladas junto à gaiola de armadura e posteriormente sofrerão o arraste do concreto durante concretagem das estacas hélice contínua. Assim, optou-se por utilizar um cabo do tipo PP 4 x 0,5 mm², pois possui uma proteção bastante robusta.

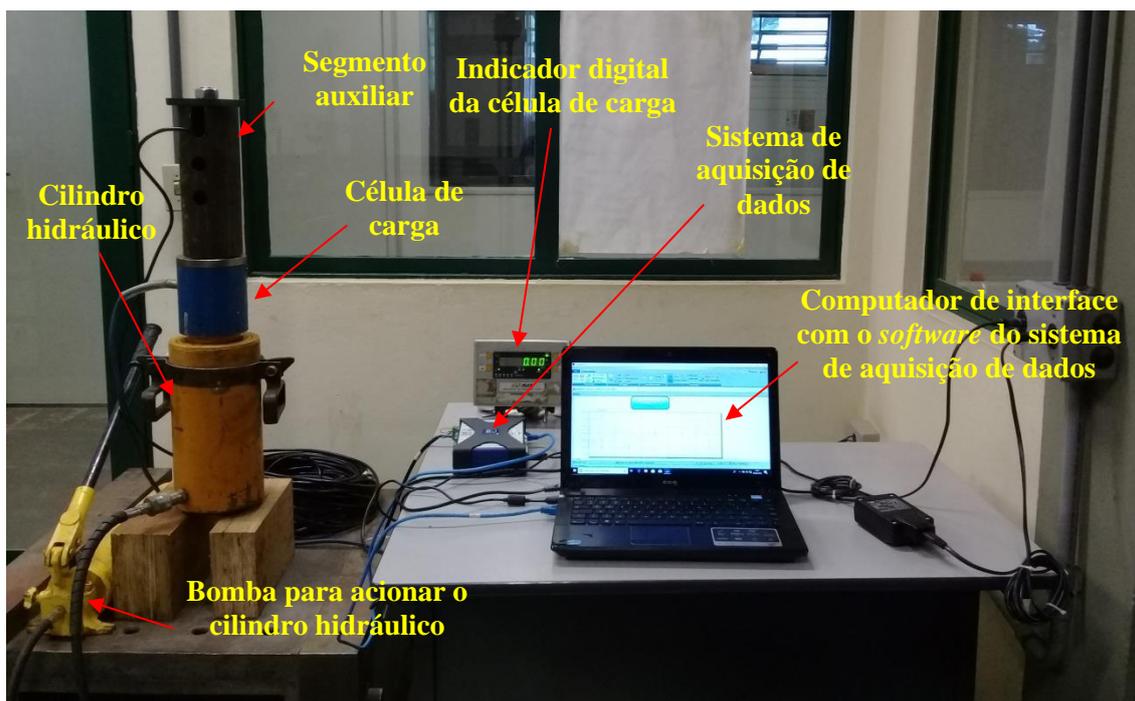


Antes da soldagem dos cabos nos terminais, um trecho de proteção do cabo foi removido e o cabo foi fixado na barra com o auxílio de fita isolante. Com as pontas dos fios desencapados, e esquentando-as com o ferro de solda, depositou-se estanho nas mesmas. Em seguida, aquecendo o ponto de solda dos terminais, soldou-se os fios do cabo nos terminais.

11. Deposição de resina de silicone na instrumentação: a fim de proteger a instrumentação contra danos e intempéries, passou-se uma camada de resina de silicone especialmente utilizada para extensômetros.

Etapa 3 – Calibração das barras instrumentadas

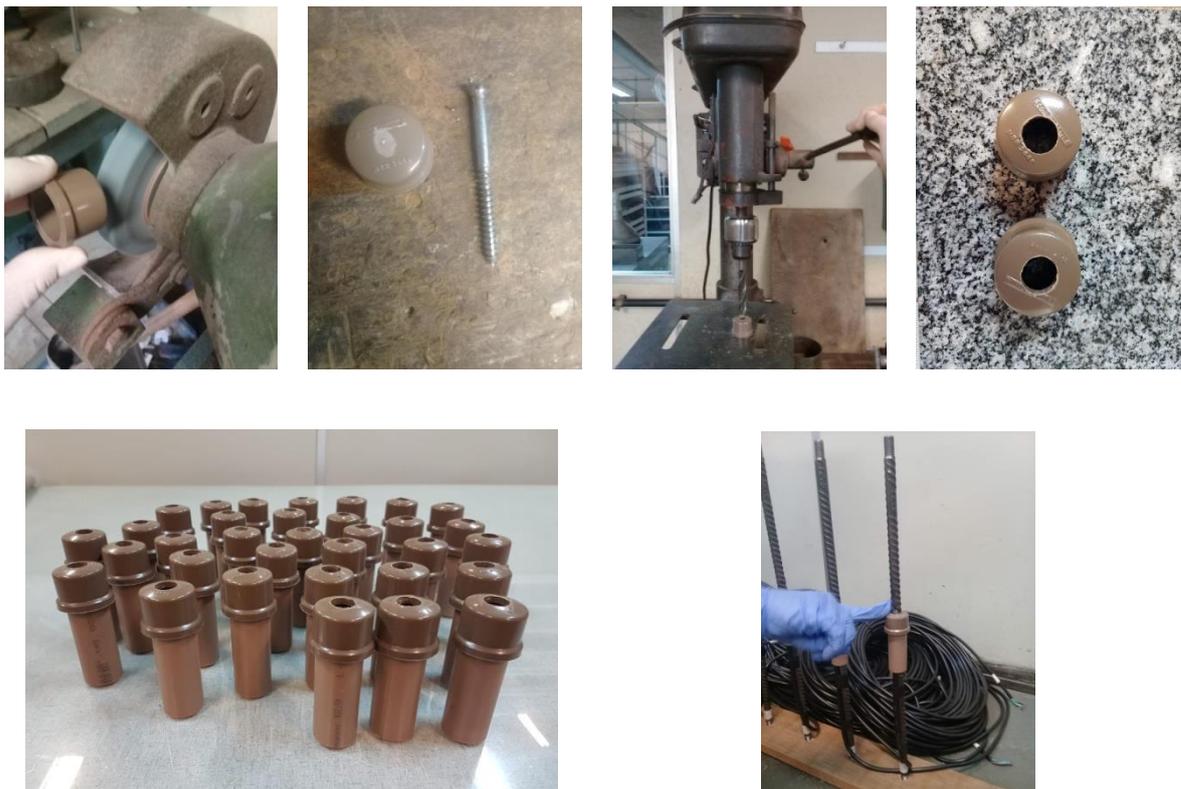
12. Calibração das barras: a calibração das barras foi realizada para verificar o seu funcionamento e assim averiguar se a instrumentação foi executada de maneira satisfatória. As barras foram calibradas à tração por meio de um aparato projetado para esse fim, que consistiu dos seguintes elementos: um macaco hidráulico, uma célula de carga e um segmento auxiliar, adaptação necessária para que a barra ficasse bem ajustada ao aparato. A barra instrumentada não está visível na foto abaixo pois se encontra no interior do cilindro hidráulico, da célula e do segmento auxiliar, sendo possível ver somente o cabo que sai dela, na parte superior do segmento auxiliar. A barra foi travada em suas extremidades e, assim, ao acionar o cilindro hidráulico, se desenvolveram esforços de tração, cuja magnitude foi visualizada no indicador digital da célula de carga. O sistema de aquisição de dados permitiu a leitura da resposta elétrica da montagem em ponte completa dos extensômetros elétricos. Por fim, de posse dos dados de carga aplicada e resposta elétrica, foi possível verificar o funcionamento das barras.



Etapa 4 – Proteção mecânica da instrumentação

Considerando que as barras instrumentadas sofrerão esforços durante sua inserção no concreto, foram confeccionados moldes de PVC de modo a protegerem o trecho instrumentado das barras. A proteção mecânica foi feita com o auxílio de caps de PVC e segmentos de tubo PVC. Após o encaixe do conjunto CAP + tubo, foi depositada resina epóxi no espaço entre a barra instrumentada e o tubo de PVC.

13. Preparação dos caps e dos tubos de PVC: Os caps foram furados de modo a permitir a passagem da barra instrumentada. A base dos caps vem com uma protuberância que foi esmerilhada para que não prejudicasse a furação. Em seguida, foi feito um pequeno furo com o auxílio de um parafuso para orientar a furação, e, por fim, foi feita a furação com furadeira, para que a barra passasse bem justa no furo. Posteriormente foram cortados segmentos de tubo PVC de aproximadamente 8 cm, de modo a permitir a proteção da instrumentação e de um trecho de cabo. Em seguida, uniu-se o cap e o segmento de tubo PVC, que foram então acoplados à barra instrumentada. Em seguida, passou-se um pouco de silicone na base do cap junto à barra a fim de vedar qualquer abertura presente.

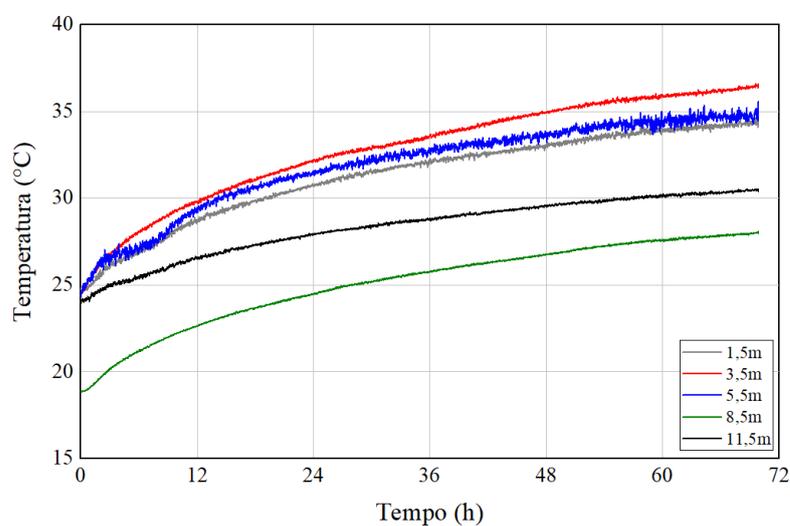
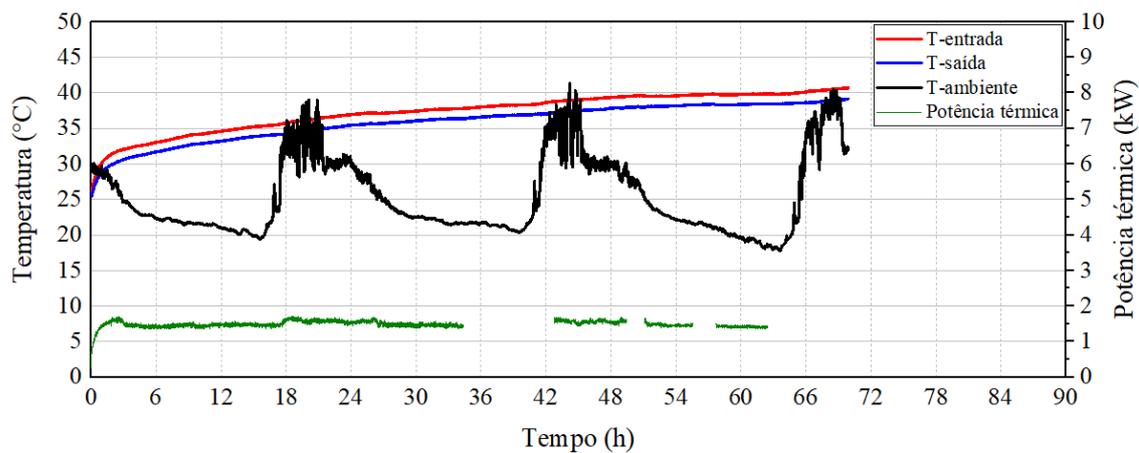


14. Deposição da resina no espaço entre o tubo de PVC e a barra: a resina utilizada é uma resina epóxi líquida para isolamento elétrico, da marca 3M™, do tipo Scotchcast™ 4. Ela é composta de duas partes que devem ser apropriadamente misturadas de modo a formar uma mistura uniforme. Após a mistura, a resina começa a aquecer e a deposição no espaço entre o tubo e a barra foi realizada rapidamente, evitando um endurecimento precoce.

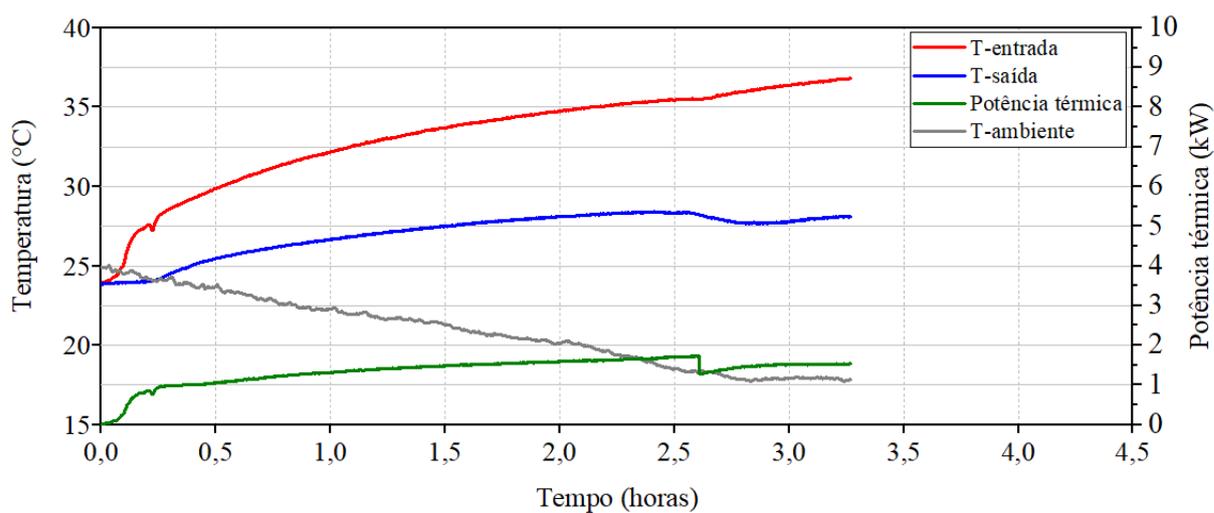


APÊNDICE B - Ensaios de troca térmica (TRTs): *S300 preliminar* e *S450*

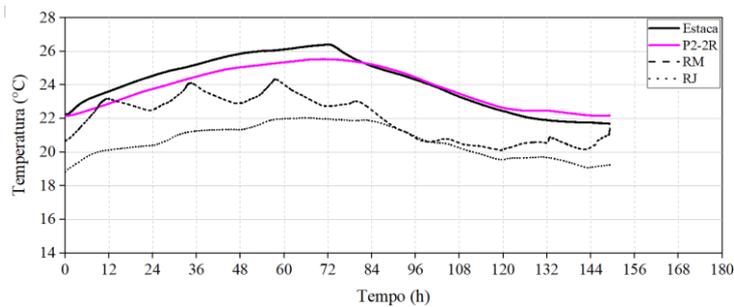
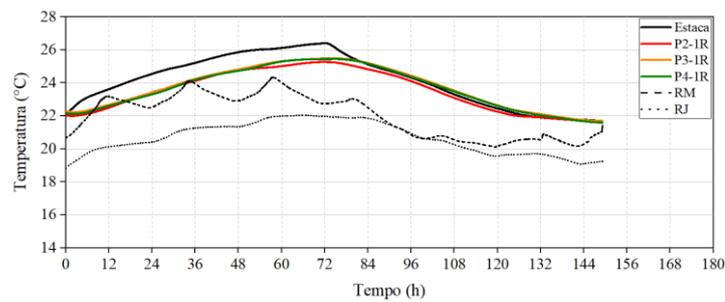
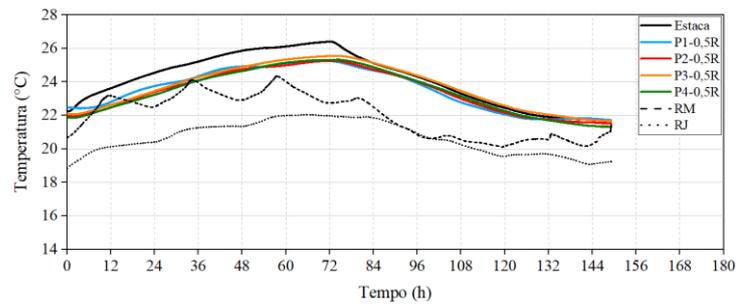
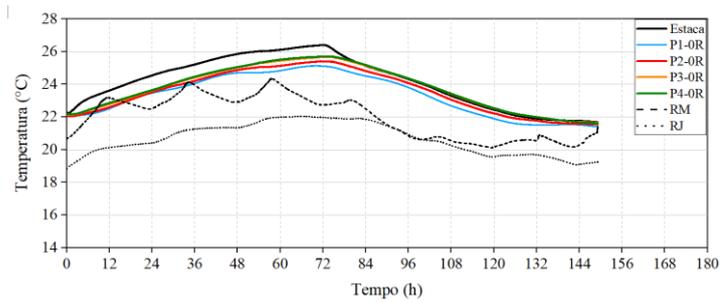
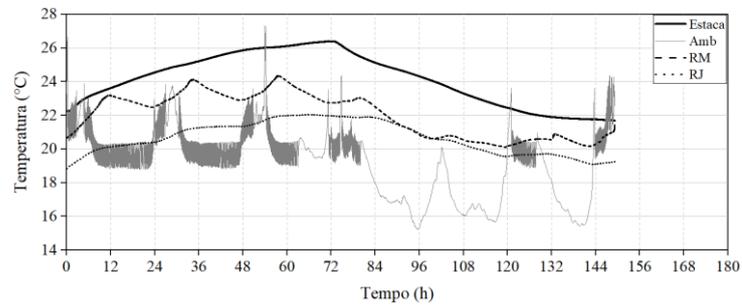
1) Ensaio S300 preliminar

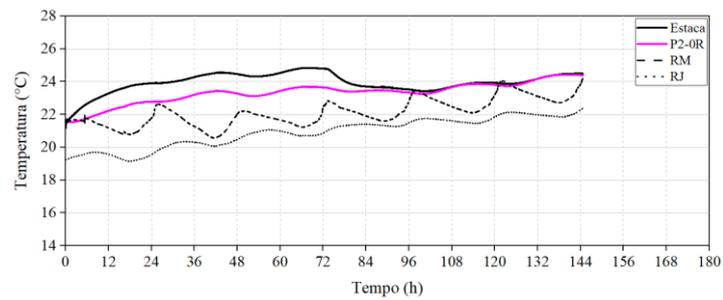
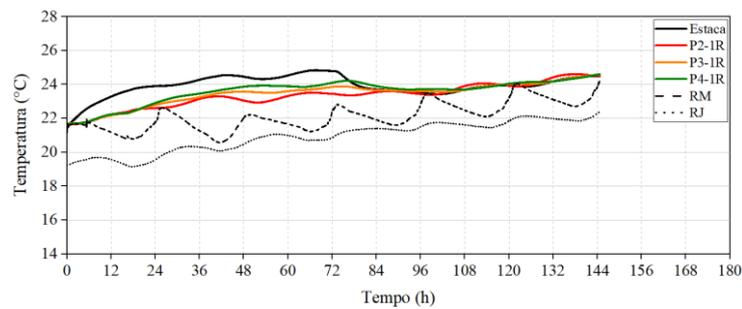
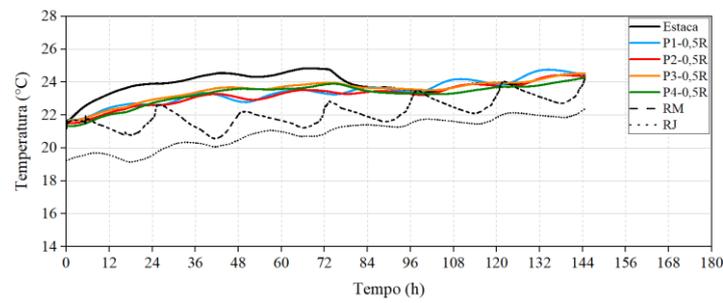
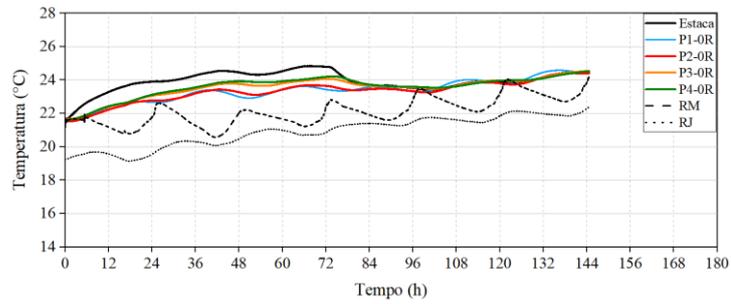
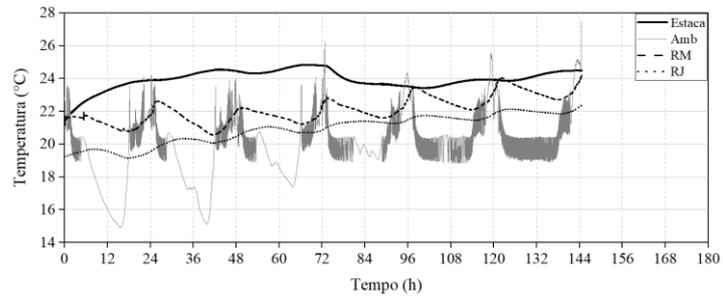


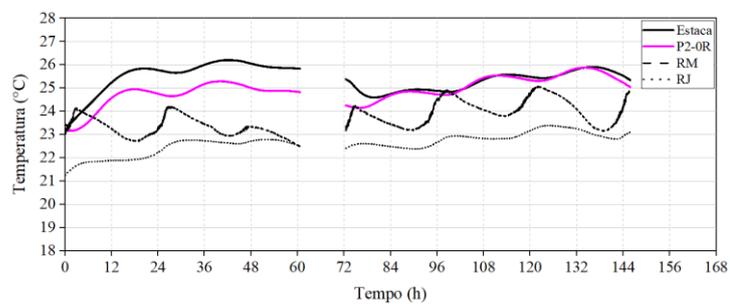
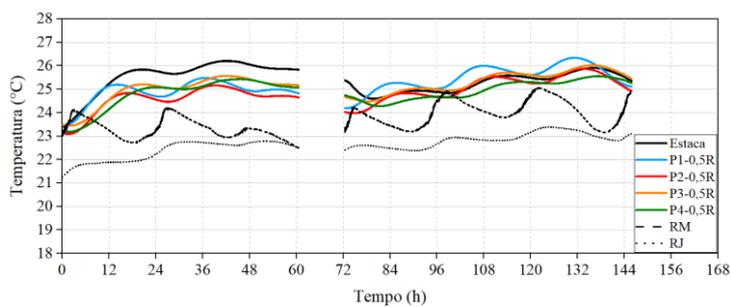
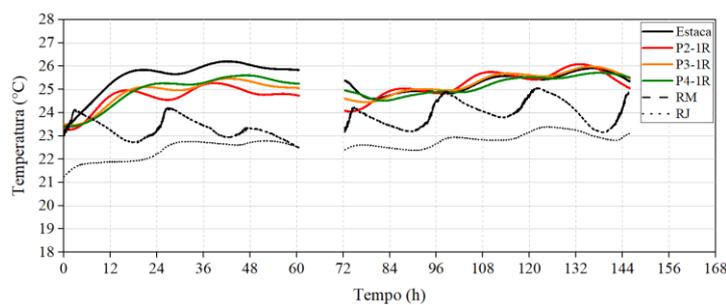
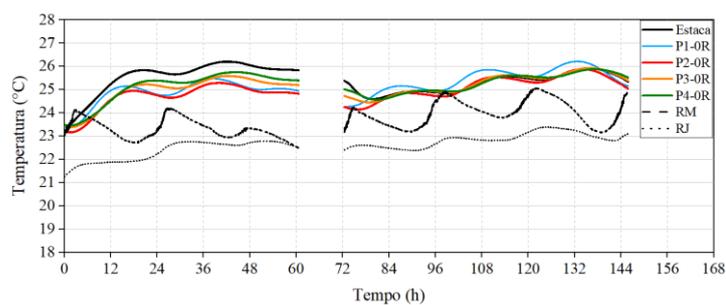
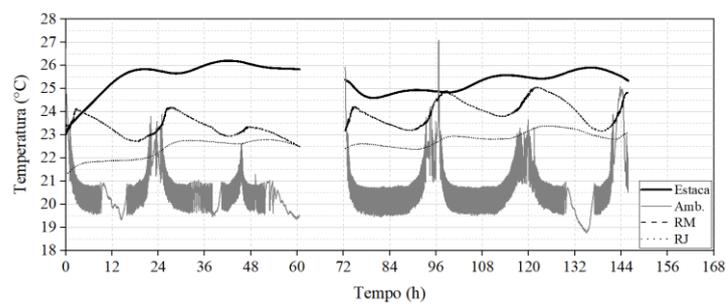
3) Ensaio S450



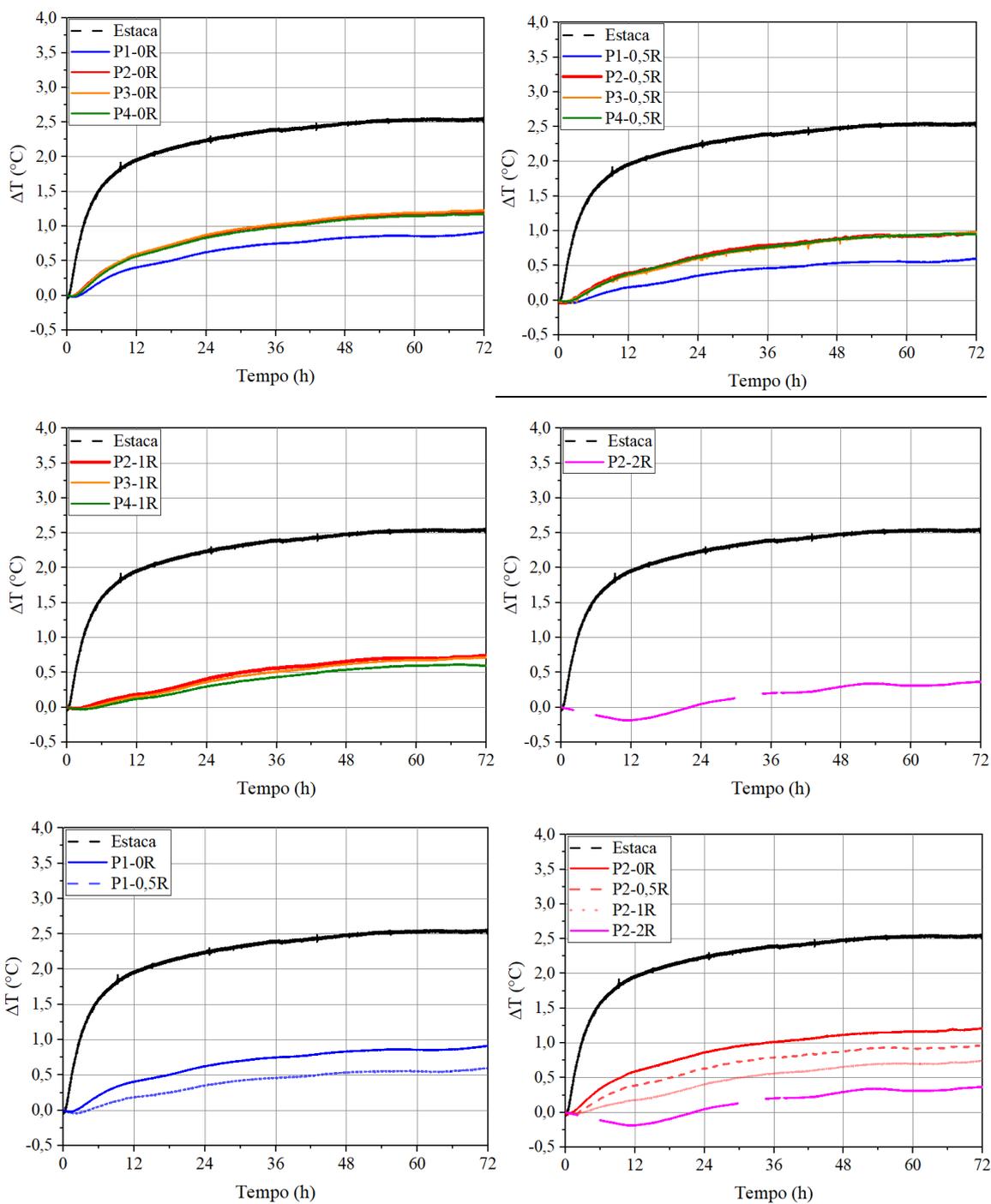
APÊNDICE C - Ensaio em modelo de estaca trocadora de calor

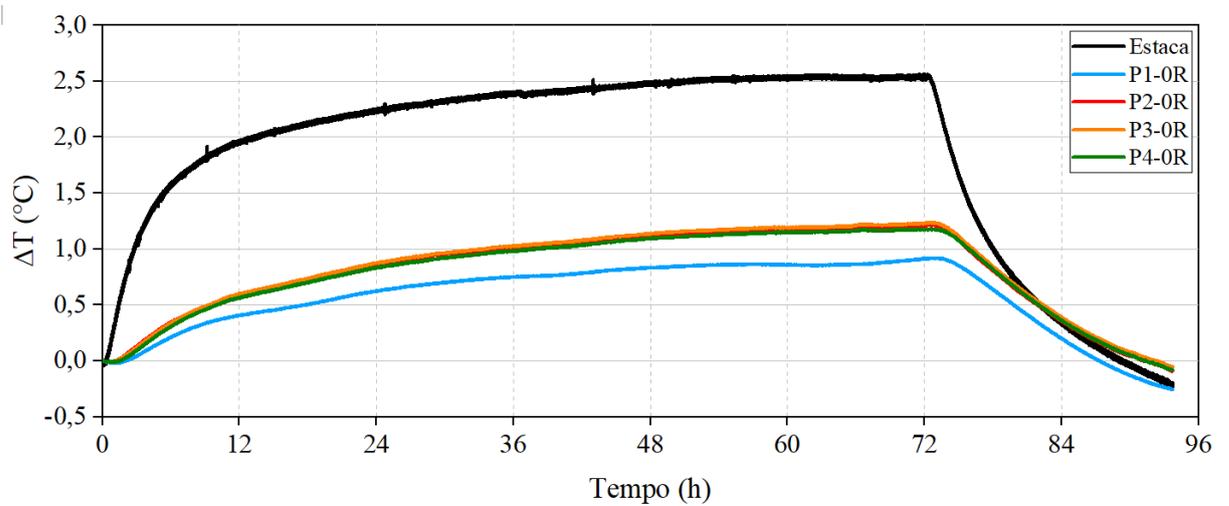
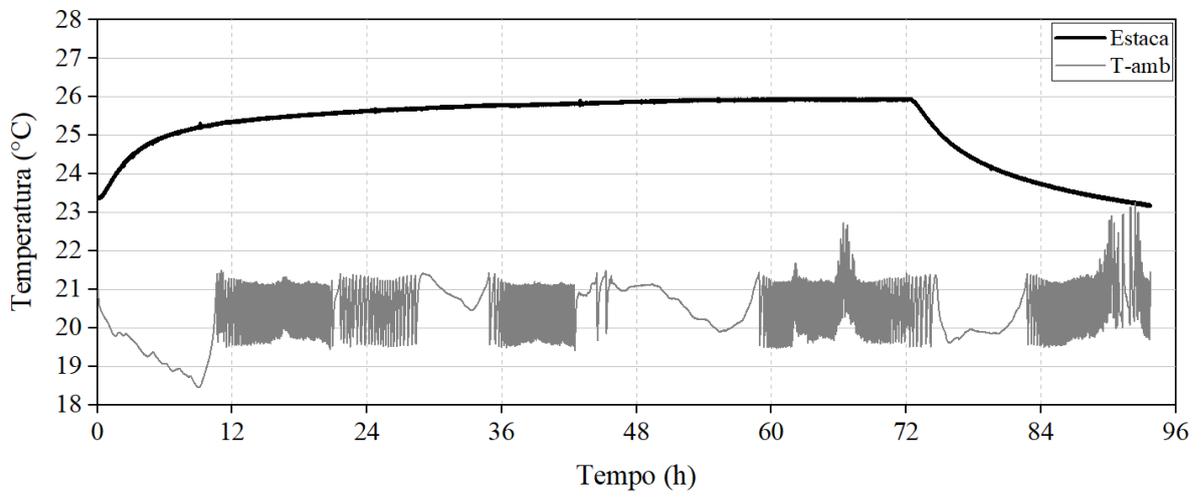
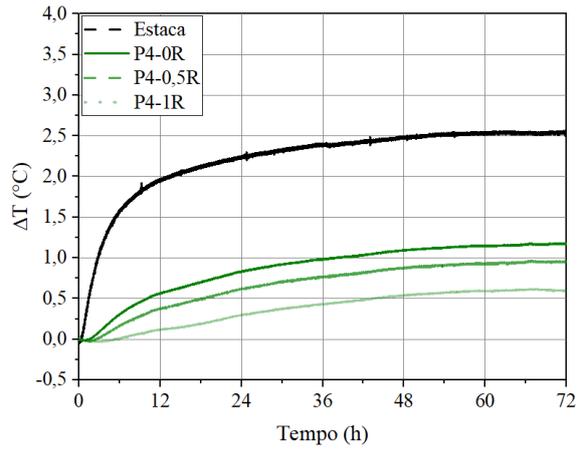
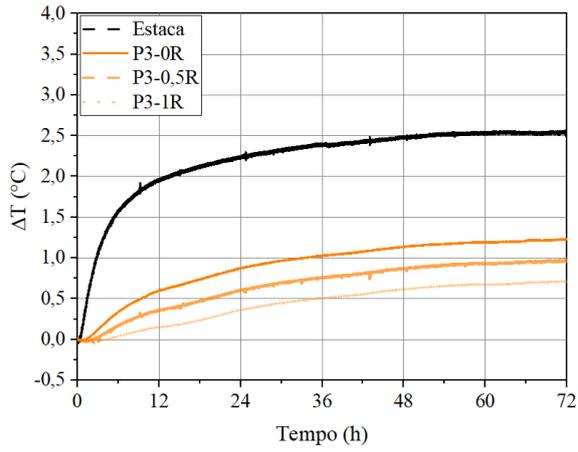
1) Ensaio com fluxo – $v = 0,4 \text{ m/s}$ – EF4

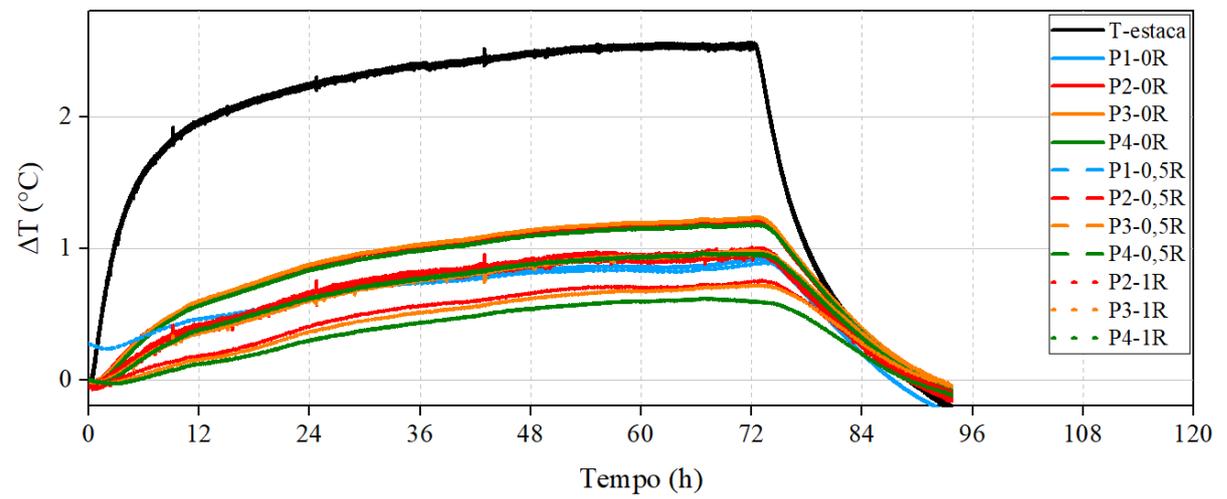
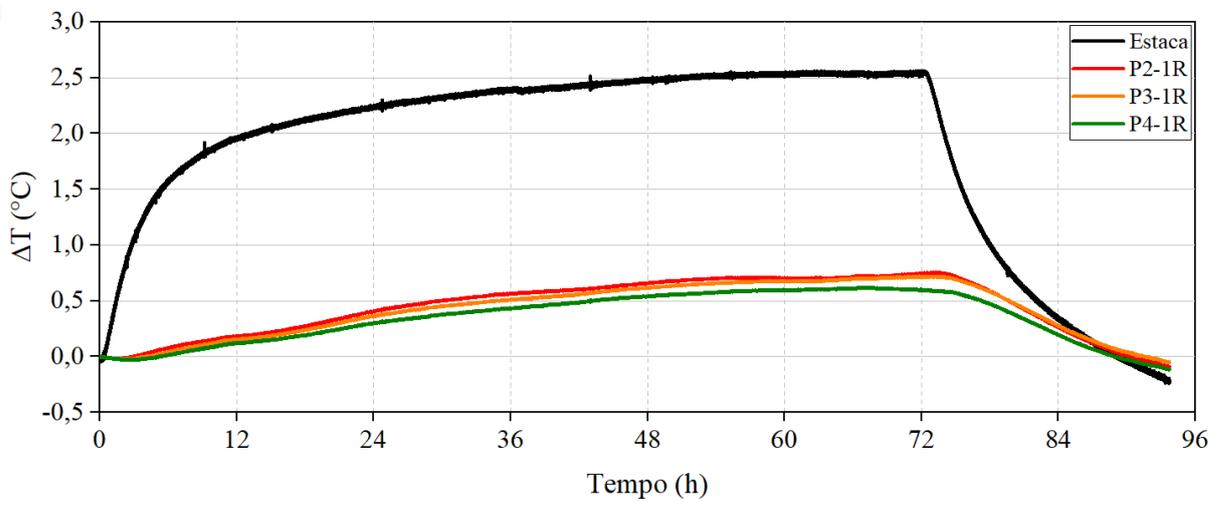
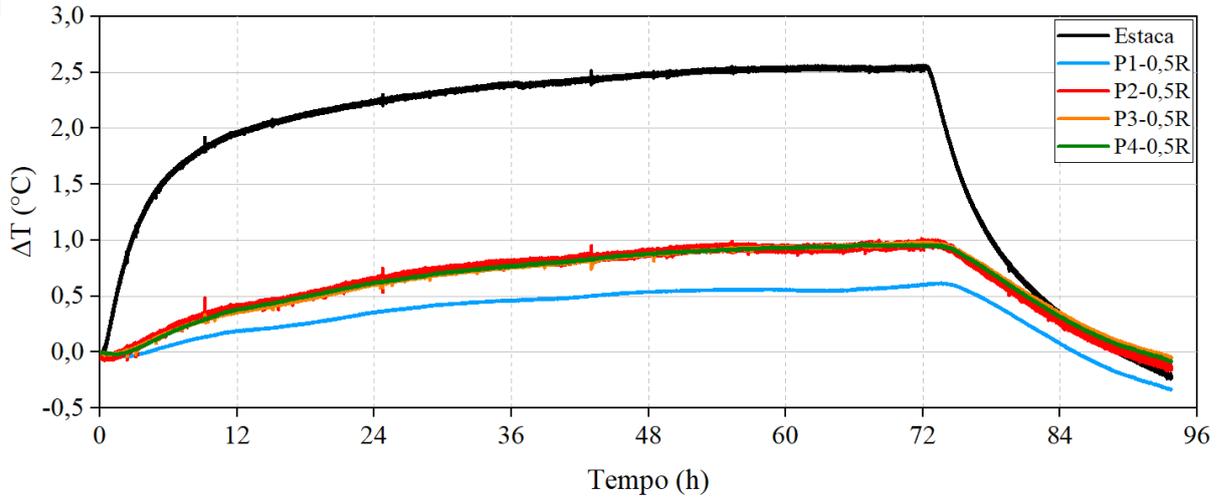
2) Ensaio com fluxo – $v = 0,8 \text{ m/s}$ – EF8

3) Ensaio com fluxo – $v = 1,5 \text{ m/s}$ – EF15

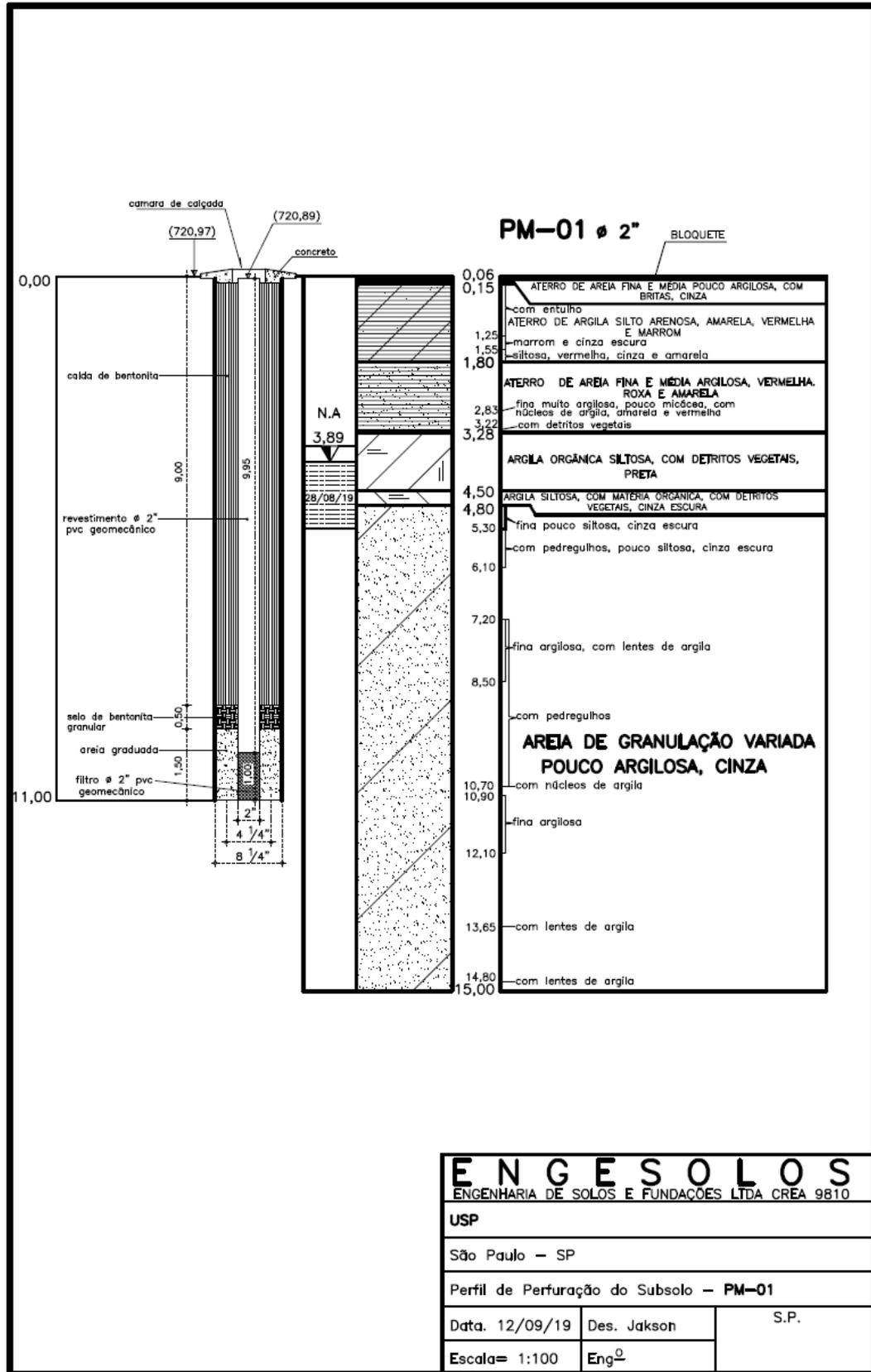
6.2 Ensaio em areia saturada (1)

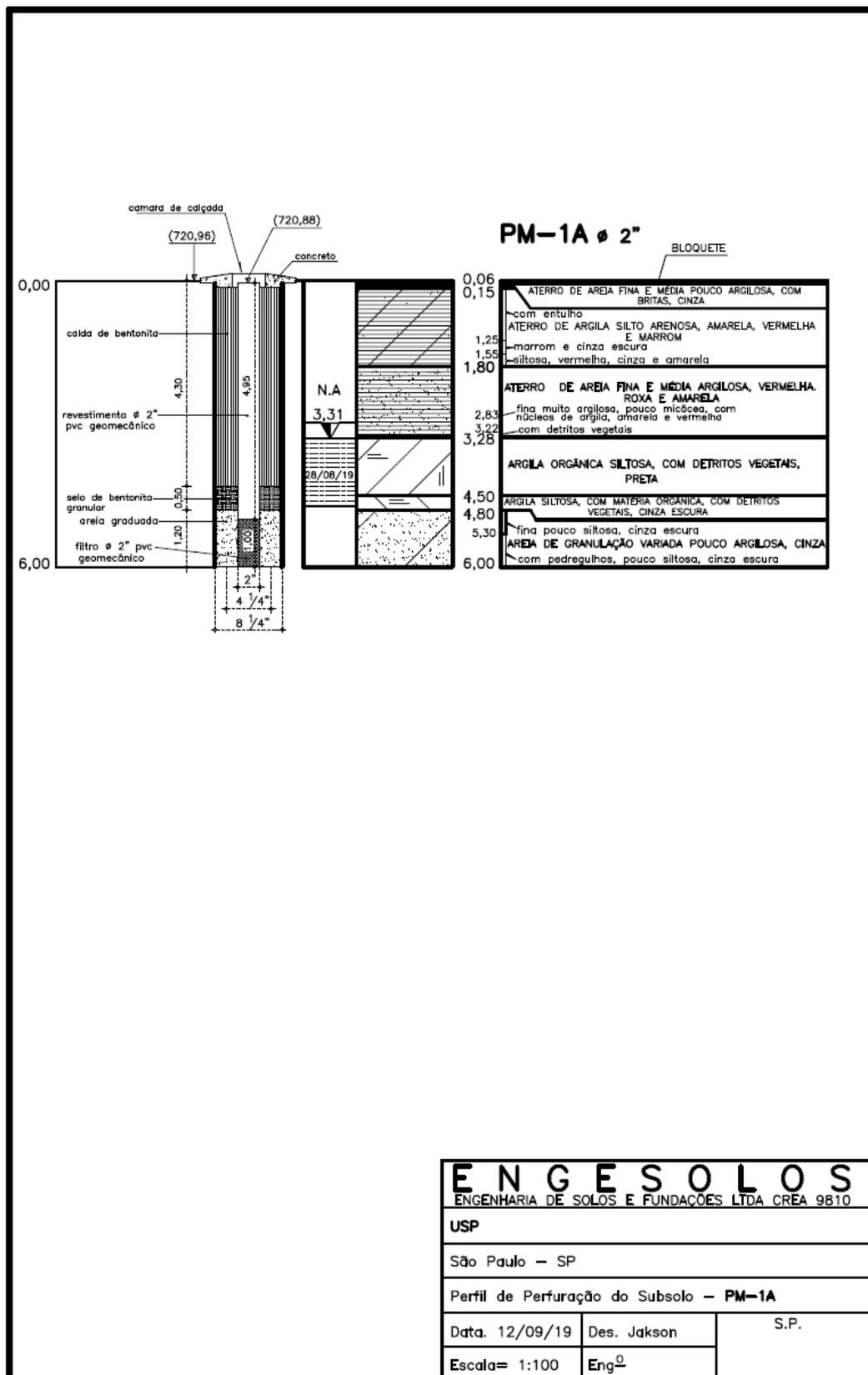




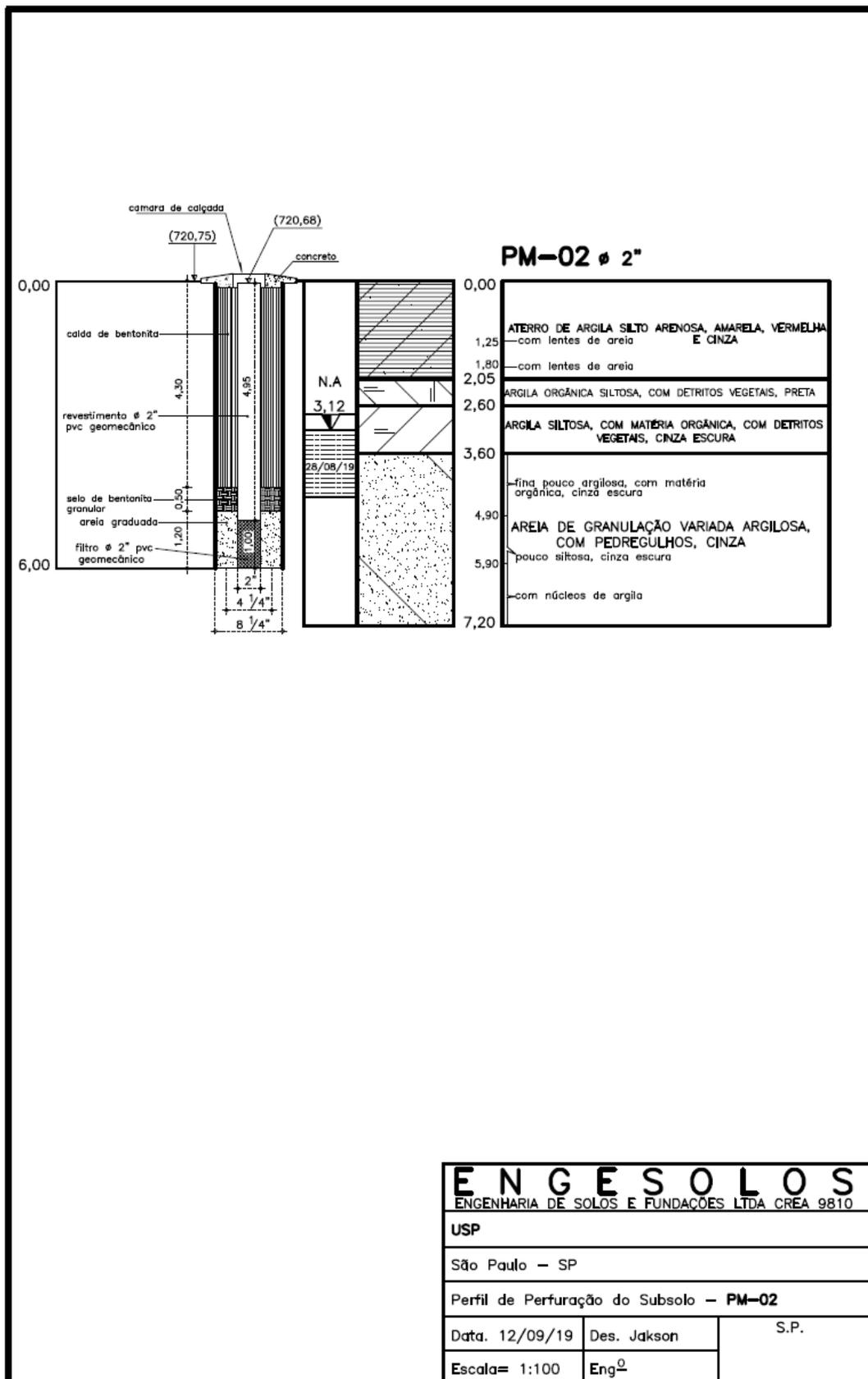


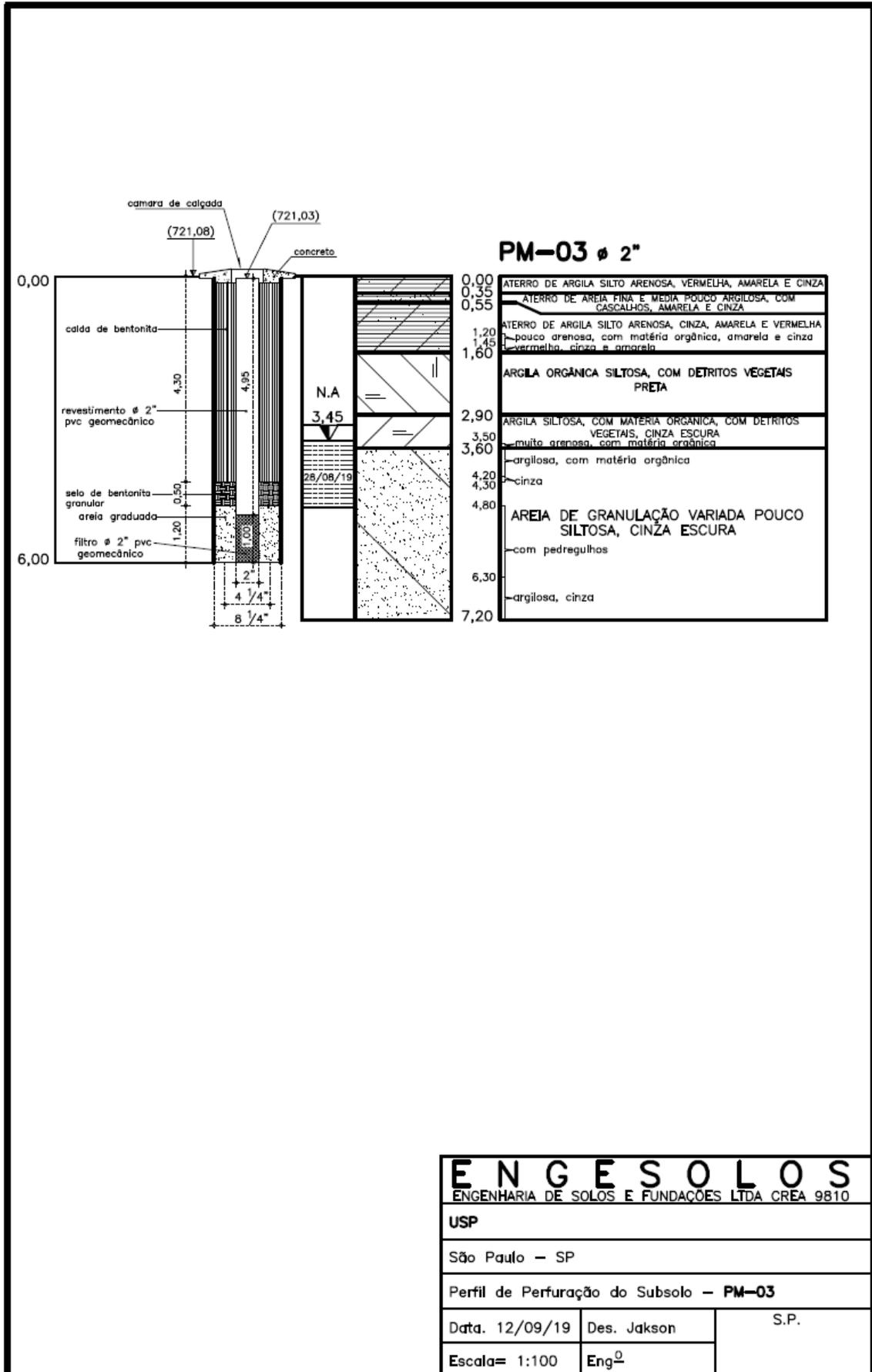
ANEXO A - Detalhamento dos poços de monitoramento





ENGENSOLOS		
ENGENHARIA DE SOLOS E FUNDAÇÕES LTDA CREA 9810		
USP		
São Paulo - SP		
Perfil de Perfuração do Subsolo - PM-1A		
Data. 12/09/19	Des. Jakson	S.P.
Escala= 1:100	Eng ^o	

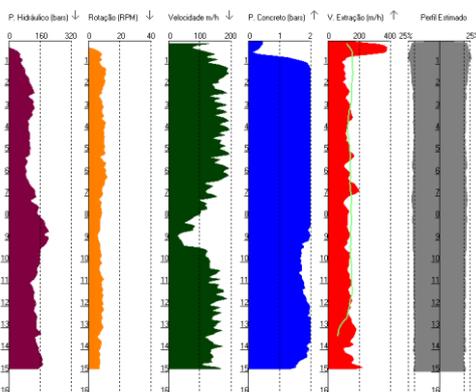




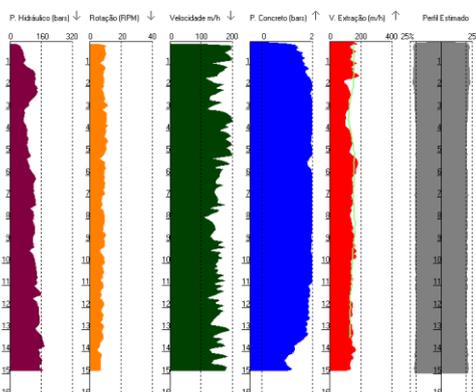
ENGE SOLOS		
ENGENHARIA DE SOLOS E FUNDACOES LTDA CREA 9810		
USP		
São Paulo - SP		
Perfil de Perfuração do Subsolo - PM-03		
Data. 12/09/19	Des. Jakson	S.P.
Escala= 1:100	Eng ^o	

ANEXO B - Relatório de execução das estacas emitido pela Stack

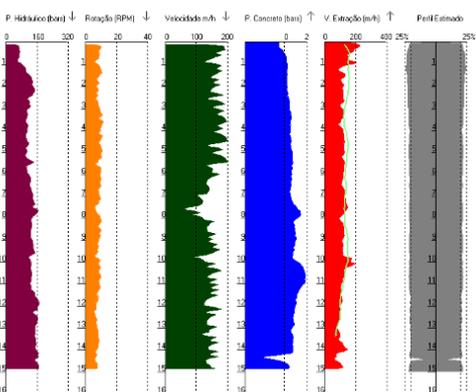
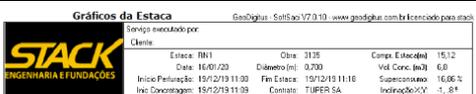
Data	Atividade
16/12/2019	- Execução da estaca teste atrás do CICS (R00)
17/12/2019	- Execução da segunda estaca teste próxima ao portão de entrada de caminhão no CICS (R0A) - Execução da estaca de reação R1 (a gaiola não entrou)
18/12/2019	- NR3 - NR4 - P2 - P8 (estaca abandonada)
19/12/2019	- NR1 - NR2 - P12 - P6 - P4a - P10a - P1b
20/12/2019	- NR5 - 4b - 7b - 10b - 8b
21/12/2019	- 7a - 8a - 1a - REF (estaca Intercement)



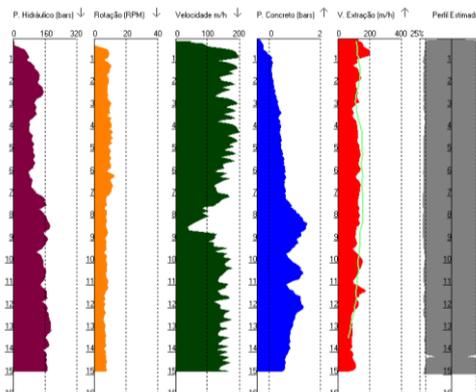
NR3, 18/12/2019, 10:29h, 15 m



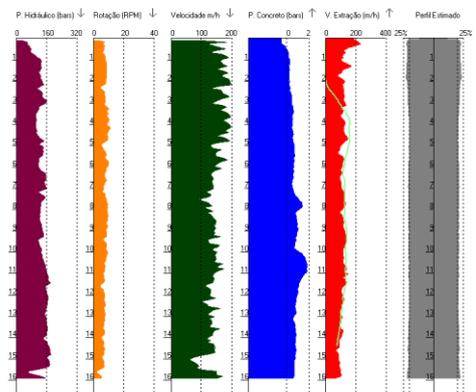
NR4, 18/12/2019, 11:27h, 15 m



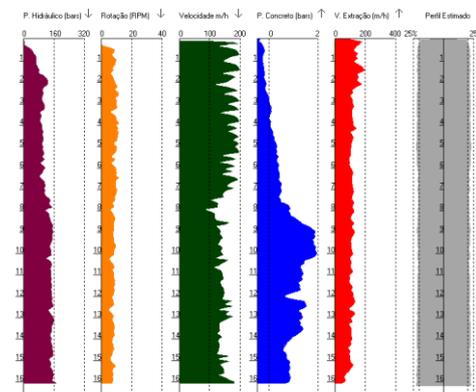
NR1 - 19/12/2019, 11:00h, 15 m



NR2 - 19/12/2019, 12:44h, 15 m



P12 - 19/12/2019, 13:38h, 16 m



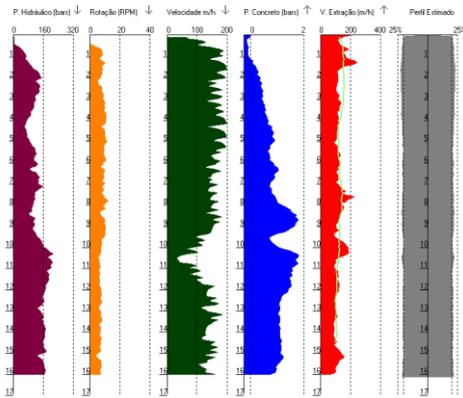
P6 - 19/12/2019, 14:38h, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: P4A	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,24
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 7,04
Início Perfuração: 19/12/19 15:31	Fim Estaca: 19/12/19 15:54	Superconsumo: 12,84 %
Inic. Concretagem: 19/12/19 15:44	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -2, 61



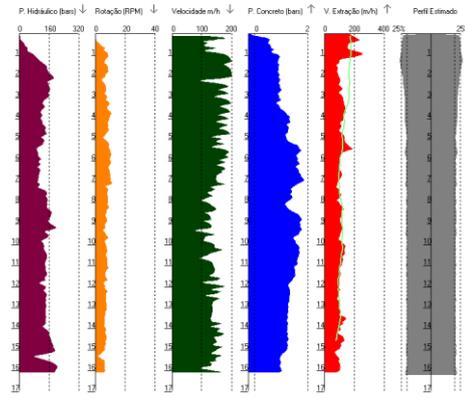
P4A - 19/12/2019, 15:31h, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: P10a	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 7,44
Início Perfuração: 19/12/19 16:22	Fim Estaca: 19/12/19 16:47	Superconsumo: 10,46 %
Inic. Concretagem: 19/12/19 16:37	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -3, 61



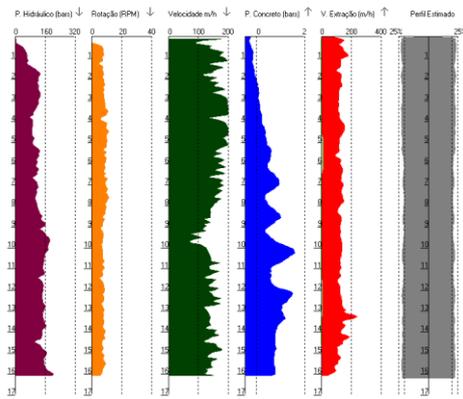
P10a - 19/12/2019, 16:22h, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: P1B	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 7,682
Início Perfuração: 19/12/19 17:27	Fim Estaca: 19/12/19 17:45	Superconsumo: 18,45 %
Inic. Concretagem: 19/12/19 17:36	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -1,2, 47



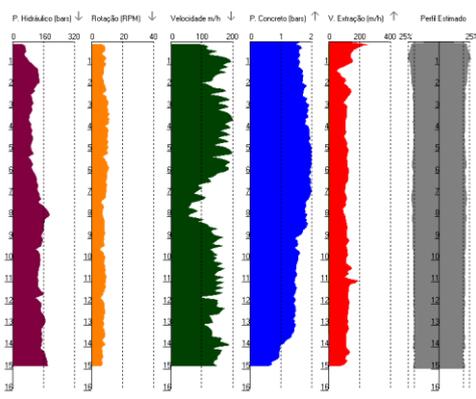
1B - 19/12/2019, 17:27h, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: NR5	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 15,12
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 6,801
Início Perfuração: 20/12/19 09:01	Fim Estaca: 20/12/19 09:20	Superconsumo: 17,32 %
Inic. Concretagem: 20/12/19 09:11	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -7, 51



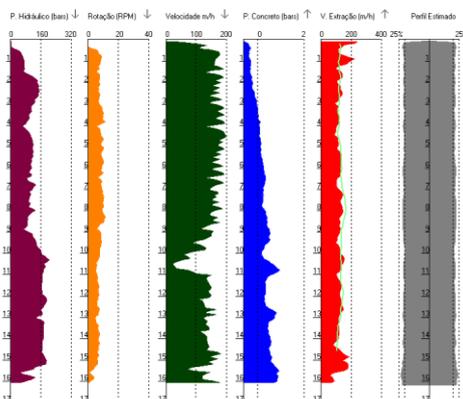
NR5 - 20/12/2019, 09:01h, 15 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: P4B	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,24
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 7,24
Início Perfuração: 20/12/19 10:08	Fim Estaca: 20/12/19 10:38	Superconsumo: 15,84 %
Inic. Concretagem: 20/12/19 10:28	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -2, 31



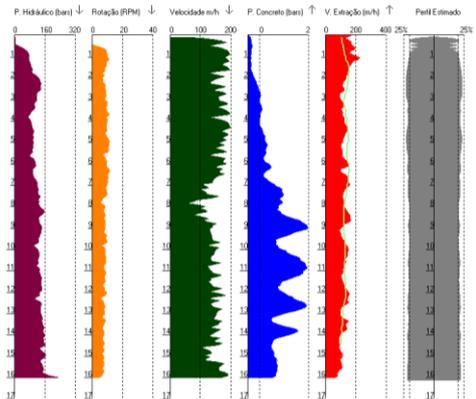
4B - 20/12/2019, 10:08, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDigma - Soft'sac V7.0.10 - www.geodigma.com.br licenciado para stack

STACK ENGENHARIA E FUNDACOES

Serviço executado por: **Cliente:**

Estaca: P7B	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,24
Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m/h): 7,04
Início Perfuração: 20/12/19 11:19	Fim Estaca: 20/12/19 11:38	Superconsumo: 12,84 %
Inic. Concretagem: 20/12/19 11:29	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: 5, 01

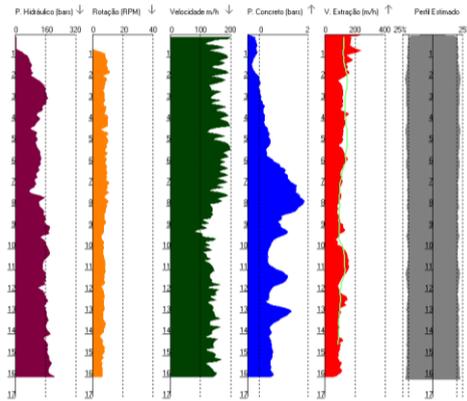


7B - 20/12/2019, 11:19, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: P10B	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,24
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,093
	Início Perfuração: 20/12/19 12:17	Fin. Estaca: 20/12/19 12:36	Superconcreto: 13,49 %
	Inic. Concretagem: 20/12/19 12:27	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -3,1°

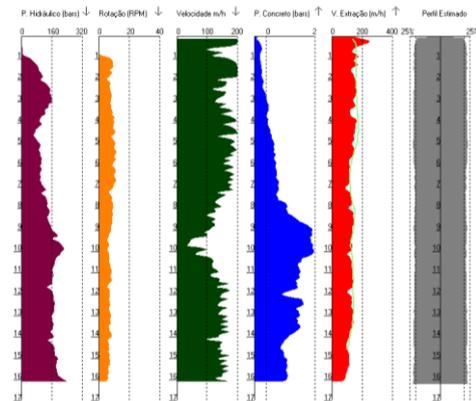


10B – 20/12/2019, 12:17, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: P8B	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,298
	Início Perfuração: 20/12/19 13:37	Fin. Estaca: 20/12/19 13:58	Superconcreto: 16,20 %
	Inic. Concretagem: 20/12/19 13:49	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -1,0°

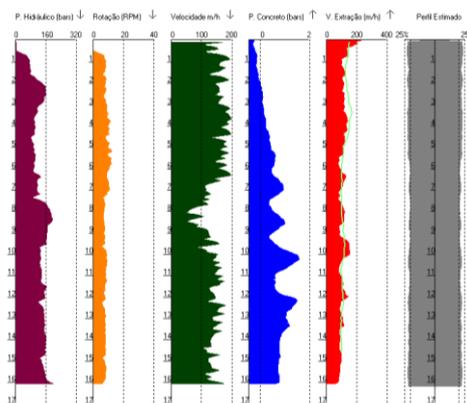


8B – 20/12/2019, 13:37, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: P7A	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,505
	Início Perfuração: 21/12/19 08:41	Fin. Estaca: 21/12/19 09:03	Superconcreto: 20,77 %
	Inic. Concretagem: 21/12/19 08:52	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -7,12°

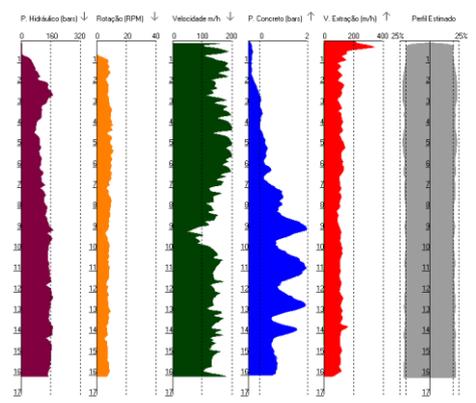


7A – 21/12/2019, 8:41, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: P8A	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,111
	Início Perfuração: 21/12/19 09:27	Fin. Estaca: 21/12/19 09:46	Superconcreto: 13,82 %
	Inic. Concretagem: 21/12/19 09:36	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -8,2°

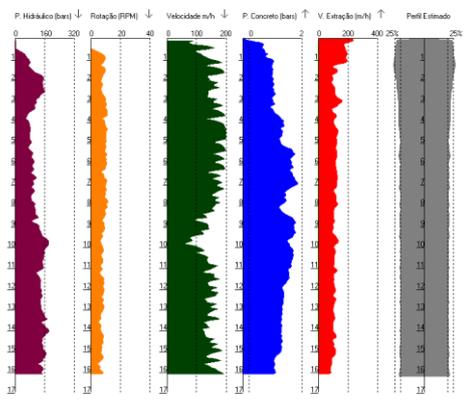


8A – 21/12/2019, 9:46, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: P1A	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,221
	Início Perfuração: 21/12/19 10:21	Fin. Estaca: 21/12/19 10:40	Superconcreto: 10,26 %
	Inic. Concretagem: 21/12/19 10:31	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: 6,2°

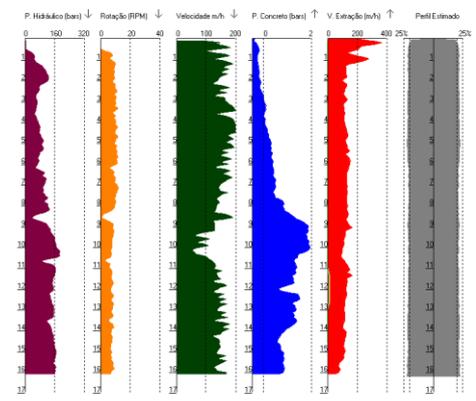


1A – 21/12/2019, 10:21, 16 m

Gráficos da Estaca GeoDighis - Soft5acV7.0.10 - www.geodighis.com.br licenciado para stack

Serviço executado por: **STACK ENGENHARIA E FUNDACOES**

Cliente:	Estaca: REF	Obra: 3135	Comp. Estaca(m): 16,32
	Data: 16/01/20	Dímetro (m): 0,700	Vel. Conc. (m3): 7,311
	Início Perfuração: 21/12/19 10:59	Fin. Estaca: 21/12/19 11:29	Superconcreto: 16,55 %
	Inic. Concretagem: 21/12/19 11:20	Contrato: TUPER SA	Inclinação X/Y: -2,0°



REF – 21/12/2019, 10:58, 16 m