

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO EM LABORATÓRIO DE RESPOSTA TÉRMICA DE
PROTÓTIPOS DE ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO
TROPICAL NÃO SATURADO**

CHARLES PEREIRA CHAVES, M.Sc.

ORIENTADOR: PROF. RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D.

COORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc.

TESE DE DOUTORADO

PUBLICAÇÃO: G.DM - 185/23

BRASÍLIA/DF: ABRIL / 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO EM LABORATÓRIO DE RESPOSTA TÉRMICA DE PROTÓTIPOS
DE ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO TROPICAL NÃO
SATURADO**

CHARLES PEREIRA CHAVES, M.Sc.

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**PROF. RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)
ORIENTADOR**

**PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (UNB)
COORIENTADOR**

**PROF. ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
EXAMINADOR INTERNO**

**PROF. CRISTINA HOLANDA CAVALCANTI TSUHA, Ph.D. (USP)
EXAMINADOR EXTERNO**

**PROF. FERNANDO SABOYA ALBUQUERQUE JÚNIOR, D.Sc. (UENF)
EXAMINADOR EXTERNO**

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE ABRIL DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

CHAVES, C.P

Estudo em laboratório de resposta térmica de protótipos de estacas trocadoras de calor em solo tropical não saturado. [Distrito Federal] 2023

xx, 283 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2023)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estacas trocadoras de calor 2. Propriedades térmicas de solos

3. Ensaios de resposta térmica 4. Geotermia

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Chaves, C.P.C. (2023). Estudo em laboratório de resposta térmica de protótipos de estacas trocadoras de calor em solo tropical não saturado. Tese de Doutorado, Publicação G.DM---/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 283 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Charles Pereira Chaves

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo em laboratório de resposta térmica de protótipos de estacas trocadoras de calor em solo tropical não saturado.

GRAU / ANO: Doutor / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Charles Pereira Chaves

Rua Paraguai, Quadra 15, Lote 10, N° 02

CEP: 75912-140– Brasília/DF – Brasil

charles.chaves@ifgoiano.edu.br

DEDICATÓRIA

À Elza Chaves Moreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu Pai, o criador do mundo e de tudo o que nele há.

Agradeço à minha mãe, Elza, por ser uma mãe batalhadora e guerreira que sempre me motivou a batalhar na vida sem reclamar dos obstáculos e mantendo a virtude da fortaleza viva na minha alma.

Agradeço à minha esposa Kerlly por estar ao meu lado nessa caminhada me motivando e me inspirando com sua dedicação, seu compromisso e seu amor.

Agradeço ao Professor Renato Pinto da Cunha, meu orientador, por todo apoio, idealização do tema, os ensinamentos profissionais e pessoais dados ao longo de todo esse tempo, bem como todo o apoio financeiro para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço ao Professor André Brasil, meu coorientador, que sempre contribuiu de maneira virtuosa para o meu crescimento profissional e pessoal. Sempre conduzindo com sabedoria suas orientações.

Agradeço ao Geofluxo e ao GPFees por todo apoio e auxílio lapidação técnica desta tese durante os encontros e apresentações semanais.

Ao meu primo Fábio Chaves Xavier, por todo apoio e suporte técnico dado ao longo do desenvolvimento da eletrônica necessária para o desenvolvimento do equipamento de ensaio TRT e da instrumentação na câmara, na qual sem ele, não seria possível desenvolver esta tese em tempo hábil.

Ao meu primo Fernando Chaves Xavier, por todo apoio técnico de informática que foi tão útil no desenvolvimento dos ensaios de forma remota.

Gratidão também ao professor John Eloi Bezerra pela inspiração inicial na graduação por seguir os caminhos da geotecnia.

Aos amigos e colegas que contribuíram no processo do desenvolvimento da pesquisa, em especial ao Joaquim, Melchior, Yago, Henrique, Daniel e Mateus, que tornaram essa caminhada mais leve e suportável ao longo desses 5 anos.

A CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de doutorado que tornou viável o desenvolvimento desse projeto.

E por último e não menos importante, a Pós-graduação em Geotecnia da UnB por todo o arcabouço teórico que me foi passado ao longo desses anos, gratidão a cada professor que, com tanta maestria, contribuíram para o sucesso desta tese.

RESUMO

ESTUDO EM LABORATÓRIO DE RESPOSTA TÉRMICA DE PROTÓTIPOS DE ESTACAS TROCADORAS DE CALOR EM SOLO TROPICAL NÃO SATURADO

A necessidade de se desenvolver novas tecnologias de eficiência energética em sistemas geotérmicos de baixa entalpia tem sido cada vez mais comum e necessária na geotecnia. Nessa perspectiva, acerca de estacas trocadoras de calor, sabe-se que o desenvolvimento da tecnologia está atrelado a profundos estudos de diversos centros de pesquisa no mundo que estão contribuindo com o seu avanço tecnológico como alternativa de uso eficiente de energia em edificações. Nesse sentido, entender com profundidade o comportamento das propriedades térmicas das estacas trocadoras de calor em solos tropicais, frente as variações geotécnicas de peso específico e grau de saturação, tem sido bastante desafiador na geotecnia. Esta tese tem como objetivo avaliar o comportamento térmico de protótipos de estacas trocadoras de calor executados em solo tropical típico do DF, na condição saturada e não saturada, na faixa de 1m de estaca em escala real, submetidas a variações paramétricas de configuração de tubos, grau de saturação e vazão interna nos tubos, tudo em ambiente controlado de laboratório, por meio de uma câmara térmica de grandes dimensões desenvolvida para esse fim. Para atingir tal objetivo, foi desenvolvido um equipamento de ensaios TRT para a realização dos ensaios nos protótipos. Suas avaliações experimentais foram executadas, e com isso, foram comparados os ensaios de resposta térmica sobre o ponto de vista de gradiente térmico em 2D e de resistência térmica em 1D. Foi feita, também, um estudo de propriedades térmicas do solo laterítico típico do Distrito Federal. Além disso, foi desenvolvido também um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, a qual foram monitoradas as variações de temperatura de um perfil geotécnico de 12m de profundidade, ao longo de 2 meses. Finalmente, com os resultados dos ensaios de resposta térmica, foram desenvolvidas funções de resposta térmica (Funções G) para cada situação geotécnica em questão, onde foram comparadas suas principais peculiaridades geométricas e geotécnicas dos protótipos. Ademais, os resultados de condutividade térmica foram comparados com os principais modelos vigentes na doutrina geotécnica, na qual foram propostos novos parâmetros de ajustes dos principais modelos de condutividade térmica na bibliografia vigente, bem como foi proposto um novo modelo empírico, bastante acurado, de ajuste matemático do solo laterítico de Brasília.

Palavras-chave: Estacas térmicas; Condutividade térmica de solo laterítico; Ensaio de resposta térmica; Solos não saturados; Estacas trocadoras de calor.

ABSTRACT

The need to develop new energy efficiency technologies in low enthalpy geothermal systems has become increasingly common and necessary in geotechnics. Regarding piles heat exchangers, it is known that the development of the technology is linked to deep studies of several research centers in the world that are contributing to the technological advancement of the application of piles heat exchangers as an alternative to the efficient use of energy in buildings. In this sense, understanding in depth the behavior of the thermal properties of heat exchanging piles in tropical soils, facing geotechnical variations of specific weight and saturation degree becomes very challenging in geotechnical, This thesis aims to evaluate the thermal behavior of prototype heat exchanger piles made in typical tropical soil of the Federal District, in the compacted and unsaturated condition, in the 1m pile full-scale range, submitted to parametric variations of pipe configuration, saturation degree and internal flow in the pipes, all in a controlled laboratory environment, by means of a large-sized thermal chamber developed for this purpose. To achieve this goal, a thermal response machine was developed to perform the tests on the prototypes. Its experimental evaluations were performed, and with that, thermal response tests were compared, from the point of view of thermal gradient in 2D and thermal resistance in 1D. A study of the thermal properties of the typical lateritic soil of the Federal District was also done. In addition, a thermal well was also developed in which the temperature variations of a 12m deep geotechnical profile were monitored throughout 2 months. Finally, with the results of the thermal response tests, thermal response functions (G functions) were developed for each geotechnical situation in question, where the main geometric and geotechnical peculiarities of the prototypes were compared. Furthermore, the results of thermal conductivity were compared with the main models in force in the geotechnical doctrine, in which new parameters of adjustment of the main models of thermal conductivity in the current bibliography were proposed, as well as a new empirical model, quite accurate, of mathematical adjustment of the lateritic soil of Brasilia.

Keywords: Thermal pile; Thermal conductivity of lateritic soil; Thermal response test; Unsaturated soils; Heat-exchange piles.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE FIGURAS | XIII |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS..... | XX |
| 1. INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 Contexto Geral | 29 |
| 1.2 Justificativa | 31 |
| 1.3 Objetivos | 34 |
| 1.3.1 Objetivo geral..... | 34 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 34 |
| 1.4 Estrutura da tese | 35 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 38 |
| 2.1 Sistemas geotérmicos de baixa entalpia..... | 38 |
| 2.2 Sistemas fechados trocadores de calor geotérmicos | 39 |
| 2.3 Propriedades termofísicas do solo..... | 41 |
| 2.3.1 Capacidade térmica volumétrica (C_v) | 41 |
| 2.3.2 Condutividade térmica (λ) | 45 |
| 2.3.3 Difusividade térmica..... | 51 |
| 2.4 Mecanismos físicos de troca térmica em uma estaca trocadora de calor | 53 |
| 2.5 Números adimensionais utilizados nas análises térmicas..... | 58 |
| 2.5.1 Número de Reynolds..... | 59 |
| 2.5.2 Número de Nusselt..... | 59 |
| 2.5.3 Número de Fourier (Fo) | 60 |
| 2.5.4 Temperatura adimensional (Φ) | 61 |
| 2.6 Correlações empíricas de número de Nusselt em convecção forçada interna para tubos circulares em regime turbulento..... | 62 |
| 2.7 Fatores que influenciam na troca térmica de um sistema de estaca trocadora de calor geotérmico..... | 63 |
| 2.8 Ensaio de resposta térmica (<i>Thermal Response Test – TRT</i>) | 64 |
| 2.9 Poços de inspeção geotérmicas | 68 |
| 2.10 Estudos em laboratório de desempenho térmico em estacas trocadoras de calor | 69 |
| 2.11 Resumo do capítulo..... | 78 |
| 2.12 Observações importantes acerca da revisão bibliográfica | 79 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 80 |
| 3.1 Local de coleta do solo estudado | 81 |
| 3.2 Ensaio de caracterização geotécnica do solo..... | 83 |
| 3.3 Medição das propriedades térmicas do solo laterítico | 84 |
| 3.4 Método de moldagem e preparação das amostras para ensaios de condutividade térmica em laboratório | 86 |
| 3.5 Metodologia de execução dos ensaios de condutividade térmica e de capacidade térmica do solo | 89 |
| 3.6 Ensaio de fluorescência de raios X do solo..... | 94 |
| 3.7 Descrição e detalhamento da bancada de ensaios de resposta térmica | 94 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.8 | Módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equip. de ensaio TRT .. | 100 |
| 3.9 | Módulo de segurança contra superaquecimento do equipamento | 102 |
| 3.10 | Módulo de controle e leitura de vazão | 103 |
| 3.11 | Módulo de controle e medição de potência de ativação da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT | 104 |
| 3.12 | Controle de compactação do solo na câmara | 106 |
| 3.13 | Regularização e compactação da camada de solo na câmara térmica | 109 |
| 3.14 | Instrumentação | 110 |
| 3.15 | Sensores de temperatura..... | 111 |
| 3.16 | Aferição dos sensores de vazão | 112 |
| 3.17 | Instalação e disposição dos sensores de temperatura na câmara térmica e no protótipo de estaca trocadora de calor | 115 |
| 3.18 | O protótipo de estaca trocadora de calor..... | 119 |
| 3.19 | Execução e concretagem | 121 |
| 3.20 | Monitoramento e controle de umidade ao longo dos ensaios de resposta térmica na câmara térmica | 123 |
| 3.21 | Programa de ensaios de resposta térmica desenvolvidos nos protótipos de estacas trocadoras de calor na câmara térmica | 124 |
| 3.22 | Execução do poço de monitoramento de temperatura do subsolo | 126 |
| 3.23 | Resumo do capítulo..... | 128 |
| 4. | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS | 129 |
| 4.1 | Caracterização geotécnica do solo | 129 |
| 4.2 | Fluorescência de raio X do solo laterítico estudado | 130 |
| 4.3 | Controle de compactação do solo na câmara térmica | 132 |
| 4.4 | Discussão sobre a variação das propriedades térmicas do solo laterítico de Brasília.133 | |
| 4.4.1 | Comportamento da condutividade térmica | 133 |
| 4.4.2 | Comportamento da capacidade térmica | 139 |
| 4.4.3 | Comportamento da difusividade térmica | 144 |
| 4.5 | Calibração dos principais modelos de previsão de condutividade térmica..... | 148 |
| 4.6 | Discussão de comparação da condutividade térmica com os principais métodos vigentes na literatura | 154 |
| 4.7 | Discussão dos ensaios TRT realizados na câmara térmica em laboratório..... | 161 |
| 4.8 | Discussão da influência da vazão na resposta térmica (Φ_g) para diferentes vazões e grau de saturação relativa nas configurações 1U 2U e 4U | 179 |
| 4.9 | Discussão da influência de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) em relação a configuração dos tubos ativos na estaca | 194 |
| 4.10 | Discussão da variação da resistência térmica média em relação a config. de tubos.. | 200 |
| 4.11 | Medição da variação térmica do perfil de solo estudado | 205 |
| 4.12 | Resumo do capítulo..... | 207 |
| 5. | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 208 |
| 5.1 | Sumário da pesquisa..... | 208 |
| 5.2 | Conclusões | 210 |
| 5.3 | Aprendizados da pesquisa | 215 |
| 5.4 | Recomendações para pesquisas futuras | 217 |
| | REFERÊNCIAS | 218 |

| | |
|----------------|-----|
| ANEXO I..... | 227 |
| ANEXO II..... | 238 |
| ANEXO III..... | 249 |
| ANEXO IV..... | 250 |
| ANEXO V..... | 258 |
| ANEXO VI..... | 264 |
| ANEXO VII..... | 273 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Capacidade térmica mássica dos principais constituintes da estrutura dos solos. | 43 |
| Tabela 2.2 – Valores gerais de capacidade térmica volumétrica dos principais tipos de solos (Adaptado de Laloui & Loria, 2020). | 49 |
| Tabela 2.4 – Valores gerais de condutividade térmica dos principais tipos de solos, (Adaptado de Laloui & Loria, (2020). | 51 |
| Tabela 2.5 – Valores gerais de capacidade térmica térmica dos principais materiais constituintes nos solos, (Adaptado de Farouki, 1981, Coté & Konrad, 2005 e Laloui & Loria, (2020). | 52 |
| Tabela 2.6 – Valores gerais de difusividade térmica dos principais tipos de solos, (Adaptado de Laloui & Loria, (2020). | 53 |
| Tabela 2.7 – Principais trabalhos no Brasil e no mundo que desenvolveram equipamentos de resposta térmica com suas principais características técnicas de operação e acurácia sensorial. | 66 |
| Tabela 2.8: Principais estudos e resultados sobre o comportamento termomecânico e o desempenho térmico de modelos e protótipos de estacas térmicas desenvolvidos em laboratório, no Brasil e no mundo. | 72 |
| Tabela 3.1 – Matriz de ensaios de medição de condutividade térmica de amostras moldadas nos corpos de prova | 91 |
| Tabela 3.2 – Especificações técnicas do concreto utilizado na pesquisa. | 122 |
| Tabela 4.1 – Resultados de caracterização geotécnica do solo do antigo campo experimental da Pós-graduação da Universidade de Brasília. | 129 |
| Tabela 4.2 – Composição química do solo laterítico obtida por Fluorescência de Raios X (% massa) e capacidade estimada do respectivo óxido. | 131 |
| Tabela 4.3 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da condutividade térmica do solo (λ_{solo}), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r). | 138 |
| Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da capacidade térmica do solo (C_p), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r). | 144 |
| Tabela 4.5 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da condutividade térmica do solo (λ_{solo}), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r). | 148 |
| Tabela 4.6 – Ajuste polinomial de resposta térmica adimensional para protótipo de estaca trocadora de calor, na configuração 1U, para vazões 3,06, 6,16 e 12,41 L/min, em condição de saturação 0,79. | 188 |
| Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33, respectivamente. | 188 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.8 – Coeficientes de curva de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente. | 192 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 2UQ3S33, 2UQ6S33 e 2UQ12S33, respectivamente..... | 192 |
| Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 4UQ3S33, 4UQ6S33 e 4UQ12S33, respectivamente..... | 194 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: a) Número de projetos acumulados no ocidente ao longo dos anos, (b) Número de emissão de CO ₂ economizados na atmosfera, em toneladas, ao longo do tempo (Adaptado de Laloui & Loria (2020)). | 30 |
| Figura 2.1 – Classificação dos sistemas geotérmicos (Adaptado de Laloui & Loria, 2020). | 39 |
| Figura 2.2 – Esquema de uma planta energia geotérmica com estacas trocadoras de calor. | 40 |
| Figura 2.3: Variação da capacitância térmica em função da umidade volumétrica do latossolo de Garanhuns – PE. (Adaptado de Maciel Neto, 2011) | 44 |
| Figura 2.4 – Variação da capacidade térmica da água em função da temperatura (Çengel & Ghajar, 2012). | 45 |
| Figura 2.5 – Fluxo térmico em um solo sobre diferentes condições de grau de saturação. (a) seco, (b) Não saturado e (c) completamente saturado (Akrouch <i>et al.</i> , 2015). | 47 |
| Figura 2.6 – Condutividade térmica de um solo argilo-siltoso em função da umidade e do peso específico. Farouki (1981). | 48 |
| Figura 2.7: Comportamento da difusividade térmica de um latossolo coletado na região de Garanhuns – PE. (Adaptado de Maciel Neto, 2011) | 53 |
| Figura 2.8 – Mecanismos de transferência de calor de uma estaca trocadora de calor: (a) propriedades térmicas da estaca e suas respectivas temperaturas de interface; (b) diferenças de temperatura e suas respectivas resistências térmicas (Adaptado de Loveridge & Powrie, 2013). | 54 |
| Figura 2.9 - Exemplo de curvas típicas de Funções G de estacas trocadoras de calor variando sua esbeltez (L/D). (Adaptado de Loveridge & Powrie, 2013). | 62 |
| Figura 2.10 – Aparato básico dos principais componentes de um equipamento TRT de campo (Adaptado de Gehlin, 2002). | 65 |
| Figura 2.11 – Comparativo da distribuição de temperaturas no subsolo para o verão e inverno. Fonte: (Adaptado de Brandl, 2006). | 68 |
| Figura 3.1 – Fluxograma do desenvolvimento metodológico da tese. | 80 |
| Figura 3.2 – Imagem do local de coleta do solo no antigo campo experimental do Programa de Pós Graduação da Geotecnia na UnB. | 81 |
| Figura 3.3: (a) Sondagem SPT dos 4 pontos do antigo campo experimental e (b) Locações dos respectivos pontos no antigo campo experimental do Programa de Pós-Graduação de Geotecnia da UnB. | 82 |
| Figura 3.4: (a) Principais horizontes das camadas observadas pelas sondagens SPT do antigo campo experimental, (b) Perfil do índice de vazios (e) a cada metro do perfil de solo. (c) peso | |

| | |
|--|-----|
| específico dos grãos (γ_s) a cada metro do perfil de solo, (d) Índice de plasticidade (IP) a cada metro do perfil de solo e peso específico aparente seco (γ_s) a cada metro do perfil de solo..... | 83 |
| Figura 3.5 – Fluxograma de caracterização geotécnica do solo do antigo campo experimental do Programa de Pós-graduação da UnB..... | 84 |
| Figura 3.6 – (a) Datalogger <i>Kd2-Pro da Decagon</i> , (b) Sonda TR-1 e (c) Sonda SH-1..... | 85 |
| Figura 3.7 – (a) Solo coletado seco em estufa e destorroado para moldagem. (b) Moldes de amostras em corpos de prova de dimensões 5x10cm nas cinco massas específicas aparente secas..... | 86 |
| Figura 3.8 – Cilindros de compactação e molde de corpo de prova (5x10cm) para moldagem das amostras..... | 86 |
| Figura 3.9 – Compactação estática para altas densidades na prensa CBR..... | 87 |
| Figura 3.10 – (a) Saturação dos corpos de prova. (b) secagem parcial na estufa dos corpos de prova..... | 88 |
| Figura 3.11 – (a) Pesagem da amostra após secagem parcial na estufa. (b) Inserção da sonda no corpo de prova. (c) inserção do corpo de prova na câmara isolada termicamente com EPS. (d) Execução do saio..... | 89 |
| Figura 3.12 – (a) Setup de ensaio de condutividade térmica com a sonda TR-1. (b) Setup de ensaio de capacidade térmica com sonda SH-1. (Imagem fora de escala)..... | 90 |
| Figura 3.13 – Plotagem das condições de moldagem dos corpos de prova para análise térmica comparado com a curva de compactação obtida por Queiroz (2015)..... | 90 |
| Figura 3.14 – Fluxograma de método desenvolvido para realização de ensaios de condutividade térmica e capacidade térmica do solo estudado..... | 93 |
| Figura 3.15 – (a) Vista em perspectiva do projeto de bancada TRT para laboratório. (b) Vista superior da bancada e (c) Corte C-C da câmara térmica com dimensões de projeto..... | 95 |
| Figura 3.16 – (a) Bancada de ensaios do equipamento de ensaio TRT e da câmara térmica isolada. (b) Vista superior da câmara térmica com as conexões da tubulação da estaca. (c) Componentes principais do equipamento de ensaio TRT na bancada de ensaios..... | 96 |
| Figura 3.17 – Diagrama da planta hidráulica do equipamento de ensaio TRT desenvolvido nesta tese..... | 97 |
| Figura 3.18: Fluxograma de circulação hidráulica do equipamento de ensaio TRT..... | 98 |
| Figura 3.19 – (a) <i>Setup</i> do equipamento de ensaio TRT utilizada nesta pesquisa. (b) Detalhe dos materiais e dos respectivos diâmetros nominais do equipamento de ensaio TRT. (c) Detalhamento da conexão das mangueiras na estaca. | 99 |
| Figura 3.20 – Algoritmo do controle lógico do equipamento de ensaio TRT..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.21 – Módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT..... | 102 |
| Figura 3.22 – Diagrama elétrico interno no módulo de segurança do equipamento de ensaio TRT..... | 103 |
| Figura 3.23 – Diagrama elétrico de ligação do módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT..... | 104 |
| Figura 3.24 – Sistema de controle e medição de potência térmica injetada no ensaio TRT. (a) Wattímetro tipo alicate. (b) Variador de tensão 2,5kVa..... | 105 |
| Figura 3.25 – (a) Camadas com alturas medias estimadas de compactação da câmara termicamente isolada. (b) Imagem real câmara com isolamento térmico..... | 107 |
| Figura 3.26 – Fluxograma do procedimento padrão de controle de compactação do solo na câmara térmica..... | 108 |
| Figura 3.27 – (a) Detalhamento do compactador manual. (b) Processo de compactação manual realizado por camada..... | 109 |
| Figura 3.28 – (a) Locação dos cilindros de cravação sobre a camada de solo. (b) Soquete cravador. (c) Cilindro com amostra após cravação..... | 110 |
| Figura 3.29 – Fluxograma de calibrações de sensores de temperatura e sensor de vazão..... | 111 |
| Figura 3.30 – (a) Sensor de temperatura digital DS18B20. (b) Termopar tipo K..... | 111 |
| Figura 3.31 – Sistemas de aquisição de dados utilizados nesta tese, (a) PICO – 08, (b) HT 9815 e (c) Datalogger 10 canais em plataforma Arduino..... | 112 |
| Figura 3.32 – Sensores de vazão utilizados no o equipamento de ensaios TRT: (a) PIUSI–2120-RU e (b) SEA para Arduíno..... | 113 |
| Figura 3.33 – (a) Aferidor COBEL 0315 de 20 L padrão. (b) medidor PIUSI sendo calibrado com o aferidor de 20 L e (c) processo de medição de água no aferidor padrão de 20 L..... | 113 |
| Figura 3.34 – (a) Comparação da medição de vazão em função da frequência de trabalho da bomba para o sensor de referência e o sensor utilizado no o equipamento de ensaios TRT, lido na plataforma Arduíno. (b) Curva de calibração do sensor de vazão no o equipamento de ensaios TRT..... | 114 |
| Figura 3.35 – Posições e disposição de instalação de sensores de temperatura em cada camada da câmara térmica. (a) Camada 2-3 (b) Camada 6-7 (c) Camada 11-12..... | 116 |
| Figura 3.36 – (a) Disposição dos sensores de temperatura na camada 6-7 da câmara térmica. (b) Sensor de temperatura DS18B20 com pasta térmica na superfície..... | 116 |
| Figura 3.37 – Disposição dos sensores de temperatura na câmara nas principais camadas no eixo x-z, (a) corte A-A e (b) Corte B-B..... | 117 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.38 – Instrumentação com termopar na interface Tubo/Concreto do protótipo..... | 118 |
| Figura 3.39 – Instalação de sensores na interface do protótipo (Concreto/Solo) de estaca executada na câmara..... | 118 |
| Figura 3.40 – (a) Armação do protótipo de estaca trocadora de calor com tubulação instalada. (b) Curvas e conexões utilizadas nos U's do protótipo. (c) Conexões de entrada e saída dos tubos do protótipo de estaca..... | 120 |
| Figura 3.41 – Esquema de distribuição de conexões dos jumpers nos protótipos de estacas trocadoras de calor em: (a) 1U, (b) 2U, e (c) 4U..... | 121 |
| Figura 3.42 – (a) Perfuração do solo compactado na câmara com trado manual em uma extensão de 1m, (b) inserção da armação do protótipo no furo executado e armação com espaçadores de 3cm e instrumentada com termopares em sua estrutura (c)..... | 121 |
| Figura 3.43 – (a) processo de concretagem do protótipo de estaca. (b) Vibração do concreto e (c) detalhamento do protótipo concretado e instrumentado..... | 122 |
| Figura 3.44 – Locação dos furos realizados para coleta de solo para medição da umidade a cada 24 horas de ensaio..... | 123 |
| Figura 3.45–Padronização de nomenclatura dos ensaios TRT realizados na câmara térmica. | 124 |
| Figura 3.46 – Fluxograma com os principais ensaios TRT realizados na câmara térmica..... | 125 |
| Figura 3.47 – (a) Locação do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, executado nesta pesquisa. (b) croqui do laboratório com a localização interna do furo de sondagem SPT no laboratório de estruturas e hidráulica da Faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília (SG13)..... | 126 |
| Figura 3.48 – (a) Dimensões de locação dos termopares tipo K ao longo da profundidade do poço de monitoramento de temperatura do subsolo. (b) Execução da vara de PVC com os sensores..... | 127 |
| Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo laterítico do antigo campo experimental proposto, e comparativo com trabalhos de Guimarães (2022) e Borges (2014)..... | 130 |
| Figura 4.2–Resultado dos principais óxidos presentes nos minerais do solo laterítico estudado..... | 131 |
| Figura 4.3 – Variação da umidade por camada na compactação do solo na câmara térmica de ensaios..... | 133 |
| Figura 4.4 – (a) Condutividade térmica do solo em função da umidade, (b) condutividade térmica do solo em função do grau de saturação e (c) Condutividade térmica em função do teor de umidade volumétrica..... | 135 |
| Figura 4.5 – (a) Condutividade térmica em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade, (b) umidade volumétrica - θ_w e (c) do grau de saturação - $S_r(\%)$ do solo laterítico estudado nesta tese..... | 137 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.6 – (a) Comportamento da capacidade térmica do solo laterítico em função da umidade, (b) Capacidade térmica do solo em função do teor de umidade volumétrica, (c) Capacidade térmica em função da saturação..... | 141 |
| Figura 4.7 – Capacidade térmica volumétrica (C_v) em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade (a), umidade volumétrica (b) e do grau de saturação (%) do solo laterítico estudado nesta tese..... | 143 |
| Figura 4.8 – Difusividade térmica do solo laterítico estudado em função do teor de umidade volumétrica (θ_w) e do grau de saturação relativo (S_r)..... | 145 |
| Figura 4.9 – Condutividade térmica em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade (a), umidade volumétrica (b) e do grau de saturação (%) do solo laterítico estudado nesta tese..... | 146 |
| Figura 4.10 – Comparação do método de Johansen (1977) em relação aos dados experimentais desta tese..... | 149 |
| Figura 4.11 – O número de Kersten medido e ajustado versus a saturação relativa para solos arenosos e siltosos ($\kappa= 3,55$) solos argilosos ($\kappa= 1,9$) com melhor ajuste para solo tropical de Brasília desenvolvido nesta tese ($\kappa= 2,5$)..... | 150 |
| Figura 4.12 – Comparação entre o coeficiente de condutividade térmica normalizado medido de forma experimental desta tese e modelado por Lu <i>et al.</i> (2007) em função da saturação relativa do solo para as cinco condições de massa específica aparente seca estudado nesta tese..... | 151 |
| Figura 4.13 – Ajuste da condutividade térmica normalizada dos dados medidos em laboratório do solo laterítico de Brasília..... | 152 |
| Figura 4.14 – (a) Ajuste da condutividade térmica residual - λ_r (na condição seca) do solo laterítico em função da massa específica aparente seca - ρ_d . (b) ajuste da condutividade térmica do solo laterítico na condição saturada (λ_s) em função da massa específica aparente seca do solo laterítico estudado..... | 153 |
| Figura 4.15 – Comparativo entre os resultados medidos em laboratório da condutividade térmica do solo laterítico estudado nesta tese com os dados previstos de condutividade térmica do solo a partir modelo desenvolvido nesta tese..... | 154 |
| Figura 4.16 – Comparativo da condutividade térmica do solo laterítico com os principais métodos de estimativa de condutividade térmica para solos finos, em $1,09 \text{ g/cm}^3$ (a); $1,3 \text{ g/cm}^3$ (b); $1,48 \text{ g/cm}^3$ (c); $1,64 \text{ g/cm}^3$ (d) e $1,75 \text{ g/cm}^3$ (e)..... | 157 |
| Figura 4.17 – Comparativo da condutividade térmica do solo laterítico com os principais métodos de estimativa de condutividade térmica para solos finos, em $1,09 \text{ g/cm}^3$ (a); $1,3 \text{ g/cm}^3$ (b); $1,48 \text{ g/cm}^3$ (c); $1,64 \text{ g/cm}^3$ (d) e $1,75 \text{ g/cm}^3$ (e)..... | 160 |
| Figura 4.18 – Resultados dos erros quadráticos médios (RMSE), dos principais métodos abordados na tese, em ordem crescente de grau de importância..... | 161 |
| Figura 4.19 – (a) ensaio TRT1UQ3S80, (b) ensaio TRT1UQ6S80, (c) ensaio TRT1UQ12S80; (d) ensaio TRT1UQ3S33; (e) TRT1UQ6S33; (f) TRT1UQ12S33..... | 165 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.20 – Taxa de calor média por metro de estaca (q) para todos os ensaios TRT realizados nessa tese..... | 167 |
| Figura 4.21 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo c a estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 80% (1UQ3S80)..... | 169 |
| Figura 4.22 – (a) aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A. (b) aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B..... | 171 |
| Figura 4.23 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 33% (1UQ3S33)..... | 172 |
| Figura 4.24 – (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes instantes de tempo de ensaio na direção A-A para o ensaio 1UQ3S33. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes instantes de tempo de ensaio na direção B-B para o ensaio 1UQ3S33..... | 173 |
| Figura 4.25 – Comparativo entre as assimetrias na dissipação de calor no solo no espaço tempo para os ensaios 1UQ3S80 e 1UQ3S33..... | 175 |
| Figura 4.26 – Comparativo de gradiente de temperatura no espaço tempo para os ensaios na condição saturada (80%) e vazão 3,06 l/min para as configurações 1U, 2U e 4U, referente aos ensaios 1UQ3S80, 2UQ3S80 e 4UQ3S80, respectivamente..... | 172 |
| Figura 4.27 – Comparativo de gradiente de temperatura no espaço tempo para os ensaios na condição saturada (33%) e vazão 3,06 l/min para as configurações 1U, 2U e 4U, referente aos ensaios 1UQ3S33, 2UQ3S33 e 4UQ3S33, respectivamente..... | 178 |
| Figura 4.28 – Comparativo geral dos gráficos de resposta térmica adimensional (Φ_g) na face das estacas em função do tempo adimensional (F_o) nas direções A-A e B-B, na configuração 1U, para os ensaios 1UQ3S80 (a), 1UQ6S80 (b) 1UQ12S80 (c) 1UQ3S33 (d), 1UQ6S33 (e) e 1UQ12S33 (f), respectivamente..... | 181 |
| Figura 4.29 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (F_o), na configuração 2U, para os ensaios 2UQ3S80 (a), 2UQ6S80 (b) 2UQ12S80 (c) 2UQ3S33 (d), 2UQ6S33 (e) e 2UQ12S33 (f), respectivamente..... | 183 |
| Figura 4.30 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (F_o), na configuração 4U, para os ensaios 4UQ3S80 (a), 4UQ3S33 (b), 4UQ6S33 (c) e 4UQ12S33 (d) respectivamente..... | 185 |
| Figura 4.31 – a) Resposta térmica adimensional média ($\Phi_{gMédia}$) na face das estacas para ensaios na configuração 1U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (1UQ3S80, 1UQ6S80 e 1UQ12S80) e (b) resposta térmica adimensional média ($\Phi_{gMédia}$) na face das estacas para ensaios na configuração 1U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33)..... | 187 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.32 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{g,Média}$) em função do tempo adimensional (Fo) na configuração 1U variando a vazão (3,06; 6,16 e 12,41 l/min) e o grau de saturação (33% e 80%) para os ensaios TRT 1UQ3S80, 1UQ6S80, 1UQ12S80, 1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33..... | 189 |
| Figura 4.33 – (a) Resposta térmica adimensional média na face das estacas para ensaios na configuração 2U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (2UQ3S80, 2UQ6S80 e 2UQ12S80) e (b) resposta térmica adimensional média na face das estacas para ensaios na configuração 2U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (2UQ3S33, 2UQ6S33 e 2UQ12S33)..... | 191 |
| Figura 4.34 – Resposta térmica adimensional média ($\Phi_{g,Média}$) na face das estacas para ensaios na configuração 4U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição não saturada (4UQ3S33, 4UQ6S33 e 4UQ12S33)..... | 193 |
| Figura 4.35 – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 3,06 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente..... | 195 |
| Figura 4.36 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{g,Média}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 3,06 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%)..... | 196 |
| Figura 4.37 – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 6,16 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente..... | 197 |
| Figura 4.38 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{g,Média}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 6,16 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%)..... | 198 |
| Figura 4.39. – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 12,41 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente..... | 199 |
| Figura 4.40 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{g,Média}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 3,06 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%)..... | 200 |
| Figura 4.41 – (a) Distribuição da resistência térmica (R_i) em função do tempo para os materiais envolvidos no protótipo de estaca trocadora de calor para o ensaio TRT 1UQ3S80 e (b) a distribuição relativa das contribuições das resistências térmicas de cada componente da estaca trocadora de calor..... | 201 |
| Figura 4.42: Comparativo da variação das resistências térmicas (R_{conv} , R_{tubo} , R_c , R_{estaca} , R_{solo} e R_{total}) referente aos ensaios TRT variando a vazão (3,06; 6,12 e 12,41 l/min) na condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$) para a configuração de tubos ativos 1U(a), 2U (b) e 4U (c)..... | 203 |

Figura 4.43 – Comparativo da resistência térmica relativa (R_i/R_{estaca}) dos principais trechos presentes nos ensaios TRT realizados nessa tese, para a configuração 1U (a), 2U (b) e 4U (b).....204

Figura 4.44 – Medição da temperatura do subsolo com profundidade para 10 dias, nos meses de agosto e setembro de 2020.....206

\

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

| | |
|-----------------|------------------------------|
| °C | Grau célsius |
| 1D | unidimensional |
| 2D | bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| A | Ampere |
| cm ³ | Centímetro cúbico |
| Cv | Cavalo vapor |
| F | Fase |
| g | Gramma |
| G | Aterramento |
| J | Joule |
| K | Kelvin |
| kV | kilovolt |
| kVa | kilovolt Ampere |
| kW | kilowatt |
| KWh | Kilowatt hora |
| L | Litro |
| L/D | Esbeltez |
| M | Mega |
| m | Metro linear |
| m ² | Metro quadrado |
| m ³ | Metro cúbico |
| mA | Miliamperes |
| min | Minuto |
| mm | milímetro |
| Mpa | Mega Pascal |
| N | Neutro |
| PSI | Libras por polegada quadrada |
| V | Volume |
| W | Watts |

Siglas

| | |
|-----------|---|
| ABCP | Associação brasileira de cimento Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CBR | California Bearing Ratio |
| CP | Cimento Portland |
| CP's | Corpos de prova |
| CD | Com defloculante |
| CL-ML | Argila siltosa de baixa compressibilidade |
| EESC | Escola de Engenharia de São Carlos |
| EPS | Poliestireno |
| FRX | Fluorescência de raio X |
| GEPS | Geothermal energy piles |
| GSHP | Ground source heat pump |
| IF Goiano | Instituto Federal Goiano |
| ILS | Infinite line source |
| IoT | Internet das coisas |
| IP | Índice de plasticidade |
| LL | Limite de liquidez |
| LP | Limite de plasticidade |
| LTC | Laboratório de transferência de calor |
| MCT | Miniatura compactado tropical |
| PEAD | Polietileno de alta densidade |
| PPG | Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil |
| PVC | Policloreto de Vinila |
| PWM | Pulse with modulation |
| RMSE | Root mean square error |
| SD | Sem defloculante |
| SGEP | Sistemas geotérmicos profundos |
| SGES | Sistema geotérmico superficial |
| SPT | Standart penetration test |
| SUCS | Sistema unificado de classificação dos solos |

| | |
|------|---|
| TRT | Thermal response test |
| UENF | Universidade Estadual do Norte Fluminense |
| UFRN | Universidade Federal do Rio Grande do Norte |
| UnB | Universidade de Brasília |
| USP | Universidade de São Paulo |
| USB | Porta serial universal |

Símbolos – Alfabeto Latino

| | |
|-----------------|---|
| A_t | Área da seção transversal que passa o fluxo de calor |
| a, b, c, d, e | Parâmetros de ajuste da curva de resposta térmica |
| A_s | Área superficial do corpo |
| A, B | Parâmetros geotécnicos da equação polinomial de cond. térmica do solo |
| a/c | Relação água-cimento, em massa |
| C | Capacitância térmica |
| C_c | Calor específico mássico |
| C_p | Calor específico |
| C_v | Capacidade térmica volumétrica |
| C_{va} | Capacidade térmica volumétrica do ar |
| C_{vs} | Capacidade térmica volumétrica dos sólidos |
| C_{vw} | Capacidade térmica volumétrica da água |
| $c_{\%}$ | Porcentagem de argila presente no solo |
| c_p | Calor específico da fluido circulante na tubulação |
| c_c | Calor específico mássico |
| c_v | Calor específico volumétrico |
| D | Diâmetro da estaca |
| e | Índice de vazios |
| f | Fator de atrito do fluido nas paredes do tubo |
| F_{ck} | Resistência característica a compressão do concreto |
| F_o | Número de Fourier |
| G_c | Função G do concreto; |
| G_g | Função G do solo. |

| | |
|------------------|---|
| G_s | Densidade das partículas sólidas do solo |
| h | Coefficiente de troca térmica por convecção |
| h_i | coeficiente de convecção no tubo |
| K_e | Número de Kersten |
| k_f | Condutividade térmica do fluido |
| L | Comprimento do elemento geotérmico |
| L_c | Comprimento característico da geometria de escoamento do fluido |
| \dot{m} | Vazão mássica de circulação do fluido no interior da tubulação |
| m_c | Massa do corpo |
| n | Porosidade do solo |
| Nu | Número de Nusselt |
| n | Número de tubos na estaca |
| Pr | Número de Prandtl |
| P_{solo} | Peso da amostra de solo |
| \dot{q}_{cond} | Taxa de calor trocado por condução |
| \dot{q}_{conv} | Taxa de calor trocado por conexão |
| \dot{Q} | Taxa de calor média do ensaio TRT |
| \dot{Q} | Fluxo de calor total trocado pela estaca no ensaio TRT |
| Q | Energia de calor trocado com o meio |
| q | Fluxo de energia |
| \dot{q} | Fluxo de calor obtido no ensaio TRT por metro de estaca |
| $q\%$ | Porcentagem de quartzo |
| r_{ext} | Raio externo |
| r_{int} | Raio interno |
| R_{Tcond} | Resistência térmica de condução do tubo |
| R_c | Resistência térmica do concreto |
| R_t | Resistência térmica do tubo |
| R_c | Resistência do concreto |
| Re | Número de Reynolds |
| r_{int} | raio interno do tubo |
| R_s | Resistência do solo |
| R_{Tcond} | Resistência térmica a condução do tubo |

| | |
|------------------|--|
| R_{Tconv} | Resistência térmica a convecção do tubo |
| S_r | Saturação relativa do solo |
| t | Tempo |
| \bar{T}_{pa} | Temperatura média da face da estaca |
| \bar{T}_{tubo} | Temperatura média dos limites do tubo |
| T_{in} | Temperatura do fluido na entrada do tubo da estaca |
| T_{out} | Temperatura do fluido na saída do tubo da estaca |
| T_{amb} | Temperatura ambiente |
| T_{cont} | Temperatura de controle |
| T_e | Temperatura da estaca |
| T_{ex} | Temperatura externa do tubo |
| T_f | Temperatura do fluido |
| T_{seg} | Temperatura de segurança |
| T_{ti} | Temperatura interna do tubo |
| V_c | Volume do corpo |
| V_m | Velocidade do fluido a montante do escoamento |
| V_{ar} | Volume de ar |
| V_c | Volume do corpo |
| V_s | Volume de sólidos |
| V_t | Volume total do solo |
| V_w | Volume de água |
| V | Velocidade a montante do escoamento livre do fluido |
| w_n | Umidade do solo |
| w_s | Umidade relativa do solo |
| X_a | Componente de proporção volumétrica da fração de ar |
| X_s | Componente de proporção volumétrica da fração de sólidos |
| X_w | Componente de proporção volumétrica da fração de água |

Símbolos – Alfabeto Grego

| | |
|------------|-----------------------|
| α_t | Difusividade térmica |
| λ | Condutividade térmica |

| | |
|-----------------------|---|
| λ_d | Condutividade térmica do solo na condição seca |
| λ_o | Condutividade térmica de outros minerais presentes no solo |
| λ_q | Condutividade térmica do quartzo |
| λ_s | Condutividade térmica das partículas sólidas do solo |
| λ_{sat} | Condutividade térmica do solo na condição saturada |
| λ_w | Condutividade térmica da água |
| ∇T | Gradiente normal de temperatura |
| β | Fator forma de Lu et al (2007) |
| Δ | Variação |
| ΔT | Variação de temperatura |
| ΔT_f | Variação de temperatura do fluido |
| ΔT_{tubo} | Variação de temperatura na parede do tubo |
| $\Delta T_{concreto}$ | Variação de temperatura do cobrimento do concreto |
| ΔT_{solo} | Variação de temperatura dada uma distância radial de solo. |
| θ_w | Umidade volumétrica do solo |
| λ_{conc} | Condutividade térmica do concreto |
| λ_g | Condutividade térmica do solo |
| λ_{tubo} | Condutividade térmica do tubo |
| ρ_d | Massa específica aparente seca |
| ρ_f | Massa específica do fluido |
| Φ_g | Temperatura adimensional |
| α | Parâmetro de ajuste de Lu et al (2007) |
| η | Parâmetro de forma |
| γ_s | Peso específico dos sólidos |
| κ | Parâmetro de ajuste de textura do solo |
| μ | Viscosidade dinâmica do fluido |
| ν | Viscosidade cinemática do fluido |
| χ | Parâmetro de forma das partículas do solo |
| $\Delta T_{concreto}$ | Variação de temperatura no cobrimento de concreto |
| ΔT_f | Variação de temperatura interna do fluido no tubo da estaca |
| ΔT_{solo} | Variação de temperatura no solo |
| ΔT_{tubo} | Variação de temperatura na parede do tubo |

1. INTRODUÇÃO

A diminuição de emissão de gases na atmosfera tem sido uma preocupação mundial emergente. Isso se deu, devido as recentes observações na mudança das condições climáticas no mundo. Não obstante, em grande parte de países no mundo os sistemas de climatização em superestruturas de engenharia têm exigido uma quantidade considerável de fontes de energia poluentes e não renováveis. Nesse sentido, muitos países dentro e fora do continente europeu estão utilizando sistemas de bombas de calor de fonte subterrânea (*Ground Source Heat Pumps – GSHP*) como uma alternativa sustentável de mitigar a emissão carbono na atmosfera (Sani *et al.*, 2019).

Para a utilização de sistemas GSHP, é necessário o uso de estruturas geotérmicas termo ativas, na qual possuem como objetivos, além de cumprir sua finalidade geotécnica, cumprir com a finalidade de troca de calor de forma eficiente entre a infraestrutura (fundação) e o meio geológico (solo ou rocha) que pode ser extraída ou dissipada. A isso é definido os sistemas geotérmicos superficiais (SGES) ou sistemas geotérmicos profundos (SGEP)

As estruturas termo ativas são limitadas quanto a eficiência de troca térmica, na qual depende tanto de fatores geotécnicos, geométricos e geotérmicos, ou seja: dos materiais envolvidos no sistema trocador de calor (Loveridge & Powrie, 2016).

Não obstante, o primeiro sistema trocador de calor geotérmico documentado quanto ao uso no solo como fonte de troca de calor da era moderna, foi em 1912 na Suíça. Naquela época, a eficiência das bombas de calor era baixa e o preço do kilowatt hora (kW.h) também era muito baixo o que não se justificava aplicação da tecnologia em termos de eficiência energética. Por conseguinte, o uso comercial da tecnologia começou somente após a primeira crise do petróleo em 1973 (Sykulski, 1999).

Sesse sentido, um sistema geotérmico trocador de calor (GSHP) pode ser dividido basicamente em dois circuitos: o circuito primário e secundário. O circuito primário consiste na rede de tubulações que são inseridas na zona da fonte geotérmica, já o circuito secundário consiste no sistema de tubulações que estão dispostas na superestrutura, na qual compreende-se toda a instalação térmica de sistemas de ar condicionados de uma edificação (Brandl, 2006).

Inicialmente, o circuito primário dos GSHP era composto por apenas um único furo no solo no qual eram inseridas tubulações que se encontravam em contato direto com o subsolo

durante a troca térmica, tais sistemas eram conhecidos como “poços provençais”. O problema dessa forma de aplicação está no alto custo relativo inerente a execução do furo para instalar a tubulação do sistema primário, uma vez que a profundidade do furo se dá em profundidades que muitas vezes ultrapassam 80 m.

Nesse interim, com finalidade de vencer essa dificuldade, surgiram alternativas de aplicação da tecnologia em estruturas geotérmicas termo ativas por meio de estruturas de fundações superficiais e profundas, estruturas de contenção, túneis, pavimentos rodoviários, etc., na qual aproveita-se a fase das escavações necessárias para a execução das estruturas geotécnicas, onde os tubos trocadores de calor do circuito primário são instalados e executados juntamente com a própria armação do elemento estrutural, que por sua vez encontra-se em contato direto com o subsolo, podendo-se eliminar a necessidade de escavações adicionais anteriormente citado. Tal artifício, consiste em gerar economia de custo de mão de obra no processo executivo das estruturas geotérmicas (Morais *et al.*, 2020).

Foi somente a partir da década de 80 que os sistemas geotérmicos de bombas de calor (GSHP) ou *Geothermal Energy Piles* (GEPS) passaram a ser acoplados a sistemas de fundações em países de clima temperado (Brandl, 2006). Para regiões tropicais, ainda não há um conhecimento pleno e consolidado do uso desta tecnologia, suas peculiaridades e desafios inerentes ao uso em regiões tropicais como no Brasil (Cunha, 2019).

Ademais, um dos parâmetros fundamentais para dimensionamento de sistemas GSHP, está a condutividade térmica do solo, que nada mais é do que a quantidade de energia de natureza térmica que o sistema consegue trocar com o meio geotécnico por metro de comprimento para elevação de 1 Kelvin de temperatura, dado por W/m.K. Neste sentido, a estimativa e determinação das propriedades térmicas dos materiais geotécnicos e estruturais envolvidos *in situ* são preocupações iminentes para se obter um dimensionamento geotérmico adequado para um sistema GSHP, que forneça a eficiência adequada na troca de calor.

A doutrina geotécnica mostra diversas formas de se estimar a condutividade térmica, capacidade térmica e a difusividade térmica dos materiais estruturais e geotécnicos envolvidos em um trocador de calor geotérmico. Sendo assim, para o caso de estacas e sistemas verticais trocadores de calor, tais propriedades podem ser obtidas tanto em laboratório, por meio de coleta de amostras, ou *in situ*, por meio de ensaios de resposta térmica - TRT (*Thermal Response Test*).

Para o uso de estacas trocadoras de calor o ensaio TRT consiste em impor uma convecção forçada interna sobre um fluxo de calor constante no interior do tubo, por meio da circulação de água quente em circuito fechado, com o auxílio de uma bomba hidráulica. Com isso, é por meio do ensaio TRT que o projetista consegue estimar (com ressalvas de acurácia) a condutividade térmica do solo.

Não obstante, seguindo Loveridge & Powrie (2013), a interpretação do ensaio TRT considera hipóteses e simplificações usuais da equação geral de calor, onde considera-se o meio de troca térmica linear e infinito, na qual trata-se o sistema geotérmico como uma agulha infinita, com esbeltez (L/D) mínima da ordem de 1000, hipótese um tanto exagerada para situações de uso em estacas convencionais, uma vez que a esbeltez de estacas (GEP) está em uma ordem de grandeza entre 10 e 50. Uma outra hipótese de simplificação da equação de calor importante a ser levado em conta, está na consideração da distribuição da temperatura ocorrer de maneira uniforme ao longo da face da estaca, uma vez que tal situação não ocorre, principalmente em configurações convencionais do tipo 1U (Loveridge & Powrie, 2013).

Neste sentido, tal situação dificulta o uso da equação de forma convencional do ensaio TRT em estacas térmicas que proporcione uma estimativa acurada da condutividade térmica. Sendo assim, uma alternativa de método de interpretação mais acurada para casos de estacas trocadoras de calor, é o conceito da utilização da Função G (*G-Function*) na equação de calor, amplamente estudado por Loveridge & Powrie (2013), Loveridge & Powrie (2014a), Loveridge & Powrie (2014b) Alberdi-Pagola *et al* (2018a) e Alberdi-Pagola *et al* (2018b).

Portanto, neste trabalho será dado maior ênfase apenas no estudo do comportamento térmico aplicado a estacas trocadoras de calor em solos tropicais em duas condições de grau de saturação, por meio do desenvolvimento de protótipos de estacas em ambiente controlado de laboratório, a fim de contribuir com os demais estudos já desenvolvidos no país pelos principais centros de pesquisa na área.

1.1 Contexto Geral

Laloui & Loria (2020) apresentam uma extensa completa e atual revisão bibliográfica de diversas pesquisas ao longo do mundo, na qual mostram o crescimento acumulado do número de projetos de estacas trocadoras de calor até o ano de 2018, na qual é mostrado a quantidade de dióxido de carbono economizado em consequência da contribuição do aumento

da utilização de estacas trocadoras de calor (Figura 1.1). Pode-se observar significativas diminuições, a partir de 2006, da emissão de CO₂ na atmosfera (Figura 1.1b), todos associados ao aumento acumulado do número de projetos implementados de estacas trocadoras de calor (Figura 1.1a).

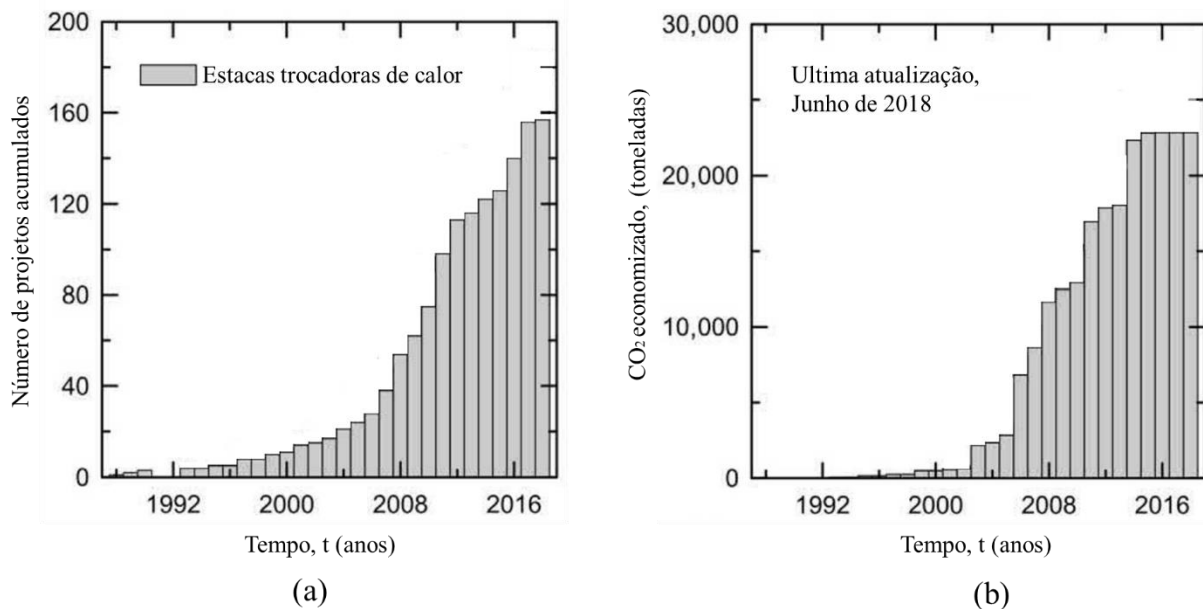


Figura 1.1 – a) Número de projetos acumulados no ocidente ao longo dos anos, (b) Número de emissão de CO₂ economizados na atmosfera, em toneladas, ao longo do tempo (Adaptado de Laloui & Loria (2020)).

Ante ao exposto na Figura 1.1, mostra-se que a implementação e uso de estacas trocadoras de calor, como uso eficiente de energia, pode contribuir de forma sustentável para o balanço de emissão de CO₂ de um país, tal correlação é um forte indício de economia de CO₂ no estabelecimento das demandas dos acordos internacionais energéticos existentes.

Vários pesquisadores no mundo vêm desenvolvendo estudos de estacas trocadoras de calor, tanto em laboratório (por meio de modelos reduzidos) quanto em âmbito de ensaios de campo em verdadeira grandeza. Eles avaliaram tanto o comportamento do desempenho térmico quanto em termos de comportamento termomecânico de estacas trocadoras de calor. Trabalhos como Brandl (2006), Laloui *et al* (2006), Laloui & Moreni (1999), Bourne-Webb *et al.* (2009), Amatya *et al* (2012), Akrouch *et al.* (2014), McCartney & Murphy (2012), Murphy *et al.* (2015), Murphy & McCartney (2015), McCartney & Murphy (2017), Szymkiewicz *et al.* (2015), You *et al.* (2016), Allani *et al.* (2017), Bourne-Webb & Bodas Freitas (2019), Bourne-Webb (2020), Li *et al.* (2021), Laloui & Sutman (2021), Saboya *et al.* (2022), Thomas & Rees

(1999), Roth *et al.* (2004), Schnurer *et al.* (2006) entre outros, estudaram sistematicamente o tema, tanto a nível de comportamento termomecânico quanto a nível de desempenho térmico.

Atualmente no Brasil, há registro de utilização da tecnologia a nível de mercado na cidade de São Paulo, por meio do grupo de pesquisa da USP de São Carlos. Pode-se destacar também algumas pesquisas acadêmicas recentes nos principais centros de pesquisa do país, tais como: Orozco (2016) e Souza Junior (2017), Cunha (2019), Cunha *et al.* (2020), Chaves *et al.* (2022) e Cunha & Bourne-Webb (2022) na Universidade de Brasília -UnB. Morais *et al.* (2019) e Sani *et al.* (2019), Cardoso *et al.* (2022) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), e Ferreira (2017), Santos (2020), Saboya *et al.* (2022) e Leite (2022), da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF.

1.2 Justificativa

O aumento do consumo de energia elétrica a nível mundial está diretamente relacionado ao crescimento da utilização de sistemas de climatização em edifícios comerciais, residenciais e industriais. Desenvolver um estudo que aborde eficiência desses sistemas de climatização podem trazer benefícios econômicos e ambientais a sociedade brasileira.

Nesse sentido, a utilização da geotermia de baixa entalpia tem se apresentado como uma alternativa interessante quanto ao aumento da eficiência de aparelhos de climatização e conseqüentemente, para a economia de energia elétrica primária, em que no caso do Brasil, está relacionado principalmente a fontes hidrelétricas e termoelétricas.

Além disso, devido à crise hídrica dos últimos anos no Brasil, bem como a crise pandêmica do COVID-19, acrescido a recente guerra entre a Rússia e a Ucrânia, tem sido fatores que tem contribuído de forma significativa para a inflação do quilowatt hora (kWh) no consumo de energia elétrica a nível mundial. Tal situação tem sido catalizadora para a busca de novas ideias no âmbito de consumo eficiente de energia elétrica. O que torna oportuno investigar o uso de estacas trocadoras de calor como uma das alternativas de solução que mitiguem tal contexto de crise de forma a contribuir no reestabelecimento de um novo equilíbrio ambiental e econômico no Brasil e no mundo.

Não obstante, apesar de usar energia renovável como fonte primária, o Brasil produz cerca de 1,3% da quantidade total de gases de efeito estufa no mundo. Esse valor não isenta o país da emenda de Doha ao Protocolo de Kyoto, que exigiu uma diminuição de 18% de níveis

de 1990 até 2020 (Kyoto, 2012). Logo, percebe-se que este trabalho traz também consideráveis contribuições frente a interesses de política internacional.

Ante ao exposto, uma alternativa de solução é o uso de sistemas geotérmicos por meio de sistemas de estacas trocadoras de calor (GEPS). No entanto, as incertezas ainda são altas sobre a tecnologia.

Segundo Cunha (2019) e Cunha & Bourne Webb (2022) embora atraente em teoria e bastante antiga em princípio, a tecnologia por trás do uso de estacas geotérmicas em construções civis permanece ainda pouco estabelecida, podendo-se destacar tais incertezas quanto ao uso seguro da tecnologia, tais como: parâmetros de projeto, diretrizes de operação, análises de simulação, modelos teóricos, falta de legislação que regule o uso da tecnologia, e quanto a esta última, ainda não é totalmente clara quanto ao seu uso, mesmo em países onde a tecnologia é mais avançada.

Ademais, ainda falta uma melhor compreensão sobre os aspectos térmicos e geotécnicos da incorporação da tecnologia a fundações, além de informações confiáveis sobre o desempenho em condições duradouras. Pode-se dizer também que modelos e ferramentas de simulação que abrangem os aspectos hidrotérmicos em sistemas de estacas trocadoras de calor, também não são totalmente estabelecidos e abordados de forma plena na bibliografia geral da geotecnia. Na qual foca-se mais em estudos de comportamento termomecânico de sistemas de estacas térmicas.

Nesse sentido, ainda há grandes lacunas na esfera legal em termos de diretrizes, operação e controle do uso da tecnologia em construção civil. Sendo assim, ainda não existe uma estrutura comum de projeto, construção e regulamentação local ou jurisprudência para permitir uma implementação padronizada dos sistemas de estacas trocadoras de calor no Brasil (Cunha, 2019).

Não obstante, a falta de entendimento geral atua, sem dúvida, como uma barreira para o investimento, uma vez que cada projeto é único, considerando a variedade de questões interdisciplinares envolvidas e as condições regionais. A conscientização pública e o impulso político também são limitados ou inexistentes na maioria dos países. Em outras palavras, é uma técnica antiga, porém ainda incompreendida em sua totalidade nos tempos modernos (Cunha, 2019 e Cunha & Bourne Webb, 2022).

Ademais, o estudo das propriedades térmicas dos solos é assunto de altíssima relevância na área geotécnica. Duarte (2004) lista algumas aplicações técnicas na engenharia geotécnica que justificam a necessidade de se estudar as propriedades térmicas dos solos.

- Problemas em relação a transporte de fluidos aquecidos em tubulações subterrâneas;
- Aproveitamento de energia geotérmica;
Armazenamento de energia em leitos granulares;
- Processos de evaporação e transmissão de calor na superfície do solo devido a variações diárias e sazonais da temperatura ambiente;
- Resfriamento de condensadores em usinas hidrelétricas e nucleares;
- Problemas com extração de petróleo;
- Armazenamento de rejeitos radioativos;
Problemas de aterramento de cabos elétricos subterrâneos;
- Problemas relacionados a remediação de áreas degradadas utilizando-se do aquecimento do solo.

Portanto, fica notório que os sistemas de estacas trocadoras de calor podem fornecer uma significativa contribuição para fins de eficiência energética do país, podendo-se regular simultaneamente as condições ambientais de superestruturas na troca térmica com o solo enquanto atuam como fundações profundas de edificações.

Ademais, a energia geotérmica de baixa entalpia pode contribuir de forma eficaz na eficiência de consumo energético do país, podendo-se diminuir a potência de consumo em equipamentos convencionais para condicionamento de ar. Sendo assim, os resultados deste trabalho sugerem a viabilidade da utilização tecnológica da energia geotérmica de baixa entalpia acoplado a estacas trocadoras de calor em solo tropical não saturado para condicionamento térmico em habitações residenciais ou industriais/agrícolas.

Por fim, a busca em propor formas alternativas de menor impacto ambiental para climatizar estruturas residenciais ou instalações industriais/agrícolas no Brasil, tem sido um instigador campo de atuação. No entanto, abordar sistemas trocadores de calor na geotecnia tem se mostrado desafiador, isso ocorre por não se tratar de uma área amplamente consolidada na doutrina geotécnica, na qual foge um pouco do escopo convencional da geotecnia tradicional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento térmico de protótipos de estaca trocadora de calor executado em solo tropical típico do DF, na condição compactada e não saturada, na faixa de 1m de estaca em escala real. E submeter tais protótipos a variações paramétricas de configuração de tubos, grau de saturação e vazão interna nos tubos, tudo em ambiente controlado de laboratório.

1.3.2 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos, pode-se destacar:

- Desenvolver um equipamento de ensaios de resposta térmica de baixo custo relativo em plataforma Arduino, adaptada para condições de laboratório;
- Desenvolver uma câmara térmica de grandes dimensões termicamente isolada para execução dos protótipos de estacas trocadoras de calor estudados;
- Medir as propriedades térmicas do solo tropical do antigo campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia em função do grau de saturação e da massa específica aparente seca. Comparar os resultados obtidos com as principais equações empíricas e semi-analíticas da atual doutrina vigente no meio geotécnico;
- Propor uma equação empírica para determinação do coeficiente de condutividade térmica do solo laterítico estudado;
- Monitorar e avaliar o gradiente térmico transiente e permanente do fluxo de calor dissipado pelos protótipos no solo por meio de instrumentação térmica, no sentido radial dos protótipos de estaca, tanto de forma unidimensional, quanto de forma bidimensional;
- Realizar ensaios de resposta térmica (TRT) nos protótipos propostos variando a configuração de disposição dos tubos ativos no seu interior (1U, 2U e 4U), vazão de circulação de água nos tubos de 3,06; 6,14 e 12, 41 l/min, sobre duas condições de grau de saturação de aproximadamente 80% e 30%;
- Avaliar o comportamento de resposta térmica do protótipo de estaca trocadora de calor em relação ao tempo, ambos de forma adimensional, para as configurações (1U, 2U e 4U) para vazões 3,06 l/min, 6,14 L/min e 12,41 l/min, sobre duas condições de grau de saturação, aproximadamente 80% e 30%;

- Avaliar sobre o ponto de vista de resistência térmica o comportamento de cada material envolvido do processo do ensaio de resposta térmica (TRT) ao longo do tempo, bem como avaliar a magnitude de suas influências relativas no ensaio em relação a parâmetros de configuração geométrica, vazão e grau de saturação do meio.
- Executar e monitorar a temperatura de um poço de inspeção térmico de 12 m de profundidade em superfície coberta, afim de se obter o diferencial de potencial térmico médio da superfície para um perfil do solo de Brasília DF;

1.4 Estrutura da tese

Esta tese foi estruturada em 5 capítulos.

No Capítulo 1, apresenta-se de forma geral, a importância do estudo das propriedades térmicas do solo bem como a aplicação e uso das estacas trocadoras de calor, na qual são abordadas as principais vantagens e desafios inerentes ao uso da tecnologia. Mostra a motivação da pesquisa em âmbito nacional e internacional, na qual são traçadas as principais justificativas da pesquisa. Por fim, são delineados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão da literatura vigente sobre o assunto, na qual buscou-se introduzir os principais conceitos básicos que foram necessários ao desenvolvimento e entendimento desta pesquisa. Neste sentido, os principais assuntos abordados foram: Sistemas geotérmicos fechados de baixa entalpia; Propriedades termo físicas do solo; Principais mecanismos físicos de troca térmica envolvidos em um sistema de estaca trocadora de calor; Números adimensionais envolvidos nas análises de resposta térmica de um sistema de estaca trocadora de calor; Os principais fatores que influenciam na troca térmica de um sistema de estaca trocadora de calor; O funcionamento técnico de um ensaio de resposta térmica – *Thermal response Test – TRT* e as formas de interpretação utilizando o conceito de *G-Functions*; Poços de inspeção geotérmicos e monitoramento de temperatura do perfil de solo, e por fim, são apresentados o estado da arte dos principais estudos em laboratório de desempenho térmico de protótipos de estacas trocadoras de calor.

No Capítulo 3, foram abordados os principais materiais envolvidos e as metodologias empregadas na execução do programa experimental. Foram mostrados os principais desafios do desenvolvimento e preparação da câmara térmica, bem como do equipamento de ensaio

TRT. Foi apresentado de forma detalhada a instrumentação e os principais sensores utilizados nos ensaios, bem como os desafios de aferição e instalação. Foi abordado também os detalhes construtivos e técnicos do desenvolvimento do equipamento de ensaio TRT, bem como os detalhes construtivos do protótipo de estaca trocadora de calor.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica; comportamento térmico e os ensaios TRT com as variações dos seus principais parâmetros. É apresentado também uma discussão dos principais resultados obtidos na pesquisa. São eles: Caracterização geotécnica; Difração de Raio X – FRX; Discussão sobre a variação das propriedades térmicas do solo tropical estudado; Calibração dos principais modelos de previsão de condutividade térmica de solos; Discussão do comportamento de transferência térmica do protótipo de estaca trocadora de calor; Discussão paramétrica da influência da vazão na resposta térmica adimensional para a configuração 1U, 2U e 4U; Comportamento da influência da resposta térmica adimensional em relação a configuração de tubos e por fim, discussão da variação da resistência térmica do sistema em relação a configuração de tubos.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões a partir das análises realizadas nesta tese, além de sugestões para trabalhos futuros.

Em adendo, a metodologia foi composta de:

- a. Caracterização geotécnica e geotérmica do solo laterítico do antigo campo experimental de geotecnia do Programa de Pós-graduação da UnB;
- b. Calibração e aferição dos sensores de temperatura e de vazão;
- c. Controle de compactação do solo laterítico na câmara térmica;
- d. Descrição detalhada do equipamento de ensaio TRT de baixo custo desenvolvida, bem como a bancada de ensaios;
- e. Descrição e detalhamento dos protótipos de estacas trocadoras de calor bem como as configurações de tubos;
- f. Descrição da matriz de ensaios a serem investigados nesta tese.

Na Figura 1.2 mostra - se de forma simplificada o desenvolvimento da metodologia desta tese. Vale ressaltar que será apresentado um fluxograma mais detalhado posteriormente no capítulo de material e métodos.

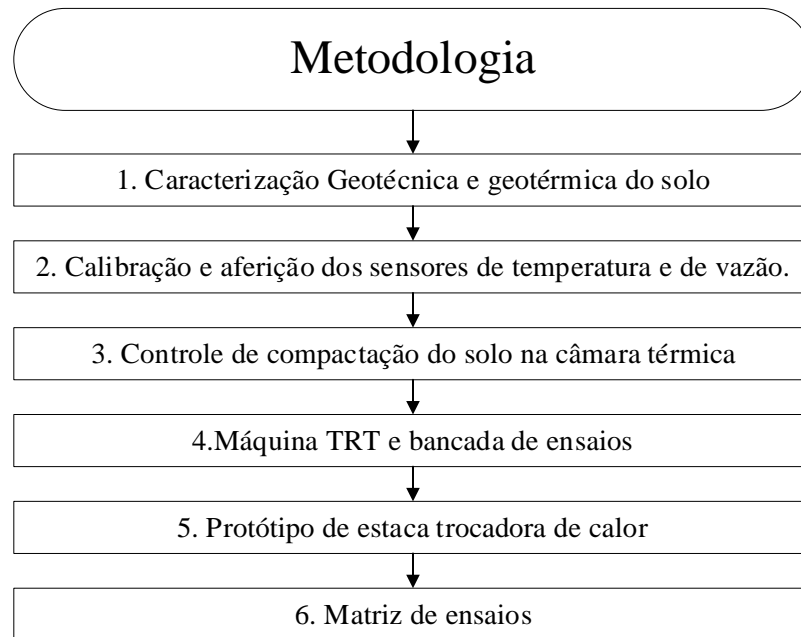


Figura 0.1: Fluxograma simplificado das principais etapas metodológicas desenvolvidas nesta tese

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada nesta tese objetiva a discussão do estudo de resposta térmica em sistemas de estacas trocadoras de calor em sua visão geral, vantagens, desafios, dificuldades, pesquisas em andamento e possíveis cenários de aplicação no Brasil, bem como o entendimento geral do comportamento geotérmico dos principais tipos de solos estudados na geotecnia.

As estacas trocadoras de calor podem captar cargas térmicas dos solos uma vez que a temperatura natural é usada como fonte de calor para aquecimento no inverno e como dissipador de calor para resfriamento no verão. Ou seja, durante o verão, o sistema atua como resfriador da edificação e durante o inverno atua como aquecedor (Brandl, 2006).

Nesse sentido, abaixo de poucos metros de profundidade, o solo mantém-se a temperaturas essencialmente constantes ao longo do ano. No inverno, o sistema pode ser utilizado como aquecedor, uma vez que o fluido circulante dentro dos tubos na estaca possui temperatura abaixo da temperatura do solo, e no verão ocorre o inverso, fazendo com que a temperatura do solo esteja acima da temperatura do fluido circulante, o que permite o sistema dissipar ou absorver o calor no solo por meio do sistema geotérmico de fundação.

2.1 Sistemas geotérmicos de baixa entalpia

Pode-se encontrar diversas classificações de sistemas geotérmicos, uma delas está em classificar quanto a sua demanda energética: em alta e baixa entalpia. De maneira geral, os sistemas geotérmicos de alta entalpia são utilizados para geração de energia elétrica devido ao seu alto volume energético de troca térmica. Já os sistemas de baixa entalpia não possuem volume energético suficiente para geração de energia. Porém, podem apresentar utilizações interessantes quando acoplados a sistemas de aquecimento ou resfriamento de edifícios (Laloui & Loria, 2020).

Para Banks (2008) a geotermia de baixa entalpia deriva de fluxos de calor sobre pequenas profundidades (abaixo de 50 m) na qual o sistema ainda sofre influência de incidência solar sobre a superfície do solo.

Na Figura 2.1, apresenta-se uma classificação básica dos principais sistemas geotérmicos utilizados atualmente, ao qual podem ser divididas em dois grandes grupos:

Sistemas geotérmicos superficiais (SGS) e Sistemas geotérmicos profundos (SGP) podendo estes ser classificados em: abertos, fechados ou quanto a circulação do fluido nos circuitos hidráulicos.

No ponto 4 subdivide-se as principais estruturas geotérmicas na engenharia geotécnica, na qual se localizam as estacas trocadoras de calor (4.a), objeto de estudo desta tese. Nesse sentido, pode-se observar que a profundidade de trabalho dessas estruturas varia de 10 a 50 m de profundidade com temperaturas de trabalho do sistema geotérmico, variando entre 10 e 12 °C, para regiões de clima temperado (Laloui & Loria, 2020).

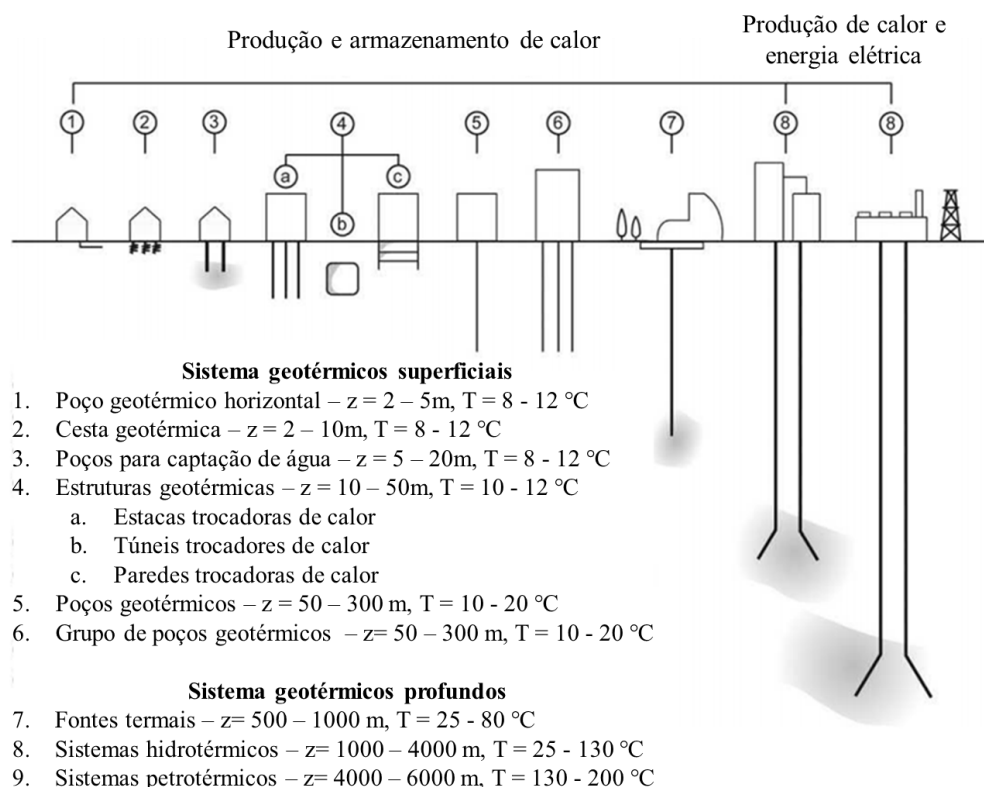


Figura 2.1 – Classificação dos sistemas geotérmicos (Adaptado de Laloui & Loria, 2020)

2.2 Sistemas fechados trocadores de calor geotérmicos

Para um melhor entendimento do objeto estudado nesta tese é importante destacar o funcionamento de um sistema trocador de calor geotérmico fechado e definir os seus principais componentes atuantes de forma a trazer uma compreensão mais ampla ao leitor do que se trata um sistema geotérmico, uma vez que não há ainda uma compreensão plena do que é este sistema, e do seu funcionamento no contexto geotécnico brasileiro.

Sendo assim, na Figura 2.2 mostra-se o esquema de um sistema fechado de um trocador de calor geotérmico, na qual compõe-se de dois circuitos hidráulicos (primário e secundário), ambos fechados e independentes, que trocam calor entre si por meio de um sistema de bomba de calor geotérmica (GEP – *Ground Energy Pump*). O circuito primário está relacionado a infraestrutura geotécnica, na qual é conectada via bomba geotérmica a um circuito secundário, este relacionado a superestrutura. A troca térmica entre estes circuitos diferentes é usada para regular e climatizar a superestrutura, na qual é injetado o excesso de calor ou extraindo o calor necessário para o solo, respectivamente.

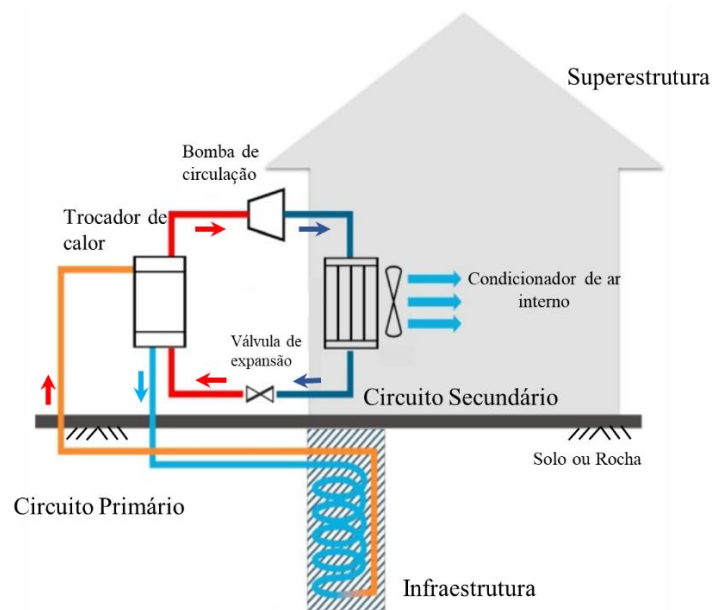


Figura 2.2 – Esquema de uma planta energia geotérmica com estacas trocadoras de calor.

O circuito primário é o sistema que está em contato direto com o meio geológico. Esta é a estrutura que será objeto de estudo nesta tese. Já o circuito secundário é o circuito em contato direto com a superestrutura, a qual ocorre troca térmica com o ambiente climatizado.

Entre os dois circuitos encontra-se a bomba de calor (trocador de calor) que é responsável por realizar a troca térmica entre o circuito primário e secundário, composto basicamente por um compressor e uma válvula de expansão na qual circula o gás refrigerante responsável por fazer a interligação de troca térmica dos dois circuitos, bem como ampliar o diferencial térmico entre eles. A eficiência do sistema está em obter o maior diferencial térmico entre o circuito primário e secundário imprimindo a menor energia para este fim (Laloui & Loria, 2020).

Vale destacar que a vantagem de se embutir o circuito primário no solo é que se pode aproveitar melhor a estabilidade térmica sazonal do subsolo, o que não se encontra nos sistemas

primários dos ares-condicionados convencionais, nos quais o meio de troca térmica do circuito primário é o próprio ar.

Ademais, o rendimento e qualidade do sistema trocador de calor depende diretamente de variáveis geométricas dos trocadores de calor (profundidade, comprimento, diâmetro dos tubos), da energia que se precisa incorporar para bombear o fluido (velocidade do fluido na tubulação) e do meio geotécnico na qual o circuito primário está inserido (tipo de solo, grau de saturação e peso específico aparente seco) (Brandl, 2006).

2.3 Propriedades termofísicas do solo

Para se compreender e analisar o modo como se processa a transferência de calor de um sistema geotérmico é necessário definir as principais propriedades termofísicas dos solos. Tais propriedades podem tanto ser obtidas por ensaios laboratoriais quanto por meio de testes *in situ* nas próprias estruturas geotérmicas.

Nesse sentido, variáveis geotécnicas importantes, tais como o tipo de solo, peso específico aparente seco e grau de saturação, definem o comportamento térmico do solo e rochas a serem estudados. Vale ressaltar que para fins de aplicabilidade e simplificação nas equações de calor dos geomateriais constituintes, deve-se considerar um meio contínuo (*continuum*) e isotrópico, para que todas as considerações e simplificações matemáticas possam ser levantadas de forma válida (Laloui & Loria, 2020).

2.3.1 Capacidade térmica volumétrica (C_v)

Çengel & Ghajar (2012) definem capacidade térmica volumétrica como a capacidade de aquecimento de um meio (sólido, líquido ou gasoso), e é dada por:

$$C_v = \frac{Q}{\Delta T \cdot V_c} \quad (2.1)$$

onde:

Q = Energia de calor necessário [W];

ΔT = Variação de temperatura do corpo [°C];

V_c = Volume do corpo [m³].

Em outras palavras, a capacidade térmica volumétrica é a energia de calor necessária para variar em 1°C uma unidade de volume básica, expressa em [J. °C⁻¹. m⁻³].

A capacidade térmica pode ser definida também como capacitância térmica (C) [J/K], que consiste na capacidade que o solo tem de armazenar energia para que se eleve 1 Kelvin de temperatura na sua estrutura, expressa por:

$$C = \rho_d \cdot c_c = m_c \cdot c_c \quad (2.2)$$

onde:

ρ_d = Massa específica aparente seca do corpo [kg. m⁻³];

c_c = Calor específico mássico, dado em [J. K⁻¹. kg⁻¹];

m_c = Massa do corpo [kg].

Segundo Duarte (2004), De Vries (1963) e Farouki (1981), o calor específico de um determinado solo depende direta e linearmente da temperatura, principalmente para solos granulares. Nesse sentido, a capacidade térmica volumétrica de um solo pode ser expressa pela soma das contribuições das capacidades térmicas volumétricas das três principais fases contribuintes (sólidos, água e ar) multiplicados pelas suas respectivas proporções volumétricas, na qual pode ser expressa por:

$$C_{v(\text{solo})} = X_s \cdot C_{vs} + X_w C_{vw} + X_a C_{va} \quad (2.3)$$

onde:

C_{vs} = Capacidade térmica volumétrica dos sólidos;

C_{vw} = Capacidade térmica volumétrica da água presente do solo;

C_{va} = Capacidade térmica volumétrica do ar presente no solo.

Os componentes de proporção (X) são definidos como a relação entre o volume do componente e o volume total do solo, na qual são expressas por:

$$X_s = \frac{V_s}{V_t} \quad (2.4)$$

$$X_w = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.5)$$

$$X_{ar} = \frac{V_{ar}}{V_t} \quad (2.6)$$

onde:

V_s = Volume dos sólidos

V_w = Volume de água

V_{ar} = Volume de ar

V_t = Volume total

Na Tabela 2.1, mostram-se valores típicos de calor específico das principais frações constituintes das fases do solo obtido por Farouki (1981).

Tabela 2.1 – Capacidade térmica mássica dos principais constituintes da estrutura dos solos (Adaptado de Farouki, 1981).

| Frações constituinte do solo | C_p [J.kg ⁻¹ . K ⁻¹] |
|------------------------------|---|
| Minerais | 714,7 |
| Água (25°C) | 4178,97 |
| Ar | 1007 |

Maciel Neto (2011) mostrou em sua dissertação de mestrado o comportamento da capacitância térmica– C [J.°C⁻¹], em função da umidade volumétrica - θ_w [cm³.cm⁻³] de um latossolo da região de Garanhuns – PE, e um Neossolo regolítico da região de São João - PE. Apesar de ambos os solos serem diferentes é possível observar aqui, um comportamento diretamente linear da variação da capacitância térmica na medida que aumenta a umidade volumétrica do solo e também é possível observar que a capacitância térmica é ligeiramente maior para condições de estados de massa específica parente seca maiores (Figura 2.3).

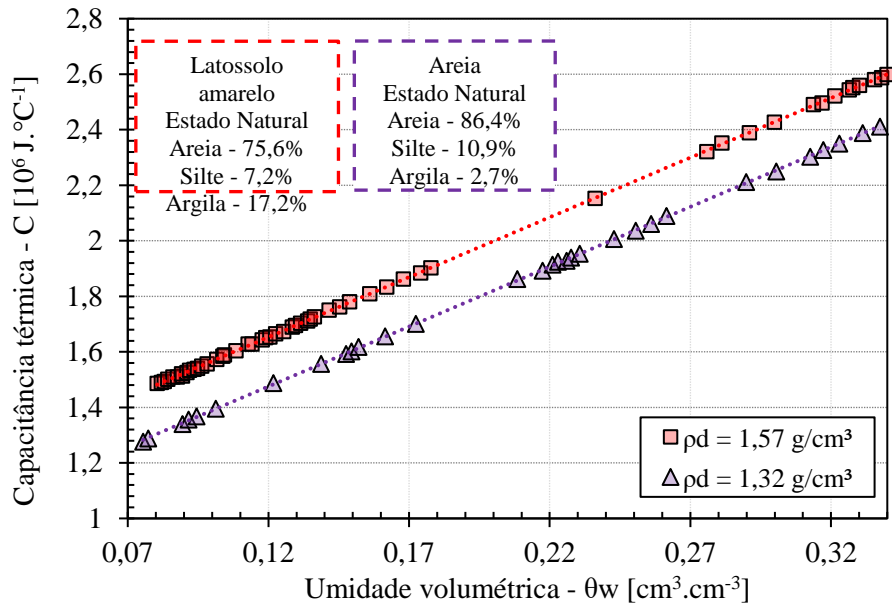


Figura 2.3 – Variação da capacitância térmica em função da umidade volumétrica do latossolo de Garanhuns – PE. (Adaptado de Maciel Neto, 2011)

É importante ressaltar que a dificuldade de se estimar a capacidade térmica de um solo de forma acurada está principalmente na determinação generalizada da capacidade térmica dos minerais constituintes devido à grande variabilidade mineralógica entre os solos existentes em geral (De Vries, 1963 e Farouki, 1981).

Nesse sentido, uma solução para se mitigar esses erros está em estimar a capacidade térmica dos sólidos pela média aritmética ponderada das frações constituintes do ensaio de Fluorescência de Raio X do solo analisado (FRX), em que consiste em identificar de forma qualitativa, os elementos químicos e suas proporcionalidades na distribuição dos minerais presentes na fração sólida dos solos. Tal medida torna a estimativa mais precisa para a determinação da capacidade térmica dos minerais de um solo, pois fornece de forma específica as informações dos principais óxidos presentes na estrutura mineralógica do solo, e suas proporções, podendo-se relacionar com suas propriedades térmicas tabeladas (Farouki, 1981).

Na Tabela 2.2, mostram – se os valores típicos de capacidade térmica volumétrica dos principais tipos de solos propostos obtidos por Laloui & Loria (2020).

Tabela 2.2 – Valores gerais de capacidade térmica volumétrica dos principais tipos de solos (Adaptado de Laloui & Loria, 2020)

| Material | Capacidade térmica volumétrica [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$] | |
|------------|--|----------------------------------|
| | Seco ($(Cv)_d$) | Saturado ($(Cv)_{\text{sat}}$) |
| Argila | 1,5 – 1,6 | 1,6 – 3,4 |
| 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 |

Ademais, para a determinação da capacidade térmica da água pode-se utilizar valores tabelados previstos em Çengel & Ghajar (2012). Na Figura 2.4, mostra-se o comportamento da capacidade térmica mássica da água em função da temperatura, uma vez que a temperatura é um fator importante para a consideração de controle nos ensaios e na consideração dos cálculos (Çengel & Ghajar, 2012).

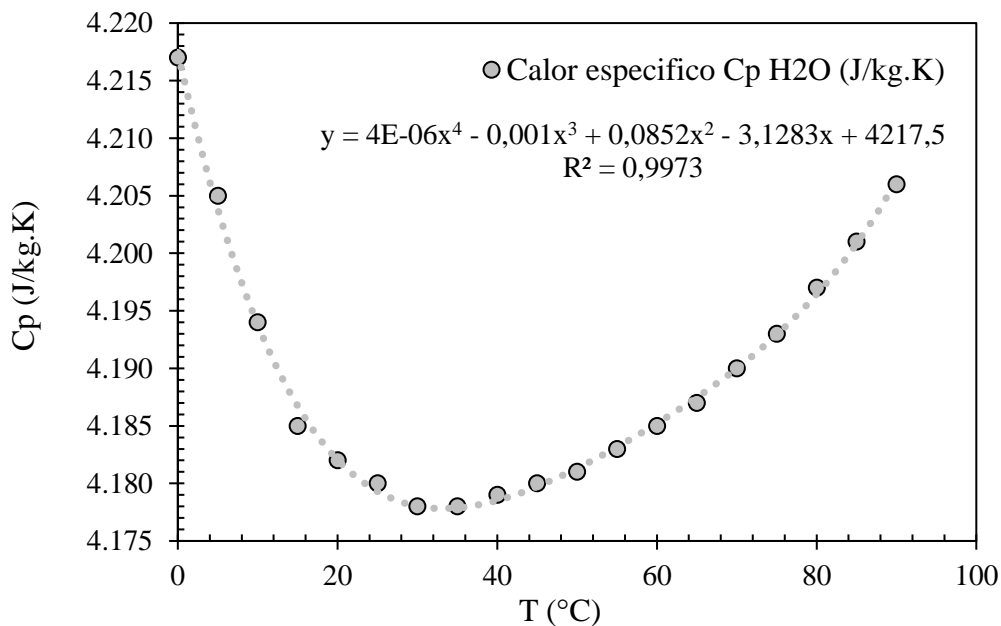


Figura 2.4 – Variação da capacidade térmica da água em função da temperatura (Çengel & Ghajar, 2012).

2.3.2 Condutividade térmica (λ)

Conceitualmente, condução térmica é um fenômeno físico que descreve o processo da difusão de calor por meio de um corpo por interação molecular, partindo de um maior potencial

térmico para um menor potencial térmico. Em outras palavras, se a extremidade de um corpo for aquecida, as moléculas da extremidade começam a vibrar mais fortemente causando influência sobre as moléculas vizinhas que por sua vez também começam a vibrar difundindo assim as vibrações moleculares por todo o corpo (Banks, 2008). O grau de vibração molecular de um corpo pode ser medido por meio da temperatura, quanto maior a medida de temperatura, maiores são as vibrações moleculares de suas partículas e conseqüentemente maior é o calor atuante neste corpo.

Este fluxo de energia é difundido pela condução na qual a rapidez da transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura atuante no corpo, ou seja, $\frac{q}{A} \sim -\nabla T$. Adicionando-se uma constante de proporcionalidade λ , tem-se:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \nabla T \quad (2.7)$$

onde:

q = Fluxo de energia [W];

λ = Condutividade térmica do meio [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$];

A = Área da seção transversal que passa o fluxo de calor [m^2];

∇T = Gradiente normal de temperatura [$^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$].

A condutividade térmica λ é definida como uma constante de proporcionalidade dependente do material, medida pela sua capacidade de conduzir calor. Em outras palavras, a condutividade térmica descreve o quanto um determinado material é bom condutor de calor. Tal propriedade é dependente predominantemente do tipo de material que o compõe. Para solos e rochas, a condutividade térmica está completamente dependente da sua mineralogia e estado de relações volumétricas, como porosidade e umidade (Moel *et al.*, 2010 e Farouki, 1981).

Segundo Moel *et al.* (2010) solos que apresentam teor mineralógico relativamente alto de quartzo, olivina, piroxênio e anfibólitos, possuem elevadas condutividades térmicas relativas. Porém, o grau de saturação é o fator predominante na influência da variação da condutividade térmica de um solo (Farouki, 1981).

Farouki (1981) mostra uma estreita relação entre o estado volumétrico dos solos (peso específico e umidade) com as suas respectivas propriedades térmicas. Quanto maior a umidade e o peso específico aparente seco do solo maior é o contato entre partículas e água adsorvida em sua área superficial. Logo, maior é a área de contato para difusão do calor e consequentemente, maior é a condutividade térmica do solo.

Nas Figuras 2.5(a), (b) e (c), mostram-se um modelo esquemático simplificado de aumento de fluxo térmico na estrutura de um solo sobre diferentes condições de grau de saturação, seco (Figura 2.5 (a)), não saturado (Figura 2.5 (b)) e saturado (Figura 2.5 (c)) proposto por Akrouch *et al* (2015). Observa-se que quanto maior o grau de saturação na estrutura interna do solo, maior é a área de água adsorvida sobre a superfície do grão e consequentemente, maior será a área o fluxo térmico. Sendo assim, como a água possui maior condutividade térmica em relação ao ar, maior será a condutividade térmica efetiva do solo.

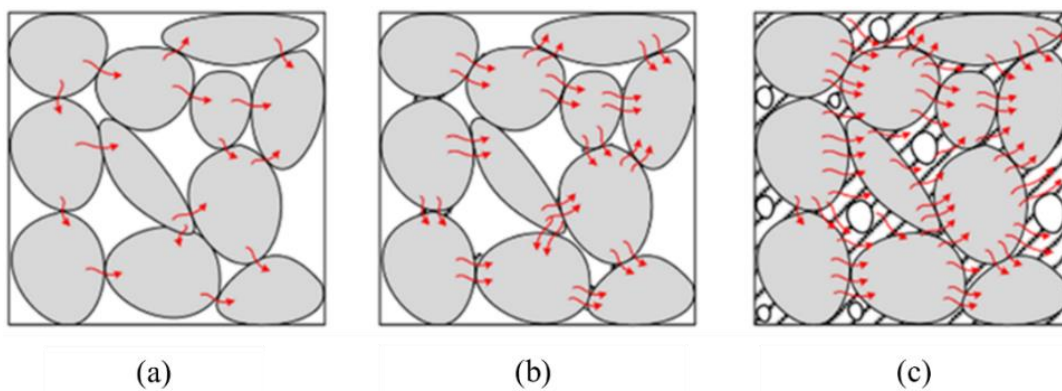


Figura 2.5 – Fluxo térmico em um solo sobre diferentes condições de grau de saturação. (a) seco, (b) Não saturado e (c) saturado (Akrouch *et al.*, 2015).

Na Figura 2.6, mostra-se o comportamento da variação da condutividade térmica de um solo argilo - siltoso em função da umidade sobre diferentes pesos específicos aparente seco. Vale observar que solos em estados mais compactos tendem a apresentar uma maior variação da condutividade térmica em relação a solos menos compactos, quando se varia a umidade. Já solos com menor peso específico aparente seco tendem a apresentar uma menor variação de condutividade térmica devido ao elevado índice de vazios em sua estrutura.

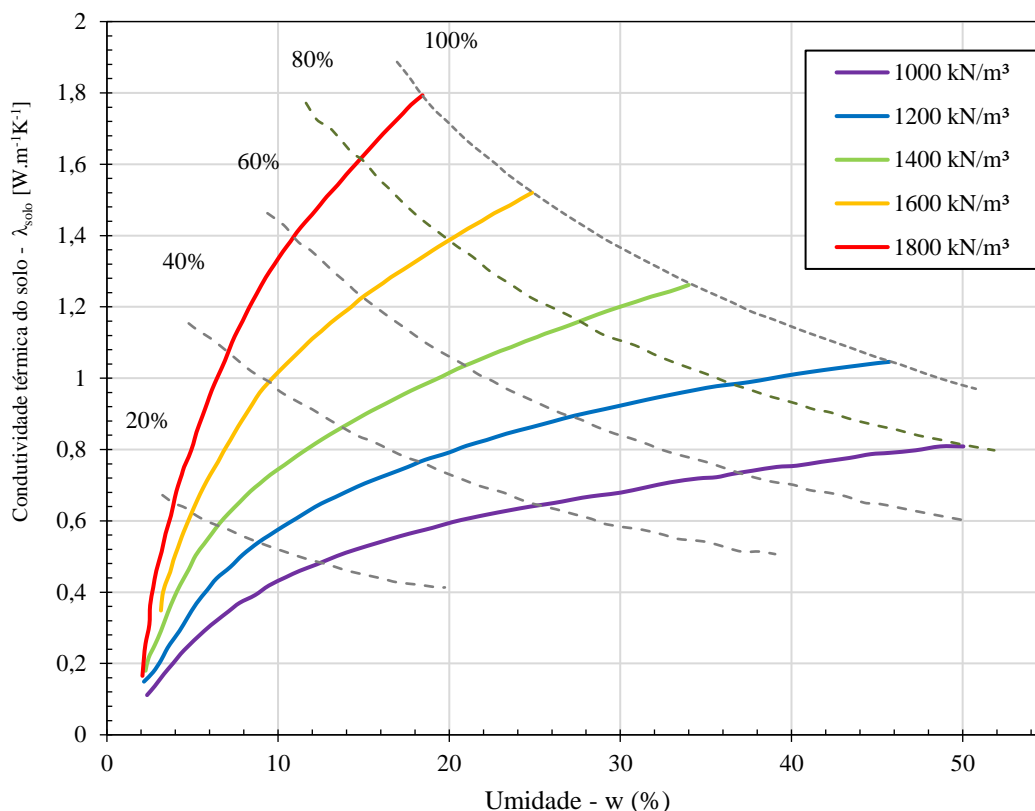


Figura 2.6 – Condutividade térmica de um solo argilo-siltoso em função da umidade e do peso específico. Farouki (1981).

Ante ao exposto, existe uma vasta quantidade de expressões matemáticas e modelos empíricos na bibliografia geotécnica na qual busca-se estimar a condutividade térmica de solos em sua grande variabilidade mineralógica, tanto para solos arenosos quanto para solos siltosos e argilosos.

Na Tabela 2.3, mostra-se de forma resumida os principais estudos e modelos propostos de estimativa da condutividade térmica para solos em função de seus principais parâmetros geotécnicos obtidos por ensaios laboratoriais, propostos por: Kersten (1949), Makowski & Mochilinski (1956), Johansen (1977), Coté & Konrad (2005) e Lu *et al* (2007).

Tabela 2.3 – Modelos propostos de estimativa da condutividade térmica de solos propostos para solos em geral e argilosos (Adaptado de Laloui & Loria 2020, De Vries, 1963, Coté & Konrad, 2005 e Lu *et al*, 2007).

| Referência | Material | Expressão | Comentários |
|-------------------------------|--------------------|---|--|
| Kersten (1949) | Siltoso e argiloso | $\lambda = (0,101 \cdot \log w_n - 0,0577) \cdot 10^{0,000624 \cdot \rho_d}$ $\lambda = (0,13 \cdot \log w_n - 0,0288) \cdot 10^{0,000624 \cdot \rho_d}$ | Equação empírica, válida somente para solos siltosos e argilosos com umidade superior a 7%. Esta equação é recomendada somente para solos com teor de argila e matéria orgânica em até 20% (Rerak, 2017 <i>apud</i> Loria Rota (2020)). A umidade do solo (w_n) é dado em % e (ρ_d) é a massa específica aparente seca do solo, dado em [kg.m ⁻³]. |
| Makowski & Mochilinski (1956) | Areno argiloso | $\lambda = (a_M \cdot \log w_n + b_M) \cdot 10^{z_M}$ | Expressão empírica para solos areno-argilosos , onde: <p style="text-align: center;"> $a_M = 0,142408 - 0,000465 \cdot c_{\%}$ $b_M = 0,04192 - 0,000313 \cdot c_{\%}$ $z_M = 6,24 \cdot \rho_d \cdot 10^{-4}$ </p> Onde a_M , b_M , z_M são constantes empíricas, $c_{\%}$ é a porcentagem de argila presente no solo e ρ_d é a massa específica aparente seca do solo, dado em [kg.m ⁻³]. |
| Johansen (1977) | Solos em Geral | $K_e = \frac{\lambda - \lambda_d}{\lambda_{sat} - \lambda_d}$ $K_e = \begin{cases} 0 & \text{para a condição seca} \\ 1 & \text{para condição saturada} \\ 0,7 \cdot \log S_r + 1, & \text{quando } S_r > 0,05 \text{ (solos grossos)} \\ \log S_r + 1, & \text{quando } S_r > 0,1 \text{ (solos finos)} \end{cases}$ | <p>Esta equação é válida tanto para solos granulares quanto solos finos com grau de saturação acima de 5% (preferencialmente acima de 20%). K_e é o número de Kersten na qual consiste na condutividade térmica do solo normalizada. λ_d e λ_{sat} são as condutividades térmicas na condição seca e saturada respectivamente, ambas avaliadas sobre a mesma massa específica aparente seca [kg.m⁻³]. Onde:</p> $\lambda_d = \frac{0,135\rho_d + 64,7}{2700 - 0,94\rho_d} \pm 20$ $\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^n$ $\lambda_s = (\lambda_q)^q \cdot (\lambda_o)^{1-q}$ <p>λ_e é a parcela de condutividade térmica do solo correspondente a influência do grau de saturação (S_r). λ_s é a condutividade térmica dos sólidos, ($q_{\%}$) é a porcentagem de quartzo presente no solo, que pode ser aproximado pela quantidade de areia presente na curva granulométrica em relação aos demais sólidos presentes. λ_q é a condutividade térmica do quartzo, dado por: 7,7 W.m⁻¹.K⁻¹. E λ_o é a condutividade térmica dos outros minerais presentes no solo, onde:</p> $\lambda_o = \begin{cases} 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, & \text{para } q > 0,2 \\ 3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, & \text{para } q \leq 0,2 \end{cases}$ |

| <p>Coté & Konrad (2005)</p> | <p>Solos em Geral</p> | $\frac{\lambda - \lambda_d}{\lambda_{sat} - \lambda_d} = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r}$ $K_e = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1)S_r}$ | <p>Aplicado para solos em geral, onde κ é o parâmetro de textura de ajuste de curva, onde os valores de κ são:</p> <table border="1" data-bbox="976 365 1340 512"> <thead> <tr> <th>Textura do solo</th> <th>κ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Pedregulho</td> <td>4,60</td> </tr> <tr> <td>Areia e silte</td> <td>3,55</td> </tr> <tr> <td>Argila</td> <td>1,90</td> </tr> <tr> <td>Orgânica</td> <td>0,60</td> </tr> </tbody> </table> <p>Onde λ_d é dado por:</p> $\lambda_d = \chi \cdot 10^{-\eta \cdot n}$ <p>Onde χ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] e η são parâmetros de forma das partículas e n, a porosidade do solo, sendo que:</p> <table border="1" data-bbox="954 864 1362 983"> <thead> <tr> <th>Tipo de solo</th> <th>χ</th> <th>η</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rocha fissurada</td> <td>1,70</td> <td>1,80</td> </tr> <tr> <td>Solos minerais</td> <td>0,75</td> <td>1,20</td> </tr> <tr> <td>Solos orgânicos</td> <td>0,30</td> <td>0,87</td> </tr> </tbody> </table> <p>λ_s e λ_{sat} são definidos a partir de Johansen (1977):</p> $\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^n$ $\lambda_s = (\lambda_1)^q \cdot (\lambda_0)^{1-q}$ | Textura do solo | κ | Pedregulho | 4,60 | Areia e silte | 3,55 | Argila | 1,90 | Orgânica | 0,60 | Tipo de solo | χ | η | Rocha fissurada | 1,70 | 1,80 | Solos minerais | 0,75 | 1,20 | Solos orgânicos | 0,30 | 0,87 |
|---------------------------------|-----------------------|---|--|-----------------|-----------|-------------|----------------|---------------|----------------------------------|----------------|---------------|----------------------------------|------|--------------|--------|--------|-----------------|------|------|----------------|------|------|-----------------|------|------|
| Textura do solo | κ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pedregulho | 4,60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Areia e silte | 3,55 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Argila | 1,90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Orgânica | 0,60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de solo | χ | η | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rocha fissurada | 1,70 | 1,80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Solos minerais | 0,75 | 1,20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Solos orgânicos | 0,30 | 0,87 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Lu <i>et al.</i> (2007)</p> | <p>Solos em Geral</p> | $K_e = \exp\{\alpha[1 - S_r^{(\alpha-1,33)}]\}$ | <p>Onde α é o parâmetro de ajuste e $\beta = 1,33$ o fator forma.</p> <table border="1" data-bbox="932 1458 1383 1693"> <thead> <tr> <th>Tipo de solo</th> <th>Parâmetro</th> <th>Comentários</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Solos arenosos</td> <td>$\alpha=0,96$</td> <td>Fração de areia maior do que 0,4</td> </tr> <tr> <td>Solos siltosos</td> <td>$\alpha=0,27$</td> <td>Fração de areia menor do que 0,4</td> </tr> </tbody> </table> <p>Onde λ_d é dado por:</p> $\lambda_d = -0,56n + 0,51$ <p>Válido para porosidade entre:</p> | Tipo de solo | Parâmetro | Comentários | Solos arenosos | $\alpha=0,96$ | Fração de areia maior do que 0,4 | Solos siltosos | $\alpha=0,27$ | Fração de areia menor do que 0,4 | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de solo | Parâmetro | Comentários | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Solos arenosos | $\alpha=0,96$ | Fração de areia maior do que 0,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Solos siltosos | $\alpha=0,27$ | Fração de areia menor do que 0,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | $0,2 < n < 0,6$ λ_{sat} é dada por: $\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^n$ E λ_s é dado por: $\lambda_s = (\lambda_1)^q \cdot (\lambda_0)^{1-q}$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Condutividade térmica (W/mK)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Areia</td> <td>8,530</td> </tr> <tr> <td>Silte</td> <td>2,930</td> </tr> <tr> <td>Argila</td> <td>2,930</td> </tr> <tr> <td>Ar</td> <td>0,025</td> </tr> <tr> <td>Água</td> <td>0,560</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Fonte: De Vries (1963)</p> | Material | Condutividade térmica (W/mK) | Areia | 8,530 | Silte | 2,930 | Argila | 2,930 | Ar | 0,025 | Água | 0,560 |
|----------|------------------------------|--|--|----------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|----|-------|------|-------|
| Material | Condutividade térmica (W/mK) | | | | | | | | | | | | | | |
| Areia | 8,530 | | | | | | | | | | | | | | |
| Silte | 2,930 | | | | | | | | | | | | | | |
| Argila | 2,930 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ar | 0,025 | | | | | | | | | | | | | | |
| Água | 0,560 | | | | | | | | | | | | | | |

Na Tabela 2.4, mostram-se alguns valores típicos de condutividade térmica dos principais tipos de solos, proposto por Laloui & Loria (2020).

Tabela 2.4 – Valores gerais de condutividade térmica dos principais tipos de solos, (Adaptado de Laloui & Loria, 2020)

| Material | Condutividade térmica [W.m ⁻¹ . K ⁻¹] | |
|------------|--|------------------------------|
| | Seco (λ_d) | Saturado (λ_{sat}) |
| Argila | 0,4 – 1,0 | 0,9 – 2,3 |
| Silte | 0,4 – 1,0 | 0,9 – 2,3 |
| Areia | 0,3 – 0,8 | 1,7 - 5 |
| Pedregulho | 0,4 – 0,5 | 1,8 |

2.3.3 Difusividade térmica

Segundo Banks (2008) e Çengel & Ghajar (2012), a difusividade térmica (α_t) pode ser definida como a relação entre a condutividade térmica e a calor específico volumétrico de um determinado material. Pode ser expressa por:

$$\alpha_t = \frac{\lambda}{c_v} = \frac{\lambda}{\rho c_c} \quad (2.8)$$

onde:

ρ = Massa específica do material, dado em $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$;

c_v = Calor específico volumétrico, dado em $[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$;

c_c = Calor específico mássico, dado em $[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

λ = Condutividade térmica, dado em $[\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$.

Na Tabela 2.5, mostram-se os principais valores de condutividade e difusividade térmica respectivamente, para os principais materiais compostos nos solos de forma geral, obtidos de Farouki (1981) e Coté & Konrad (2005).

Tabela 2.5 – Valores gerais difusividade térmica dos principais materiais constituintes nos solos, (Adaptado de Farouki, 1981, Coté & Konrad, 2005 e Laloui & Loria, 2020)

| Material | Difusividade térmica [$10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] |
|------------------|---|
| Quartzo | 43 |
| Outros minerais | 15 |
| Matéria orgânica | 1 |
| Água | 1,42 |
| Ar | 0,21 |

Na Figura 2.7 mostra-se o comportamento da difusividade térmica de um latossolo da região de Garanhuns – PE, versus a umidade volumétrica, estudado por Maciel Neto (2011). Observa-se que, apesar de serem distintos, solos com maiores condições de compactidade apresentam, ligeiramente, maiores condições de difusividade térmica, em relação a solos com menores massa específica aparente seca. É válido observar que a difusividade térmica aumenta na medida que a umidade volumétrica do solo aumenta. Por outro lado, quando a amostra de solo atinge uma umidade volumétrica, de aproximadamente de 23%, a difusividade tende a diminuir com o aumento da umidade. Fenômeno bastante interessante que será melhor explicado na discussão dos resultados desta tese.

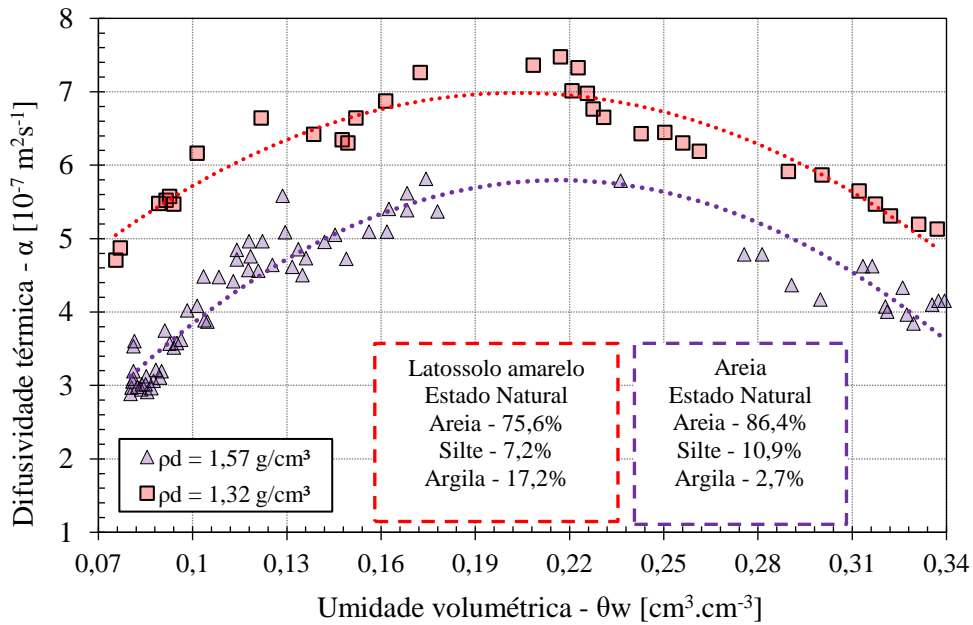


Figura 2.7: Comportamento da difusividade térmica de um latossolo coletado na região de Garanhuns – PE. (Adaptado de Maciel Neto, 2011)

Na Tabela 2.6, mostram – se os valores típicos de difusividade térmica dos principais tipos de solos propostos por Laloui & Loria (2020).

Tabela 2.6 – Valores gerais de difusividade térmica dos principais tipos de solos, (Adaptado de Laloui & Loria, 2020)

| Material | Difusividade térmica [10 ⁻⁷ m ² .s ⁻¹] | |
|------------|---|-----------------------------|
| | Seco (α_d) | Saturado (α_{sat}) |
| Argila | 2,7 – 6,2 | 5,6 – 6,8 |
| Silte | 2,7 – 6,2 | 5,6 – 6,8 |
| Areia | 2,3 – 5,0 | 7,7 – 17,2 |
| Pedregulho | 2,8 – 3,1 | 7,5 |

2.4 Mecanismos físicos de troca térmica em uma estaca trocadora de calor

Durante o fenômeno de troca térmica de um sistema geotérmico de estaca trocadora de calor, podem-se destacar, primordialmente, os fenômenos de convecção forçada interna e de condução térmica em meios porosos. O fenômeno de convecção forçada ocorre no interior do tubo por meio da circulação do fluido no circuito fechado. Já fenômeno de condução ocorre ao

longo do percurso de difusão térmica nos diferentes materiais (tubo, concreto e solo) no sentido radial da estaca.

Para um melhor entendimento dos mecanismos físicos de troca térmica é necessário aqui definir antecipadamente o conceito de resistência térmica, na qual é dado pela capacidade de um material impedir a transmissão de calos através dele, na qual é dada pela relação entre a diferença de temperatura entre dois pontos paralelos entre si e perpendiculares ao fluxo térmico (ΔT) e a taxa de calor transferido (q). É dada pelo inverso da condutividade térmica, na qual a unidade no SI é expressa em (K/W) (Çengel & Ghajar, 2012)

Na Figura 2.8(a), observa-se uma representação em vista superior da seção transversal de uma estaca trocadora de calor, na qual descreve o caminho do fluxo térmico desde o fluido, passando pela parede do tubo, cobrimento do concreto e finalmente, dissipando na matriz de solo.

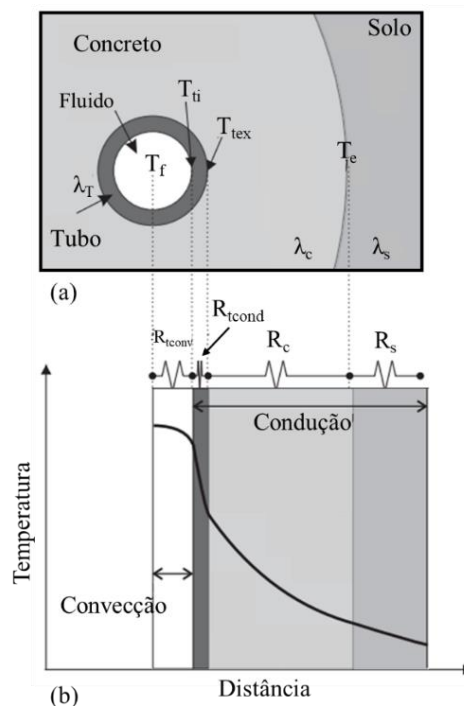


Figura 2.8 – Mecanismos de transferência de calor de uma estaca trocadora de calor: (a) propriedades térmicas da estaca e suas respectivas temperaturas de interface; (b) diferenças de temperatura e suas respectivas resistências térmicas (Adaptado de Loveridge & Powrie, 2013).

Os coeficientes de condutividade térmica dos materiais são dados expostos para: Tubo (λ_{tubo}), concreto (λ_{conc}) e solo (λ_g). Pode-se observar também as temperaturas nos principais pontos de mudança de material, tais como temperatura do fluido (T_f), Temperatura interna do tubo (T_{ti}), Temperatura externa do tubo (T_{tex}) e a temperatura da estaca (T_e).

Na Figura 2.8 (b), observa-se um esquema de forma simplificada, por meio de analogias de resistências térmicas do processo de transferência de calor em regime permanente, na qual o fluxo de calor sai do fluido em movimento (convecção) e difunde até o solo, passando pelos principais materiais que compõe o sistema geotérmico (parede do tubo de polietileno de alta densidade - PEAD, concreto e solo). Em cada mudança de material têm-se uma mudança de resistência térmica proposto por Loveridge & Powrie (2013).

A variação de resposta térmica de uma estaca trocadora de calor dentro de um intervalo transiente, pode ser dada por:

$$\Delta T_f = \Delta T_{\text{tubo}} + \Delta T_{\text{concreto}} + \Delta T_{\text{solo}} \quad (2.9)$$

onde:

ΔT_f = Variação de temperatura do fluido em um dado intervalo de tempo transiente [°C];

ΔT_{tubo} = Variação de temperatura na parede do tubo [°C];

$\Delta T_{\text{concreto}}$ = Variação de temperatura do cobrimento do concreto [°C];

ΔT_{solo} = Variação de temperatura dada uma distância radial de solo [°C].

Pela definição de resistência térmica condutiva, a Equação (2.9) pode ser reescrita como:

$$\Delta T_f = \dot{q}R_t + qR_cG_c + \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_g}G_g \quad (2.10)$$

onde:

\dot{q} = Taxa de fluxo de calor trocado obtido no ensaio TRT [W.m⁻¹];

R_t = Resistência térmica da parede do tubo [m.°C.W⁻¹];

R_c = Resistência térmica no cobrimento do concreto da estaca [m.°C.W⁻¹];

G_c = Função G do concreto;

λ_g = Coeficiente de condutividade térmica do solo [W.m⁻¹.°C⁻¹]

G_g = Função G do solo.

Nesse sentido, a taxa de fluxo de calor trocado entre a estaca e o meio, pode ser expresso por:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{L} = \dot{m}c_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (2.11)$$

onde:

\dot{Q} = Taxa de calor média do ensaio TRT [W];

L = Comprimento do elemento geotérmico [m];

\dot{m} = Vazão mássica de circulação do fluido no interior da tubulação [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$];

c_p = Calor específico da fluido circulante na tubulação [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$];

T_{in} = Temperatura de entrada na estaca [$^\circ\text{C}$];

T_{out} = Temperatura de saída na estaca [$^\circ\text{C}$].

Vale ressaltar aqui que as Funções G mostradas na Eq. (2.10), descrevem a mudança de temperatura no solo ou do concreto, ao redor do trocador de calor com o tempo de forma adimensional. Neste G_g é a Função G para resposta térmica do solo na qual encontra-se à estaca, e G_c é a Função G de resposta térmica do concreto durante o ensaio.

Segundo Loveridge & Powrie (2013) e Pagola *et al* (2018), as Funções G podem ser obtidas de forma analítica, numéricas ou experimentalmente. Uma forma de representar o fator de resposta térmica na literatura é computar a temperatura adimensional (Φ) em função do tempo adimensional (Fo) para ensaios, submetidos a fluxo térmico constante. A partir da medição das temperaturas médias no perímetro da superfície de uma estaca ao longo do tempo de ensaio, é possível mensurar funções de resposta térmica (Φ) por meio de ajustes polinomiais das curvas (Φ x Fo).

As Funções G proporcionam a obtenção das propriedades térmicas da estaca no ensaio TRT, tanto no regime transiente quanto no regime permanente. Ela depende primordialmente das condições geométricas de esbeltez, configuração de tubos dispostos e do fluxo de calor, bem como número, forma e configuração de estacas.

Nesse sentido, para cada condição especificada pode-se gerar uma Função G, que permite obter o comportamento da variação térmica em cada instante do ensaio TRT, independente do tempo de ensaio. Portanto, as Funções G tem sido vastamente utilizada na

interpretação de ensaios de resposta térmica de estacas uma vez que elas representam com maior precisão e acurácia o comportamento térmico em estacas dado suas especificidades geométricas, configurações de tubos, ou número de estacas. (Man, 2010, Loveridge & Powrie, 2013 e Pagola *et al.*, 2018).

O estudo das Funções G têm sido de grande importância para o entendimento do estudo das propriedades térmicas de ensaios TRT em estacas trocadoras de calor, uma vez que nas interpretações convencionais do ensaio TRT, considera-se hipóteses e simplificações usuais da equação geral de calor onde simplifica-se o meio de troca térmica como linear e infinito. É considerado também o sistema geotérmico como uma fonte de agulha infinita - ILS (*Infinite Line Source*) cuja esbeltez (L/D) mínima do elemento geotérmico é da ordem de 1000, hipótese um tanto exagerada para situações de uso em estacas convencionais, uma vez que a esbeltez de estacas está em uma ordem de grandeza entre 10 e 50.

Ademais, uma outra hipótese de simplificação da equação de calor inadequada nos ensaios TRT em estacas, está na consideração da distribuição da temperatura ocorrer de maneira uniforme ao longo da face da estaca, uma vez que tal situação não ocorre para configurações convencionais 1U, (Loveridge & Powrie, 2013).

Não obstante, a resistência térmica do tubo (R_t) é definida por:

$$R_t = R_{Tconv} + R_{Tcond} \quad (2.12)$$

onde:

R_{Tconv} = Resistência convectiva do fluido circulante no tubo [$W^{-1}.m.^{\circ}C$];

R_{Tcond} = Resistência térmica da parede do tubo [$W^{-1}.m.^{\circ}C$].

Por sua vez, a resistência convectiva (R_{Tconv}) é dada por:

$$R_{Tconv} = \frac{1}{2n\pi r_i h_i} \quad (2.13)$$

onde:

n = número de tubos no interior da secção transversal da estaca;

r_{int} = raio interno do tubo [m];

h_i = coeficiente de convecção no tubo [$W.m^{-2}. ^\circ C^{-1}$].

É válido ressaltar que o coeficiente de convecção para situações de convecção forçada interna pode ser estimada por correlação empírica proposto por Gnielinski (Loveridge & Powrie, 2013).

A resistência condutiva da parede do tubo pode ser dada pela equação do cilindro oco com n tubos em paralelo, expressa por:

$$R_{Tcond} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2n\pi\lambda_{tubo}} \quad (2.14)$$

onde:

r_{ext} = raio externo do tubo [m];

r_{int} = raio interno do tubo [m];

λ_{tubo} = condutividade térmica do material do tubo [$W.m^{-1}.^\circ C^{-1}$].

A resistência da cobertura de concreto da estaca pode ser expressa por:

$$R_c = \frac{\bar{T}_{tubo} - \bar{T}_{pa}}{q} \quad (2.15)$$

onde:

\bar{T}_{tubo} = Temperatura média dos limites do tubo [$^\circ C$];

\bar{T}_{pa} = Temperatura média na face da estaca [$^\circ C$].

2.5 Números adimensionais utilizados nas análises térmicas de estacas trocadoras de calor

Os principais números adimensionais envolvidos no problema de convecção forçada interna em dutos de estacas trocadoras de calor são: Número de Reynolds (Re), Número de Prandl (Pr) e Número de Nusselt (Nu). Para análises condutivas de calor no sistema estaca/solo,

utiliza-se o número de Fourier (Fo), e temperatura adimensional (Φ) para a obtenção das Funções G. Uma das principais vantagens da adimensionalização está na redução significativa do número de parâmetros envolvidos em problemas complexos que apresentam muitas variáveis.

2.5.1 Número de Reynolds

A definição do número de Reynolds consiste na relação das forças de inércia e das forças viscosas de um fluido em movimento e é dado por:

$$Re = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças viscosas}} = \frac{V_m L_c}{\nu} = \frac{\rho_f V_m L_c}{\mu} \quad (2.16)$$

onde:

V_m = Velocidade do fluido a montante do escoamento livre do fluido [$m \cdot s^{-1}$];

L_c = comprimento característico da geometria de escoamento do fluido [m];

ν = viscosidade cinemática do fluido ou a difusividade molecular de quantidade de movimento [$m^2 \cdot s^{-1}$];

ρ_f = massa específica do fluido [$kg \cdot m^{-3}$];

μ = viscosidade dinâmica do fluido [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Vale ressaltar que o número de Reynolds tem como finalidade prática definir o regime de escoamento de um fluido que escoa por uma determinada superfície. Para escoamentos laminares, encontra-se número de Reynolds menores que 2000. Para escoamento em transição $2000 < Re < 2400$. E para $Re \geq 2400$ o escoamento é considerado turbulento (Çengel & Ghajar, 2012)

2.5.2 Número de Nusselt

Çengel & Ghajar (2012) conceituam o número de Nusselt (Nu) como o número que representa o aumento da transferência de calor por meio da camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda a camada limite térmica, dado por:

$$\text{Nu} = \frac{\dot{q}_{\text{conv}}}{\dot{q}_{\text{cond}}} = \frac{h \cdot \Delta T}{k_f \cdot \Delta T / L_c} = \frac{h \cdot L_c}{k_f} \quad (2.17)$$

onde:

L_c = comprimento característico da geometria de referência, dado em [m],

k_f = condutividade térmica do fluido [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$].

ΔT = Variação de temperatura entre a superfície de contato com o fluido em velocidade e a temperatura média do fluido [$^{\circ}\text{C}$];

h = Coeficiente de condutividade convectivo do sistema [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$].

Conceitualmente, o comprimento característico é definido por:

$$L_c = \frac{V_c}{A_s} \quad (2.18)$$

onde:

V_c = Volume do corpo [m^3];

A_s = Área superficial do corpo [m^2].

Em outras palavras, quanto maior o número de Nusselt mais eficiente será a transferência de calor por convecção em relação a transferência por condução para um determinado fluido que escoar sobre uma dada superfície.

2.5.3 Número de Fourier (Fo)

É definida pela relação entre a taxa de calor transferido por condução e o calor acumulado no corpo por unidade de tempo, dado por:

$$\text{Fo} = \frac{\text{Taxa de calor transferido por condução}}{\text{Calor acumulado no corpo por unidade de tempo}} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T / L_c}{\rho V C_p \cdot \Delta T / t} = \frac{\alpha \cdot t}{L_c^2} \quad (2.19)$$

onde:

α = Difusividade térmica do meio [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$];

t = instante de tempo medido durante o ensaio [s];

L_c = Comprimento característico do corpo [m].

Em outras palavras, o número de Fourier consiste no tempo adimensional que caracteriza problemas de condução transiente de um dado corpo. Nesse sentido, vale ressaltar que o número de Fourier proporciona uma forma razoável de se comparar o tempo em escalas experimentais de laboratório com a de campo. No entanto, essa escala de tempo não reproduz perfeitamente o tempo real de estacas térmicas de modo geral, uma vez que as condições geométricas e disposição de tubos variam bastante (Kramer, 2014).

2.5.4 Temperatura adimensional (Φ)

Para aplicação das equações de resposta térmica em estacas trocadoras de calor, Loveridge & Powrie (2013) definem a temperatura normalizada dada por:

$$\Phi = \frac{2\pi\lambda_g\Delta T}{q} \quad (2.20)$$

Vale ressaltar que as hipóteses simplificadoras da equação de calor são válidas para condições de poços provençais, cuja esbelteza atende as hipóteses simplificadoras da equação considerando o ILS (*Infinite Line Source*) bem como a temperatura na superfície do poço é constante em toda sua superfície.

Loveridge & Powrie (2013) definem Função G como uma função matemática que descreve a resposta térmica das estacas trocadoras de calor mediante variações de temperatura no solo. Sendo assim, as Funções G podem ser obtidas por meio de ensaios de resposta térmica (TRT) de estacas, ou por modelagens numéricas. As funções G dependem, basicamente, das propriedades térmicas do solo, das dimensões da estaca, das propriedades térmicas do fluido circulante, da disposição dos tubos e do fluxo de calor aplicado.

É importante frisar aqui que as Funções G se distinguem da temperatura adimensional (Φ), uma vez que as Funções G são ajustes polinomiais do comportamento da variação da temperatura adimensional versus o tempo adimensional (Fo). Ou seja, são as funções de resposta térmica. Tal destaque deve ser explícito aqui, para não confundir os termos em questão.

Loveridge & Powrie (2013) expressaram em seu trabalho, o comportamento típico da variação de Funções G de estacas trocadoras de calor variando apenas sua esbeltez (Figura 2.9).

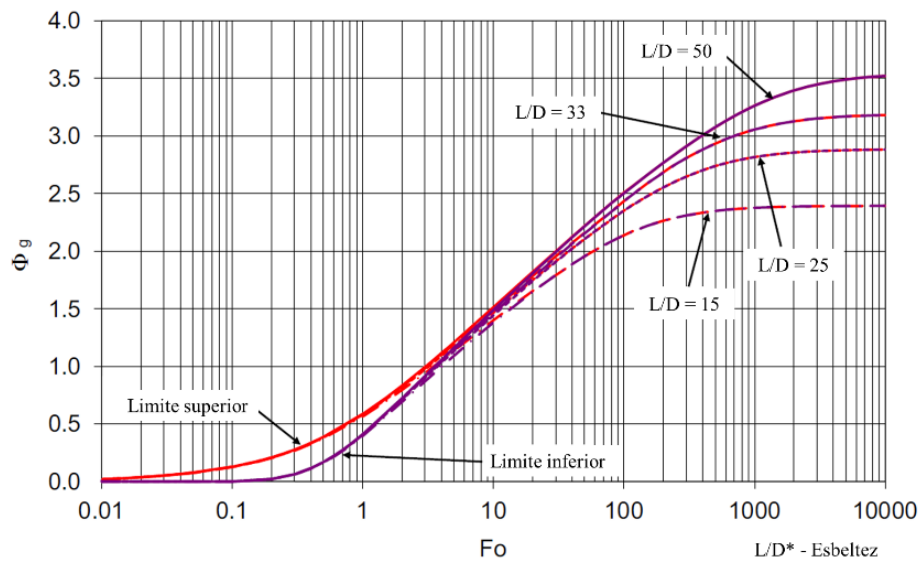


Figura 2.9 - Exemplo de curvas típicas de Funções G de estacas trocadoras de calor variando sua esbeltez (L/D) (Adaptado de Loveridge & Powrie, 2013).

2.6 Correlações empíricas de número de Nusselt em convecção forçada interna para tubos circulares em regime turbulento.

Pode-se determinar o número de Nusselt a partir de um sistema de convecção forçada, por meio de correlações empíricas na qual o número de Nusselt é função do número de Reynolds e do número de Prandtl ($Nu = f(Re, Pr)$). Laloui & Loria (2020) recomendam aplicar as equações de correlação, de Dittus Boelter ou de Gnielinski, para estimativa do número de Nusselt em estacas trocadoras de calor. No entanto, Çengel & Ghajar (2012) explicitam que a equação de Petukhov, melhorada por Gnielinski (1976) expressa um melhor ajuste entre as equações empíricas apresentadas usualmente diminuindo erros de 25% para menores de 10%, para número de Reynolds relativamente baixo. A equação de Petukhov & Gnielinski (1976) *apud* Çengel & Ghajar (2012), pode ser dada por:

$$Nu = \frac{(f/8) (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad \left(\begin{array}{l} 0,5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3.10^3 < Re < 5.10^6 \end{array} \right) \quad (2.21)$$

onde:

f = Fator de atrito do tubo;

Re = Número de Reynolds;

Pr = Número de Prandl.

O fator de atrito (f) para tubos lisos e escoamento turbulento, é determinado a partir da equação explícita de *Petukhov*, dada por:

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (3000 < Re < 5.10^6) \quad (2.22)$$

Vale ressaltar que para um trocador de calor convencional, o desafio principal está em determinar o coeficiente de convecção do problema em análise. Conhecendo-se as condições hidráulicas e térmicas do fluido escoante no tubo pode-se estimar empiricamente um número de Nusselt. Uma vez estimado o Número de Nusselt do problema, pode-se encontrar por definição o coeficiente convectivo do trocador de calor e assim, pode-se estimar a quantidade de calor que o sistema troca com o meio em que se encontra, no caso à estaca trocadora de calor.

2.7 Fatores que influenciam na troca térmica de um sistema de estaca trocadora de calor geotérmico

Segundo Murphy *et al.* (2015), os principais fatores que influenciam diretamente na eficiência de troca térmica de um sistema trocador de calor geotérmico (GSHP) acoplado a estacas trocadoras de calor, são:

- Tipos de materiais utilizados (tubo, concreto, solo);
- Nível do lençol freático;
- Arranjo e disposição dos tubos trocadores de calor dentro da estaca (em forma de U, S, W, espiral);
- Geometria da fundação (comprimento e diâmetro da estaca);
- Demanda energética do sistema geotérmico, tanto para aquecimento quanto para resfriamento.

O CFMS (2017), que dispõe de recomendações para projeto, dimensionamento e execução de estruturas geotérmicas, recomenda que haja um espaçamento entre tubos de no mínimo 15 cm de distância em estruturas térmicas. Nos casos em que a armação tem função estrutural, recomenda-se um espaçamento dos tubos em relação a armadura longitudinal, de no mínimo 4 vezes o diâmetro máximo do agregado utilizado no concreto.

Segundo Kramer *et al.* (2015), a eficiência térmica de uma estaca de energia aumenta com o aumento da vazão do fluido no tubo. No entanto, isso resulta em maior consumo de energia elétrica. Assim, poderia ser prejudicial em seu desempenho sazonal ao longo do ano. Segundo Akrouch *et al.* (2015) e Akrouch *et al.* (2016), o desempenho térmico de uma estaca trocadora de calor pode aumentar em até 40% em areia, dependendo do grau de saturação e a variação do lençol freático na areia pode diminuir a eficiência da troca térmica em até 43%. No entanto, pouca diferença significativa foi observada nas argilas arenosas.

Quanto a configuração de tubos, resultados de simulações numéricas mostraram que a configuração da distribuição dos tubos em uma estaca trocadora de calor pode afetar a eficiência do sistema na troca térmica (Cecinato & Loveridge, 2015). Nesse sentido, os Anexos I e II, mostram as tabelas resumos dos principais trabalhos de análises numéricas (Anexo I) e de trabalhos desenvolvidos em campo (Anexo II) com as principais conclusões sobre o ponto de vista termomecânico e de desempenho térmico. Vale ressaltar que tais trabalhos, apesar de não terem sido em sua totalidade como estudos principais para o desenvolvimento desta tese, exerceram uma considerável importância para o entendimento global do assunto em questão.

2.8 Ensaio de resposta térmica (*Thermal Response Test* – TRT)

Thermal Response Test (TRT) ou Ensaio de Resposta Térmica, é considerado o principal ensaio de campo para obtenção da condutividade térmica de sistemas geotérmicos. Seu funcionamento consiste em circular de forma forçada um fluido aquecido sobre carga térmica constante em um circuito fechado no interior do elemento geotérmico. Tal elemento pode ser usualmente um poço provençal ou uma estaca de fundação de concreto adaptada com função secundária de trocar calor com o subsolo (Loveridge & Powrie, 2013).

Ao forçar a troca térmica do sistema, são medidos parâmetros de temperatura na entrada e saída na estaca trocadora de calor, bem como a vazão e a quantidade de energia injetada no sistema. Quanto maior a diferença térmica na entrada e saída do sistema, maior a quantidade de calor trocado com o solo.

Segundo Gehlin (2002), o equipamento de ensaios TRT possui um funcionamento simples a qual permite circular o fluido no circuito fechado, controlar a taxa de calor injetada no sistema, garantindo assim injeção de calor constante, bem como medir e gravar as temperaturas de entrada (T_{in}) e saída (T_{out}) do sistema. Na Figura 2.10, apresenta-se um

esquema simplificado do equipamento de ensaio TRT com seus principais elementos constituintes.

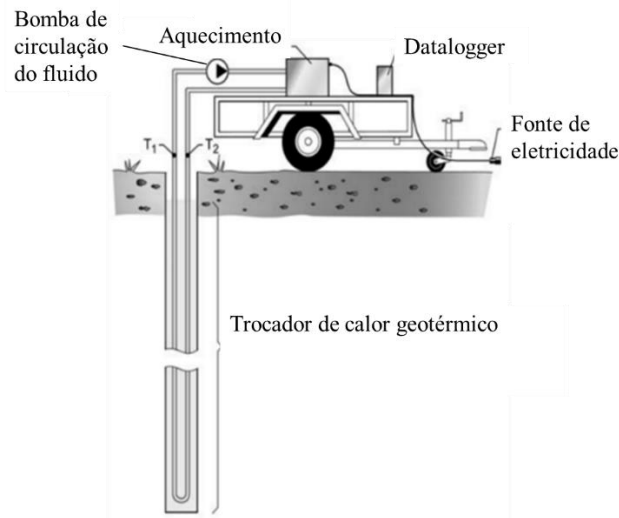


Figura 2.10 – Aparato básico dos principais componentes de um o equipamento de ensaios TRT de campo de resposta térmica (Adaptado de Gehlin, 2002)

Gehlin (2002) e Sanner *et al* (2005) detalharam os principais equipamentos de ensaios de resposta térmicas desenvolvidas ao longo do mundo, na qual apresentaram os principais detalhes construtivos, especificações técnicas e sensores utilizados.

Na Tabela 2.7, mostra-se um resumo dos principais trabalhos na qual desenvolveram o equipamento de ensaios TRTs no Brasil e no mundo. Nesse sentido, a Tabela 2.3 resume principais parâmetros técnicos de potência de injeção de calor no ensaio, controle de potência, limites de vazão, tipo de fluido de circulação, tipos de sensores de temperatura e finalmente o tipo de sensor de vazão e acurácia. Vale ressaltar que, tais trabalhos apresentados foram de grande valia e auxílio para a criação, desenvolvimento e melhoramento do equipamento de ensaio TRT de baixo custo desenvolvida para esta tese.

Tabela 2.7 – Principais trabalhos no Brasil e no mundo que desenvolveram o equipamento de ensaios TRT com suas principais características técnicas de operação e acurácia sensorial.

| Referência | País | Layout do equipamento de ensaio TRT | Potência de injeção (kW) | Controle de potência | Vazão do fluido (l/min) | Fluido de circulação | Sensores de temperatura /Acurácia | Fluxímetro/Acurácia |
|--------------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------|---|-------------------------|----------------------|-----------------------------------|---|
| Cruickshanks, <i>et al.</i> (2000) * | Canadá | Trailer | 3,2 | N/D | 45 | Água/Glicol | N/D | Estimativa pela perda de carga na pressão |
| Gehlin & Hellstrom (2000)* | Suécia | Trailer | 3 – 11 | Manual, três níveis | 30 – 60 | Água/Glicol | Termopar/ +/-0,2K | N/D |
| Paksoy (2000)* | Turquia | Trailer | 3 – 6 | Manual, quatro níveis | 30 – 60 | Água | Termopar/ +/-0,2K | Fluxímetro Efeito Hall - +/-3% |
| Austin, <i>et al.</i> (2000)* | Estados Unidos | Trailer | 0 – 4,5 | Manual, variação contínua | 12 | Água | Termistor - +/- 0,1K | Fluxímetro Efeito Hall - +/-2% |
| Sanner (2000)* | Alemanha | Trailer | 1 – 6 | Manual em 6 níveis | 16,9 | Água | PT100 | N/D |
| Witte <i>et al.</i> (2001) * | Países baixos | Container | 0,05 – 4,5 | Controlado pela variação de temperatura | 8,4 – 49,8 | Água/Glicol | PT100/ +/- 0,07K | MagMaster/ 0,2 – 0,9% |
| Curtis (2001)* | Reino Unido | Carrinho manual | 3 - 6 | Manual, dois níveis | 15 - 60 | Água | Termistor - +/- 0,1K | Eletromagnético |

| | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|---------|--------------------------|-----------|------|----------------------|---|
| Eugster (2001)* | Suíça | Veículo móvel | 3 – 9 | Semi-manual, Três níveis | N/D | Água | PT100/ +/- 0,1K | N/D |
| Lim <i>et al.</i> (2006) | Coréia do Sul | Trailer | 1 – 4,5 | N/D | 3 - 14 | Água | Termostato - +/-0,2K | N/D |
| Geoenergie Concept GmbH (2008) <i>apud</i> GeoPLASMA-CE (2017) | Alemanha | Caixa transportável | 1 – 12 | N/D | 133 | Água | PT1000- +/- 0,5K | Fluxímetro efeito <i>Hall</i> – VTH 25 MS – 180 = +/-5% |
| Serviço Geológico Federal (2009) <i>apud</i> GeoPLASMA-CE (2017) | Áustria | Trailer | 1 – 10 | N/D | 83,3 | Água | PT100 | Fluxímetro magnético MAGFLOW 5100 W |
| Bandeira Neto (2015) | Brasil | Container | 1 | N/D | 11,6 - 28 | | PT100 | Fluxímetro – Efeito <i>Hall</i> |
| PGI-NRI (2015) <i>apud</i> GeoPLASMA-CE (2017) | Polônia | Caixa transportável | 1 - 9 | N/D | 33,33 | Água | PT500 | Fluxímetro de ultrassom – Kamstrup Ultraflow 54 |
| Ferreira (2017) | Brasil | Aberto | 1,3 | N/D | 19,4 | Água | Termistor | Fluxímetro efeito <i>Hall</i> – FP 2000 |
| Chaves (2022) | Brasil | Bancada | 0 – 3kW | Variação linear | 1 – 30 | Água | DS18B20 | Fluxímetro efeito <i>Hall</i> |

* *apud* Gehlin (2002)

2.9 Poços de inspeção geotérmicas

O gradiente de temperatura em regiões rasas da subsuperfície da terra geralmente exibe uma alta sensibilidade às condições de clima atmosférico, geralmente nos primeiros 4 a 15 metros, na qual o subsolo é fortemente influenciado por variações diárias de temperatura e marcada por flutuações sazonais. Durante o inverno essa zona perde calor para a superfície e durante o verão recebe calor da superfície (Laloui & Loria, 2020 e Brandl, 2006).

Nesse sentido, uma forma de se observar as variações sazonais da temperatura na superfície do solo e em profundidade está em dispor de poços de inspeção geotérmicas na qual consistem em monitorar a variação de temperatura de uma determinada região geográfica por meio de sensores dispostos e localizados em profundidade desde a superfície até a profundidade desejada. Entender em que profundidade e quais as amplitudes térmicas de uma determinada região é fundamental para auxiliar em projetos e implantação de sistemas geotérmicos em um determinado local.

Brandl (2006) mostra um esquema simplificado da distribuição de temperatura estável ao longo da profundidade do subsolo a partir de 10 a 15 m, para um sistema na qual a superfície do solo está exposta ao sol. De fato, esta profundidade de estabilização pode variar em função do tipo de solo e do nível de incidência solar na superfície. Essas amplitudes térmicas podem variar em média de 10 a 15 °C, para a maioria das regiões do continente europeu e de 20 a 25 °C para regiões tropicais (Figura 2.11).

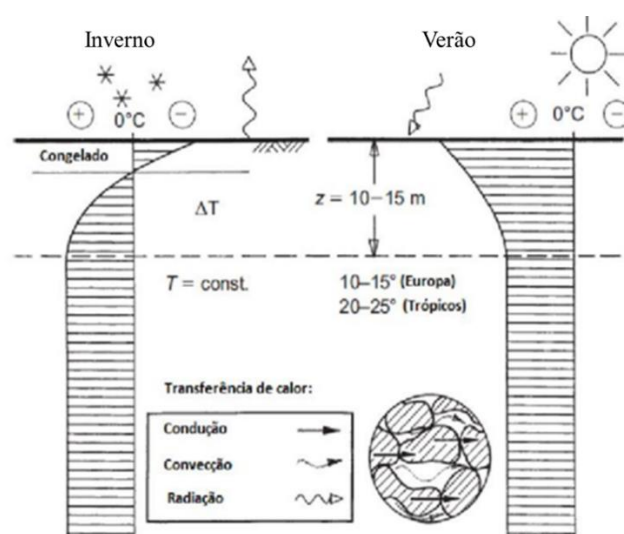


Figura 2.11 – Comparativo da distribuição de temperaturas no subsolo para o verão e inverno.
Fonte: (Adaptado de Brandl, 2006)

Ao se observar a estabilidade de amplitudes térmicas ao longo da profundidade, como mostrado na Figura 2.11. Pode-se conjecturar que a eficiência energética de edificações ou pequenas indústrias, pode ser ponderada pela suavização e diminuição das amplitudes térmicas ao longo da profundidade do subsolo, principalmente em horários críticos de consumo de energia, horários de ponta ou horários de altas amplitudes térmicas diárias. Podendo-se diminuir assim a demanda de potência de consumo de energia elétrica na climatização de uma edificação.

Vale ressaltar que a maioria dos trabalhos que se encontra sobre poços térmicos de inspeção avaliam a variação térmica em solo cuja superfície encontra-se completamente descoberta e exposta às variações de incidência solar. Neste trabalho foram realizadas medições de temperatura de um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, com superfície completamente coberta. Tal objetivo se deu a fim de buscar entender a influência do prédio quanto ao isolamento e amortecimento térmico sazonal ao longo da profundidade uma vez que as estacas trocadoras de calor se encontram-se abaixo do prédio (Longo, 2014).

2.10 Estudos em laboratório de desempenho térmico em estacas trocadoras de calor

Nesta subseção serão abordados os principais trabalhos e pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo acerca de comportamento térmico de estacas trocadoras de calor que contribuíram, em algum grau de importância, para o desenvolvimento desta tese.

Na Universidade Estadual da Pensilvânia, Akrouch *et al* (2014), Akrouch *et al* (2015) e Ahmadipur (2017) expandiram um estudo, em modelos 1G, de um protótipo estaca trocadora de calor em escala reduzida, imersas em areias pluviais na condição seca submersa, em uma câmara termicamente isolada e instrumentada com sensores de temperatura ao longo da distância radial do protótipo. Avaliaram o comportamento de troca térmica do protótipo em função da vazão interna no tubo, na configuração 1U. Dados da temperatura obtidos foram utilizados para caracterizar a dissipação de calor em função do tempo e espaço em 3D. Observaram que a extensão do bulbo de influência se estendeu a cerca de 5 vezes o diâmetro do protótipo de estaca, tanto em aquecimento quanto resfriamento do sistema, avaliando a troca térmica tanto na rejeição quando na extração de calor. Concluíram que a eficiência térmica do sistema aumenta à medida que a velocidade de circulação aumenta. Além disso, a eficiência do protótipo aumentou cerca de 30% durante a inversão da ciclagem térmica, devido a presença de elevados gradientes térmicos no início da inversão térmica.

Ahmadipur (2017) desenvolveu provas de carga estáticas sobre o mesmo protótipo, submetendo-os a variações de temperatura diferentes em areia seca. Observou que a capacidade de carga aumenta com o aumento da temperatura média das estacas. Observou também que tanto as resistências laterais e de ponta da estaca aumentam com a temperatura. O aumento da temperatura da estaca aumenta o confinamento lateral. Para um aumento de 31,6°C de temperatura da estaca, observou-se um aumento de 15% de sua carga limite última.

Black & Tatari (2015) desenvolveram uma nova técnica para estudar a inversão da carga térmica transitória e observou a interação entre as estacas térmicas e o meio que foram submetidas. Adotaram solo transparente e relacionaram a intensidade de pixels (em imagens fotográficas de solo) com a temperatura para definir o fluxo de calor ao longo da amostra de solo em escala reduzida (1G). Os testes foram realizados em uma estaca térmica feita de alumínio com 18mm de diâmetro por 150 mm de comprimento, imersa em uma câmara transparente de 190x150x40mm de dimensões (comprimento x altura x largura) que foi executado em um grande recipiente submetido a banho maria. Os testes foram realizados por processamento de imagem digital na qual variaram a temperatura da estaca em até 50°C, mantendo a temperatura da água a 20°C. Os autores demonstraram a presença e o desenvolvimento de um fluxo de calor no solo de até 1,5 diâmetros, radialmente a partir do protótipo. Concluíram que a técnica de avaliar protótipos de estacas térmicas em solo transparente mostrou-se viável e contribuiu para uma melhor compreensão dos processos de troca térmica da estaca com o solo e que a extensão da zona de influência reflete valores semelhantes relatados na literatura de grande escala, em campo e em análises numéricas.

Pesquisadores da Universidade do A&M do Texas, em *College Station*, Akrouch *et al.* (2015) e Akrouch *et al.* (2016) exploraram o comportamento de uma seção planar de uma estaca trocadora de calor em 2D com dimensões distintas de 30 e 40cm todas imersas em uma caixa de ensaio com areia em diversos graus de saturação. A caixa foi desenvolvida nas dimensões 1,2 x 1,2 x 0,2m (comprimento, largura, altura), na qual a seção de estaca térmica foi executada com seções de dois tubos de PVC com entrada e saída de água, de modo a simular a dissipação térmica do calor ao longo da distância radial do protótipo. Akrouch *et al.* (2015) circulou água na tubulação interna do protótipo à uma temperatura constante de 37°C, na qual o teste foi realizado durante 48 horas para uma estaca diâmetro de 30 cm, imersa em areia com três valores distintos de grau de saturação (totalmente seco, totalmente saturado, e na condição não saturada). Os dados experimentais foram calibrados em um programa de elementos finitos

chamado CODE_BRIGHT na qual objetivou explorar o desempenho térmico do protótipo de estaca térmica em termos de troca calor e eficiência em condições distintas de saturação. Os autores observaram inicialmente que a eficiência de troca térmica, bem como a condutividade térmica do solo depende primordialmente do grau de saturação. Akrouch *et al.* (2016) ampliaram testes anteriores para considerar outros tipos de solo (lodo e argila arenosa) em condições experimentais mais amplas de 6 graus de saturação

Yang *et al.* (2016), da Universidade de Yangzhou, investigaram os efeitos de diferentes fatores sobre o desempenho térmico de um protótipo de estaca trocadora de calor em laboratório, com diâmetro de 20 cm e com tubo de PVC de 6mm de diâmetro externo na configuração de espiral, executado em uma caixa de madeira de dimensões de 0,8 m x 0,8 m x 1,2 m (largura, comprimento e profundidade) com solo compactado e uma estaca de 20 cm de diâmetro, na qual foram realizados ensaios de resposta térmica sobre temperatura constante e feito o monitoramento da temperatura de entrada e saída do tubo em espiral do protótipo e da distância radial no solo ao longo do tempo de ensaio. Avaliaram o comportamento térmico do sistema em função do passo da espiral interna do protótipo, da temperatura de entrada da água no tubo e da imposição de ciclos térmicos ao longo do tempo nos ensaios. Concluíram que quanto maior a temperatura de entrada da água maior o armazenamento do calor na estaca e maior é taxa de dissipação de calor total no protótipo, embora haja diminuição na taxa de calor por unidade de comprimento de tubo. Concluíram também que a difusividade térmica do protótipo se deve primordialmente em função da taxa de calor liberada pela estaca e consequentemente da temperatura constante na entrada do protótipo.

Da mesma Universidade de Yangzhou, Fei & Dai (2018) melhoraram a o entendimento dos efeitos dos ciclos térmicos sobre o comportamento mecânico de um protótipo de estaca trocadora de calor pré-fabricada em argamassa de cimento, em 1G, com dimensões 10 cm de diâmetro e 90 cm de comprimento, com tubos de polietileno de 16 mm de diâmetro na configuração 1U, executada em uma caixa com areia seca com densidade média de 30%, realizada por pluviometria com dimensões de 1 x 1 x 1,5 m (comprimento x largura x altura).

Ademais, na Tabela 2.8, mostra-se um resumo geral dos principais trabalhos em estacas térmicas, desenvolvidos no Brasil e no mundo, acerca de comportamento térmico e comportamento termomecânico, com as principais conclusões e observações relevantes para o desenvolvimento e análises dos protótipos de estacas térmicas estudadas nesta tese.

Tabela 2.8: Principais estudos e resultados sobre o comportamento termomecânico e o desempenho térmico de modelos e protótipos de estacas térmicas desenvolvidos em laboratório, no Brasil e no mundo.

| Referência | Principais conclusões sobre o comportamento termomecânico |
|--|--|
| <p>Universidade do Colorado Estados Unidos</p> <p>McCartney & Rosenberg (2011)</p> <p>Goode & McCartney (2015)</p> <p>Stewart & McCartney (2012)</p> <p>Stewart & McCartney (2014)</p> | <p>2 O aquecimento de uma estaca de energia de 15° a 60°C aumenta o atrito lateral em 40%. Entretanto, em termos práticos, essa faixa de temperatura não é representativa, pois esse ganho de atrito, é perdido quando as cargas térmicas cessam;</p> <p>3 O aquecimento das estacas térmicas semiflutuantes em silte compactado, resulta em um aumento da capacidade de carga total das estacas. No entanto, o aquecimento da estaca em areia é insignificante para o aumento da capacidade de carga total. Possivelmente por causa da compactação do silte durante a instalação de estacas;</p> <p>4 O processo de aquecimento induz maiores tensões compressivas na estaca, que são maiores do que as desenvolvidas devido ao carregamento mecânico;</p> <p>5 A tensão desenvolvida ao longo do comprimento da estaca, varia, e depende da magnitude do atrito lateral mobilizado;</p> <p>6 A maior tensão térmica axial ocorre perto da ponta da estaca, acima do ponto nulo;</p> <p>7 Mudanças nas propriedades do solo, durante ciclos transitórios não tem um impacto significativo na resposta térmica. O efeito termo hidromecânico na camada do solo, não afetou o comportamento do modelo de estaca térmica, além do fluxo de água induzido termicamente ter sido notado.</p> |
| <p>Universidade de Paris-Est França</p> <p>Kalantidou <i>et al.</i> (2012)</p> <p>Yavari <i>et al.</i> (2014)</p> <p>Nguyen <i>et al.</i> (2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A estaca apresenta um comportamento termo elástico quando a carga mecânica é inferior a 40% da resistência última, No entanto, quando a carga mecânica aplicada ultrapassa 40% da resistência última, desenvolve-se um comportamento plástico nos deslocamentos da estaca; • O atrito de interface estaca/solo, mobilizada, aumentou durante a carga mecânica inicial e foi significativamente modificado durante os ciclos térmicos subsequentes; • Foi medido recalque irreversível da estaca durante longos períodos de carregamento térmico cíclicos; • O primeiro ciclo térmico induz uma maior magnitude de deslocamento das estacas, que diminui gradualmente e se torna insignificante com os demais ciclos térmicos; • As tensões axiais induzidas, no final da fase de aquecimento, são maiores do que as desenvolvidas no final do resfriamento da estaca térmica. |

| | |
|---|---|
| <p>Hong Kong Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong</p> <p>Ng <i>et al.</i> 2014</p> <p>Ng <i>et al.</i> 2015</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A estaca térmica embutida em argila levemente sobre adensada, recalca mais acentuadamente durante os ciclos térmicos, em comparação com estacas em argilas muito sobre adensadas; • Foi observado um recalque de 3,8%D (diâmetro D), na estaca instalada em argila, em comparação com os 2,1%D associados a estacas em argilas fortemente sobre adensadas, ambos durante os ciclos de aquecimentos e de resfriamento; • Foram observados que tanto as estacas de energia (EP1 e EP2), instaladas em argila leve e fortemente sobre adensadas, respectivamente, continuaram a recalcar quando submetidos a aplicação de carga térmica sobre uma taxa reduzida; • Estacas térmicas em argilas, podem apresentar problemas de recalque a longo prazo; • O ponto neutro de tensões internas na estaca térmica, localizado abaixo da metade do comprimento da estaca, se desloca para baixo devido ao aumento da temperatura; • Sob carga pura de aquecimento, houve mobilização adicional da resistência de ponta, devido à expansão vertical da estaca térmica. |
| <p>University of Dundee Escócia</p> <p>Minto <i>et al.</i> 2016</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foi desenvolvido e testado um novo modelo reduzido, de estaca térmica, em centrífuga, com uma mistura de argamassa, termicamente melhorada, na qual buscou-se reproduzir uma estaca térmica de forma realista, tanto em propriedades térmicas quanto mecânicas, de um modelo reduzido de estaca trocadora de calor, em centrífuga; • A adição de pó de cobre na argamassa, foi eficaz para melhorar as propriedades térmicas, mantendo simultaneamente sua capacidade de reproduzir as propriedades mecânicas do concreto. 6% é a porcentagem ideal, onde os efeitos de temperatura em até 50°C são desprezíveis. O novo modelo de estaca de energia sugerido é então uma mistura de gesso, areia de sílica, água e cobre em pó. |
| <p>Universidade Estadual da Pensilvânia Estados Unidos</p> <p>Kramer & Basu (2014)</p> <p>Ahmadipur & Basu, (2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O aumento na temperatura da estaca térmica, resulta em um desenvolvimento de tensões efetivas adicionais na ponta da estaca; • Além disso, o aumento da temperatura leva a um aumento no confinamento lateral e, conseqüentemente, aumento de atrito de interface e resistência de ponta mobilizada, na estaca térmica. |
| <p>Chongqing University, Hohai University</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A pressão lateral da estaca na configuração W, foi de 1,18 vezes maior comparado com a configuração espiral, e 1,24 vezes, quando comparado com a configuração 1U, com ambos submetidos a mesma potência térmica; |

| | |
|---|--|
| <p>China</p> <p>Wang <i>et al.</i> (2016)</p> <p>Wang <i>et al.</i> (2017)</p> <p>Peng <i>et al.</i> (2018)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foi observado o acúmulo de adensamento após cada ciclo térmico, na configuração W, cuja medição foi de - 0,585mm (0,56%D) no final do terceiro ciclo, o que indica que deve ser dada atenção onde os ciclos repetidos de aquecimento-arrefecimento são envolvidos; • Analisaram resultados experimentais, em modelos de estacas térmicas e estacas convencionais, em escala 1G, inseridos em areia; • O comportamento do grupo de estacas se mostrou diferente do comportamento de uma única estaca, em termos de tensões axiais induzidas, o que pode ser explicado pelo desenvolvimento de pressões laterais de confinamento induzidas, nas estacas térmicas; • O comportamento termomecânico de uma estaca térmica também é controlado por condições de confinamento lateral; • As tensões axiais induzidas, nas estacas térmicas, são basicamente uma função das condições de confinamento, controladas por pressões laterais confinantes; • Estudaram também modelos reduzidos de estacas térmicas de concreto (em escala 1:20), em uma câmara térmica de grandes dimensões, imersos totalmente em areia seca, com carregamento vertical aplicado na cabeça da estaca; • Durante os ciclos térmicos, observou-se a presença de tensões térmicas induzidas nas estacas, e após o término de cada ciclo, pôde-se observar a presença de tensões residuais induzidas; • As tensões axiais aumentaram ao longo da profundidade, mas sempre abaixo do limite de tensão do concreto. As cargas axiais aumentaram, durante o aquecimento, cerca de 42% da carga total aplicada na cabeça da estaca, e durante o resfriamento, observou-se recalques induzidos; • A resistência de ponta das estacas aumentou durante o ciclo de aquecimento, e diminuiu no resfriamento, assim como as pressões do solo. |
| <p>Universidade de Wisconsin-Milwaukee</p> <p>e Instituto Politécnico da Virgínia</p> <p>Estados Unidos</p> <p>Yazdani <i>et al.</i> (2019)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foram realizados 5 testes de prova de carga, em estacas térmicas de pequena dimensão, em ambiente controlado de laboratório, em 1G. Os testes foram realizados a fim de entender os efeitos da resistência lateral e de ponta, durante o verão, na qual o solo atua como um dissipador de calor. O material utilizado para execução dos ensaios, foi o caulim totalmente saturado, em condição normalmente adensada; • Foi observado que o calor pode melhorar a capacidade axial e que o aquecimento cíclico e não cíclico pode causar diferenças na resistência lateral e na ponta da estaca. Ademais, o aquecimento também aumenta a rigidez inicial da curva tensão x recalque na estaca térmica; • O aumento da resistência lateral da estaca térmica, pode ser explicado pelo aumento do ângulo de atrito de interface, devido a expansão da estaca, durante o carregamento térmico. |
| <p>Universidade de Yangzhou</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolveram modelos reduzidos de estacas térmicas afim de estudar o comportamento termomecânico de mudança de fase, das estacas térmicas de concreto no modo verão; |

| | |
|---|--|
| <p>China</p> <p>Yang <i>et al.</i> (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Em comparação com estacas térmicas tradicionais, as estacas térmicas de concreto com mudança de fase podem reduzir o aumento da temperatura do corpo da estaca e melhorar o armazenamento de energia em sua estrutura. Ao mesmo tempo, devido a extração de calor, resultante da liquefação da mudança de fase do material, o aumento de temperatura e o raio de influência de calor da estaca, podem ser aliviados, e conseqüentemente ocorrer um efetivo alívio da dilatação térmica e das tensões induzidas na estaca; • Os deslocamentos máximos da cabeça da estaca, medidos no modelo, foram de 0,12mm. |
| <p>Universidade de Shenzhen</p> <p>China</p> <p>Bao <i>et al.</i> (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolveu um modelo reduzido de estacas trocadoras de calor, em ambiente controlado de laboratório, na qual comparou um modelo de estaca híbrida (argamassa com esferas de aço em mistura), com um modelo de estaca térmica convencional sem a adição de esferas metálicas na mistura. Ambas imersas em um tanque com argila não saturada; • Variaram a taxa de fluxo de calor e o comportamento térmico do sistema no solo circundante. • Resultados mostraram que o uso de estacas térmicas híbridas, com esferas de metal na massa de concreto melhora a capacidade de troca de calor do sistema, quando comparado com o sistema convencional de estaca de concreto; • O alcance do fluxo de calor para a estaca térmica híbrida, atingiu duas vezes o alcance de calor do modelo de estaca convencional, para 12h de ensaio; • A estaca térmica híbrida exerceu uma distribuição de temperatura mais uniforme do que a tradicional; • Para todas as operações térmicas, a fluxo de calor transferido das estacas, mostrou-se alta no início dos testes, então diminuiu gradualmente, estabilizando com o tempo de circulação do fluido. |
| <p>Faculdade CNEC Rio das Ostras e Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF</p> <p>Brasil</p> <p>Leite (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolveu um modelo físico de estaca térmica, 1G, em argila normalmente adensada e sobre adensada; • O modelo foi executado em uma câmara térmica circular e instrumentada com argila sobre adensada e normalmente adensada, com sensores de temperatura ao longo da distância radial; • Ambos os meios (normalmente adensado e sobre adensado), a resistência não drenada tendeu a crescer proporcionalmente à variação de temperatura e a mudança permanente de volume é alcançado após um ciclo de aquecimento e arrefecimento. Por outro lado, a resistência não drenada indicou variações menos significativas para relações de sobre adensamentos maiores; |
| <p>Referência</p> | <p>Principais conclusões sobre desempenho térmico</p> |
| <p>Universidade Estadual da Pensilvânia</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A eficiência térmica de uma estaca de energia aumenta com o aumento da vazão do fluido no tubo, no entanto, isso resulta em maior consumo de energia elétrica. Assim, poderia ser prejudicial em seu desempenho sazonal; |

| | |
|---|--|
| <p>Estados Unidos Kramer <i>et al.</i> (2015)</p> | <ul style="list-style-type: none"> Os ciclos térmicos têm influência positiva na eficiência de transferência térmica de uma estaca trocadora de calor. O primeiro ciclo (caso de aquecimento), aumenta o potencial térmico do solo, o que resulta em uma maior taxa de troca de calor durante o processo do ciclo térmico de extração de calor; |
| <p>Universidade de Sheffield Inglaterra Black & Tatari (2015)</p> | <ul style="list-style-type: none"> Foram realizados ensaios térmicos de modelos reduzidos, de estaca térmicas, em solo transparente, por meio da metodologia de análise de imagem, relacionando a intensidade do pixel com a temperatura do solo, a fim de definir o fluxo de calor no solo ao longo da estaca; Observou-se que zona de influência de calor dissipado estendeu-se em uma distância radial de até 1,5D. |
| <p>Universidade do Texas A & M Estados Unidos Akrouch <i>et al.</i> (2015) Akrouch <i>et al.</i> (2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> O desempenho térmico da estaca pode aumentar em até 40%, em areia, dependendo do grau de saturação; A variação do lençol freático na areia diminui a eficiência da troca térmica em até 43%. No entanto, pouca diferença significativa foi observada nas argilas arenosas. |
| <p>Universidade de Yangzhou China Yang <i>et al.</i> (2016) Fei & Dai (2018)</p> | <ul style="list-style-type: none"> A taxa de dissipação de energia térmica aumenta linearmente com um aumento na temperatura do fluido de entrada; Uma redução no tamanho do passo (espaçamento vertical entre duas hélices) poderia levar a um aumento na dissipação total de calor; A difusividade térmica de uma estaca térmica (ou capacidade de trocar energia térmica com seu entorno) tem significativa influência sobre sua taxa de dissipação de calor e sobre a taxa de restauração da temperatura do solo; Foi desenvolvido um modelo reduzido de estaca térmica embutido em areia seca, em escala 1G. Sujeita a 3 ciclos térmicos de 15°C; A resistência última da estaca, após ciclos térmicos, não apresentou perdas significativas, mas o de recalque na cabeça da estaca, durante o ciclo térmico, deve ser considerado no dimensionamento de uma estaca térmica. |
| <p>Universidade de ciência e tecnologia de Hong Kong China</p> | <ul style="list-style-type: none"> Investigaram, por meio de modelos reduzidos em centrífuga, os efeitos o espaçamento de grupos estacas térmicas ativas, submetidas a cargas térmicas assimétricas em argila mole; A distribuição e temperatura para o grupo 5D, foi similar a distribuição de temperatura para uma estaca simples. No entanto, a temperatura da estaca inativa no grupo 3D foi afetada em cerca de 30% nas mudanças de temperatura. Assim, as estacas térmicas inativas também são afetadas por cargas cíclicas, mas em menor grau; Foram observados recalques irreversíveis, acumulados e dilatação térmica, do grupo 3D, cerca de duas vezes maior do que o grupo 5D. |

| | |
|---|---|
| Ng <i>et al.</i> (2021) | |
| Universidade de Brasília – UnB Brasil Cunha & Bourne-Webb (2022) | <ul style="list-style-type: none"> • Desenvolveram uma extensa revisão crítica sobre o atual entendimento do mecanismo de funcionamento de estacas térmicas para climatização de edifícios; • O fluxo de calor é altamente influenciado pelas condições de saturação do solo, e pela termodinâmica; • A Eficiência diminui em solos não saturados. No entanto, solos tropicais com abundância de minerais de alta capacidade térmica, pode ter potencial para uma possível aplicação viável em regiões tropicais e subtropicais; • O contato térmico de resistência de interface também é um fator importante a ser considerado no fluxo térmico estaca/solo, embora ainda seja difícil estimar para a maioria de aplicações práticas; |
| Escola de Engenharia de São Carlos – USP Bandeira Neto (2019) Morais, <i>et al</i> (2019) Morais, <i>et al</i> (2020) Pessin (2021) | <ul style="list-style-type: none"> • Avaliaram a performance de estacas trocadoras de calor na em solo laterítico não saturado com alta porosidade, próximo a superfície; • Mapearam as variações do nível d'água e a influência da mesma no desempenho de troca térmica. As estacas mostraram um bom potencial de transferência de calor no local investigado; • Avaliaram o desempenho e a aplicação de estacas trocadoras de calor em solo tropical não saturado, encontrado em várias regiões do Brasil, e o efeito de seu uso no comportamento da fundação; • Mostraram que devido as características climáticas do local avaliado, da consequente variação do grau de saturação do subsolo e flutuação do lençol freático, a eficiência de troca de calor com o solo varia sazonalmente. Além disso, foram realizados uma série de ensaios TRT em estacas carregadas mecanicamente de forma simultânea, indicaram que o comportamento mecânico da fundação não foi prejudicado durante as simulações de utilização de sistemas de energia geotérmica superficial; • Realizaram também um estudo experimental, na qual avaliaram a influência da configuração dos tubos na eficiência de troca térmica com o solo e na variação da temperatura da estaca. Quando maior foi a variação de temperatura, entre o solo e a estaca, maiores foram a troca de calor com o solo; • Avaliaram também a influência do fluxo de água subterrânea na troca de calor entre a estaca e o subsolo; • Maiores velocidades do fluxo de água subterrânea podem contribuir para a dissipação de calor no solo e amenizar os efeitos de saturação térmica do sistema; • A configuração dos tubos instalados na estaca afeta a eficiência da troca térmica com o subsolo; • O efeito de um ciclo de carregamento térmico não prejudicou no desempenho da fundação no estudo realizado; • A presença do fluxo de água subterrânea reduziu 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 foi desligado. |

Vale ressaltar que apesar dos estudos desenvolvidos nesta tese terem abordado somente do ponto de vista de comportamento térmico e em ambiente controlado em laboratório. Foi realizado uma revisão bibliográfica mais extensiva do assunto, abrangendo não só estudos em laboratório de protótipos de estacas, como também estudos de campo e análises numéricas, ambos tratados não só sobre o ponto de vista de desempenho térmico da estaca trocadora de calor como também sobre o ponto de vista termomecânico de estacas trocadoras de calor.

Tal finalidade se deu por não só haver conclusões importantes nos artigos estudados acerca do tema como também estes artigos abordarem o assunto de forma ampla e geral, trazendo o estado da arte do assunto como um todo. Tal objetivo se deu afim de contribuir com o desenvolvimento de trabalhos futuros acerca do assunto. Sendo assim, como exposto anteriormente, os principais trabalhos sobre comportamento termomecânico e desempenho térmico em estudos de campo podem ser vistos no Anexo I, bem como estudos de análises numéricas podem ser vistos no Anexo II desta tese.

2.11 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi apresentado uma revisão bibliográfica, que teve como foco abordar os principais conceitos teóricos e físicos necessários para a compreensão mais concreta das análises e conclusões desta tese. Foram abordadas as principais definições de sistemas geotérmicos bem como o funcionamento de um sistema fechado de trocador de calor geotérmico de baixa entalpia. Abordou-se também as principais propriedades termofísicas do solo bem como os principais trabalhos e estudos de modelos desenvolvidos de estimativas de condutividade térmica de solos areno-argilosos ou solos em geral. Foram abordados os principais mecanismos de difusão térmica que ocorre sobre um sistema de estaca trocadora de calor, na qual foram introduzidos os principais conceitos de resistência térmica. Foram abordados também as definições dos principais números adimensionais estudados em problemas de fluxo de calor em estacas térmicas, nas quais foram introduzidas as funções de resposta térmica (Funções G). Abordou-se também o funcionamento do ensaio de resposta térmica bem como os principais aspectos técnicos dos principais trabalhos do Brasil e do mundo, acerca de o equipamento de ensaios TRT. Foram abordados também uma pequena revisão bibliográfica acerca de poços geotérmicos de inspeção sazonal na qual mostrou-se a importância do estudo das variações térmicas do subsolo ao longo do tempo. Por fim, foram

mostrados os principais trabalhos de estudo em laboratório de estacas térmicas e seu estado da arte de forma ampla, tanto sobre o ponto de vista de desempenho térmico quanto comportamento termomecânico, ambos analisados sobre trabalhos de laboratórios, de campo e de análises numéricas.

2.12 Observações importantes acerca da revisão bibliográfica

Pode-se perceber algumas lacunas nos estudos abordados nesta revisão bibliográfica:

- Há pouco detalhamento acerca do desenvolvimento e funcionamento do equipamento de ensaio TRT, tais como: Materiais utilizados, sistemas de segurança contra superaquecimento e controle de potência elétrica, desafios construtivos e detalhes elétricos de controle e leitura dos dados utilizados no ensaio;
- Não se tem um conhecimento pleno acerca de parâmetros de ajuste de modelos e estimativa da condutividade térmica para solos tropicais. Tais parâmetros são ajustados em sua grande maioria apenas para solos temperados, o que leva a incertezas de estimativas da condutividade térmica em solos tropicais quando se deseja utilizar os métodos convencionais da bibliografia vigente. Daí a importância da presente pesquisa;
- Não se tem um modelo desenvolvido e validado especificamente para solos tropicais de Brasília;
- Há poucos trabalhos experimentais de estudo de resposta térmica em protótipos de estacas térmicas controladas em ambiente de laboratório na qual haja um detalhamento e observação do processo de troca térmica e da difusão de calor em todo o sistema ao longo do tempo, limitando-se em grande parte, apenas em trabalhos de análises numéricas acerca do assunto;
- É necessário compreender melhor como se dá o comportamento de resposta térmica (Função G) de estacas trocadoras de calor em situações de baixa esbeltez.

Ao observar todos estes trabalhos da revisão bibliográfica, o desenvolvimento desta tese consistiu em abordar os principais pontos acima, que ainda se encontram em abertos ou pouco abordados no contexto geral da academia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as principais características geotécnicas e geotérmicas do solo tropical estudado nesta tese. É abordada também a descrição da bancada de ensaios de resposta térmica, o desenvolvimento da câmara térmica, o controle de compactação do solo para execução do protótipo, o material e métodos desenvolvidos para os testes de condutividade térmica em laboratório.

Na Figura 3.1, mostra-se um esquema amplo do programa experimental com as principais etapas utilizadas no desenvolvimento metodológico dos materiais utilizados, ao qual foi possível atingir os objetivos desejados desta tese.

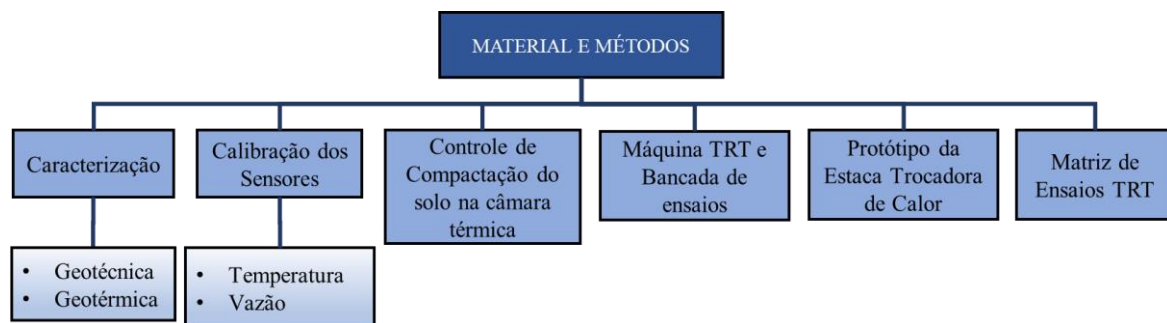


Figura 3.1 – Fluxograma do desenvolvimento metodológico da tese.

Como é possível observar na Figura 3.1, foi realizada a caracterização geotécnica do solo tropical do antigo campo experimental do programa de Pós-Graduação de Geotecnia da Universidade de Brasília. Este solo é bastante conhecido em diversos trabalhos desenvolvidos pelo programa, sendo que o objetivo de se utilizar este solo se deu não somente pela facilidade de coleta, mas pelo vasto conhecimento de suas características geotécnicas.

Após a caracterização, foram desenvolvidos os ensaios de calibração e aferição dos sensores de temperatura e de vazão utilizados nesta tese. Concomitantemente, iniciou-se a preparação e desenvolvimento do controle de compactação do solo na câmara térmica desenvolvida e a preparação da bancada de ensaios com o o equipamento de ensaios TRT. Após a compactação do solo, realizou-se a execução de concretagem do protótipo de estaca trocadora de calor na câmara, e finalmente, após 28 dias de cura do concreto na estaca, pôde-se realizar os ensaios de resposta térmica propriamente dito na câmara.

Vale ressaltar que no fluxograma mostrado na Figura 3.1, é apresentado apenas uma visão geral das principais etapas da metodologia desenvolvida, sendo que cada etapa dessa será apresentada com maior requinte de detalhes nas subseções a seguir.

3.1 Local de coleta do solo estudado

O solo utilizado nesta pesquisa foi coletado no antigo campo experimental de Fundações e ensaios de campo do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da UnB, situado no Distrito Federal. A data de coleta foi agosto de 2019. O antigo campo experimental situa-se aos fundos do prédio de laboratórios do SG13 e ao lado do Instituto de Sismologia, à 12 m x 3 m de distância do ponto de referência, conforme mostrado na Figura 3.2. A localização exata do ponto de coleta, são as coordenadas geográficas de 15°45'58" S e 47°52'8" O.

O motivo da escolha do local de coleta se deu pelo fato do solo coletado ser característico do DF e pelo vasto conhecimento das características geotécnicas do solo devido as inúmeras pesquisas desenvolvidas nesse campo experimental, nas quais podem ser citadas os trabalhos de: Guimarães (2002), Silva (2007), Silva (2009), Fuji (2012), Restrepo (2010), Borges (2014), Queiroz (2015), entre outros. Na Figura 3.2, apresenta-se a imagem detalhada do local de coleta do solo estudado.

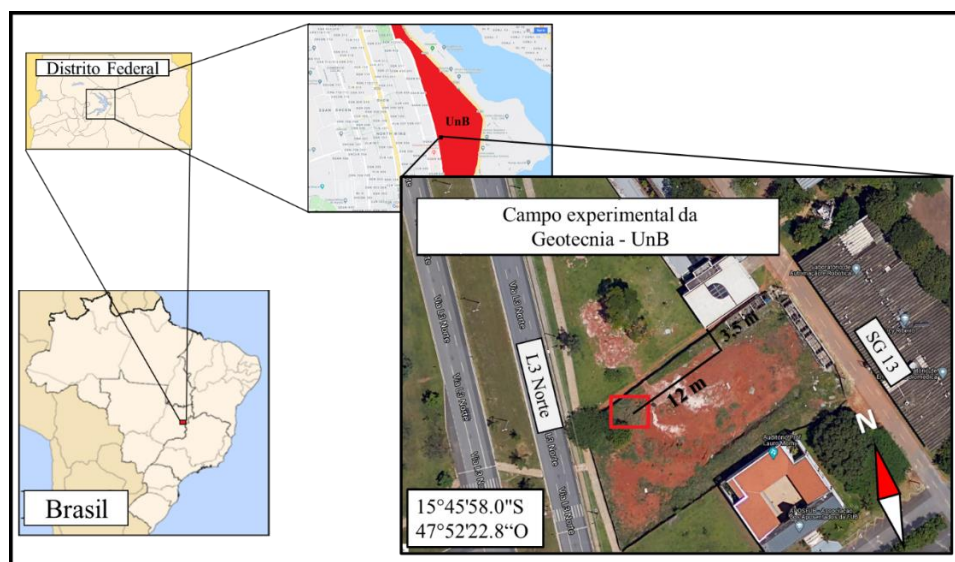


Figura 3.2 – Imagem do local de coleta do solo no antigo campo experimental do Programa de Pós Graduação da Geotecnia na UnB.

A Figura 3.3(a) e a Figura 3.3(b) mostram, respectivamente, o diagrama de quatro sondagens SPT e a locação de cada ponto, próximo ao local de coleta do antigo campo

experimental do Programa da Pós Graduação da Geotecnia da UnB, obtido de Guimarães (2002).

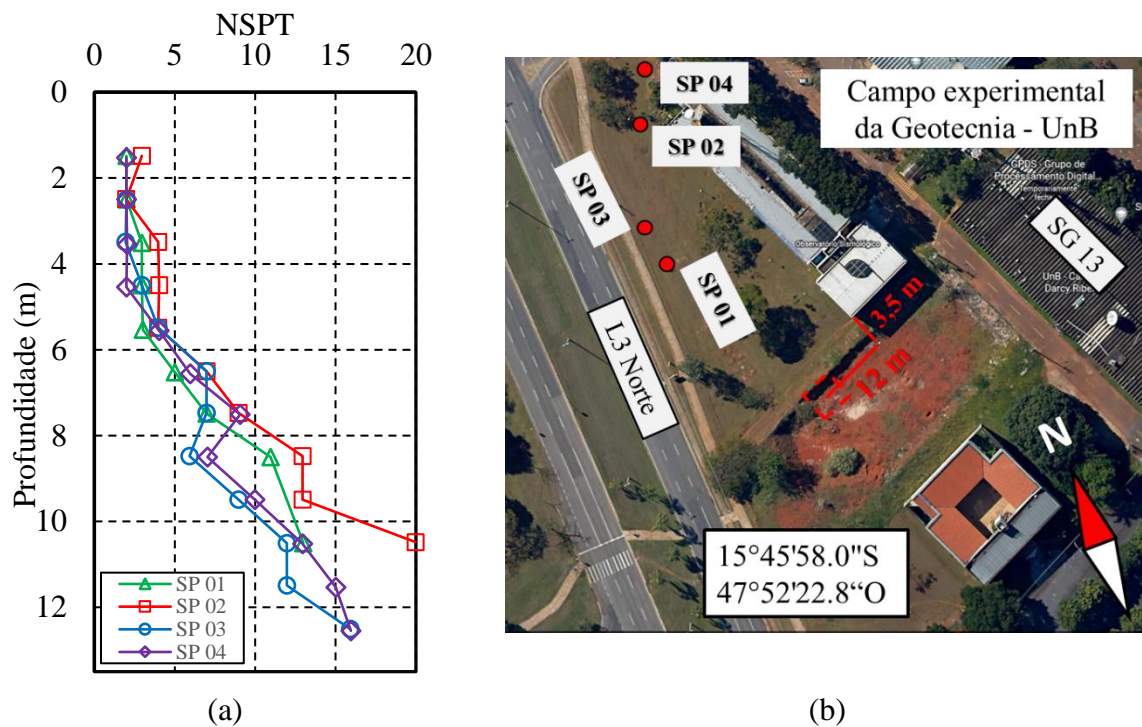


Figura 3.3: (a) Sondagem SPT dos 4 pontos do antigo campo experimental e (b) Locações dos respectivos pontos no antigo campo experimental do Programa de Pós-Graduação de Geotecnia da UnB.

A Figura 3.4 (a) mostra o perfil geológico geotécnico básico das três camadas iniciais das sondagens realizadas no antigo campo experimental, bem como as caracterizações geotécnicas das amostras recolhidas por Guimarães (2002) de índice de vazios (Figura 3.4 (b)), peso específico dos grãos (Figura 3.4 (c)), Índice de plasticidade (Figura 3.4 (d)) e peso específico aparente seco (Figura 3.4 (e)) a cada metro das camadas. Guimarães (2002) dividiu o perfil do solo em três horizontes:

O primeiro horizonte compreende as cotas entre 0m e -3,5m de profundidade, na qual encontra-se uma camada areno-argilo siltosa com elevado índice de vazios, variando entre 1,27 e 1,60, com peso específico dos sólidos médio de $26,5 \text{ kN.m}^{-3}$ e índice de plasticidade médio de aproximadamente 10. Esta camada é caracterizada pela presença de macro poros e agregações das partículas. Nesta camada há uma predominância mineralógica da gibbsita, seguido do argilomineral do tipo caulinita, o mineral quartzo e os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Foi nessa camada, mais precisamente na cota 2m que o solo desta pesquisa foi coletado.

No segundo horizonte compreendido entre -3,5m e -8,5m de profundidade, na qual encontra-se uma camada argilo-arenosa com silte, apresentando um índice de vazios decrescente, variando de 1,27 à 0,89, peso específico dos sólidos e índice de plasticidade semelhante a camada anterior.

No terceiro horizonte, compreendido entre -8,5m e 10m, limite da caracterização feita em Guimarães (2002), apresenta uma camada de silte que é caracterizada pelo aumento do índice de vazios e do peso específico dos sólidos, variando entre 0,89 à 1,08 e 26,25kN/m³ e 27,62kN/m³ respectivamente.

Vale ressaltar aqui que apesar de nos primeiros 3,5 metros de profundidade de sondagem ter sido encontrado areia argilo-siltosa. O solo estudado e obtido nessa pesquisa, consistiu de argila com comportamento lateríticas.

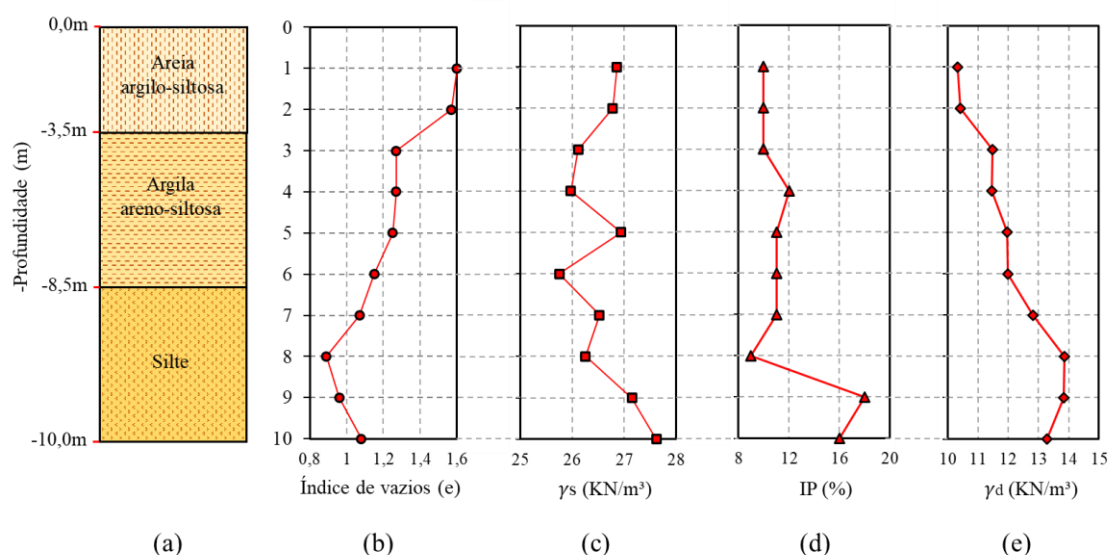


Figura 3.4: (a) Principais horizontes das camadas observadas pelas sondagens SPT do antigo campo experimental, (b) Perfil do índice de vazios (e) a cada metro do perfil de solo. (c) peso específico dos grãos (γ_s) a cada metro do perfil de solo, (d) Índice de plasticidade (IP) a cada metro do perfil de solo e peso específico aparente seco (γ_d) a cada metro do perfil de solo, Guimarães (2002).

3.2 Ensaios de caracterização geotécnica do solo

A caracterização geotécnica do solo estudado foi realizada seguindo as recomendações e especificações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Todos os ensaios de caracterização geotecnia foram desenvolvidos na Laboratório de Geotecnia da UnB.

Foram realizados ensaios de umidade higroscópica do solo coletado, limites de consistência (LL e LP) segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016) e a NBR 7180 (ABNT, 2016) respectivamente, peso específico dos grãos segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984), e granulometria com peneiramento grosso e fino, com e sem defloculante, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). Na Figura 3.5, mostram-se os principais ensaios de caracterização geotécnica do solo tropical utilizado nesta pesquisa.

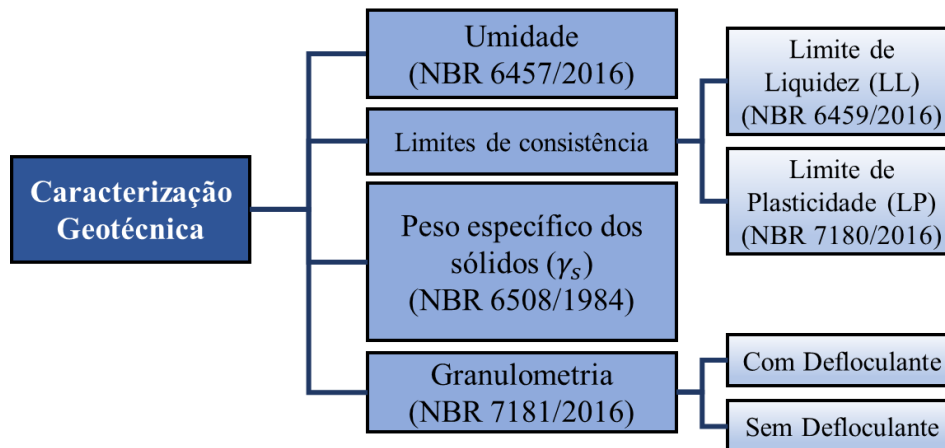


Figura 3.5 – Fluxograma de caracterização geotécnica do solo do antigo campo experimental do Programa de Pós-graduação da UnB.

O ensaio de umidade permitiu determinar a umidade higroscópica do solo coletado o que contribuiu para a correção adequada da umidade no controle de compactação do solo na câmara. Os ensaios de limite de consistência permitiram determinar a “janela” de umidade que permitiu escolher a umidade adequada para uma compactação homogênea do solo. O ensaio de peso específico dos grãos permitiu realizar os cálculos de forma precisa e acurada dos estados de compactação em todo os processos de ensaios térmicos e geotécnicos nesta tese. E finalmente, os ensaios de granulometria permitiram caracterizar de forma adequada o solo. Vale ressaltar o vasto conhecimento das características do solo estudado, tendo em vista sua ampla utilização no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB.

3.3 Medição das propriedades térmicas do solo laterítico

Para a determinação da condutividade térmica do solo utilizou-se do procedimento da norma ASTM D5334-08 (ASTM, 2008) – (*Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*) – Método padrão para determinação da condutividade térmica em solos e rochas macias com procedimento da sonda térmica. Foi utilizado o equipamento de medição de condutividade

térmica *KD2 Pro* da *Decagon Devices* (Figura 3.6 (a)), bem como a sonda TR-1 para determinação da condutividade térmica (Figura 3.6 (b)) e a sonda SH-1 para determinação da capacidade térmica do solo no estado seco (Figura 3.6 (c)).

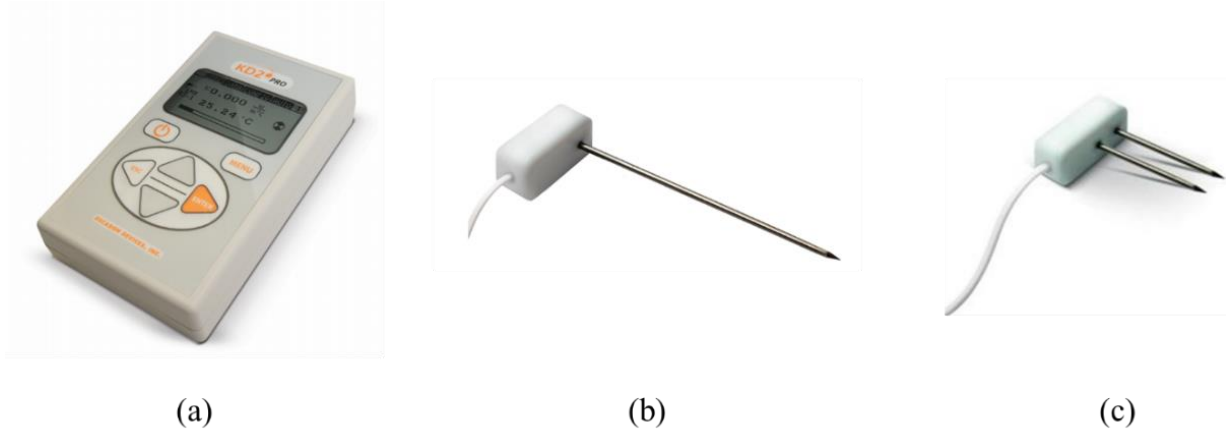


Figura 3.6 – (a) Datalogger *Kd2-Pro* da *Decagon*, (b) Sonda TR-1 e (c) Sonda SH-1.

A sonda TR-1 (Figura 3.6 (b)) possui 10 cm de comprimento e 2,4 mm de diâmetro, e é adequada para medições de meios porosos com presença de umidade, na qual a condutividade térmica varia entre 0,1 e 4 W/m.K. A acurácia de +/- 10%, para leituras entre 0,2 e 4 W/m.K (KD2, 2011).

A sonda SH-1, apresentada na Figura 3.6 (c), possui duas agulhas paralelas de 30mm de comprimento e 1,30mm de diâmetro, adequado para medições em meios porosos sem a presença de umidade. A acurácia é de +/- 10% para leituras entre 0,2 e 2 W/m.K. Sua principal característica está na possibilidade de medição da capacidade térmica do meio.

Vale ressaltar que todos os ensaios de condutividade térmica foram desenvolvidos no Laboratório de Transferência de Calor – LTC da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, por meio de uma parceria tríplice entre a UFRN, UnB e o IF Goiano/Rio Verde.

Foram por meio dos ensaios térmicos no solo que foi possível a obtenção de todos os parâmetros de condutividade térmica em função do peso específico aparente seco e da umidade do solo. A seguir será detalhado a metodologia utilizada na preparação das amostras utilizadas bem como todo o procedimento metodológico da realização dos ensaios térmicos no Laboratório de Transferência de Calor – LTC da UFRN. O objetivo de tal detalhamento se deu devido a pouca realização do ensaio no meio geotécnico cuja finalidade pedagógica está em sanar as principais dúvidas durante o processo de reprodução do ensaio.

3.4 Método de moldagem e preparação das amostras para ensaios de condutividade térmica em laboratório

Após a coleta do solo, houve a preparação de secagem e destorroamento para a preparação de moldagem das amostras em diferentes pesos específicos aparente seco. Foram moldados 5 corpos de prova (CP's) em diferentes pesos específicos afim de garantir uniformidade na estrutura porosa das amostras. Todos os CP's foram moldados sobre a mesma metodologia de compactação e sobre a mesma umidade de 20%.

Na Figura 3.7 (a), mostra-se o processo de destorroamento e preparação do solo para moldagem na umidade de 20%. Na Figura 3.7 (b), mostra-se os 5 principais corpos de prova moldados em pesos específicos diferentes.



Figura 3.7 – (a) Solo coletado seco em estufa e destorroado para moldagem. (b) Moldes de amostras em corpos de prova de dimensões 5x10cm nas cinco massas específicas aparente secas.

A compactação foi realizada em três camadas de mesma massa e em iguais alturas por meio do método dos cilindros de moldagem de corpo de prova para ensaio triaxial. Cada cilindro foi responsável por garantir uniformidade de compactação nas diferentes camadas de cada CP (Figura 3.8).

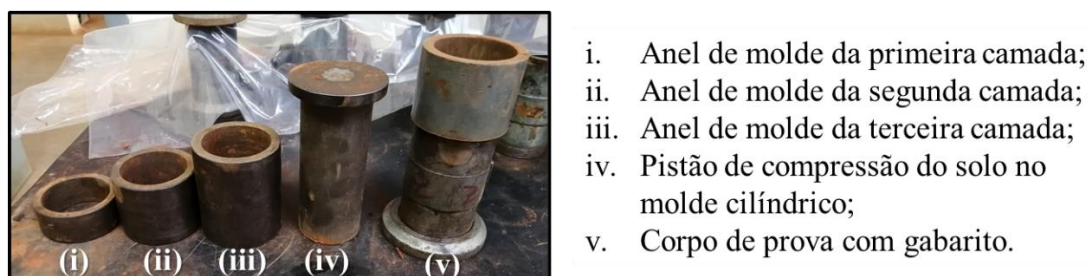


Figura 3.8 – Cilindros de compactação e molde de corpo de prova (5x10cm) para moldagem das amostras.

Vale ressaltar que as dimensões dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa (5x10cm) atendem as dimensões mínimas exigidas pela norma ASTM D5334-08 (ASTM, 2008), que

dispõe sobre o método padrão de determinação do ensaio de condutividade térmica de solos e rochas por meio do método da agulha térmica infinita, nas quais garantem a inexistência de interferência térmica da sonda nas extremidades do corpo de prova durante a realização dos ensaios.

Destaca-se também que cada cilindro teve suas medições geométricas feitas com paquímetro de precisão e suas massas foram pesadas de forma a serem descontadas nos cálculos de obtenção do peso específico aparente seco.

A compactação das amostras de solo foi realizada de forma controlada por compactação estática em três camadas de altura e mesma distribuição de massa dispostas igualmente. Para estados de compactação mais densas foi necessário uso da prensa da máquina de CBR para garantia da compactação da mesma quantidade em massa de solo nas camadas.

É importante frisar, que, os todos os modelos de propriedades térmicas obtidos com essas amostras, possuem limitações quanto ao comportamento do solo no estado indeformado, uma vez que todos os ensaios foram realizados sobre condições de solo compactado.

No detalhe mostrado na Figura 3.9, observa-se a compactação estática da primeira camada no corpo de prova com o auxílio da prensa do ensaio CBR, para condições mais densas de compactação.

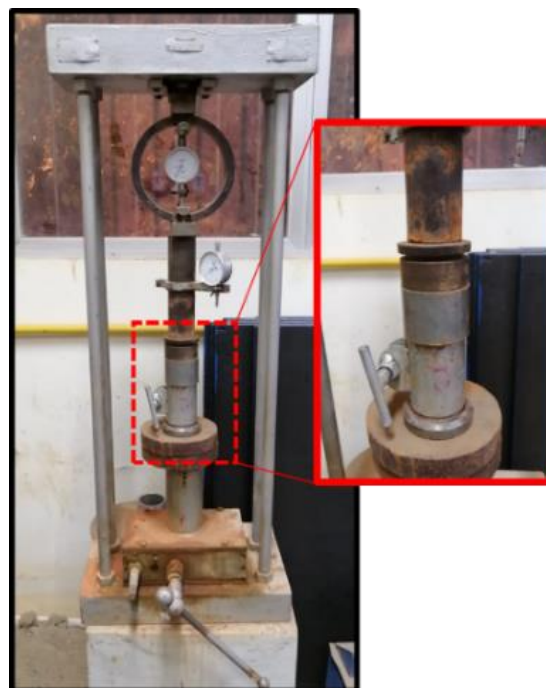


Figura 3.9 – Compactação estática para altas densidades na prensa CBR

Durante a realização dos ensaios térmicos foram avaliados os corpos de prova desde a condição saturada até a condição mais seca, para isso foi necessário a ajuda de uma estufa. Nesse sentido, na Figura 3.10 (a), mostra-se o processo de saturação após a moldagem dos CP's, e na Figura 3.10 (b) mostra-se o processo de secagem dos corpos de prova na estufa. Foram moldados três corpos de prova sobre 5 massas específicas aparente seca. Após a moldagem, foi realizada a saturação com uma pisseta. Após a saturação, foram realizadas a moldagem do furo para a sonda linear com gabarito padrão.

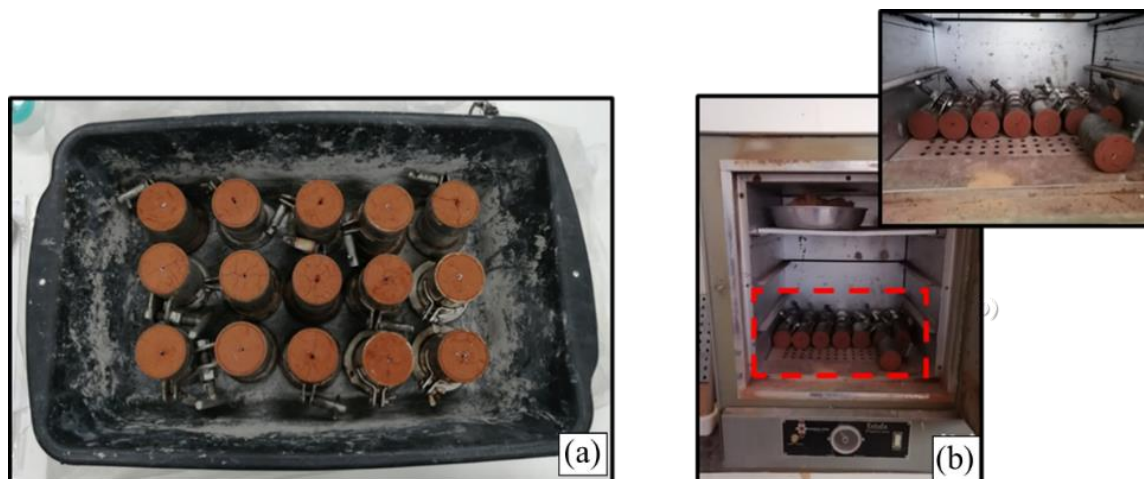


Figura 3.10 – (a) Saturação dos corpos de prova. (b) secagem parcial na estufa dos corpos de prova.

Nesse interim, vale ressaltar que a necessidade de utilização da estufa se deu devido a inviabilidade de se secar as amostras ao ar livre, uma vez que há uma considerável massa de solo protegida na contenção dos CP's, e apenas uma pequena área exposta na sua superfície, o que inviabiliza a evaporação natural da água nas amostras em toda a estrutura interna do CP. Sabe-se que não é a situação ideal, porém foi a situação viável para uma aplicação adequada do ensaio naquele momento.

O tempo de secagem das amostras em estufa variou de acordo com o a massa específica aparente seca da amostra e do estado de umidade uma vez que as amostras mais compactas apresentavam uma maior dificuldade de secagem em relação a amostras menos compactas. Sendo assim, o tempo médio de secagem das amostras variaram entre 4 h e 24 h.

Para cada etapa de secagem das amostras em estufa foi esperado um período mínimo de quatro horas para estabilização da temperatura e da umidade no interior das amostras, submetendo-as a uma temperatura constante de aproximadamente 20°C. Tal período foi

necessário para se garantir estabilização da umidade e temperatura ao longo de toda a massa de solo do corpo de prova.

3.5 Metodologia de execução dos ensaios de condutividade térmica e de capacidade térmica do solo

Na Figura 3.11 (a), mostra-se o procedimento de pesagem da amostra após retirada da estufa e seu respectivo resfriamento e estabilização. Posteriormente, houve a preparação para a realização do ensaio térmico na qual inseriu a sonda térmica na amostra (Figura 3.11 (b)) e posteriormente isolou-se termicamente o conjunto da amostra em uma caixa de EPS com EPS triturado em seu interior (Figura 3.11 (c)). Uma vez tampada a caixa isolante foi esperado um período de 5 minutos para a estabilização entre a temperatura do corpo de prova e a sonda térmica para somente assim dar início ao ensaio (Figura 3.9 (d)).

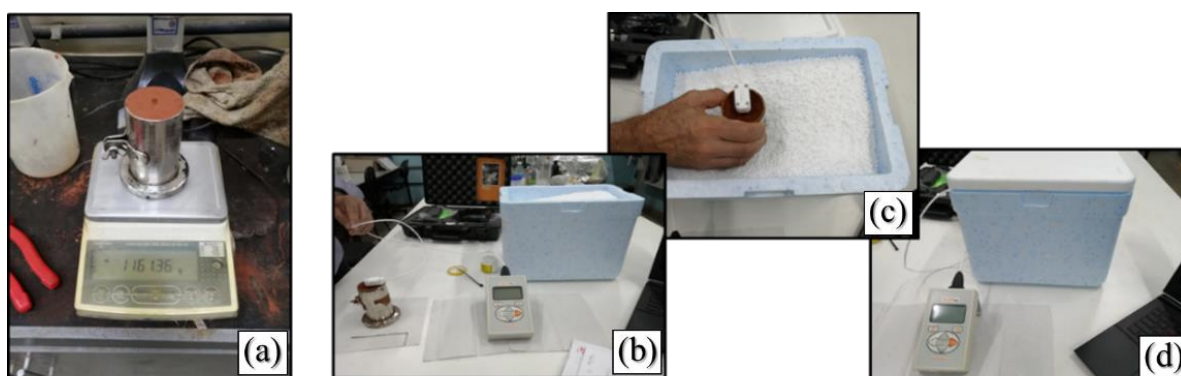


Figura 3.11 – (a) Pesagem da amostra após secagem parcial na estufa. (b) Inserção da sonda no corpo de prova. (c) inserção do corpo de prova na câmara isolada termicamente com EPS. (d) Execução do saio.

Ressalta-se que o procedimento de isolamento das amostras e estabilização de temperatura do corpo de prova com a sonda foi necessário, uma vez que tais procedimentos são importantes para se obter resultados precisos e acurados na realização de cada ensaio. Para cada corpo de prova, foram feitas três repetições de ensaios afim de garantir um tratamento estatístico adequado das propriedades térmicas obtidas.

Na Figura 3.12 (a), mostra-se o *setup* do ensaio de condutividade térmica do solo com a sonda TR-1, e na Figura 3.12 (b), mostra-se o ensaio de capacidade térmica do solo na condição seca com a sonda SH-1, ambos realizados nesta tese. Sendo assim, todos ensaios foram realizados em ambiente de temperatura controlada e todas as amostras foram inseridas em uma câmara isolada termicamente com EPS.

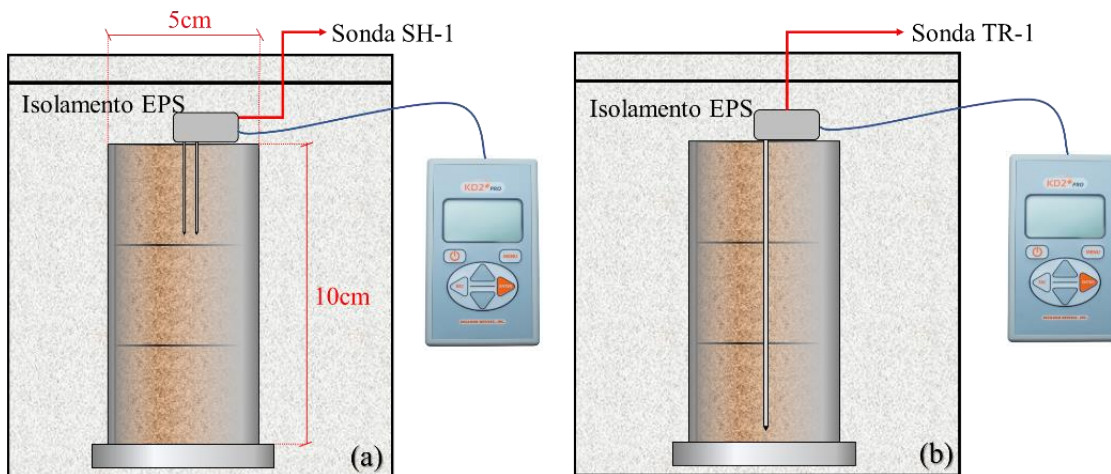


Figura 3.12 – (a) Setup de ensaio de condutividade térmica com a sonda TR-1. (b) Setup de ensaio de capacidade térmica com sonda SH-1. (Imagem fora de escala)

Na Figura 3.13, mostra-se um gráfico com a condição de moldagem dos cinco grupos de corpos de provas (A*; B*; F*; C*; N*) plotados em comparativos da curva de compactação do mesmo solo obtido por Queiroz (2015). Observa-se que todos os corpos de prova foram moldados na mesma umidade relativa de aproximadamente 20,2%.

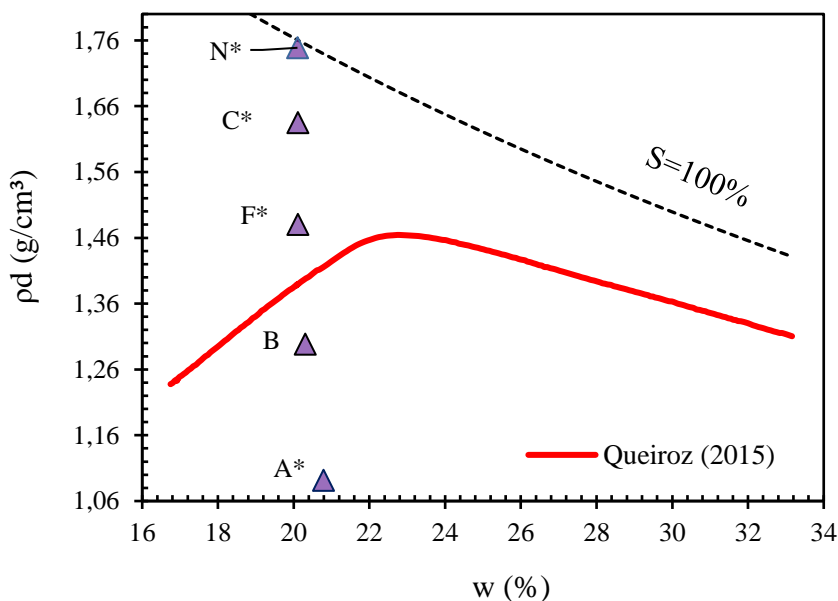


Figura 3.13 – Plotagem das condições de moldagem dos corpos de prova para análise térmica comparado com a curva de compactação obtida por Queiroz (2015).

Na Tabela 3.1, apresenta-se a matriz de ensaios de condutividade térmica realizados nesta pesquisa. Vale ressaltar que cada ensaio foi realizado com repetição de três vezes afim de se obter resultados estatisticamente mais consistentes. Sendo assim, foram realizados um total de 75 ensaios (25x3) de condutividade térmica.

Tabela 3.1 – Matriz de ensaios de medição de condutividade térmica de amostras moldadas nos corpos de prova

| ρ [g.cm ⁻³] | Umidade (%) | | | | |
|------------------------------|-------------|----|----|---|---|
| | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 |
| 1,09 | X | X | X | X | X |
| 1,29 | X | X | X | X | X |
| 1,48 | X | X | X | X | X |
| 1,63 | X | X | X | X | X |
| 1,75 | X | X | X | X | X |
| TOTAL | 25 x 3 | | | | |

O objetivo da matriz de ensaios destina-se em determinar correlações empíricas da condutividade térmica do solo laterítico para as principais condições geotécnicas de massa específica aparente seca e grau de saturação.

É válido destacar que foi aproveitado apenas uma única moldagem dos corpos de prova afim de fixar a massa específica aparente seca de cada amostra, variando assim apenas a umidade dos corpos de prova, levando-os para a estufa em tempo controlado e medindo-se assim o seu respectivo peso total após cada ciclo de ensaios.

Na Figura 3.14, mostra-se o fluxograma com o resumo do processo de realização dos ensaios para determinação das propriedades térmicas do solo estudado. Os parâmetros a serem obtidos são: condutividade térmica do solo (λ_{solo}) e capacidade térmica do solo (C_p). O primeiro passo foi a coleta do solo no antigo campo experimental e sua respectiva caracterização geotécnica. Posteriormente, após a preparação do solo foi realizada a moldagem dos corpos de prova sobre cinco condições de massas específicas aparente seca.

Após a moldagem das amostras, foram feitas as marcações com os furos da sonda térmica (TR-1 e SH-1) nas amostras e posteriormente sua saturação com ajuda de uma pisseta. Após realizadas a saturação, os conjuntos foram pesados afim de determinar a umidade inicial das amostras. Uma vez pesada foi inserida a sonda térmica na amostra e levada para o isolamento térmico na caixa de EPS. Após a estabilização térmica do sistema foram realizadas 3 medições de condutividade térmica da amostra com o *KD2-Pro*. Por fim, realizado o ensaio

de condutividade térmica de todas as amostras, estas foram levadas a estufa para diminuição da umidade, variando em aproximadamente 5% a menos em cada ciclo.

Após a secagem parcial das amostras, o procedimento de pesagem, a realização do ensaio de condutividade térmica e a secagem parcial na estufa das amostras, repetiu-se o algoritmo de forma cíclica até que as amostras secassem totalmente. Por fim, uma vez seca totalmente a amostra foi realizado o ensaio de capacidade térmica do solo com a sonda SH-1 (Figura 3.14).

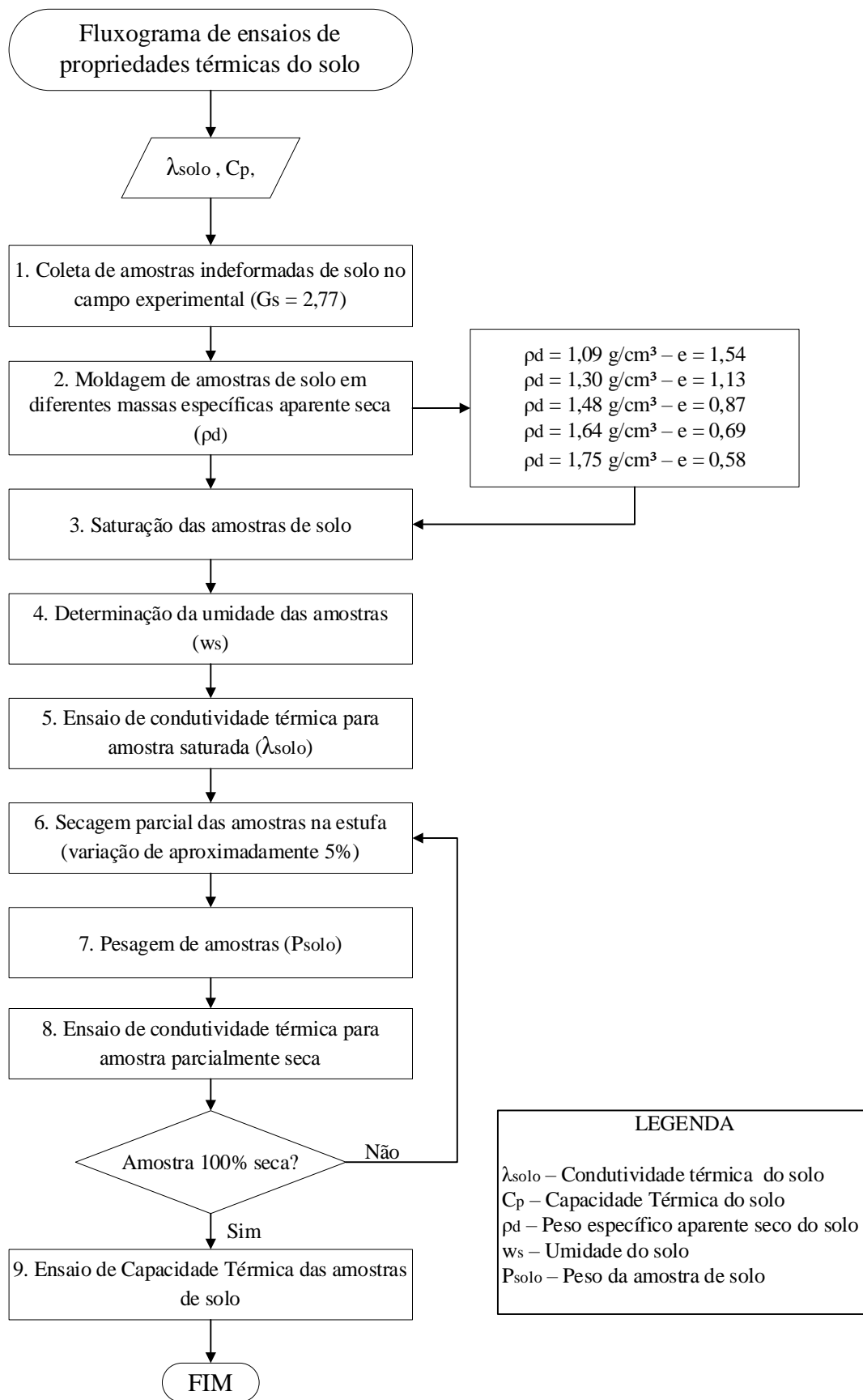


Figura 3.14 – Fluxograma de método desenvolvido para realização de ensaios de condutividade térmica e capacidade térmica do solo estudado.

3.6 Ensaio de fluorescência de raios X do solo

A fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada no Laboratório de Peneiras Moleculares da Universidade Federal do Rio Grande do Norte no aparelho Bruker S2 Ranger, utilizando radiação Pd e ânodo de Ag, potência máxima de 50 W, tensão máxima de 50 kV e corrente máxima de 2 mA. Para detecção dos elementos, utilizou-se um detector XFlash® Silicon Drift.

O objetivo da realização do ensaio, se deu em estimar de forma mais acurada as propriedades de capacidade térmica volumétrica dos minerais constituintes do solo e conseqüentemente, a difusividade térmica mineralógica do solo laterítico.

Sendo assim, o ensaio FRX se deu tendo em vista a grande variabilidade mineralógica dos solos lateríticos em relação a solos temperados e a necessidade de se obter dados mais acurados de capacidade térmica do solo estudado nesta tese.

3.7 Descrição e detalhamento da bancada de ensaios de resposta térmica

O desenvolvimento da bancada de ensaios para esta tese consistiu em criar um equipamento de ensaios de resposta térmica (TRT) de baixo custo bem como criar uma câmara térmica de grandes dimensões relativas e executar os protótipos de estaca trocadora de calor em uma faixa de 1m de comprimento em concreto armado.

Para isso, foi utilizado a plataforma Arduino na qual consiste em uma plataforma de prototipagem de projetos eletrônicos de baixo custo. A simplicidade de programação e baixo custo de prototipagem são as duas principais vantagens da utilização da plataforma.

Na Figura 3.15, mostra-se o projeto da bancada de ensaio com vista em perspectiva (Figura 3.155 (a)), vista superior (Figura 3.15 (b)) e as principais dimensões do protótipo e da câmara térmica desenvolvida nesta tese (Figura 3.15 (c)). Foi desenvolvido uma câmara térmica cujo espaço interno para compactação do solo consistiu em um cilindro de 120cm de altura e 120cm de diâmetro. O protótipo de estaca desenvolvida possui um diâmetro de 30cm e comprimento de 100cm.

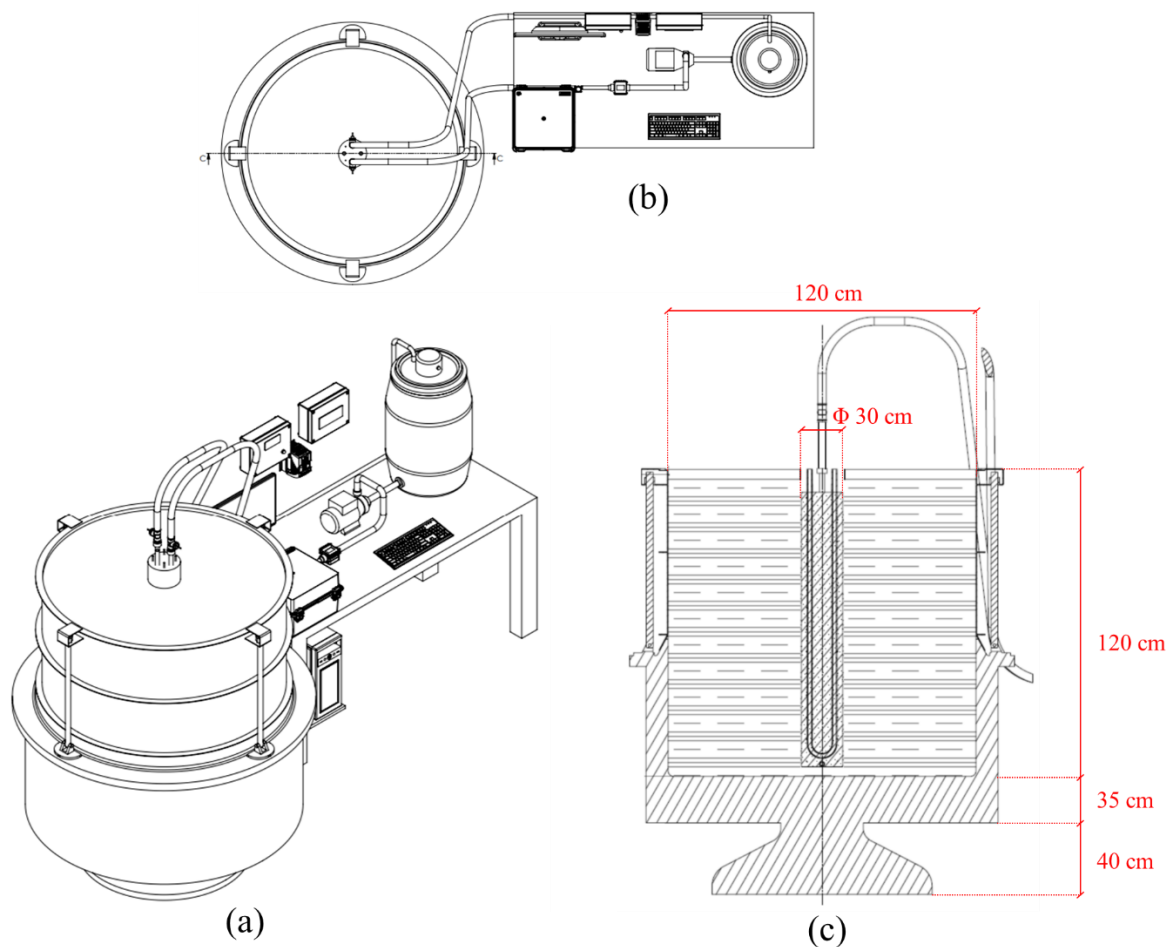


Figura 3.15 – (a) Vista em perspectiva do projeto de bancada TRT para laboratório. (b) Vista superior da bancada e (c) Corte C-C da câmara térmica com dimensões de projeto.

Na Figura 3.16 (a), é apresentada uma imagem da bancada com o equipamento de ensaios TRT desenvolvida nesta tese bem como a câmara térmica isolada termicamente a qual está o solo compactado de forma controlada e o protótipo de estaca trocadora de calor executada no centro da câmara.

Na Figura 3.16 (b), apresenta-se uma vista superior da câmara térmica isolada com os tubos e jumpers conectados na estaca dentro da câmara. O objetivo do isolamento da câmara foi em isolar o sistema de variações térmicas externas afim de observar o fenômeno físico de condução térmica no solo e convecção térmica interna na tubulação da estaca, ambos de forma isolada de interferências externas.

A Figura 3.16 (c), mostra-se os principais componentes de controle e leitura de temperatura, vazão, potência e perda de carga presentes no equipamento de ensaios de resposta térmica da bancada.

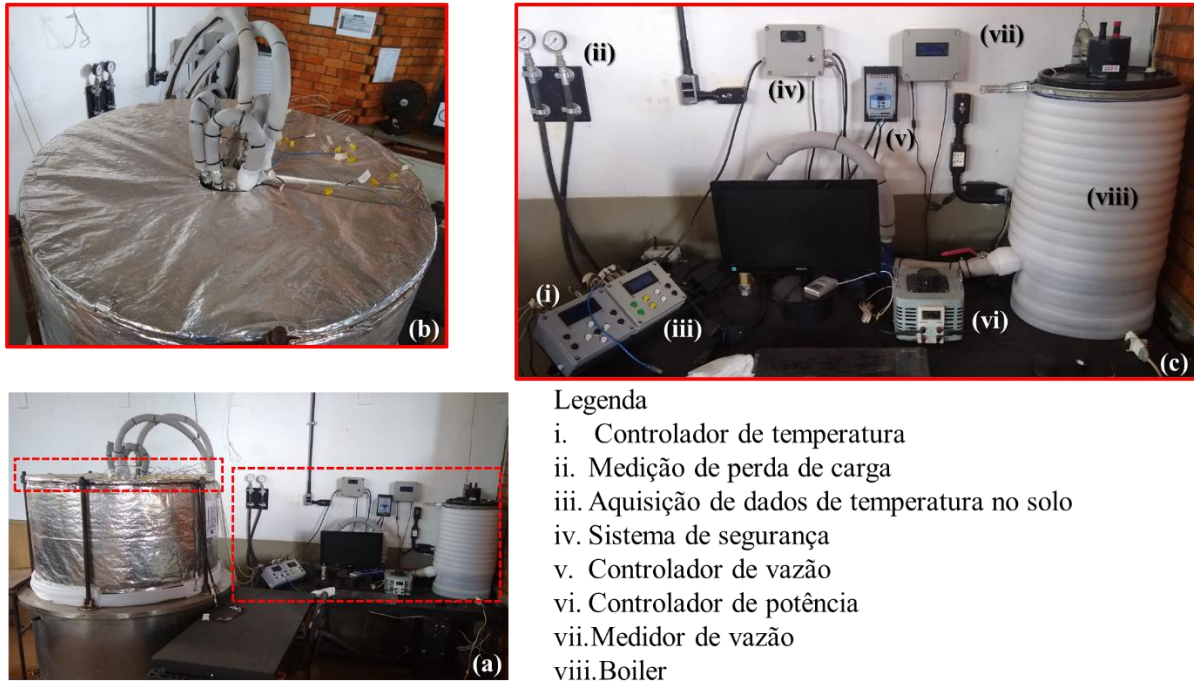


Figura .3.16 – (a) Bancada de ensaios do equipamento de ensaio TRT e da câmara térmica isolada. (b) Vista superior da câmara térmica com as conexões da tubulação da estaca. (c) Componentes principais do equipamento de ensaio TRT na bancada de ensaios.

Na Figura 3.17, mostra-se o esquema básico do diagrama da planta hidráulica do equipamento de ensaio TRT. É possível observar um circuito hidráulico fechado na qual circula água presente no boiler. O caminho da água no circuito pode ser descrito da seguinte forma: A água é aquecida por uma resistência térmica variável de até 3kW, que circula de forma forçada por uma bomba de 1/2 Cv, na qual passa por um fluxímetro afim de medir a vazão da água. Após passar pelo fluxímetro, a água passa por um manômetro afim de se medir a pressão da água em metros de coluna de água na entrada do protótipo de estaca trocadora de calor, onde é medido a temperatura de entrada da água na estaca. A água circula no interior da tubulação do protótipo, a depender a configuração e sai da estaca medindo-se a temperatura de saída da água. Posteriormente, a água passa por um manômetro de saída da estaca no tubo e retorna ao boiler para ser reaquecido sobre potência térmica constante e retorna novamente à estaca, fechando assim o circuito hidráulico.

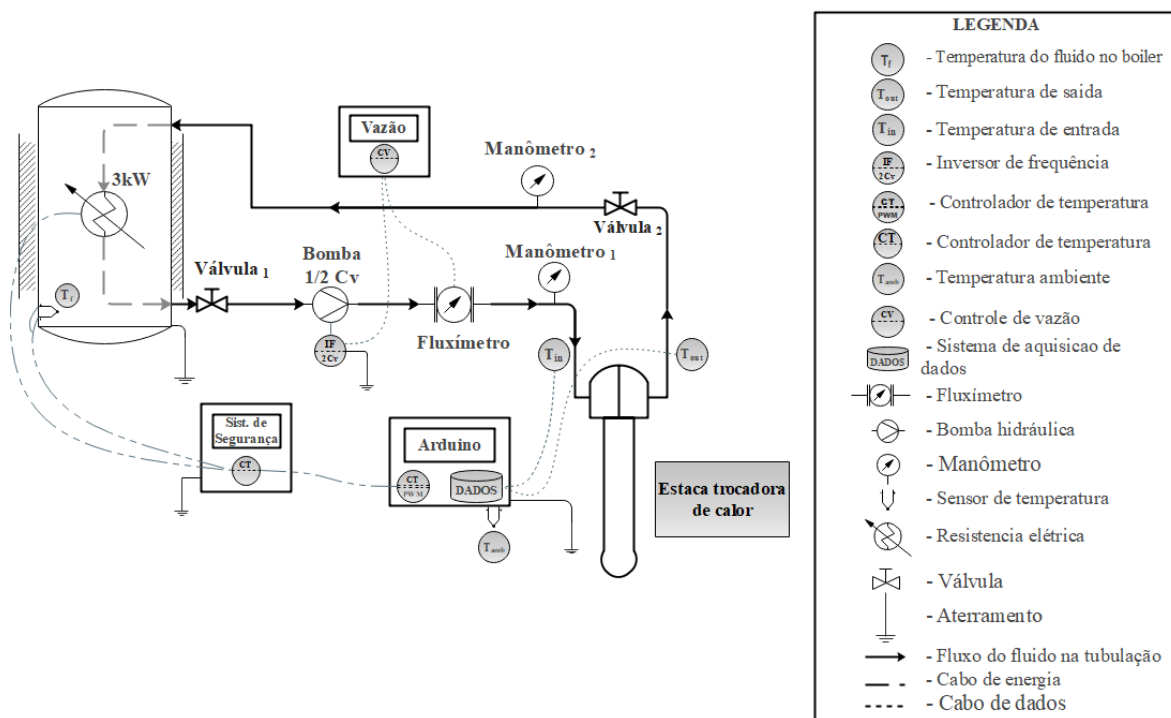


Figura 3.17 – Diagrama da planta hidráulica do equipamento de ensaio TRT desenvolvido nesta tese.

Nesse interim, e para uma melhor compreensão do funcionamento hidráulico do equipamento de ensaio TRT, foi desenvolvido um fluxograma (Figura 3.18) na qual é detalhado o processo de aquecimento e circulação da água nos principais componentes do equipamento de ensaio TRT. Inicialmente a água presente no boiler é aquecida pela resistência elétrica, posteriormente é succionada pela bomba hidráulica, após passar pela bomba, a água passa pelo sensor de vazão na qual é registrada no sistema de medição de vazão. Seguindo o fluxograma, têm-se a medição da pressão manométrica pelo manômetro 1 no início da estaca. Ademais, a água quente força um fluxo de troca térmica entre a estaca e o solo e posteriormente é medida a temperatura de saída (T_{out}) e a pressão manométrica na saída da estaca. Por fim a água retorna ao boiler afim de reaquecer e fechar do circuito hidráulico. Vale ressaltar que o Loop é finalizado apenas quando é atingido o tempo de ensaio estipulado pelo projetista e consequentemente a finalização do ensaio.

É importante frisar também, que a finalidade de se medir as temperaturas de entrada e saída na estaca, está em obter a diferença térmica no protótipo, que juntamente com a vazão mássica obtida no medidor de vazão é possível estimar a quantidade de calor trocado entre o protótipo e o solo. A perda de carga do sistema é estimada pela diferença de pressão medido na entrada e saída da água no interior da estaca.

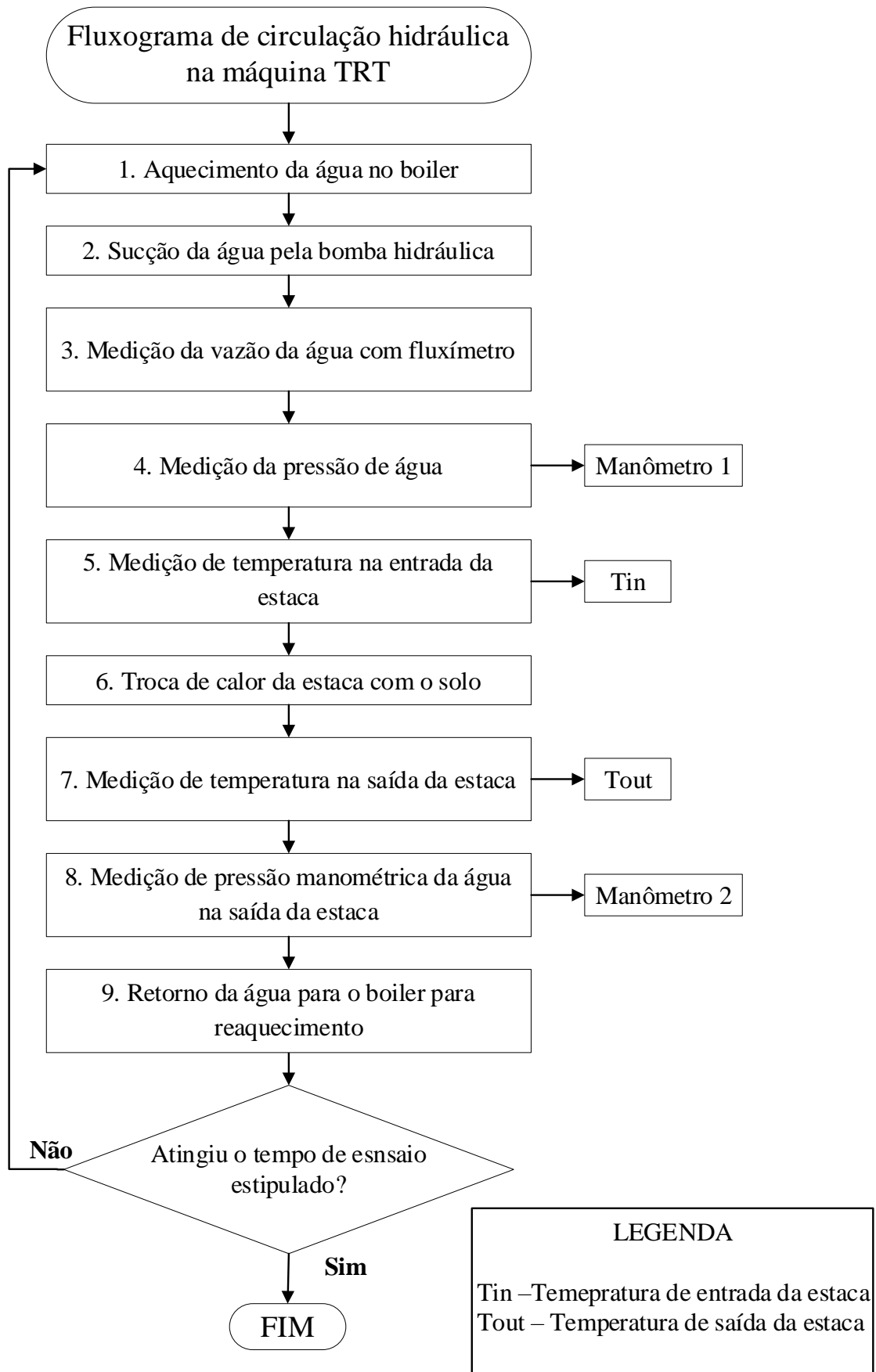


Figura 3.18: Fluxograma de circulação hidráulica do equipamento de ensaio TRT.

Na Figura 3.19 (a), apresenta-se o *layout* completo da bancada de ensaio com equipamento de ensaios TRT conectada no protótipo de estaca trocadora de calor utilizada nesta tese, com os principais detalhamentos das dimensões e conexões hidráulicas, como mostradas nas Figura 3.19 (b) e Figura 3.19 (c).

As mangueiras foram escolhidas de forma a suportar altas temperaturas por um longo período de trabalho. A mangueira adequada para este fim foi a do tipo SAE 100 R1 AT, utilizada para aplicações de pressões médias (pressão máxima de trabalho 8,8 MPa) e temperatura máxima de 100°C. Já as conexões utilizadas foram conexões metálicas do tipo galvanizada afim de suportarem altas temperaturas de trabalho sobre longos períodos sem sofrer danos.

Os principais componentes utilizados no equipamento de ensaios TRT foram:

- 1 boiler de 70L de PEAD;
- 1 resistência elétrica interna de 3kW;
- 1 Fluxímetro com vazão livre de 2 a 120 l/min;
- 1 bomba trifásica KSB 1/2Cv, modelo P500, com rotor de liga de latão com temperatura máxima de trabalho de 80 °C;
- 1 inversor de frequência WEG de 2Cv;
- 2 manômetros IMB, pressão máxima de 50m.c.a;
- 4 sensores de temperatura;
- 1 mangueira hidráulica SAE100 R1.

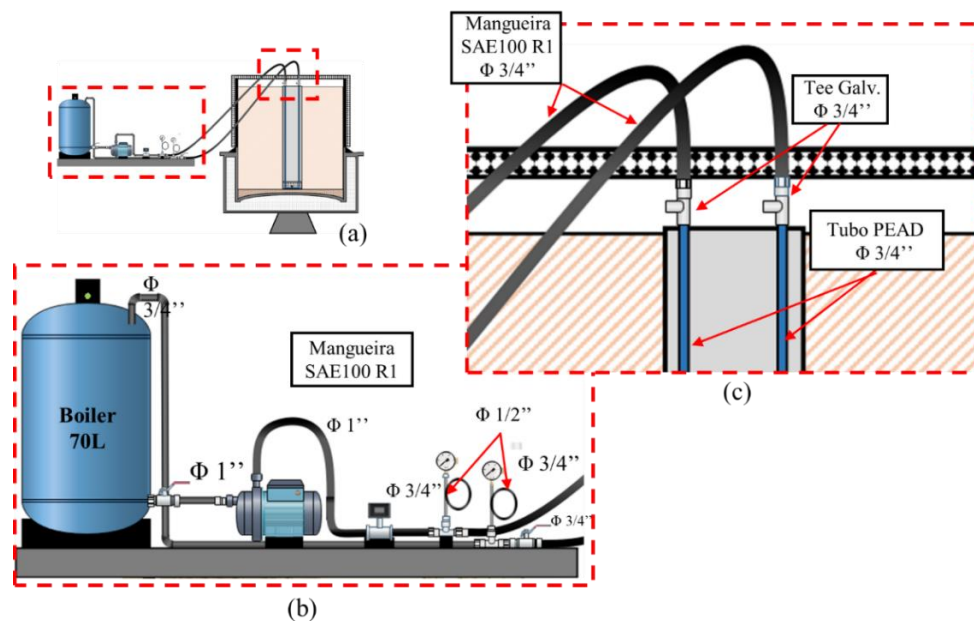


Figura 3.19 – (a) *Setup* do equipamento de ensaio TRT utilizada nesta pesquisa. (b) Detalhe dos materiais e dos respectivos diâmetros nominais do equipamento de ensaio TRT. (c) Detalhamento da conexão das mangueiras na estaca.

Nesse sentido, o equipamento de ensaios TRT desenvolvida nesta tese pode ser dividida em quatro módulos básicos, sendo eles:

- Módulo de controle, leitura e gravação de temperaturas do equipamento de ensaio TRT;
- Módulo de segurança do equipamento;
- Módulo de controle e leitura de potência elétrica;
- Módulo de controle e leitura de vazão.

Para fins pedagógicos, as subseções a seguir detalhará melhor cada módulo descrito acima.

3.8 Módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT

O equipamento de ensaios de resposta térmica TRT desenvolvida nesta tese possui duas formas de execução de ensaio, podendo ser ensaio TRT com a temperatura constante ou ensaio TRT com fluxo de calor constante, condição mais usual para o campo.

O módulo de controle de temperatura desenvolvido controla a temperatura por PWM – *Pulse With Modulation*. Seu objetivo consistiu em controlar a temperatura do fluido circulante no equipamento por meio de temperaturas predefinidas pelo usuário, como temperatura de controle (T_{cont}) e temperatura de segurança (T_{seg}). O objetivo foi garantir que a temperatura de entrada do fluido na estaca esteja sempre constante na temperatura predefinida (T_f) para uma situação de análise de troca térmica forçada interna à temperatura constante.

Caso seja necessário realizar os ensaios com fluxo de calor constante, o que foi o caso das análises para esta tese, bastou-se conectar a resistência térmica do equipamento de ensaio TRT diretamente na tomada e controlar a potência com um variador de tensão.

Uma vez determinada a temperatura de controle do equipamento de ensaio TRT (T_f) o microcontrolador do Arduino faz uma verificação lógica, na qual: Se a temperatura de entrada do fluido na estaca (T_{in}) estiver inferior a temperatura de controle (T_{cont}) será enviado um comando de acionamento da resistência, caso contrário equipamento desligará a resistência. Tal processo permanece em loop enquanto o equipamento estiver em pleno funcionamento.

O módulo de leitura, controle e gravação dos dados é responsável pela leitura e gravação das temperaturas de entrada da estaca (T_{in}), temperatura de saída da estaca (T_{out}) e temperatura

ambiente (T_{amb}). Tais temperaturas podem ser armazenadas no cartão de memória ou podem ser enviadas para o computador via cabo serial universal (USB). O módulo de segurança é responsável por proteger o equipamento de qualquer problema de superaquecimento, em caso de um eventual problema que possa ocorrer com a bomba de circulação, impedindo assim que a resistência superaqueça todo o sistema.

Na Figura 3.20, apresenta-se o algoritmo do controle lógico programado do equipamento de ensaio TRT de resposta térmica desenvolvida nesta tese, a qual é dividida em dois grupos básicos:

- Segurança contra superaquecimento e controle de temperatura do fluido circulante;
- Aquisição de dados de temperatura do equipamento de ensaio TRT.

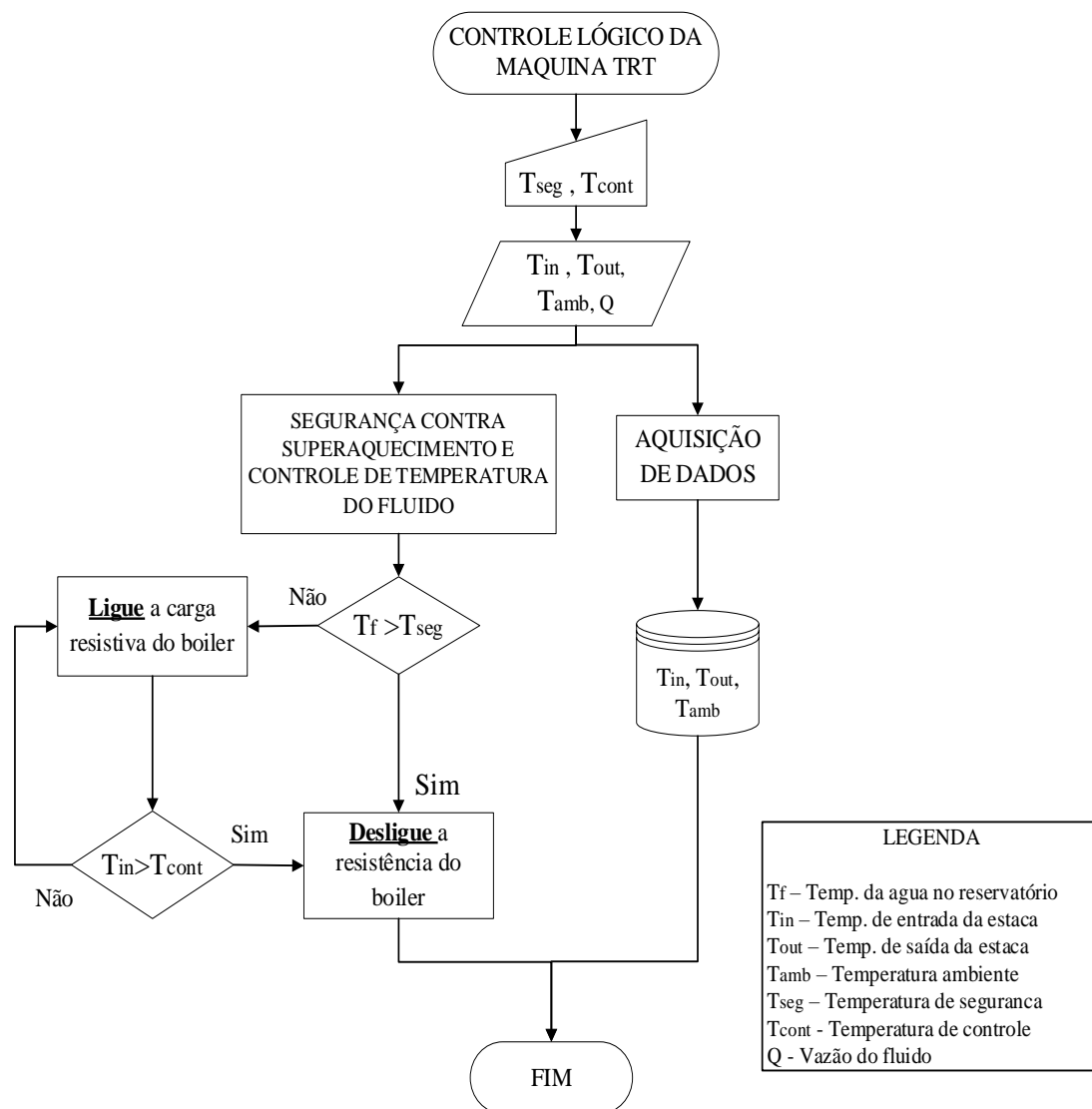


Figura 3.20 – Algoritmo do controle lógico do equipamento de ensaio TRT.

Na Figura 3.21, apresenta-se o esquema elétrico da conexão do módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT com o sistema de segurança, interconectados por um relé de estado sólido e a resistência elétrica de 3 kW de potência, que por sua vez é acionado pelo microcontrolador do Arduino.

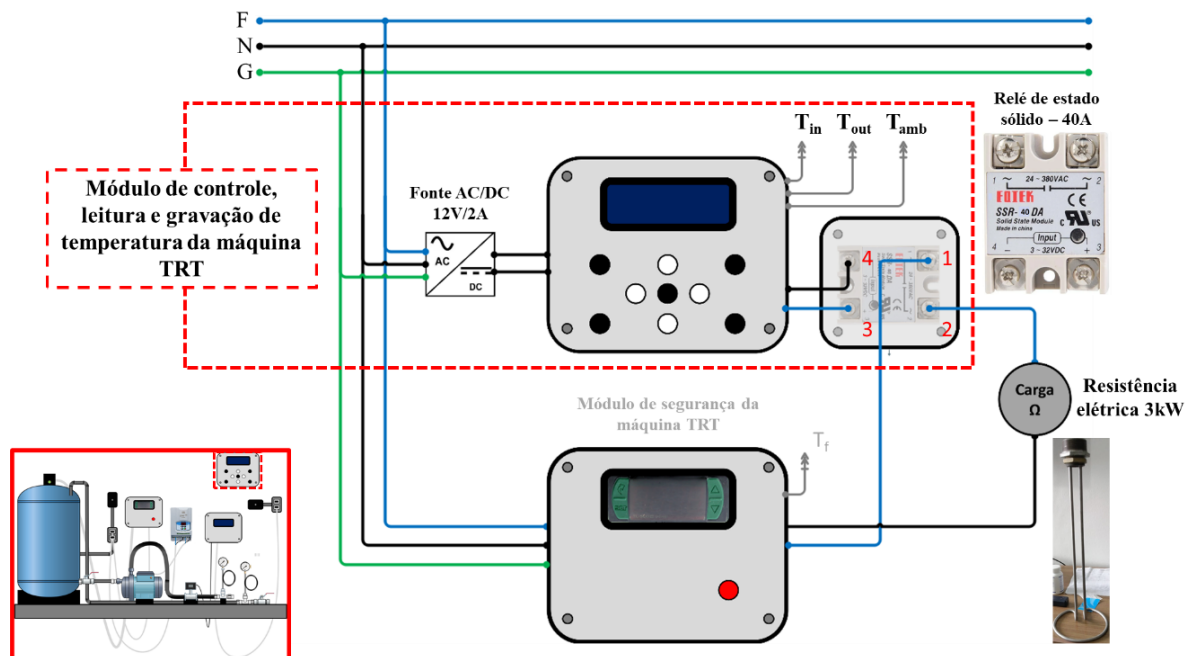


Figura 3.21 – Módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT.

3.9 Módulo de segurança contra superaquecimento do equipamento

Caso haja falha na circulação do fluido em caso de queda repentina de energia e seu posterior retorno, a leitura da temperatura de entrada da estaca (T_{in}) diminuirá, obrigando o módulo de controle do equipamento de ensaio TRT, manter a resistência do boiler sempre ligada, podendo-se causar superaquecimento e conseqüentemente um provável acidente. Para evitar esse transtorno foi desenvolvido um sistema de segurança independente com a finalidade de desligar todo o sistema de potência, caso isso ocorra.

Na Figura 3.22, apresenta-se o esquema elétrico do módulo de segurança do equipamento de ensaio TRT. Na qual consiste em um controlador de temperatura digital da *Full Gauge* MT-512E 2HP/I3 e um contactor tripolar de 32 A, ligados entre o módulo de controle e a resistência do boiler de 3 kW.

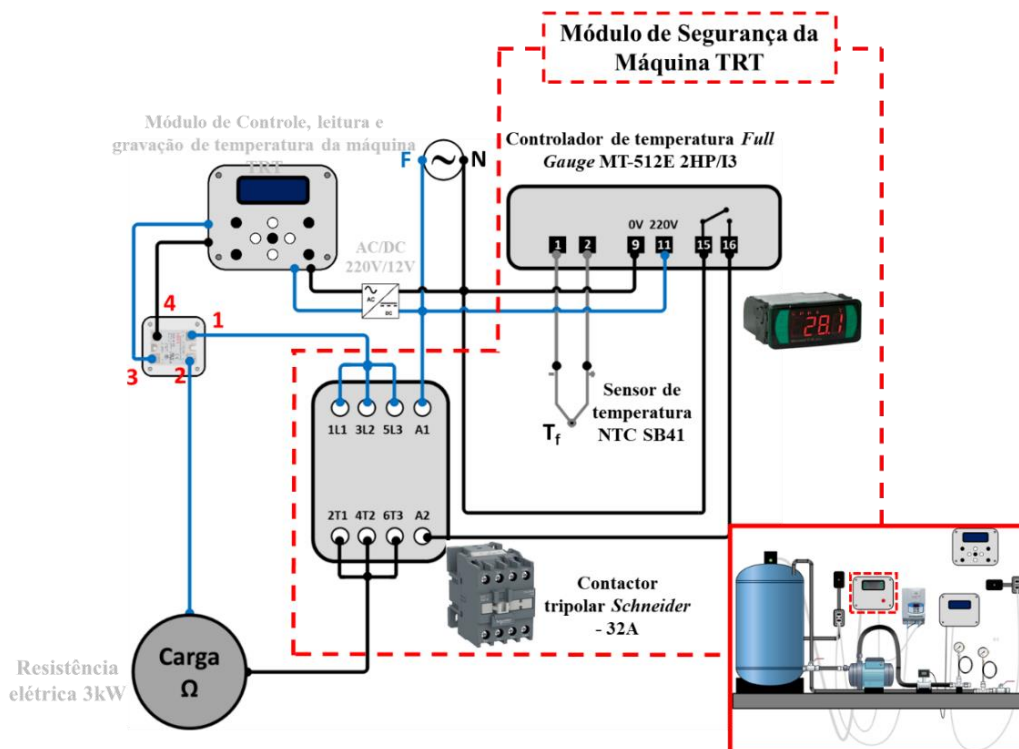


Figura 3.22 – Diagrama elétrico interno no módulo de segurança do equipamento de ensaio TRT.

A função do controlador de temperatura está em acionar ou desligar a corrente geral do equipamento de ensaio TRT, caso haja superaquecimento ou a temperatura do fluido no boiler ultrapasse a temperatura programada no controlador de temperatura (T_f). Vale ressaltar que foi necessário o uso de um contactor tripolar de 32A, devido ao controlador de temperatura não suportar um acionamento de uma carga tão elevada.

Uma vez determinada a temperatura de segurança do equipamento de ensaio TRT, no módulo de segurança (T_{seg}) o controlador de temperatura fará uma segunda verificação lógica na qual é garantido que a temperatura do fluido no boiler (T_f) esteja dentro da faixa estabelecida na programação do controlador de temperatura. Caso temperatura do fluido (T_f) esteja superior a temperatura de segurança ($T_f > T_{seg}$) o controlador imediatamente desligará o contactor e consequentemente cortará a corrente de alimentação da resistência elétrica do boiler, evitando assim prováveis acidentes de uso do equipamento de ensaio TRT.

3.10 Módulo de controle e leitura de vazão

O módulo de leitura e controle de vazão foi desenvolvido por meio da ligação de um inversor de frequência WEG CFW10 de 3 CV, conectado a uma bomba trifásica de ½ CV (Figura 3.23). Seu objetivo consistiu em controlar a velocidade do rotor da bomba pela variação

da frequência do sinal elétrico que conseqüentemente controla a velocidade da água que circula internamente nos tubos do circuito fechado.

Na Figura 3.23, mostra-se o detalhamento do esquema elétrico com as principais conexões elétricas realizadas para a instalação do inversor de frequência na bomba, bem como a conexão do sensor de vazão com o medidor.

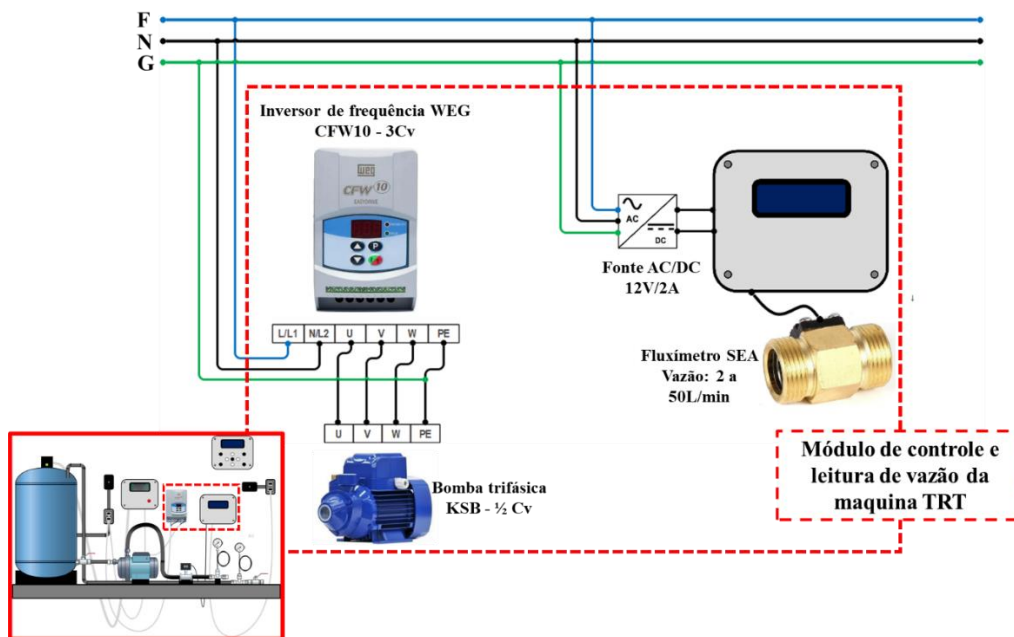


Figura 3.23 – Diagrama elétrico de ligação do módulo de controle, leitura e gravação de temperatura do equipamento de ensaio TRT.

3.11 Módulo de controle e medição de potência de ativação da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT

O módulo de controle de potência térmica injetada no equipamento consiste basicamente, em um wattímetro (Figura 3.24 (a)) e um variador de tensão (*Variac*) de 2,5 kVa (Figura 3.24 (b)) ambos conectados à resistência elétrica imersa no reservatório. A finalidade deste módulo está em poder controlar e medir de forma exata e constante, a quantidade de calor injetada na água do reservatório, em Watts, por meio do efeito Joule (Figura 3.24). O wattímetro foi conectado a um sistema de aquisição de dados da marca Minipa, cuja finalidade consistiu em medir corretamente a potência injetada no equipamento de ensaios TRT.

Vale ressaltar que o equipamento de ensaios TRT foi desenvolvido, primordialmente, para trabalhos em laboratório. Porém, isso não impede que esse mesmo equipamento de ensaios TRT possa ser utilizado em campo em trabalhos futuros, uma vez que as grandezas utilizadas

para o seu desenvolvimento são totalmente compatíveis com os demais equipamentos desenvolvidos para campo, alterando-se somente a estrutura de isolamento elétrico e proteção contra interferências de ordem eletromagnética de seus componentes eletrônicos bem como mudar a potência da resistência, conforme a necessidade de campo.

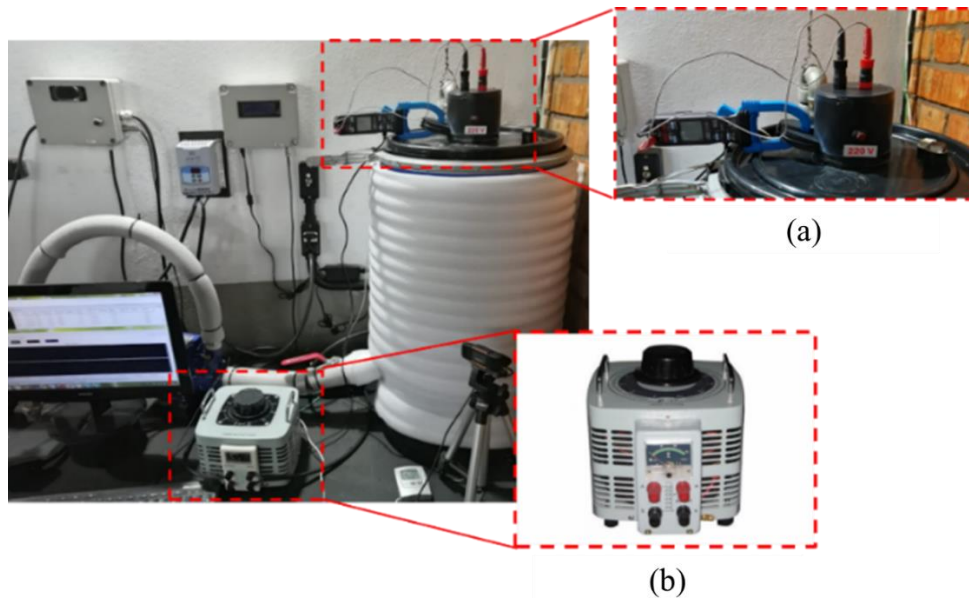


Figura 3.24 – Sistema de controle e medição de potência térmica injetada no ensaio TRT. (a) Wattímetro tipo alicate. (b) Variador de tensão 2,5kVa.

Pode-se destacar aqui algumas contribuições importantes quanto a peculiaridades do equipamento de ensaio TRT desenvolvido nesta tese que a distingue dos demais equipamentos de ensaios TRT desenvolvidas no Brasil e no mundo:

- O sistema de segurança e proteção elétrica de baixo custo, que protege o equipamento de toda e qualquer flutuação e picos da rede elétrica durante os ensaios, na qual evita-se superaquecimento da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT em caso de falhas de circulação da água;
- Sistema de controle de potência elétrica injetada no ensaio por meio do variador de tensão instalado. Isto permite que seja feita ajustes finos na potência injetada na resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT. Esta possibilidade facilita um melhor controle e uniformidade de injeção da potência elétrica sobre o sistema. Os sistemas convencionais possuem um controle muito grosseiro de baixa resolução de modulação de potência na resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT;
- Pode-se fazer análises de resposta térmica não só sobre fluxo de calor constante bem como é possível também realizar ensaios sob temperatura constante na superfície do

tubo da estaca por meio do controle de acionamento por PWM da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT. Equipamentos convencionais possuem apenas uso de potência constante;

- Sistema de leitura e gravação da potência elétrica injetada na resistência elétrica em tempo real por meio de um wattímetro instalado na entrada da resistência elétrica. Com isso pode-se estimar em tempo real a potência elétrica injetada (em Watts) no equipamento de ensaio TRT, como controle de qualidade dos dados de ensaio. Sistemas convencionais utilizam medições nominais das resistências elétricas utilizadas, na qual desprezam as flutuações de corrente elétrica no circuito utilizado, bem como a geração de distorções harmônicas no circuito interno do equipamento de ensaio TRT;
- É possível controlar a vazão do fluido no ensaio por meio do sistema de controle de vazão com o inversor de frequência, podendo trabalhar com regimes de escoamento laminar, intermediário e turbulento, sendo possível adaptar equipamento tanto para situações de laboratório, em protótipos e modelos reduzidos, quanto em situações de campo, em escala de verdadeira grandeza. Equipamentos de ensaio TRT convencionais apresentam pouca possibilidade de modulação de sua estrutura para analisar ensaios de resposta térmica em pequena escala;
- A equipamento fornece acoplamento com sistema de internet das coisas (*Internet of Things - IoT*), na qual permite realizar medições de temperatura em tempo real durante o ensaio, à distância. Equipamentos convencionais apresentam capacidade de aquisição de dados apenas via cartão de memória, ou com computador acoplado na mesma. Tal acoplamento no computador, possibilitou monitorar os ensaios TRT nos períodos de lockdown imposto pelo período da pandemia.

3.12 Controle de compactação do solo na câmara

Foi realizado uma campanha de compactação do solo, em camadas, sobre a câmara térmica de ensaios a qual foi executado o protótipo de estaca trocadora de calor. Na Figura 3.25, mostra-se a câmara térmica desenvolvida nesta tese com as suas respectivas dimensões e alturas das camadas médias de solo compactado.

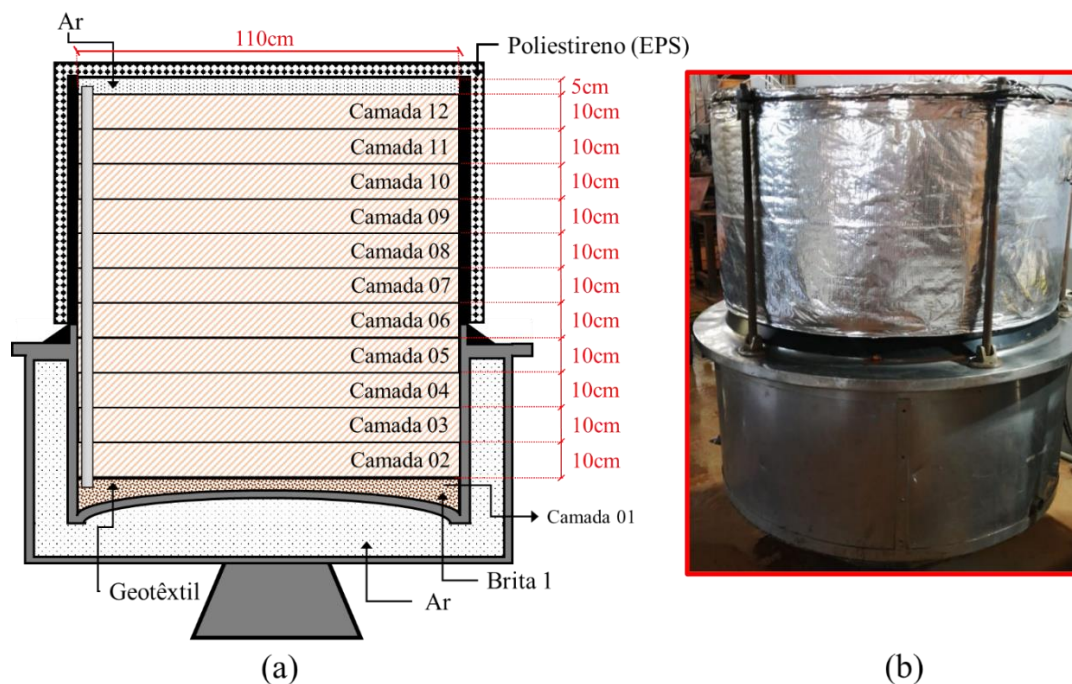


Figura 3.25 – (a) Camadas com alturas medias estimadas de compactação da câmara termicamente isolada. (b) Imagem real câmara com isolamento térmico.

A câmara térmica desenvolvida nesta tese consiste em um cilindro metálico termicamente isolado com poliestireno (EPS) na parte superior e tampa. Suas dimensões consistem em 115 cm de altura por 110 cm de diâmetro interno (Figura 3.25 (a)). Vale ressaltar que foi instalado uma camada de material refratário sobre a camada de EPS para melhorar o isolamento da mesma contra radiação (Figura 3.25 (b)).

Foram executadas ao todo, 12 camadas de solo com altura média de aproximadamente 10 cm de altura. A camada 1 foi executada com brita 1 e separada com geotêxtil, a qual foi ligado nesta camada 3 tubos de PVC igualmente espaçados ao longo do modulo cilíndrico. A finalidade desta primeira camada drenante foi em facilitar a saturação do solo posteriormente nos ensaios de resposta térmica com o solo saturado.

Com o objetivo de garantir padronização e maior homogeneização no processo de compactação do solo desta pesquisa seguiu-se o mesmo procedimento padrão de compactação para cada camada de solo no interior da câmara térmica (Figura 3.26).

Inicialmente, procedeu-se em (1) destorroar todo o solo coletado, afim de tornar mais fácil a homogeneização durante a compactação. Após toda a homogeneização seguiu-se a pesagem do solo em umidade higroscópica (2), afim de corrigir a umidade na betoneira (3), com o ensaio *speed test* (4). Em seguida, o solo já com a umidade corrigida e homogeneizada

(5) foi inserido na câmara com peso controlado, de forma a atingir a massa total estipulada da camada (6). Após regularizada e inserida toda a massa de solo na camada foi dada início a compactação, com auxílio de um compactador manual padrão, com o número de golpes especificado por camada (7). Ao finalizar o processo de compactação, foi realizado a medição de altura da camada (8), bem como o ensaio de peso específico aparente seco pelo método do cilindro de cravação (9). E, por fim, foi realizado a medição da umidade média de cada camada compactada em estufa (10).

Vale ressaltar que, por se tratar de análises de ensaios em solo compactado, há limitações que devem ser observadas cuidadosamente quando comparado a situações reais em campo, nas quais o solo encontra-se na condição natural.

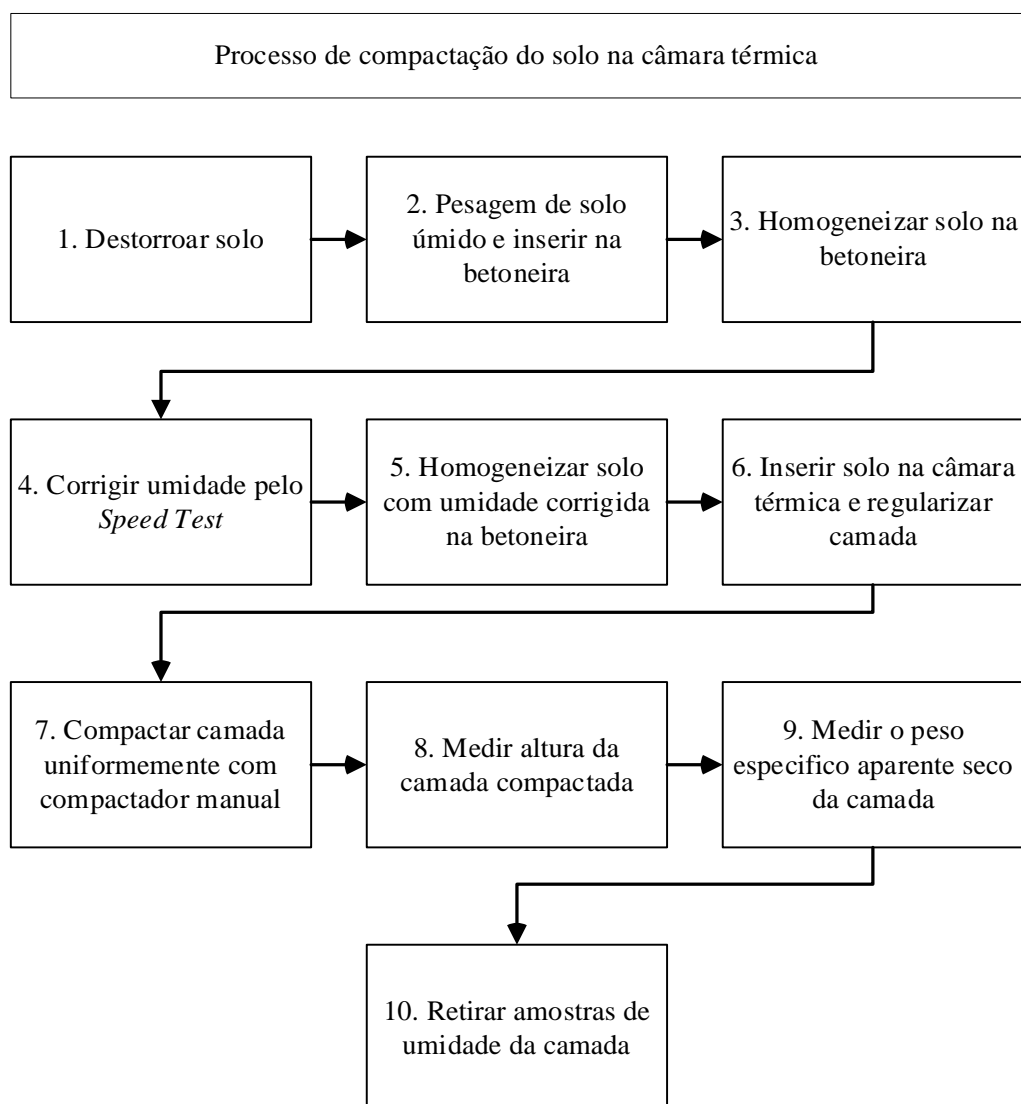


Figura 3.26 – Fluxograma do procedimento padrão de controle de compactação do solo na câmara térmica.

O subtópico a seguir detalhará de forma mais didática os procedimentos das principais etapas realizadas no processo de controle de compactação do solo, na câmara térmica desenvolvida nesta tese, conforme mostrado no fluxograma da Figura 3.26. Cada procedimento foi detalhado com os principais materiais utilizados.

3.13 Regularização e compactação da camada de solo na câmara térmica

Com a umidade corrigida e homogeneizada na betoneira a massa de solo foi lançada e regularizada por camada a ser compactada por meio de um compactador manual a percussão de 10,73 kg de peso, sobre uma altura de queda de 27,5 cm e área de 240,25 cm² (Figura 3.27 (a)). O processo de compactação se deu conforme mostrado na Figura 3.27 (b). A qual foram contabilizados 513 golpes por camada, distribuídos uniformemente sobre toda a área da camada a ser compactada.

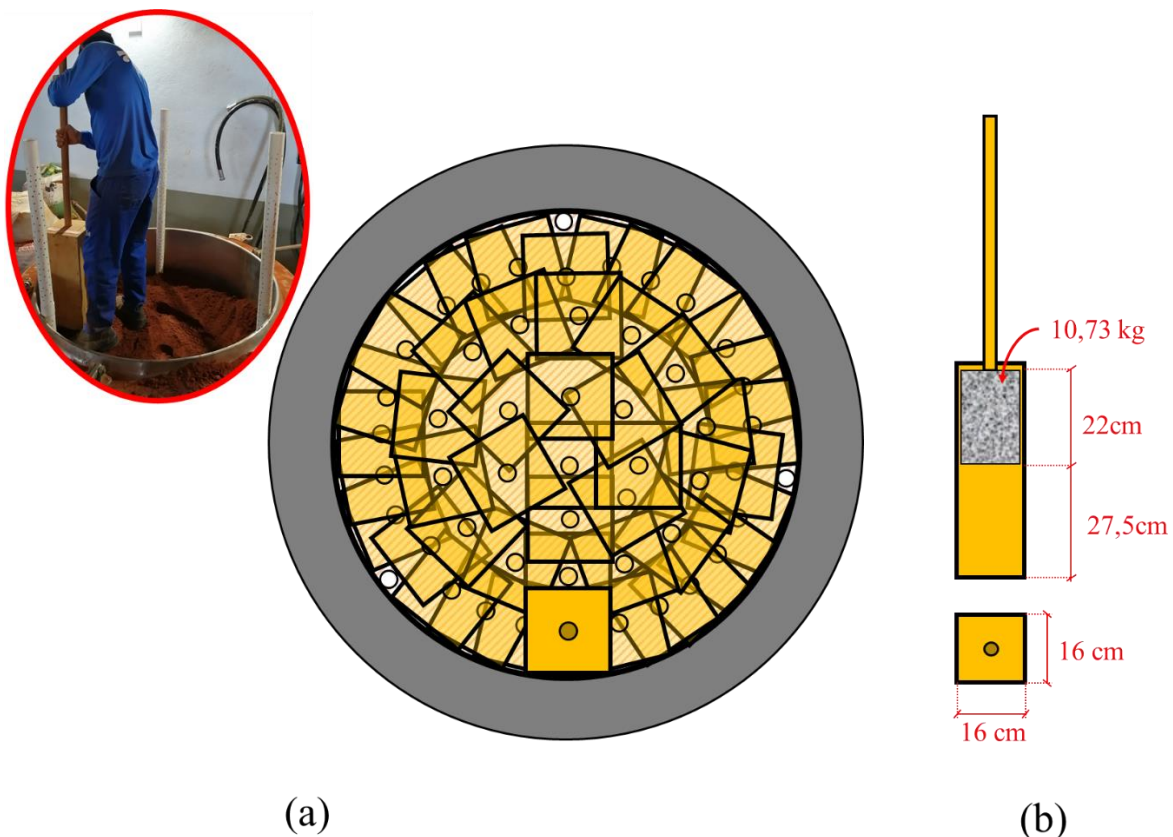


Figura 3.27 – (a) Detalhamento do compactador manual. (b) Processo de compactação manual realizado por camada.

A energia de compactação foi em média de 2353,6 kN.m/m³ (24 kgf.cm/cm³), aproximadamente 84% da energia de compactação Proctor Modificado. Vale ressaltar que o

grande número de golpes escolhido se deu pelo fato de buscar garantir uma boa uniformidade de compactação em toda a área da camada e em todas as camadas adjacentes.

Após a compactação de cada camada de solo foi realizado três medições de peso específico aparente seco, por meio de um cilindro de cravação desenvolvido para esta finalidade (Figura 3.28 (a)), na qual foram realizadas cravações padronizadas com peso padrão do ensaio MCT (miniatura, compactado, tropical), (Figura 3.28 (b) e Figura 3.28 (c)).

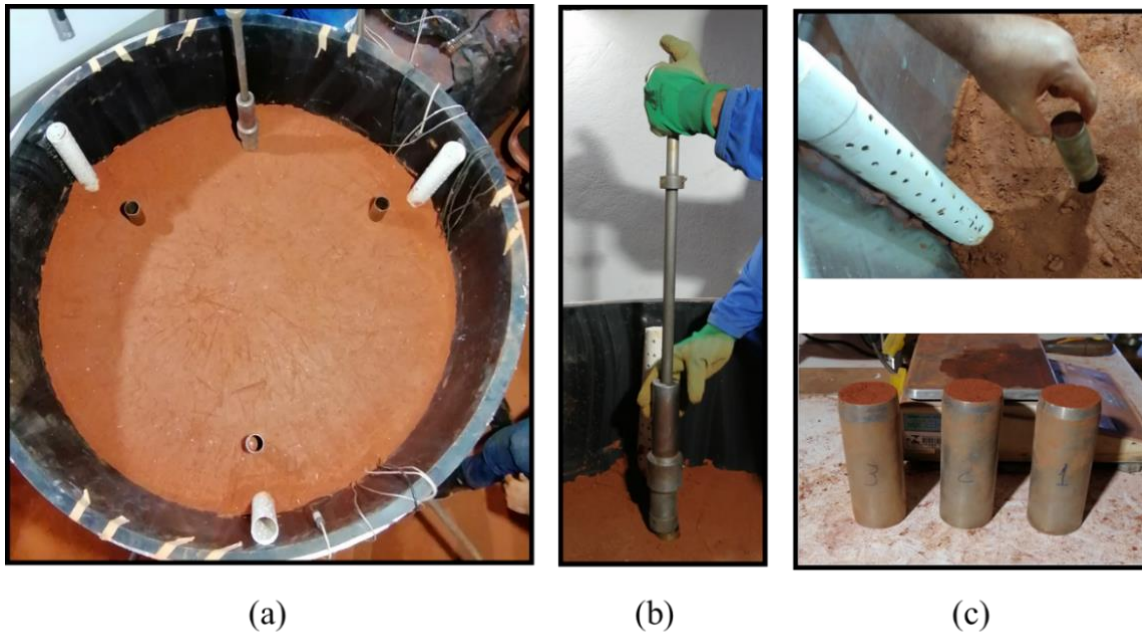


Figura 3.28 – (a) Locação dos cilindros de cravação sobre a camada de solo. (b) Soquete cravador. (c) Cilindro com amostra após cravação.

Para cada cilindro de cravação foram realizadas a retirada de três pontos de teor de umidade pelo método estufa, um na base do cilindro, um no meio e outro no topo e assim pôde-se obter uma média aritmética da umidade da camada.

3.14 Instrumentação

Foram desenvolvidas calibrações dos respectivos sensores e equipamentos necessários para a realização das medições de cada ensaio de resposta térmica do equipamento de ensaio TRT dessa tese. Na Figura 3.29, apresenta-se o esquema do programa de calibrações realizados nos sensores de temperatura (termopar tipo K e sensor digital DS18B20), e de vazão (Para Arla 32 145PSI e SEA 250 PSI), utilizados nessa tese.

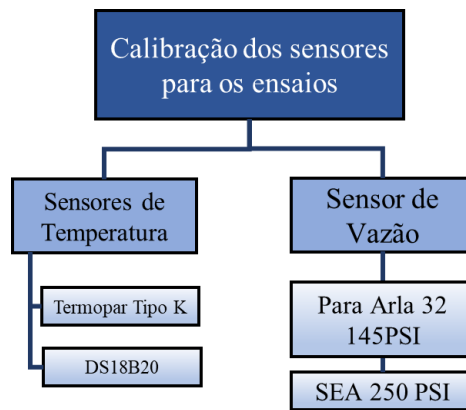


Figura 3.29 – Fluxograma de calibrações de sensores de temperatura e sensor de vazão.

Os subtópicos a seguir detalharão de forma mais técnica os sensores de temperatura (termopar tipo K e o DS18B20) os sensores de vazão, bem como os sistemas de aquisição de dados utilizados nesta tese. E, por fim, apresentará o procedimento metodológico de calibração dos sensores.

3.15 Sensores de temperatura

Na Figura 3.30, mostra-se os dois tipos de sensores de temperatura utilizados nesta tese. Na Figura 3.30 (a), mostra-se o sensor digital DS18B20, bastante recomendado para medições de temperatura em plataforma Arduino, e o sensor termopar do tipo K (Figura 3.30 (b)).

O sensor DS18B20 consiste em um sensor digital de temperatura que utiliza protocolo *one wire* para leitura de dados, o que o permite facilmente se comunicar com a plataforma Arduino. Possui um encapsulamento blindado com bulbo de aço inox e vedação a prova d'água, umidade e oxidação. A resolução do sensor pode ser ajustável entre 9 a 12bits. Já o sensor termopar tipo K consiste em uma junta fria de duas ligas metálicas de *alumel* e *cromel*, que funcionam pelo efeito *Seebeck*.

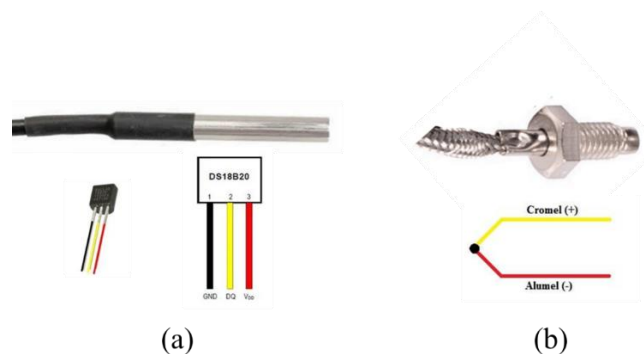


Figura 3.30 – (a) Sensor de temperatura digital DS18B20. (b) Termopar tipo K.

Nas Figura 3.31, mostram-se os principais sistemas de leitura e aquisição de dados de temperatura utilizados nesta tese. Na Figura 3.31 (a), mostra-se o sistema de aquisição de dados de oito canais, PICO TC-08, para termopares tipo K. Na Figura 3.31 (b), mostra-se o leitor de temperatura de quatro canais HT 9815, para termopares do tipo K, e um sistema aquisitor de dados de 10 canais para os sensores do tipo DS18B20 desenvolvido em plataforma Arduino, (Figura 3.31 (c)).



Figura 3.31 – Sistemas de aquisição de dados utilizados nesta tese, (a) PICO – 08, (b) HT 9815 e (c) Datalogger 10 canais em plataforma Arduino.

As calibrações dos sensores de temperatura foram realizadas no Laboratório de Transferência de calor, no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília – UnB. O método de calibração utilizado foi por comparação por instrumento padrão segundo a NBR 13770/2013, em banho térmico estabilizado.

3.16 Aferição dos sensores de vazão

A calibração do sensor de vazão seguiu as recomendações do manual técnico do sensor PIUSI-2120-UR, na qual foram realizadas calibrações para uma faixa de temperatura de média de 40°C.

Na Figura 3.32 (a), mostra-se o medidor de vazão em acetal do tipo turbina (efeito *Hall*), para Arla 32 de aproximadamente 1MPa de pressão máxima, referência PIUSI-2120-UR, com diâmetros de entrada e saída de uma polegada (2,54 cm), precisão de 1%. O medidor possui uma vazão livre de 5 a 120 l/min. Temperatura de trabalho de -10 °C até 50 °C. Na Figura 3.32 (b), mostra-se o sensor de vazão do tipo turbina utilizado no equipamento de referência SEA para Arduino, com diâmetros de entrada e saída de uma polegada, precisão de 5% a 10%. O

medidor possui uma vazão livre de 2 a 50 l/min. Temperatura mínima de trabalho de 5°C e temperatura máxima de trabalho de 60°C.



Figura 3.32 – Sensores de vazão utilizados no equipamento de ensaios TRT: (a) PIUSI-2120-RU e (b) SEA para Arduíno.

Vale ressaltar que o sensor PIUSI foi utilizado com o objetivo de checar a integridade de calibração do sensor SEA, uma vez que por funcionar por efeito *Hall*, a turbina no interior do sensor pode sofrer danos ao longo do tempo de forma a descalibrar o sensor ao longo dos ensaios. O ideal seria utilizar um sensor de fluxo que utiliza ultrassom na tubulação, afim de evitar o desgaste das hélices ao longo do tempo.

Para a calibração utilizou-se um aferidor de combustível com capacidade de 20 litros, modelo COBEL0315 (Figura 3.33 (a)). A aferição se deu basicamente pelo ajuste do volume de água medido no aferidor padrão de 20 L (Figura 3.33 (c)) no fluxímetro digital utilizado (Figura 3.33 (b)).

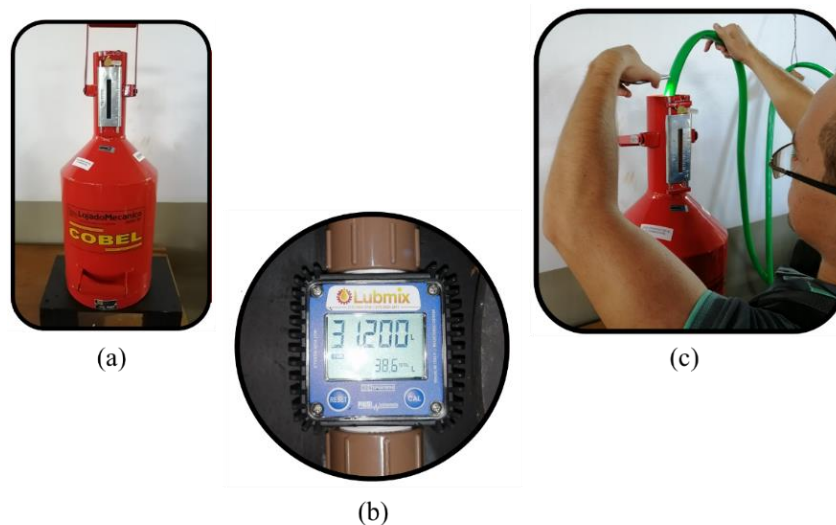
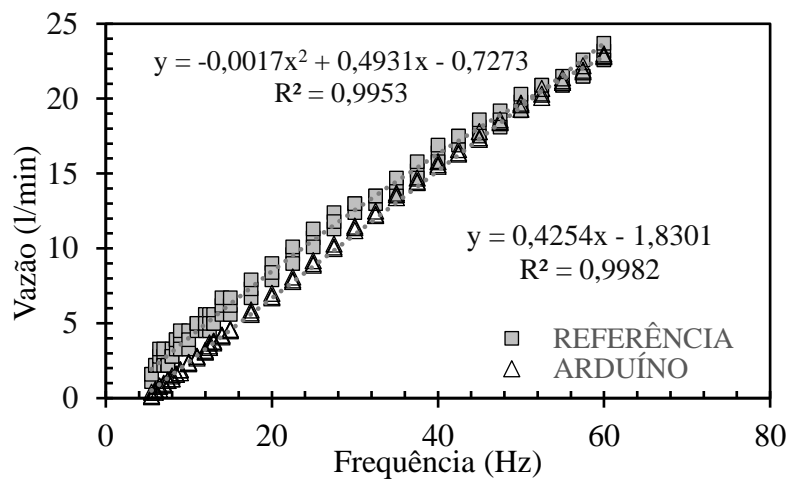


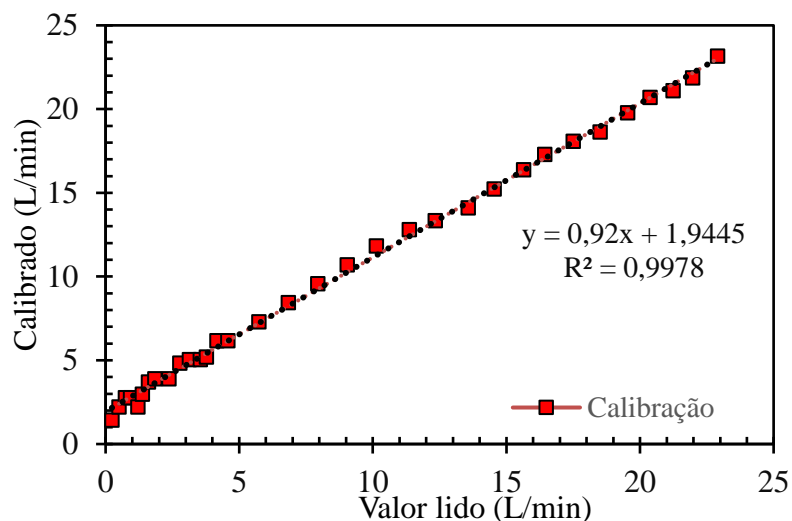
Figura 3.33 – (a) Aferidor COBEL 0315 de 20 L padrão. (b) medidor PIUSI sendo calibrado com o aferidor de 20 L e (c) processo de medição de água no aferidor padrão de 20 L.

Ao realizar o ajuste do valor do volume medido no aferidor padrão no fluxímetro digital de forma automática, o equipamento calcula de forma contínua, o fator de calibração a ser considerado no ensaio.

Na Figura 3.34 (a), mostra-se as curvas de vazão obtidas nos dois sensores, o de referência, e o medido no equipamento de ensaio TRT com o Arduino, ambos em função da frequência imposta pelo inversor de frequência conectada na bomba. Na Figura 3.34 (b), mostra-se a curva de calibração do sensor de vazão utilizado no equipamento de ensaios TRT para uma temperatura de trabalho de aproximadamente 40°C, bem como a equação de ajuste da calibração a ser considerada no sistema.



(a)

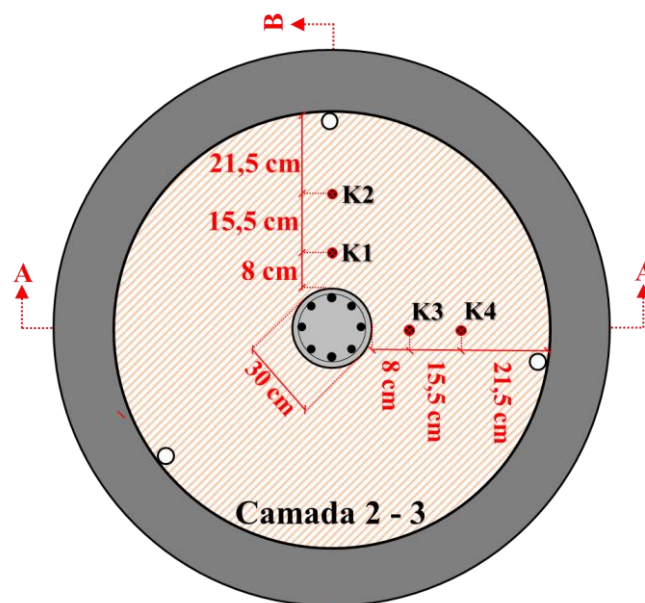


(b)

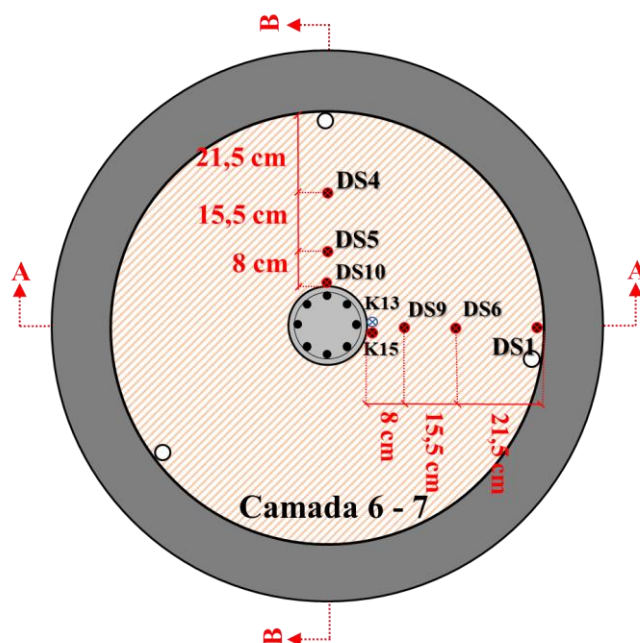
Figura 3.34 – (a) Comparação da medição de vazão em função da frequência de trabalho da bomba para o sensor de referência e o sensor utilizado no equipamento de ensaios TRT, lido na plataforma Arduino. (b) Curva de calibração do sensor de vazão no equipamento de ensaios TRT.

3.17 Instalação e disposição dos sensores de temperatura na câmara térmica e no protótipo de estaca trocadora de calor

Durante o processo de compactação foram realizados a instalação de sensores de temperatura do tipo K e do tipo DS18B20, ambos sobre três camadas na câmara térmica desenvolvida. Nas Figura 3.35, apresentam-se a disposição de instalação dos sensores e a locação na área das camadas intermediárias 2 – 3 (Figura 3.35 (a)), 6 – 7 (Figura 3.35 (b)) e 11 – 12 (Figura 3.35 (c)), respectivamente sobre o eixo cartesiano x-y da câmara térmica.



(a)



(b)

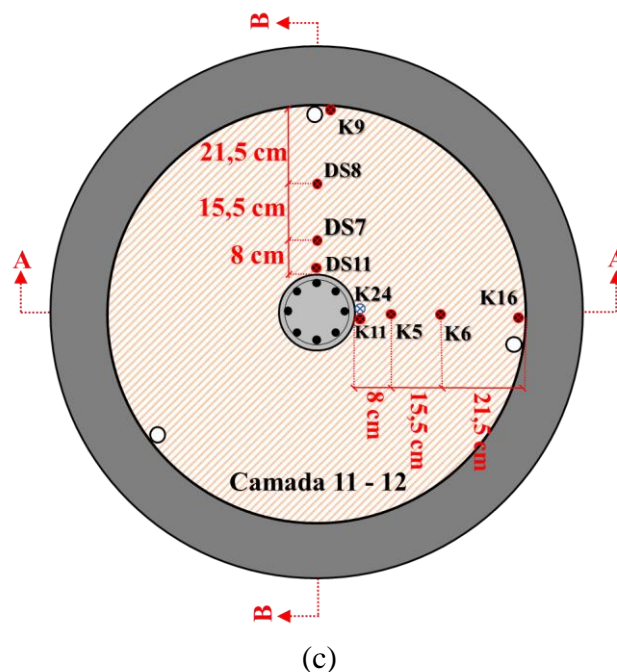


Figura 3.35 – Posições e disposição de instalação de sensores de temperatura em cada camada da câmara térmica. (a) Camada 2-3 (b) Camada 6-7 (c) Camada 11-12.

Todos os sensores de temperatura, com exceção dos sensores K13, K14, K17 e K24, foram embebidos com pasta térmica, na qual consiste em um líquido viscoso, com propriedades termo condutoras, em que se objetiva reduzir os efeitos de resistência térmica de contato entre dois materiais, onde no caso em questão, entre a superfície da cápsula do sensor e o solo, como mostrado na Figura 3.36 (b), instalado na camada 6-7 da câmara térmica (Figura 3.36 (a)). A finalidade do uso da pasta térmica está em tentar observar a influência dos efeitos de resistência térmica de contato entre dos diferentes materiais na medição de temperatura durante os ensaios.

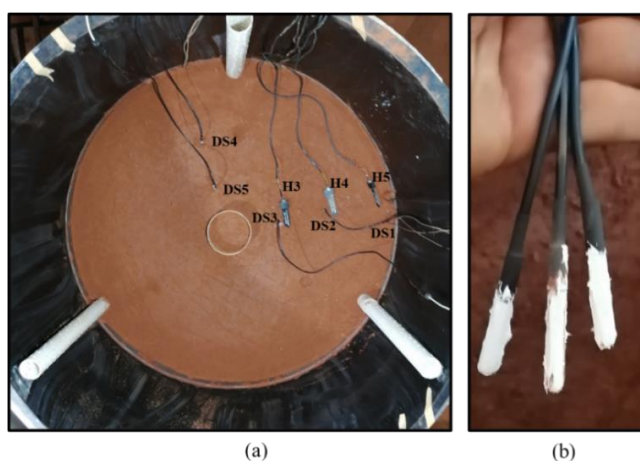


Figura 3.36 – (a) Disposição dos sensores de temperatura na camada 6-7 da câmara térmica. (b) Sensor de temperatura DS18B20 com pasta térmica na superfície.

Na Figura 3.37, apresenta-se um esquema com um corte A-A (Figura 3.37 (a)) e B-B (Figura 3.37 (b)), da câmara térmica com a localização de todos os sensores de temperatura e umidade, e suas respectivas cotas, no eixo x-z.

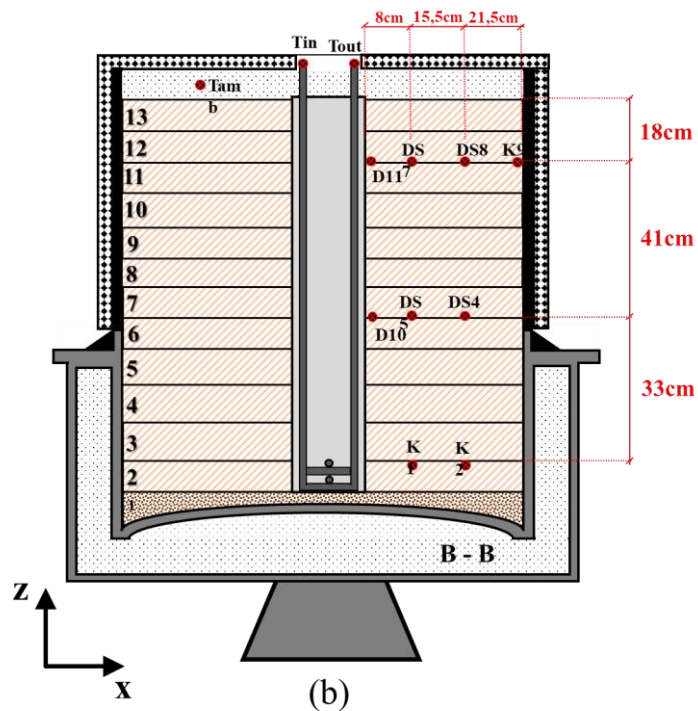
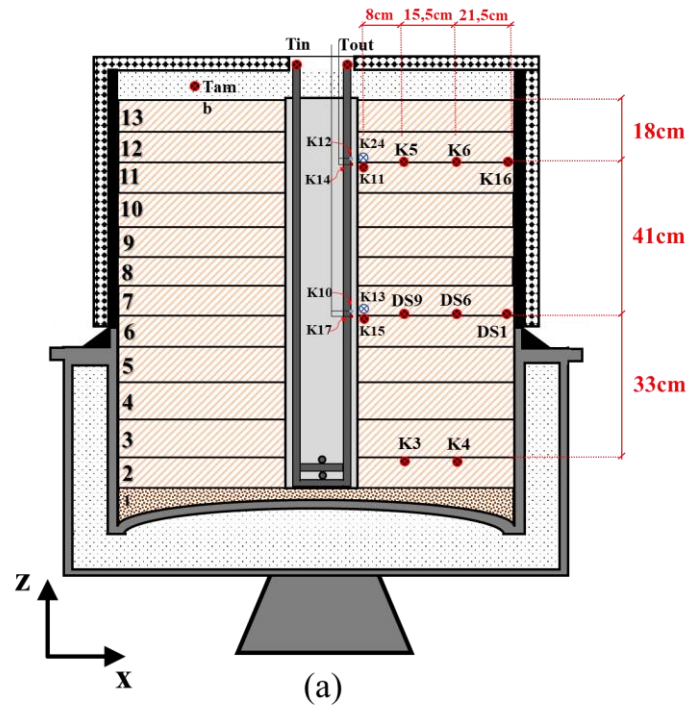


Figura 3.37 – Disposição dos sensores de temperatura na câmara nas principais camadas no eixo x-z, (a) corte A-A e (b) Corte B-B.

Objetivando redundância de medição dos pontos foram instalados dois sensores, K12 e K14, na cota 18cm e os sensores K10 e K17 na cota 59cm. Na Figura 3.38, mostra-se a instalação dos sensores K12 e K14 sobre um mesmo ponto na superfície do tubo de PEAD, na qual o sensor K12 foi embebido com pasta térmica, e o sensor K14 foi instalado sem pasta térmica. A mesma coisa ocorreu para os sensores K10 e K17, na qual o sensor K10 foi instalado embebido com a pasta térmica e o sensor K17 foi instalado sem pasta térmica.

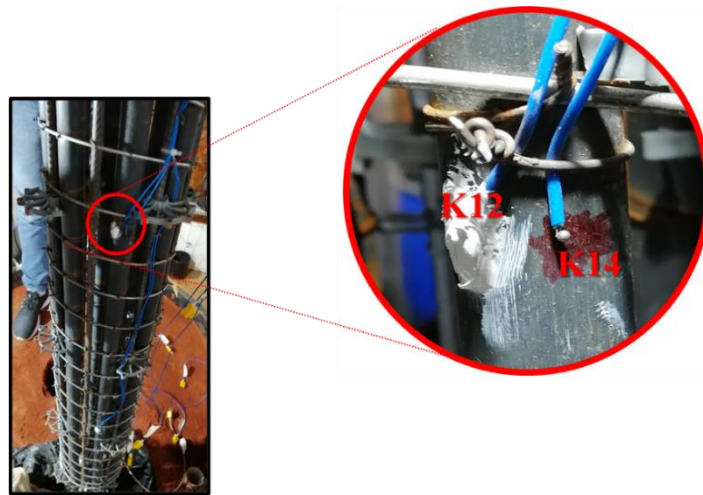


Figura 3.38 – Instrumentação com termopar na interface Tubo/Concreto do protótipo.

A mesma coisa foi feita para a interface concreto/solo, na qual, foram instalados os sensores K11, K24 na cota 18 cm da superfície do solo e os sensores K13 e K15 na cota 59 cm.

Na Figura 3.39, apresenta-se a instalação dos sensores K11 e K24 sobre um mesmo ponto na superfície do furo da estaca, na qual o sensor K11 foi embebido com a pasta térmica e o sensor K24 foi instalado sem pasta térmica.

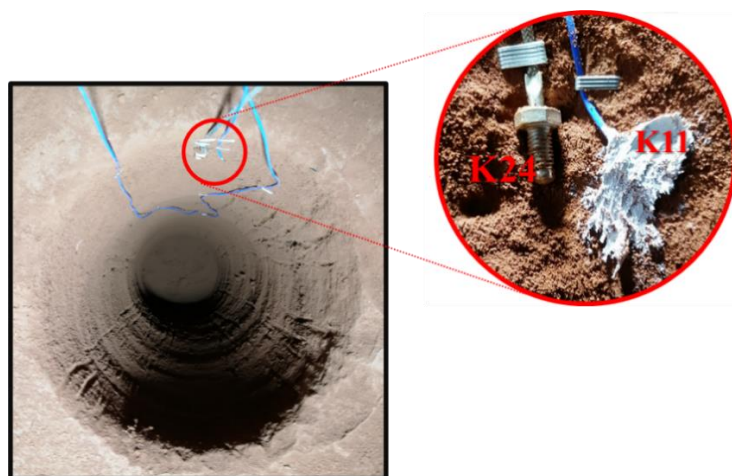


Figura 3.39 – Instalação de sensores na interface do protótipo (Concreto/Solo) de estaca executada na câmara.

Vale ressaltar aqui a importância da instrumentação detalhada da estaca e do solo executados na câmara térmica de ensaios. Com esta instrumentação foi possível observar o fenômeno do desenvolvimento do gradiente térmico e a influência da resistência de térmica dos materiais envolvidos (tubo, concreto e solo) de forma mais acurada e precisa. O que seria algo um tanto complicado de se fazer em campo, tendo em vista a dificuldade técnica e econômica de se instalar sensores em profundidade ao longo do solo, radialmente à estaca.

A vantagem de se desenvolver esses ensaios em laboratório é que se pode observar o fenômeno de troca térmica de forma isolada, sem interferências externas de radiação solar e variação do nível do lençol freático, com medições controladas e seguras, tanto em regime transiente quanto em regime estacionário, uma vez que a câmara térmica desenvolvida foi isolada termicamente e hermeticamente e instrumentada para esse fim.

3.18 O protótipo de estaca trocadora de calor

O protótipo de estaca trocadora de calor foi desenvolvido nas dimensões aproximadas de 30 cm de diâmetro e 1 m de comprimento. Foram instalados 8 tubos de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) de $\frac{3}{4}$ polegadas, no interior da armação, formando uma configuração de 4 U's, na qual foram feitas quatro curvas no final da estaca com joelhos do tipo “espigão” de PEAD, condições semelhantes de dimensões e materiais utilizados em campo. Nesse sentido, cada U foi interconectado com “jumpers” na superfície de forma que foi permitido de realizar mudança nas configurações dos U's, aproveitando a mesma estrutura geotécnica do solo.

A escolha do material do tubo ser de PEAD está diretamente relacionada a diversos fatores termo físicos, econômicos, ambientais e mecânicos, tais como: boa durabilidade, resistência a corrosão, resistência térmica, resistência a pressão hidráulica, resistência a impactos mecânicos, e maleabilidade para adequada execução na armadura da estaca.

Na Figura 3.40, apresenta-se a armadura da estaca trocadora de calor com seus respectivos tubos amarrados nos estribos entre as barras de aço em vista frontal com jumpers instalados na parte superior do protótipo (Figura 3.40 (a)), na região inferior do protótipo com as conexões e ligações entre os tubos em formato U (Figura 3.40 (b)) e uma vista superior com os espigões em aço galvanizado, para conexão dos jumpers (Figura 3.40 (c)).

Vale ressaltar que cada conexão executada na estaca foi feita com veda rosca industrial pastosa e apertada com abraçadeiras de aço galvanizado a fim de evitar vazamentos indesejados

no interior do protótipo. As conexões no topo da estaca foram executadas com “espigões” em aço galvanizado. Tal necessidade se deu afim de garantir a integridade estrutural das conexões durante os grandes números de trocas de jumpers durante a realização dos ensaios realizados.

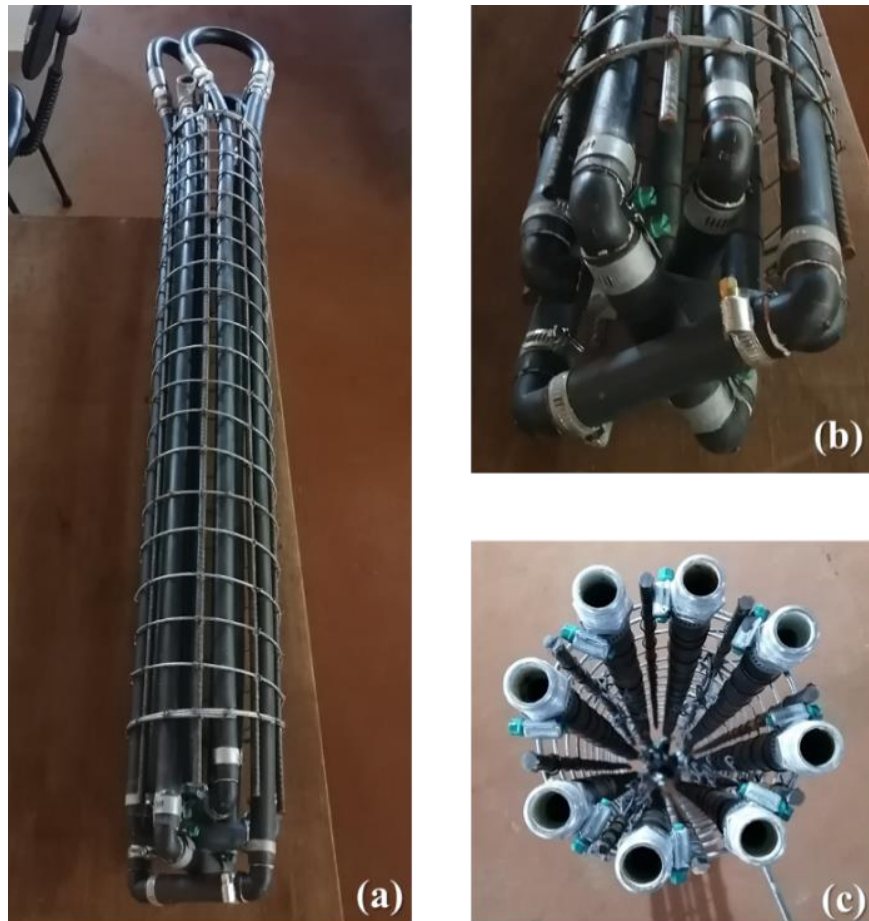


Figura 3.40 – (a) Armação do protótipo de estaca trocadora de calor com tubulação instalada. (b) Curvas e conexões utilizadas nos U's do protótipo. (c) Conexões de entrada e saída dos tubos do protótipo de estaca.

O protótipo de estaca térmica foi desenvolvido com a finalidade de se obter o maior número possível de possibilidades de configurações sem ter a necessidade de se retirar a estaca e recompactar o solo na câmara térmica. Isto garantiu uniformidade em todos os ensaios realizados, uma vez que as condições geotécnicas do solo e dos materiais envolvidos permanecerão íntegras em todas as variações de configurações analisadas.

Na Figura 3.41, mostra-se um esquema de conexões das três configurações analisadas nesta tese (1U – Figura 3.41 (a), 2U – Figura 3.41 (b) e 4U – Figura 3.41 (c)) na qual detalha por meio de setas, os caminhos percorridos pela água na tubulação do protótipo durante o ensaio.

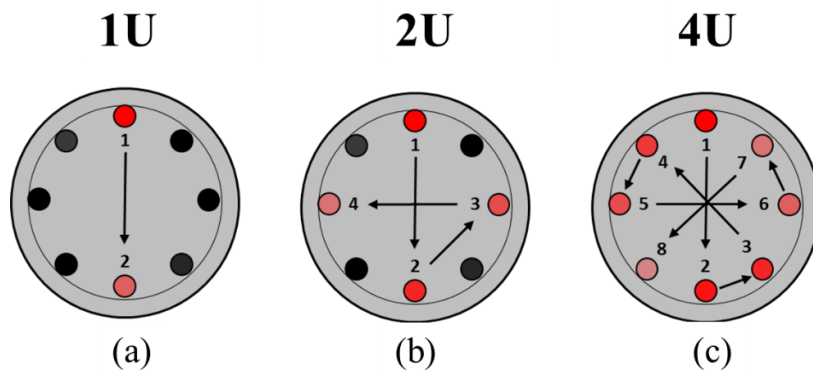


Figura 3.41 – Esquema de distribuição de conexões dos jumpers não protótipos de estacas trocadoras de calor em: (a) 1U, (b) 2U, e (c) 4U.

3.19 Execução e concretagem

Foi executado um furo de 1 m de profundidade e aproximadamente 30 cm de diâmetro, por meio de um trado manual (Figura 3.42 (a)). Ao ser executado o furo, imediatamente foi inserido a armação do protótipo com espaçadores de 3 cm de espessura com toda a instrumentação interna. (Figura 3.42 (b) e Figura 3.42 (c))

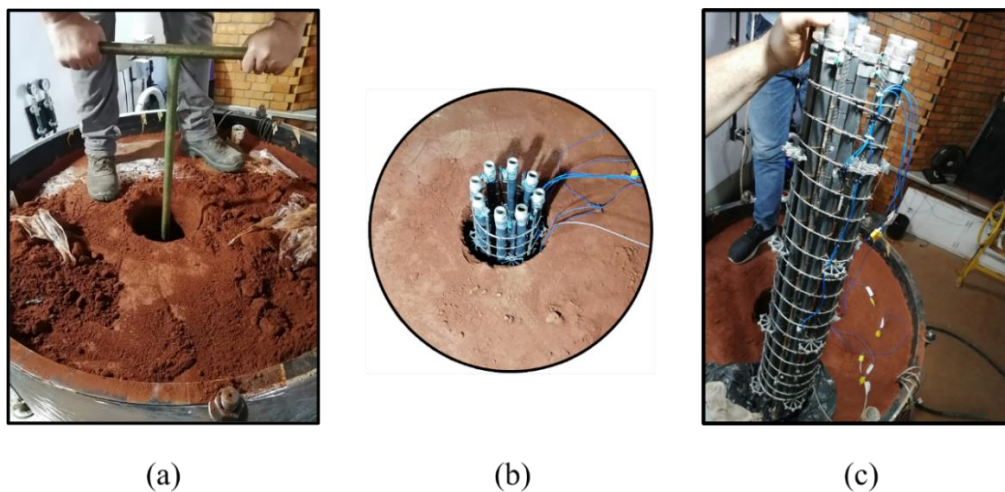


Figura 3.42 – (a) Perfuração do solo compactado na câmara com trado manual em uma extensão de 1m, (b) inserção da armação do protótipo no furo executado e armação com espaçadores de 3cm e instrumentada com termopares em sua estrutura (c).

Após a inserção da armação foi executado o concreto sobre o furo (Figura 3.43 (a)). O traço do concreto executado seguiu as determinações da ABCP (Associação Brasileira de cimento Portland). O traço escolhido foi 1:2,15:2,11, com fator a/c (água/cimento) de 0,57. O traço foi calculado para uma resistência característica de 20Mpa, abatimento entre 80 e 100mm.

O cimento utilizado foi o CP II – Z (com adição de pozolana). Ambas as especificações técnicas cumprem as exigências mínimas estabelecidas para uso do elemento estrutural em ambientes de classe de agressividade tipo I (NBR 6118, 2014).

Na Figura 3.43 (a), mostra-se o momento da concretagem do protótipo, e na Figura 3.43 (b), mostra-se o momento da vibração do concreto para melhorar o adensamento e aderência sobre a armação e os tubos no interior do protótipo. Na Figura 3.43 (c), mostra-se uma vista superior da estaca completamente preenchida pelo concreto após o adensamento.

Vale destacar aqui que o processo de cura do concreto na estaca ocorreu sem molhagem, no entanto, a própria umidade do solo, utilizada na compactação forneceu uma boa estabilidade no controle de temperatura do concreto, na qual evitou o fissuramento.

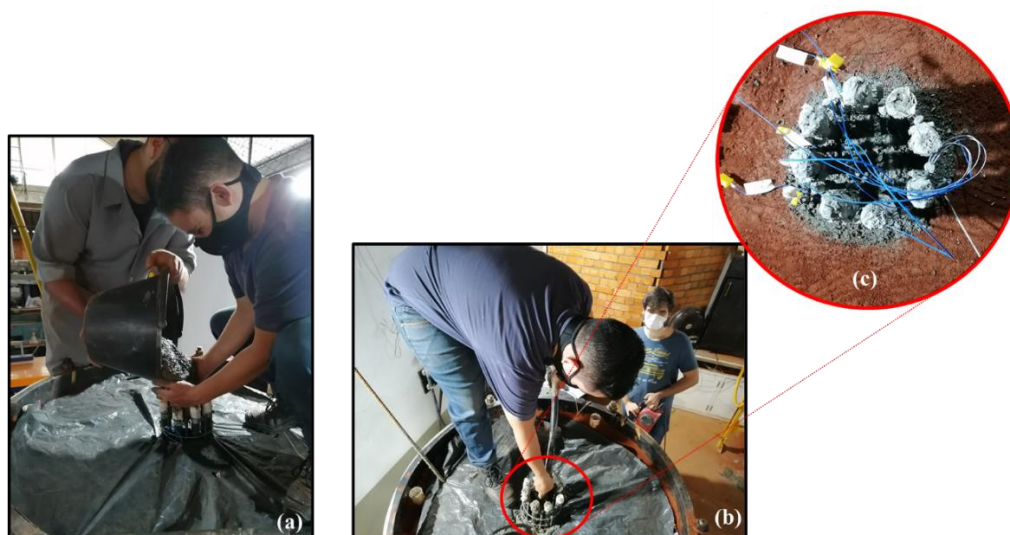


Figura 3.43 – (a) processo de concretagem do protótipo de estaca. (b) Vibração do concreto e (c) detalhamento do protótipo concretado e instrumentado.

Na Tabela 3.2 se apresenta um resumo das especificações técnicas do concreto utilizado no protótipo desta pesquisa.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas do concreto utilizado na pesquisa.

| | |
|-----------------------------------|-------------|
| Traço | 1:2,15:2,11 |
| Numeração da brita | Brita zero |
| Cimento | CP II – Z |
| Resistência estimada (F_{ck}) | 20 MPa |
| Fator a/c | 0,57 |
| Abatimento esperado | 80 a 100 mm |

3.20 Monitoramento e controle de umidade ao longo dos ensaios de resposta térmica na câmara térmica

Durante a realização dos ensaios de resposta térmica, foram realizados monitoramentos e medições diretas de umidade no solo compactado por meio de coleta de pequenas amostras de solo em furos verticais no sentido radial oposto ao sentido dos sensores instalados. Tal necessidade se deu afim de avaliar o comportamento da perda de umidade da estrutura de solo ao longo de todo o período de ensaios realizados na condição não saturada.

Na Figura 3.44, mostra-se a locação de seis furos realizados para coleta de amostras de solo para medição da umidade. A cada 24 horas de ensaio, foram coletadas amostras de umidade ao longo dos seis furos. Vale ressaltar que durante a realização dos ensaios TRT na condição não saturada, no início da campanha, houve medições de umidade somente no primeiro ensaio e no último, que variou entre 35% e 31% de grau de saturação. Sendo assim, optou-se por utilizar uma umidade média entre o primeiro e o segundo de 33% para todos os ensaios na condição não saturada. Tal diferença de umidade não implicou em mudanças significativas das propriedades térmicas do solo, por isso achou-se razoável adotar uma umidade média para todos.

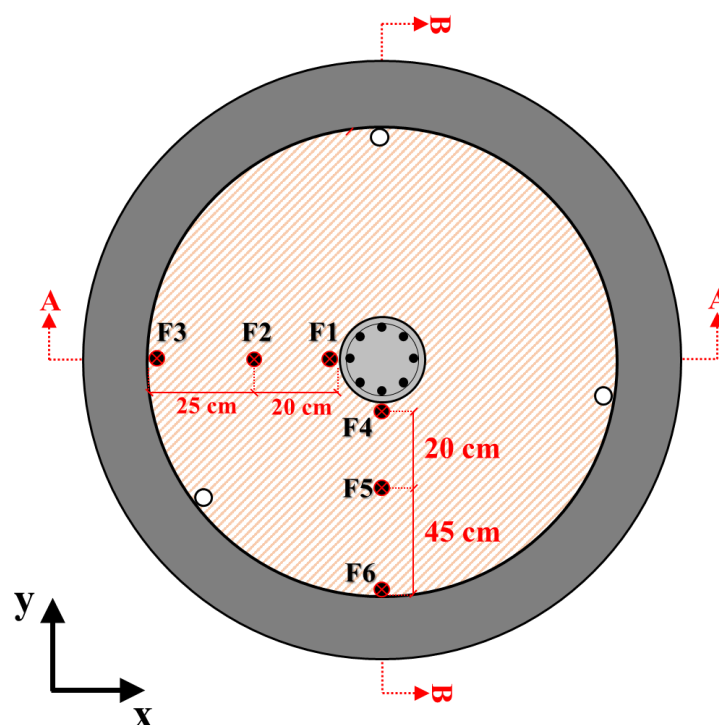


Figura 3.44 – Locação dos furos realizados para coleta de solo para medição da umidade a cada 24 horas de ensaio.

3.21 Programa de ensaios de resposta térmica desenvolvidos nos protótipos de estacas trocadoras de calor na câmara térmica

Após a concretagem do protótipo, foi aguardado um período mínimo de 28 dias para que houvesse plena cura do concreto na qual posteriormente, foi dado início aos testes de resposta térmica nos protótipos.

Nesse sentido, foi determinado a definição da nomenclatura dos ensaios TRT, como mostrado na Figura 3.45, onde a nomenclatura dos ensaios foi dividida em três componentes básicos. O primeiro termo destina-se a esta configuração dos tubos dispostos nos protótipos, podendo ser 1U, 2U ou 4U. O segundo termo destina-se a informação de vazão imposta no fluido circulante do equipamento de ensaio TRT, que podem ser 3,06 ou 6,12 ou 12,41 l/min. O terceiro termo destina-se a informação do grau de saturação relativa do solo a que o ensaio foi submetido, podendo ser em média 33% ou 80%.

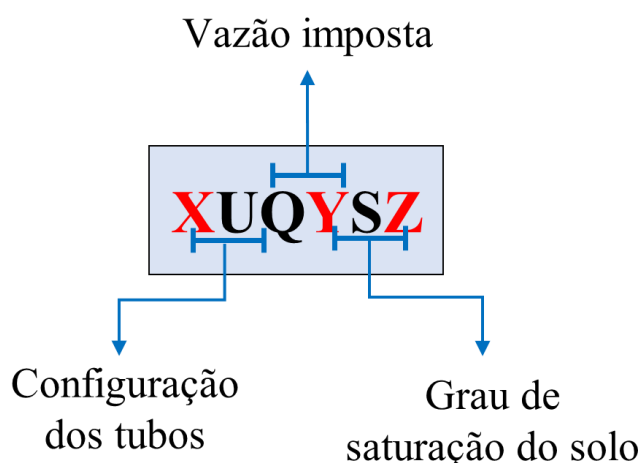


Figura 3.45 – Padronização de nomenclatura dos ensaios TRT realizados na câmara térmica.

Na Figura 3.46, mostra-se o fluxograma da campanha experimental dos ensaios TRT, realizados na câmara térmica dessa tese. Ambas as configurações (1U, 2U e 4U) foram submetidas a três condições de vazão de circulação da água na tubulação (3,1; 6,2 3 12,4 l/min), onde tal condição, objetivou contrastar as condições de capacidade de estocagem de energia térmica no sistema, condutividade térmica, capacidade de expansão do bulbo térmico no solo, aumento da vazão, todos submetidos a duas condições de grau de saturação médio de aproximadamente 33% para a condição não saturada e 80% para a condição saturada. Nesse sentido, vale ressaltar que não houve mudanças na estrutura geotécnica do solo. Vale ressaltar

que os ensaios 4UQ6S80 e 4UQ12S80 não foram possíveis de serem executados devido a problemas técnicos identificados no sensor de vazão e em alguns sensores de temperatura.

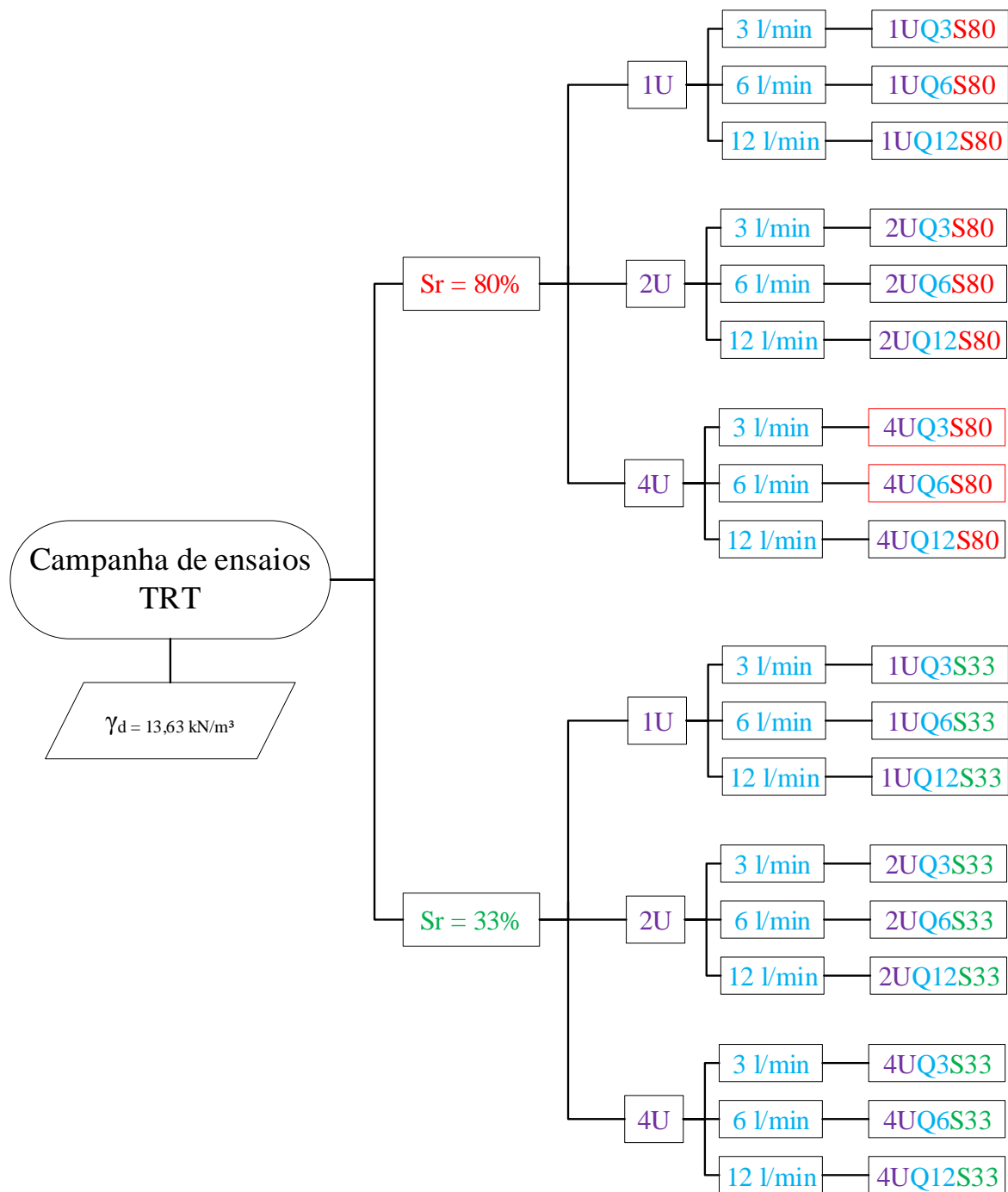


Figura 3.46 – Fluxograma com os principais ensaios TRT realizados na câmara térmica.

Observa-se aqui, que todas as vazões escolhidas (3; 6 e 12 l/min) garantiram que o fluido no interior dos tubos estivesse no regime turbulento ($Re > 2400$), com número de

Reynolds médios de 5800, 12170 e 24600 respectivamente. Vale ressaltar que apesar de ter sido realizados ensaios fixados vazões em aproximadamente 3; 6 e 12 l/min, as taxas de calor trocadas em cada situação foram distintas, o que impossibilitou a realização de comparações de respostas térmicas entre as mesmas vazões.

Por fim, a campanha de ensaios, tiveram cerca de 16 ensaios TRT, nas quais tiveram duração total de 8 dias de coleta de dados de temperatura ininterruptos, 4 dias na fase de aquecimento e 4 dias na fase de resfriamento do solo, o que totalizou mais de 4 meses ininterruptos de ensaio, tirando os ensaios que deram errado e tiveram que ser refeitos.

3.22 Execução do poço de monitoramento de temperatura do subsolo

Na Figura 3.47 (a), mostra-se uma imagem de satélite do prédio a localização do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, executado dentro do Laboratório de Estruturas e Hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília- UnB. A locação do ponto de execução do poço foi a 28,6 m de distância da frente do laboratório e 2,8 m da lateral direita. O poço foi executado aproveitando-se o furo de uma sondagem SPT de 12 m de profundidade. Na Figura 3.47 (b), mostra-se um croqui com a localização interna do furo de sondagem executado dentro do laboratório. O Anexo III mostra em detalhamento o relatório de sondagem do subsolo do laboratório de estruturas de hidráulica, obtido ao longo da execução do poço de monitoramento de temperatura do subsolo.

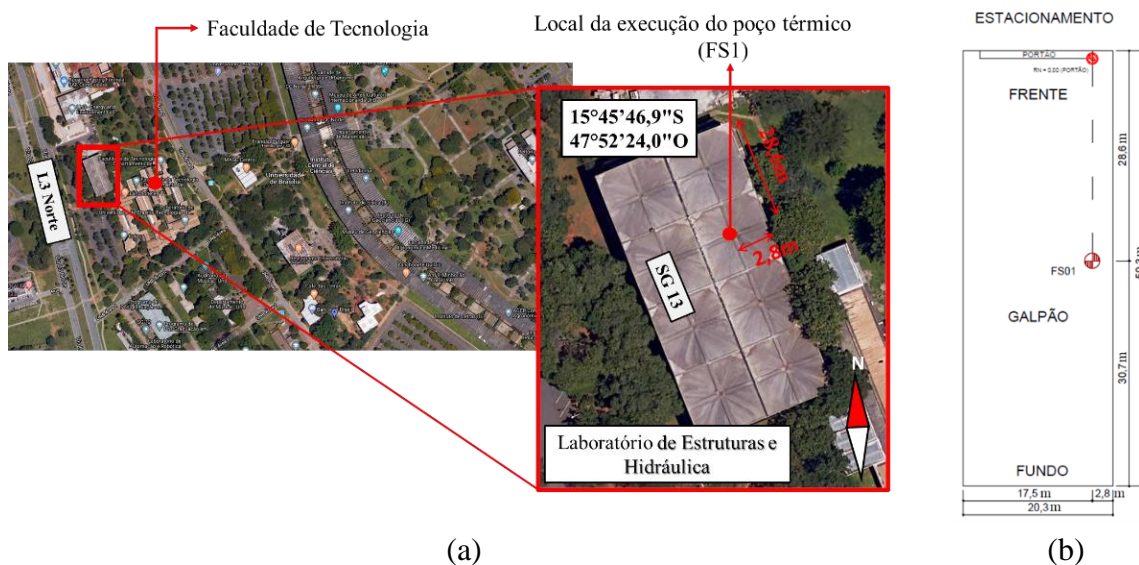


Figura 3.47 – (a) Locação do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, executado nesta pesquisa. (b) croqui do laboratório com a localização interna do furo de sondagem SPT no laboratório de estruturas e hidráulica da Faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília (SG13).

Na Figura 3.48 (a), mostra-se o detalhe da instrumentação instalada no furo da sondagem SPT. A instrumentação consistiu em uma coluna de PVC de meia polegada com um sensor termopar tipo K a cada 3 m de profundidade, partindo da cota zero. Na Figura 3.48 (b), mostra-se a execução da instrumentação a ser inserida no furo SPT.

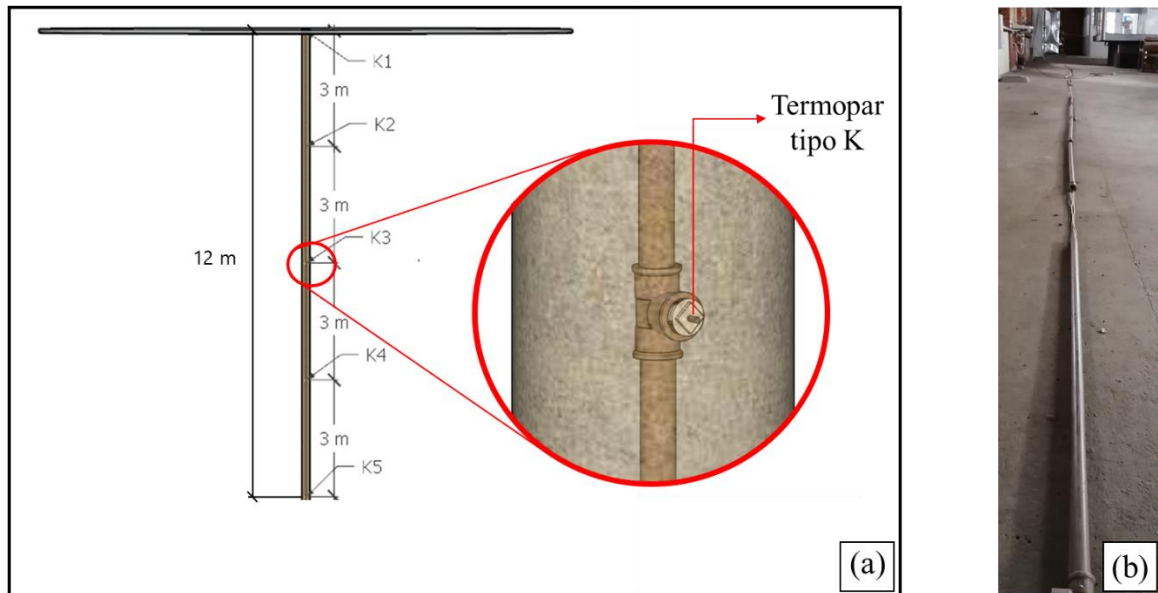


Figura 3.48 – (a) Dimensões de locação dos termopares tipo K ao longo da profundidade do poço de monitoramento de temperatura do subsolo. (b) Execução da vara de PVC com os sensores.

Foram realizadas medições diárias de quatro meses em diferentes estações. Em 2020 foram medidos nos meses de agosto e setembro, e em 2021 foram feitas medições em abril e junho. Em cada mês obteve-se 5 dias de leituras na qual em cada dia foram realizadas três medições estratégicas no dia, uma às 7 horas, outra as 14 horas e outra as 21 horas. Para cada dia foi possível estimar a temperatura média diária para o mês medido, na qual se permitiu observar o comportamento da variação térmica ao longo de um perfil de solo sobre condições cobertas pelo prédio típico (galpão fechado) na região do DF.

3.23 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias de obtenção das características do solo utilizado nesta tese, proveniente do antigo campo experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB) no âmbito geotécnico e no âmbito geotérmico. Nesse caso, foram abordados os ensaios de caracterização básicos de limite de liquidez (LL); Limite de plasticidade (LP); ensaio de granulometria, fina e grossa; densidade dos grãos e ensaio de FRX. Para os ensaios térmicos, abordou-se de forma detalhada a metodologia de compactação das amostras de solo, bem como o procedimento metodológico do ensaio de condutividade térmica com o equipamento “KD2 Pro”.

Foram também apresentadas as metodologias utilizadas na execução do programa experimental, que consistiu em ensaios de controle de compactação do solo na câmara térmica; calibração de sensores térmicos e de vazão; detalhamento do equipamento de ensaio TRT de resposta térmica e bancada de ensaios; detalhamento e execução dos protótipos de estaca trocadora de calor e apresentação do programa experimental dos ensaios de resposta térmica, bem como os detalhes da instrumentação e execução do poço de monitoramento de temperatura do subsolo.

A utilização dos dados obtidos por meio deste programa experimental, suas definições, características e comparações, é apresentado a seguir.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo estudado: granulometria, limites de consistência, peso específico dos grãos, FRX do solo, bem como os resultados do controle de compactação do solo no interior da câmara térmica.

Também será discutido os resultados das principais propriedades geotérmicas do solo laterítico de Brasília em função de suas propriedades geotécnicas. Foram propostos ajustes de parâmetros dos principais modelos de previsão de condutividade térmica do solo que melhor ajustou para o solo laterítico estudado, bem como foi proposto um modelo de ajuste matemático para a condição do solo laterítico de Brasília.

Serão mostradas as leituras de temperatura do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, obtidos ao longo do tempo, em um período de 4 meses. Posteriormente, será apresentado a discussão paramétrica sobre os principais resultados dos ensaios TRT realizados na câmara térmica sobre um ponto de vista de resposta térmica adimensional, bem como de resistências térmicas dos protótipos de estacas trocadoras de calor nas configurações 1U, 2U e 4U, em duas condições de grau de saturação do solo compactado.

4.1 Caracterização geotécnica do solo

Os principais resultados obtidos da caracterização geotécnica do solo laterítico do antigo campo experimental, foram comparados com os resultados de caracterização geotécnica de alguns importantes trabalhos de teses e dissertações do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, que também estudaram o mesmo solo. Os principais trabalhos foram o de Guimarães (2002), Silva (2007), Silva (2009), Fuji (2012), Restrepo (2010), Borges (2014) e Queiroz (2015).

Na Tabela 4.1, mostra-se de forma resumida os principais resultados da caracterização geotécnica do solo do antigo campo experimental da Pós-graduação de Geotecnia realizados neste trabalho.

Tabela 4.1 – Resultados de caracterização geotécnica do solo do antigo campo experimental da Pós-graduação da Universidade de Brasília.

| Parâmetro | LL (%) | LP (%) | IP (%) | γ_s (kN/m ³) | SUCS |
|-----------|--------|--------|--------|---------------------------------|-------|
| | 41 | 24 | 17 | 27,15 | CL-ML |

O peso específico dos grãos do solo coletado na profundidade aproximada de 2 m, foi de 27,15 kN/m³, semelhante ao encontrado por Queiroz (2015), Borges (2014), Guimarães (2002) e Restrepo (2010). Quanto aos limites de consistência, os valores de LL e IP determinados são similares aos obtidos por Borges (2014) na faixa de 41% e 17%, respectivamente. Conforme o Sistema unificado de classificação de solos (SUCS), o solo caracterizado trata-se de uma argila siltosa de baixa compressibilidade.

Na Figura 4.1 mostra-se o resultado curva granulométrica dos ensaios de granulometria com defloculante (CD) e sem defloculante (SD) do solo coletado nesta pesquisa, ambos comparados com as curvas granulométricas de Guimarães (2002) e Borges (2014).

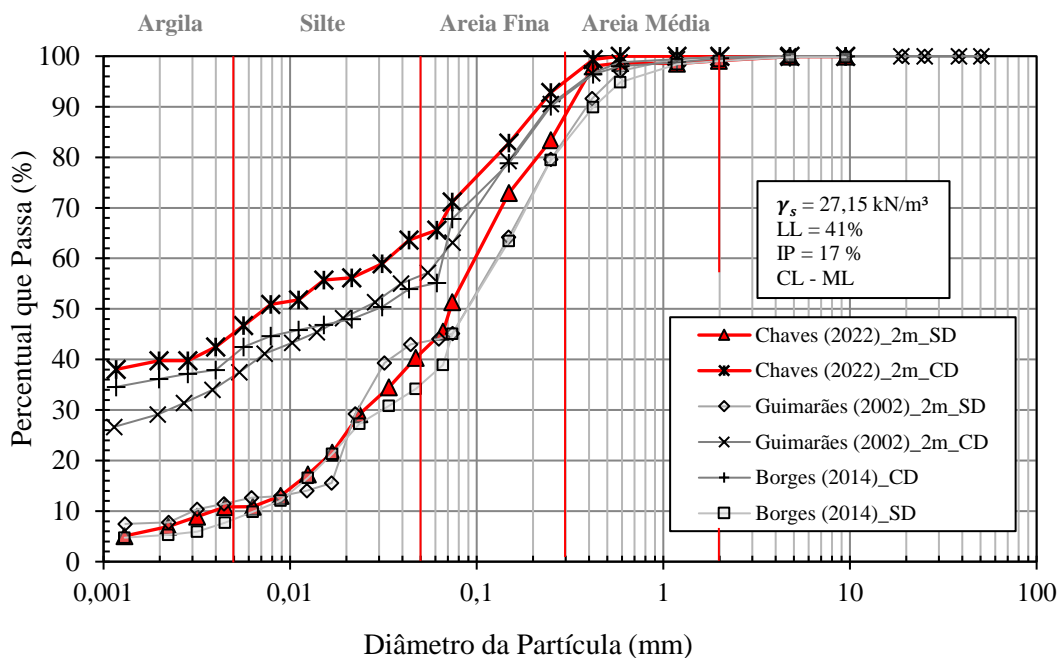


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo laterítico do antigo campo experimental proposto, e comparativo com trabalhos de Guimarães (2002) e Borges (2014).

O comparativo dos ensaios de granulometria teve por objetivo validar os ensaios de caracterização realizados nesta tese e avaliar a semelhança entre os solos, uma vez que ambos pertencem ao mesmo antigo campo experimental, sobre a mesma profundidade, apesar de terem sido coletados em pontos distintos de coleta da área do antigo campo experimental.

4.2 Fluorescência de raio X do solo laterítico estudado

Na Tabela 4.2, mostra-se o resultado do ensaio de fluorescência de raios X, em porcentagem de massa da composição de óxidos, da mineralogia dos grãos presente no solo

estudado, bem como a capacidade térmica dos respectivos óxidos obtidos pelos manuais técnicos de propriedades térmicas dos materiais da RGP balls.

Tabela 4.2 – Composição química do solo laterítico obtida por Fluorescência de Raios X (% massa) e capacidade estimada do respectivo óxido.

| Óxidos | Porcentagens (%) | C _P (MJ.m ⁻³ . K ⁻¹) |
|--------------------------------|------------------|--|
| Al ₂ O | 44,45 | 3,046 |
| SiO ₂ | 24,06 | 1,595 |
| Fe ₂ O ₃ | 22,76 | 3,511 |
| TiO ₂ | 3,03 | 2,927 |
| Na ₂ O | 2,3 | - |
| MgO | 2 | 3,355 |
| K ₂ O | 0,49 | - |
| ZrO ₂ | 0,19 | 2,7 |
| SO ₃ | 0,15 | - |
| Cl | 0,3 | - |
| CaO | 0,12 | - |
| Cr ₂ O ₃ | 0,11 | - |
| V ₂ O ₅ | 0,07 | - |
| MnO | 0,05 | - |
| As ₂ O ₃ | 0,01 | - |
| ZnO | 0,01 | - |
| NiO | 0,01 | - |

Na Figura 4.2, mostra-se com maiores detalhes um gráfico em pizza do resultado do ensaio FRX com seus principais óxidos presentes e relevantes no solo, sobre o ponto de vista das propriedades térmicas dos minerais presentes no solo.

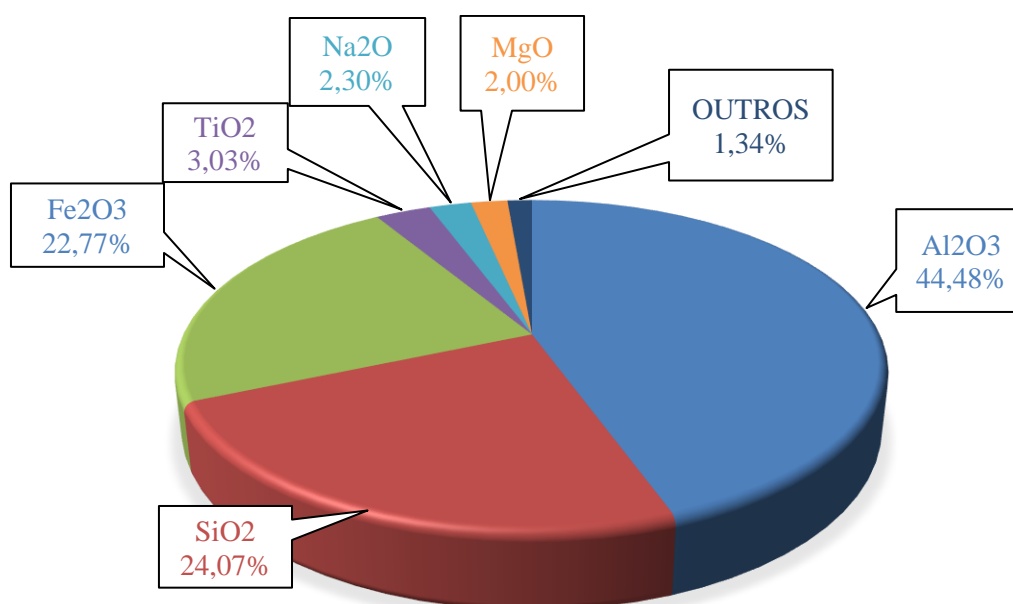


Figura 4.2 – Resultado dos principais óxidos presentes nos minerais do solo laterítico estudado.

Os principais óxidos constituintes dos minerais presentes no solo estudado são: óxido de Ferro III (Fe_2O_3), com 22,77%, típico de um solo laterítico, 44,48% de óxido de alumínio (Al_2O_3), típico de um solo de comportamento argiloso, e 24,07% de óxido de silício (SiO_2), que é característico de um solo que possui uma influência de um comportamento arenoso.

Por meio do ensaio FRX foi possível conseguir estimar com maior acurácia, a capacidade térmica dos minerais constituintes dos grãos do solo laterítico estudado nas expressões matemáticas de média aritmética ponderada proposto por De Vries (1963) e amplamente estudado por Farouki (1981). Foi possível estimar tal propriedade térmica por meio de uma média ponderada das frações de minerais pela capacidade térmica de cada mineral presente na estrutura mineralógica do solo, que será apresentado nas próximas seções desta tese.

4.3 Controle de compactação do solo na câmara térmica

Na Figura 4.3 (a), apresenta-se o gráfico da variação de umidade por camada, a qual tem-se uma umidade média de aproximadamente 19,9%, com desvio padrão médio de 0,56, que correspondeu a um grau de saturação médio de aproximadamente 48,4%, com desvio padrão médio de 0,014. Percebe-se uma boa uniformidade na distribuição da umidade do solo na câmara, tendo em vista o considerável volume de solo utilizado nesta tese. Na Figura 4.3 (b), mostra-se a variação média do peso específico aparente seco de cada camada de solo no processo de compactação, a qual têm-se um peso específico aparente seco médio total de aproximadamente 13,4 kN/m³, com um desvio padrão médio de 0,48. Pode-se observar também uma baixa variação média de peso específico aparente seco em todas as camadas de solo, tendo em vista a dificuldade de manter uniformidade no processo de compactação em todas as camadas.

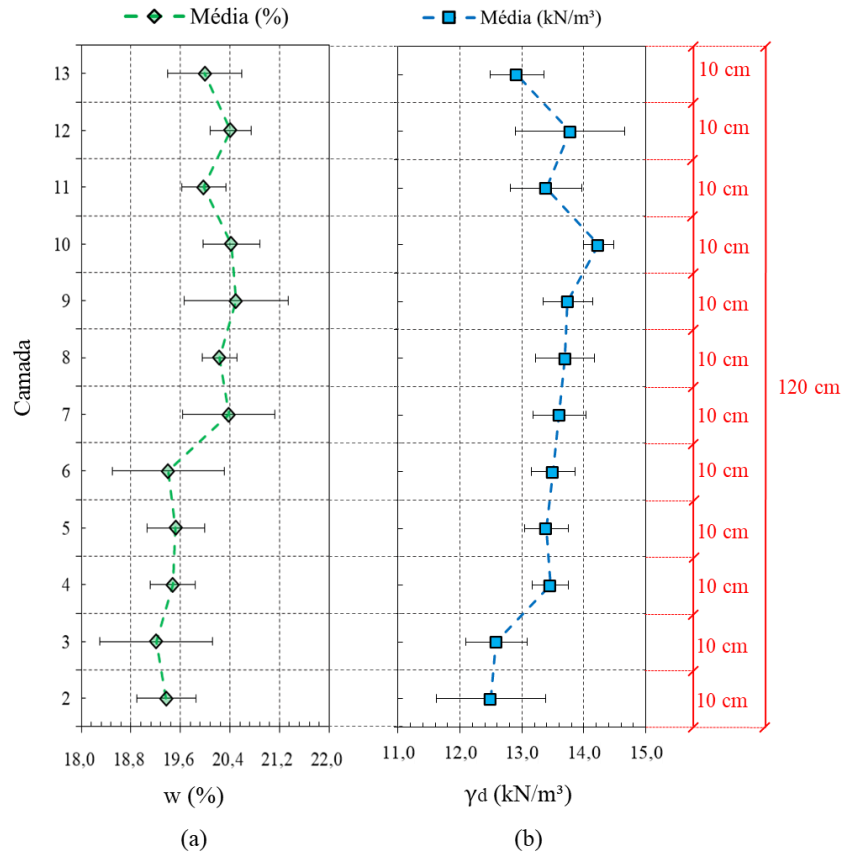


Figura 4.3 – (a) variação da umidade e (b) variação do peso específico aparente seco, ambos por camada, na compactação do solo no interior da câmara térmica de ensaios.

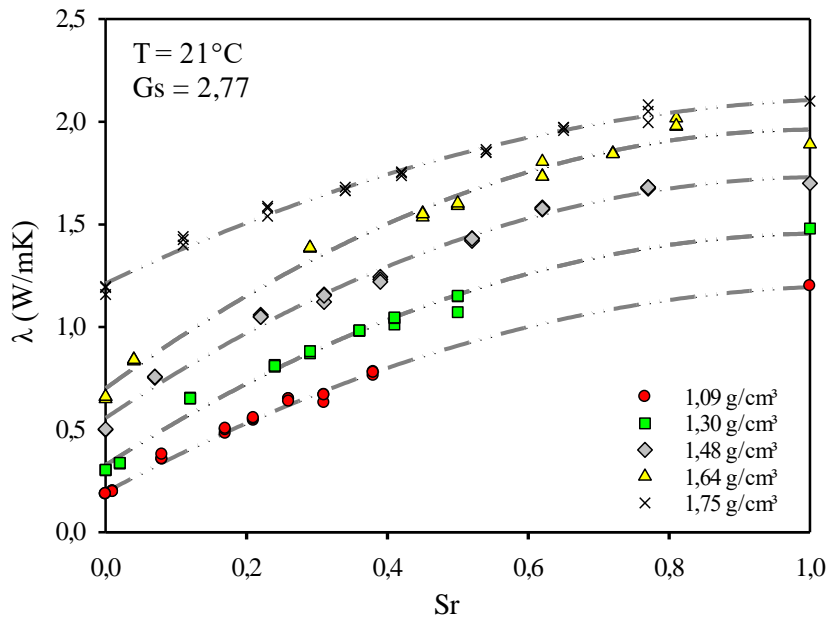
4.4 Discussão sobre a variação das propriedades térmicas do solo laterítico de Brasília-DF

É de conhecimento no meio geotécnico que o teor de umidade e o estado de compactação são fatores que influenciam no comportamento térmico de um solo. Visando entender como esses aspectos afetam no comportamento térmico do solo laterítico estudado, os resultados das curvas de condutividade térmica e capacidade térmica do solo em função do grau de saturação e da massa específica aparente seca são apresentados nos subtópicos a seguir.

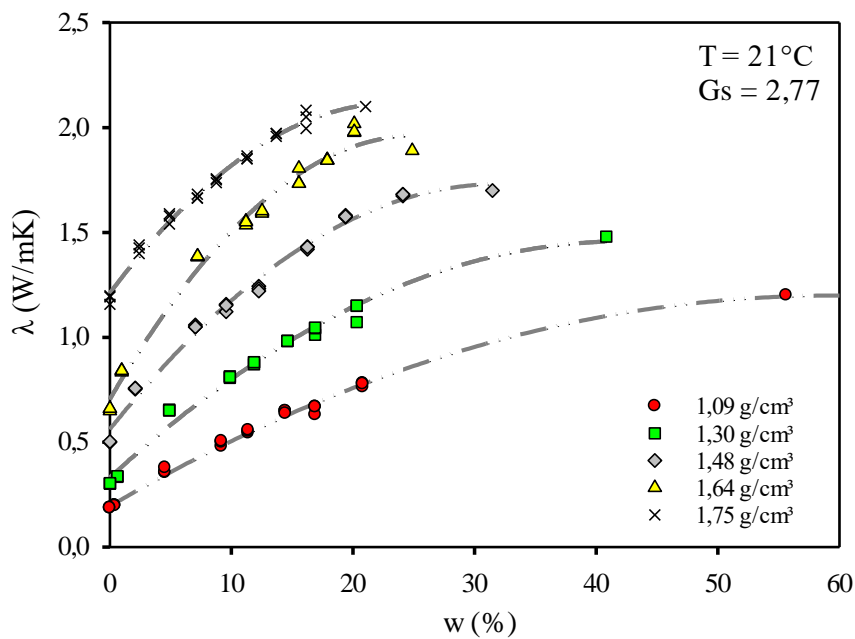
4.4.1 Comportamento da condutividade térmica

Na Figura 4.4, mostram-se os resultados dos ensaios de condutividade térmica, feitas em laboratório, das amostras compactadas (A*; B*; F*; C*; N*), referente aos corpos de prova coletados no antigo campo experimental do programa de Pós Graduação de Geotecnia da UnB. Na qual mostra o comportamento da variação da condutividade térmica do solo tropical, em função da variação da umidade (Figura 4.4 (a)), do grau de saturação (Figura 4.4 (b)) e do teor

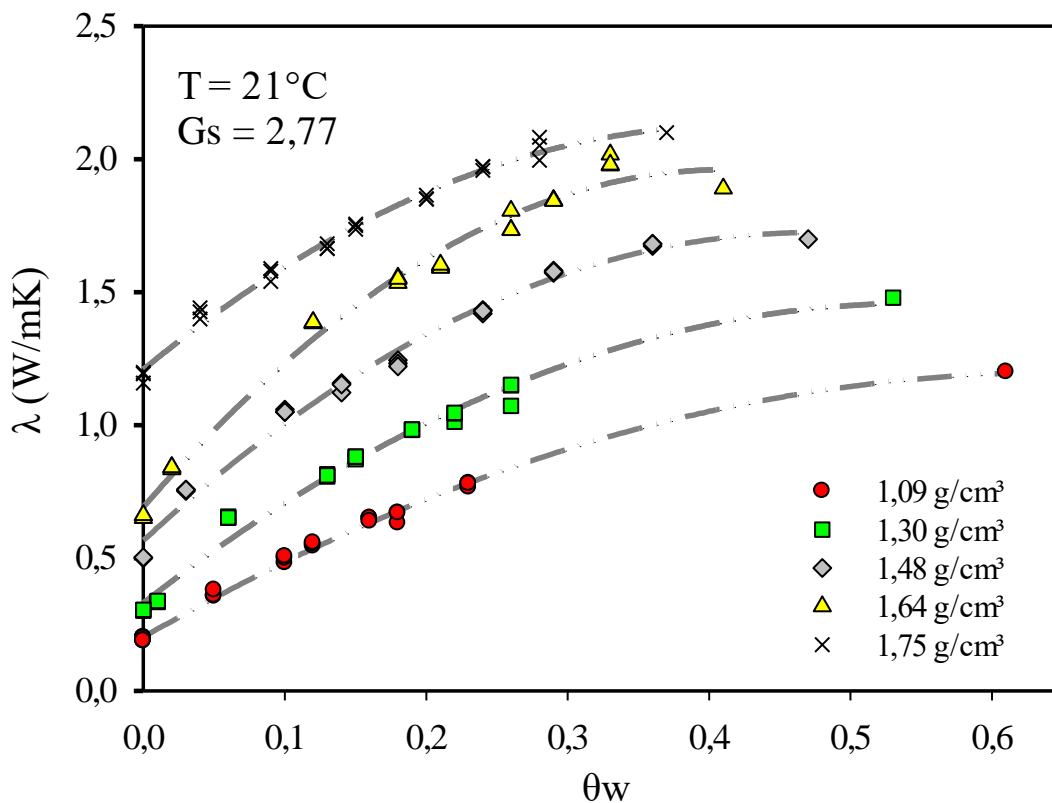
de umidade volumétrica (Figura 4.4 (c)). Vale aqui ressaltar que todas as amostras foram coletadas no antigo campo experimental, na profundidade de 2m e foram moldadas por meio de compactação estática conforme a metodologia citada no item 3.4. Além disso, pode-se observar que os valores obtidos de condutividade térmica estão dentro da faixa esperada de condutividade térmica de argilas, como mostrado por Laloui & Loria (2020), na Tabela 2.4



(a)



(b)

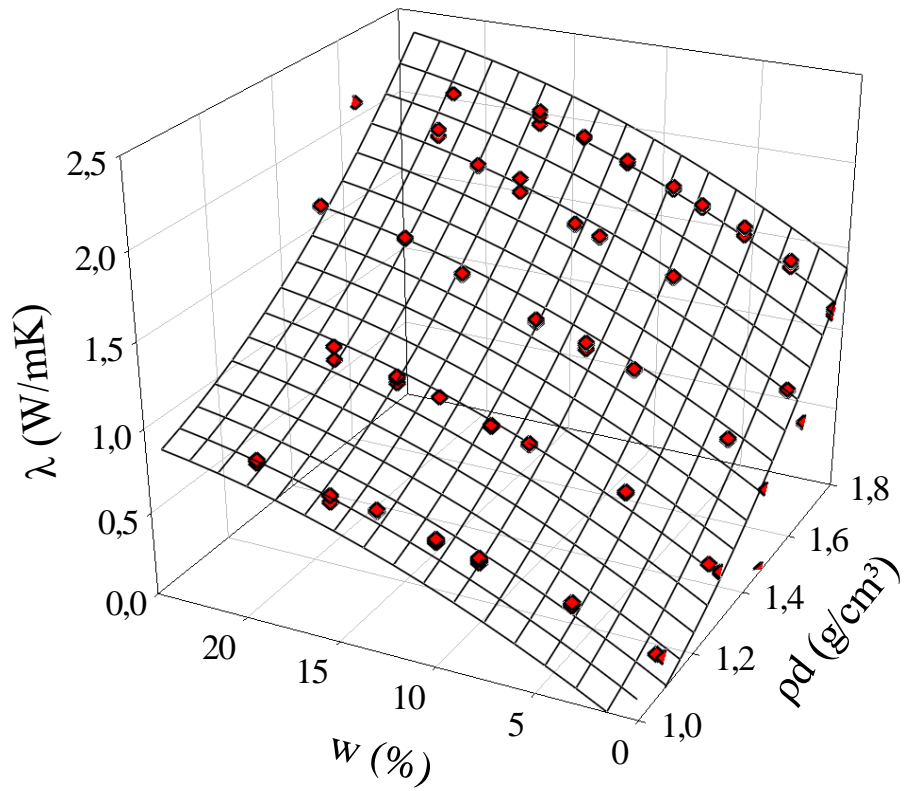


(c)

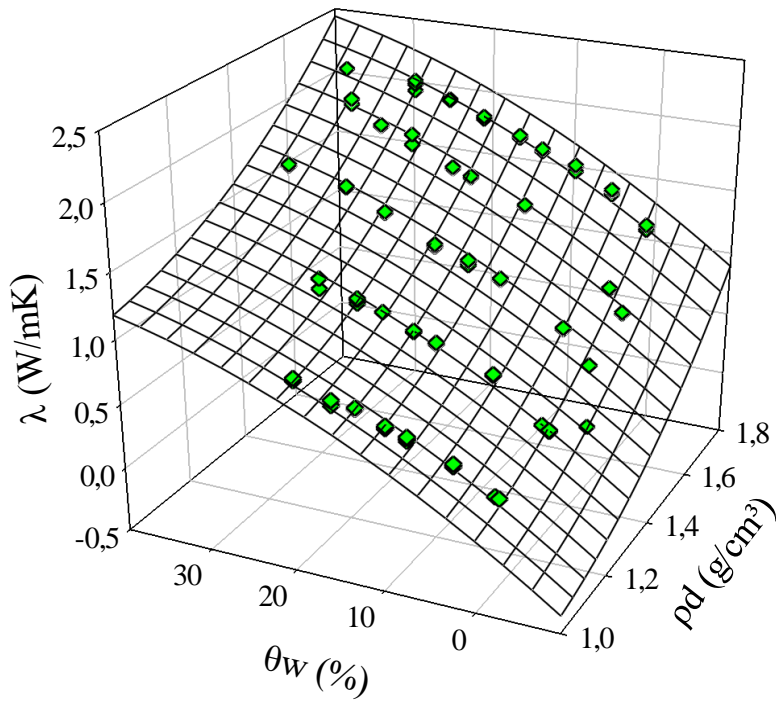
Figura 4.4 – (a) Condutividade térmica do solo em função da umidade, (b) condutividade térmica do solo em função do grau de saturação e (c) Condutividade térmica em função do teor de umidade volumétrica.

Pode-se observar que quanto maior o peso específico aparente seco do solo maiores são os valores da condutividade térmica efetiva. Tal comportamento já era esperado, uma vez que quanto maior o peso específico do solo, mais sólidos ocupam os espaços vazios da amostra, como a condutividade térmica dos minerais é maior do que o ar em sua estrutura é proporcionado assim uma maior condutividade térmica efetiva do solo na estrutura porosa estudada. Observa-se também que quanto maior a umidade do solo, maior é a quantidade de água presente nos espaços vazios de sua estrutura porosa e, conseqüentemente, maiores são os valores da condutividade térmica efetiva do mesmo.

Na Figura 4.5, mostram-se gráficos de superfície da condutividade térmica do solo laterítico estudado [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], em função da massa específica aparente seca e da umidade (Figura 4.5 (a)), umidade volumétrica θ_w (Figura 4.5 (b)) e grau de saturação S_r (%) (Figura 4.5 (c)).



(a)



(b)

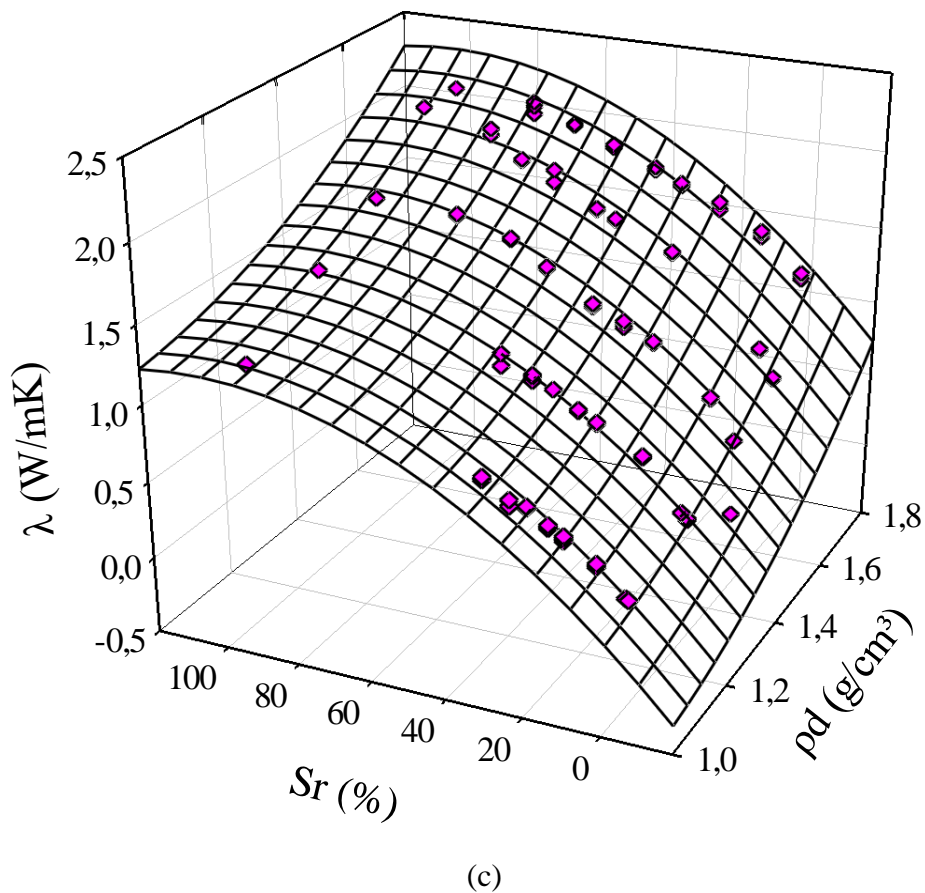


Figura 4.5 – (a) Condutividade térmica em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade, (b) umidade volumétrica - θ_w e (c) do grau de saturação - $S_r(\%)$ do solo laterítico estudado nesta tese.

A condutividade térmica do solo aumentou em função do grau de saturação bem como aumenta com o peso específico aparente seco. Nesse sentido, é perceptível uma maior sensibilidade na variação da condutividade térmica com a variação do grau de saturação do solo. No entanto, não se observa a mesma intensidade de efeito quando é comparado com a variação do peso específico aparente seco.

Por meio dos pontos plotados em 3D, foi possível ajustar as curvas de superfície com ajuste polinomial obtidos no software estatístico, Sigmaplot, dado por:

$$\lambda_{\text{solo}} = a. \rho_d^2 + b. (\mathbf{A})^2 + c. \rho_d + d. \mathbf{A} + e \quad (4.1)$$

onde,

$$\rho_d = \text{Massa específica aparente seca do solo } [\text{g}.\text{cm}^{-3}].$$

E quanto ao parâmetro **A**, pode ser:

w = Umidade do solo [%];

θ_w = Teor de umidade volumétrica do solo [%];

S_r = Grau de saturação do solo [%].

Na Tabela 4.3, mostram-se os valores dos parâmetros de ajuste da função polinomial da superfície. É possível perceber um bom ajuste (r^2) para as equações em função do teor de umidade volumétrica (%) e do grau de saturação (%), de 0,9852 e 0,9866, respectivamente. Para a equação da superfície em função da umidade do solo (%), observa-se um ajuste r^2 de 0,9725, valor inferior em relação aos demais ajustes encontrados, porém, ainda assim aceitável.

Tabela 4.3 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da condutividade térmica do solo (λ_{solo}), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r).

| Parâmetros | Parâmetro (A) | | |
|------------|---------------|----------------|-----------|
| | w (%) | θ_w (%) | S_r (%) |
| a | 1,2237 | 1,3808 | 1,0137 |
| b | 0,0010 | 0,0003 | 7,1129E-5 |
| c | 1,5898 | 2,2940 | 1,5802 |
| d | 0,0651 | 0,0421 | 0,0178 |
| e | 0,2730 | 0,9574 | 0,7019 |
| r^2 | 0,9725 | 0,9852 | 0,9866 |

Dessa forma, com a equação empírica de superfície gerada, foi possível estimar com um bom grau de acurácia, a condutividade térmica do solo laterítico do antigo campo experimental da UnB, para toda a faixa de grau de saturação (0 a 100%) dentro das faixas limites de peso específico aparente seco de 1,1 e 1,75 g/cm³ respectivamente. Vale ressaltar que os valores obtidos dos modelos propostos foram obtidos para o solo na condição compactada, sendo assim, é necessário tomar cuidado ao utilizar o modelo em solo na condição natural, em campo.

Tal resultado proporciona a possibilidade de se obter valores mais precisos e acurados de condutividade térmica de solo laterítico em trabalhos e projetos futuros que demandem tal informação na região onde o solo estudado é predominante.

De forma resumida, a partir da Tabela 4.3, tem-se que as equações para as três superfícies das Figuras 4.5 podem ser expressas por:

$$\lambda_{\text{solo}} = 1,2237 \cdot \rho_d^2 + 0,0010 \cdot (w_{(\%)})^2 + 1,5898 \cdot \rho_d + 0,0651 \cdot w_{(\%)} + 0,2730 \quad (4.2)$$

$$r^2 = 0,97$$

$$\lambda_{\text{solo}} = 1,0137 \cdot \rho_d^2 + 7,1129E - 5 \cdot (Sr_{(\%)})^2 + 1,5802 \cdot \rho_d + 0,0178 \cdot Sr_{(\%)} + 0,7019 \quad (4.3)$$

$$r^2 = 0,98$$

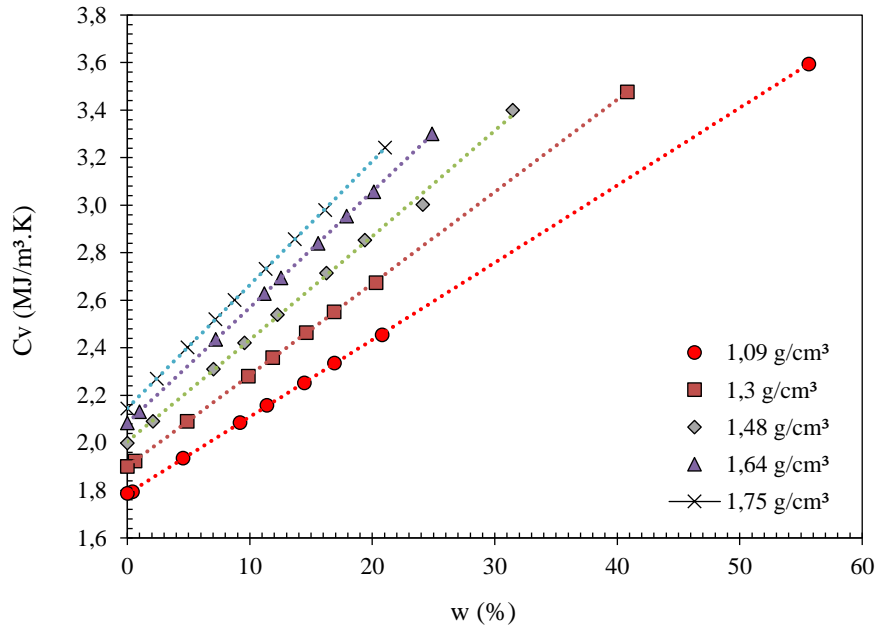
$$\lambda_{\text{solo}} = 1,3808 \cdot \rho_d^2 + 0,0003 \cdot (\theta_{w(\%)})^2 + 2,2940 \cdot \rho_d + 0,0421 \cdot \theta_{w(\%)} + 0,9574 \quad (4.4)$$

$$r^2 = 0,98$$

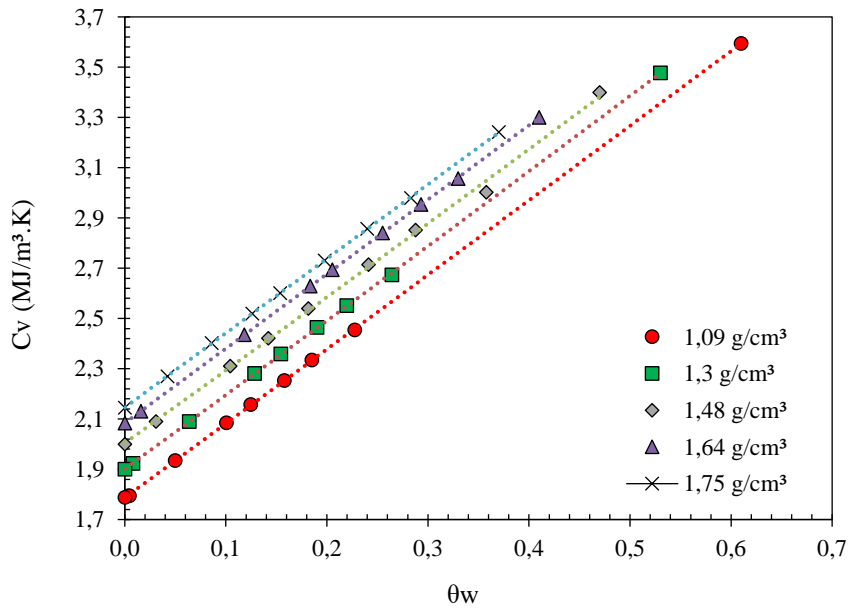
4.4.2 Comportamento da capacidade térmica

Por meio do ensaio FRX, foi possível estimar a capacidade térmica dos sólidos obtida pela média ponderada da capacidade térmica dos principais óxidos presentes na mineralogia do solo e suas proporções. Posteriormente, foi estimado a capacidade térmica do solo como um todo (sólido, água e ar) a partir da média ponderada de cada fase presente na estrutura dos corpos de prova do experimento.

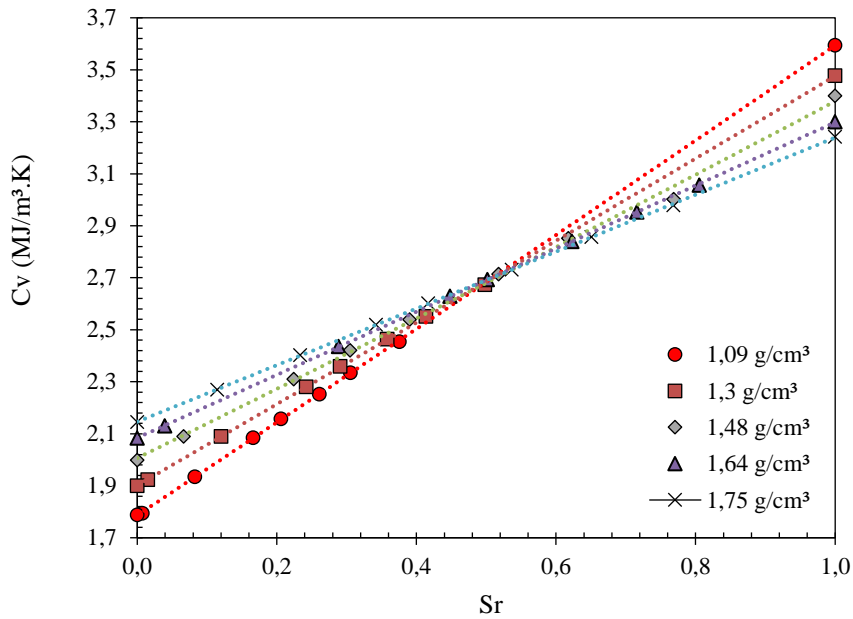
Na Figura 4.6, mostra-se o comportamento da variação da capacidade térmica volumétrica do solo - C_v em função da umidade - w (%) (Figura 4.6 (a)), umidade volumétrica θ_w (%), (Figura 4.6 (b)) e grau de saturação - Sr (%), (Figura 4.6 (c)). Além disso, pode-se observar que os valores obtidos de capacidade térmica volumétrica desta pesquisa encontram-se ligeiramente superiores a faixa esperada de capacidade térmica volumétrica para argilas, como mostrado por Laloui & Loria (2020), na Tabela 2.2. Nesse sentido, vale ressaltar que o solo estudado possui propriedades térmicas de armazenamento de energia superior aos valores típicos de argilas.



(a)



(b)

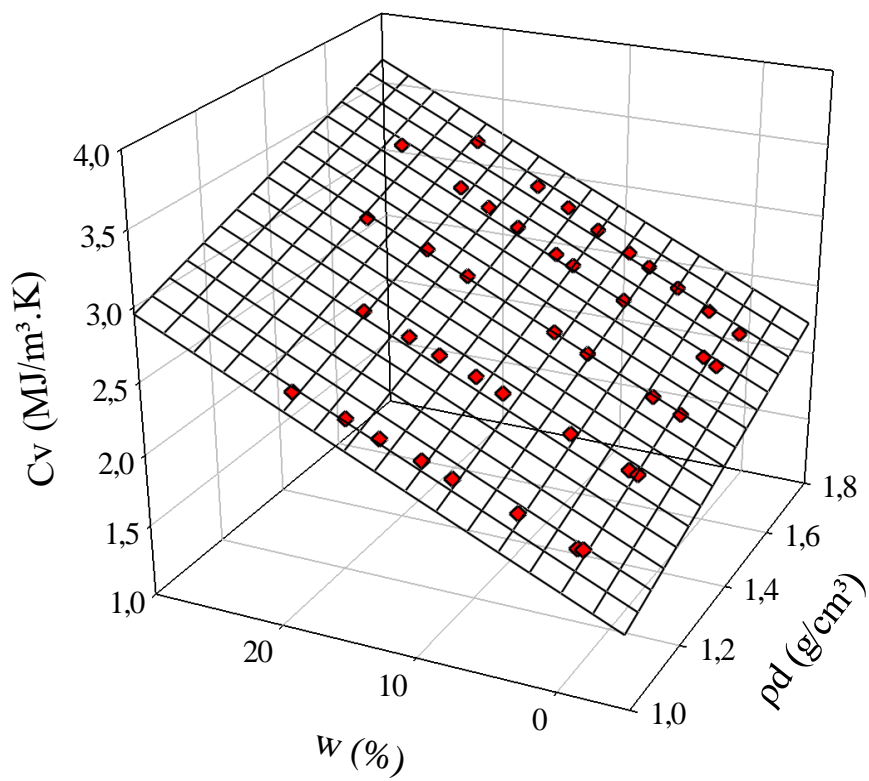


(c)

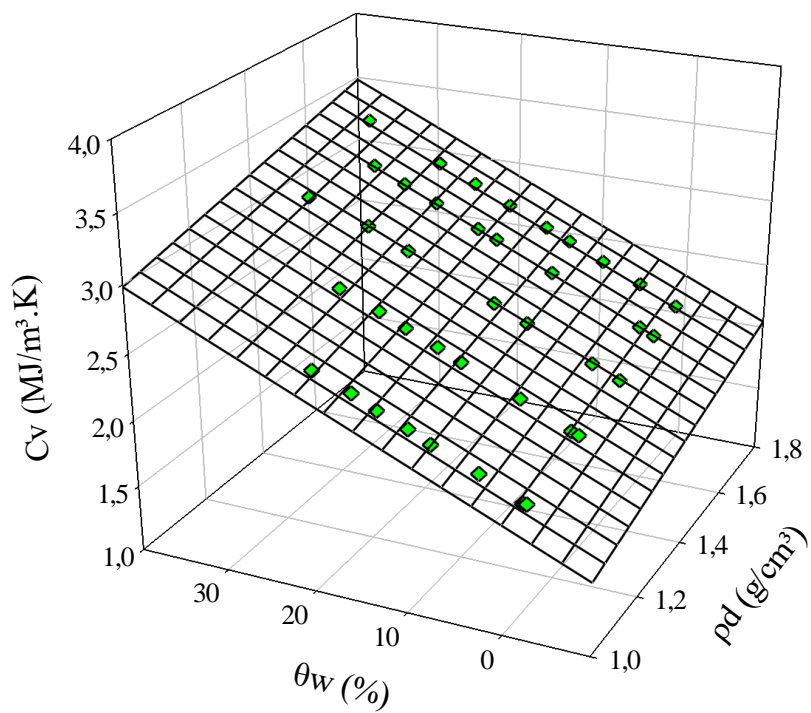
Figura 4.6 – (a) Comportamento da capacidade térmica do solo laterítico em função da umidade, (b) Capacidade térmica do solo em função do teor de umidade volumétrica, (c) Capacidade térmica em função da saturação.

Ademais, Nas Figuras 4.6 (a) e (b), mostram-se que a capacidade térmica do solo aumenta com o aumento do peso específico aparente seco e com a umidade. Porém, observa-se também que a inclinação da curva de capacidade térmica diminui com o aumento do peso específico. Este fenômeno pode ser explicado devido a presença de mais vazios em estruturas menos compactas, o que permite um maior acúmulo de água nos poros, quando comparado a estruturas mais compactas. Esta maior capacidade de acúmulo de água em estruturas mais porosas proporciona a possibilidade de maiores capacidades térmicas quando comparado a condições mais compactas. Este fenômeno pode ser observado com maiores detalhes na Figura 4.6(c), onde o solo, com massa específica aparente seca de 1,75g/cm³, apresenta menor capacidade térmica do que o mesmo sobre um peso específico de 1,09 g/cm³ para grau de saturação acima de 50%.

Na Figura 4.7, mostram-se gráficos de superfície da capacidade térmica do solo laterítico estudado, dado em [MJ.m⁻³.K], em função da massa específica aparente seca, e da umidade (Figura 4.7 (a)), umidade volumétrica (Figura 4.7 (b)) e grau de saturação (Figura 4.7 (c)).



(a)



(b)

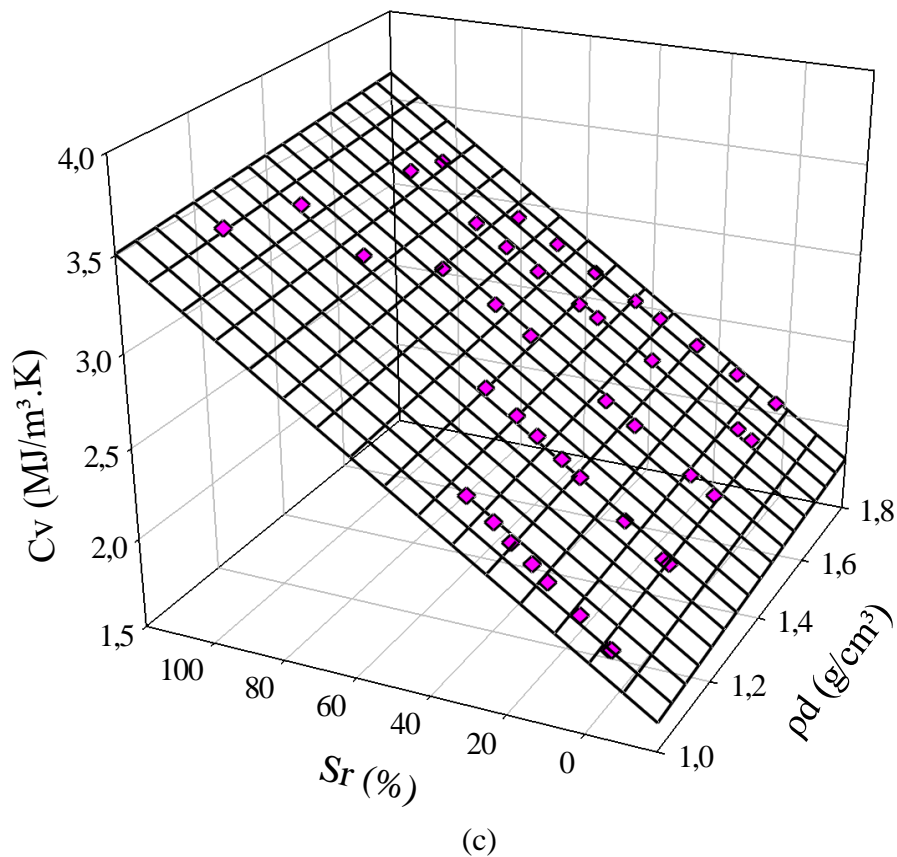


Figura 4.7 – Capacidade térmica volumétrica (C_v) em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade (a), umidade volumétrica (b) e do grau de saturação (%) do solo laterítico estudado nesta tese.

Por meio dos pontos plotados em 3D, conforme mostrado nas Figuras 4.7 (a), (b) e (c), foi possível ajustar as curvas de superfície com ajuste polinomial, dado por:

$$C_v = a. \rho_d + b. \mathbf{B} + c \quad (4.5)$$

onde:

ρ_d = Massa específica aparente seca do solo [$\text{g}.\text{cm}^{-3}$];

E quanto ao parâmetro \mathbf{B} , pode ser:

w = Umidade do solo [%];

θ_w = Teor de umidade volumétrica do solo [%];

S_r = Grau de saturação do solo [%].

Na Tabela 4.4, mostra-se os valores dos parâmetros ajustados da função polinomial com forma dada pela Eq.(4.5). É possível perceber um bom ajuste (r^2) para as equações em função da umidade relativa (%) e do grau de saturação (%) de 0,9828 e 0,9683, respectivamente. Para a equação da superfície em função do teor de umidade volumétrica do solo (%), obteve-se um ótimo ajuste r^2 de 0,9994.

Tabela 4.4 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da capacidade térmica volumétrica do solo (C_v), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r).

| Parâmetros | Parâmetro (B) | | |
|------------|------------------------|----------------|-----------|
| | w (%) | θ_w (%) | S_r (%) |
| a | 0,8912 | 0,6221 | 0,2914 |
| b | 0,0420 | 0,0293 | 0,0105 |
| c | 0,8031 | 1,1901 | 1,6880 |
| r^2 | 0,9828 | 0,9994 | 0,9683 |

De forma resumida, a partir da Tabela 4.4, tem-se que as equações para as três superfícies das Figuras 4.7 podem ser expressas por:

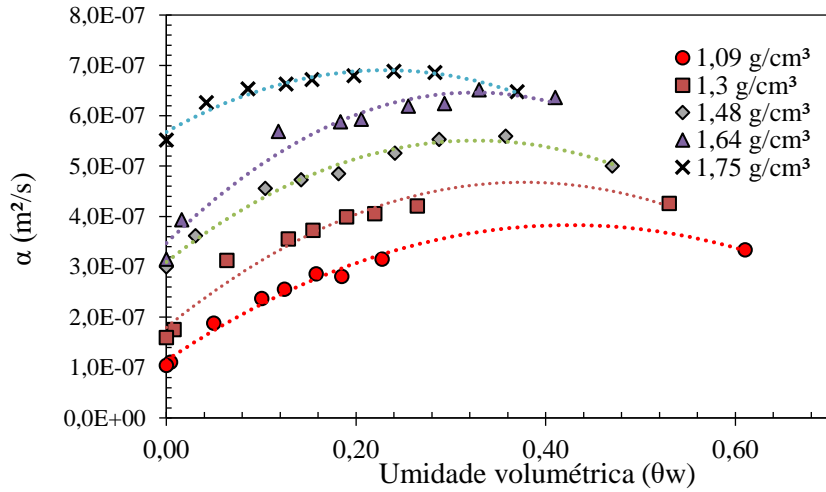
$$C_v = 0,8912 \cdot \rho_d + 0,0420 \cdot w_{(\%)} + 0,8031 \quad r^2 = 0,98 \quad (4.6)$$

$$C_v = 0,6221 \cdot \rho_d + 0,0293 \cdot \theta_{w(\%)} + 1,1901 \quad r^2 = 0,99 \quad (4.7)$$

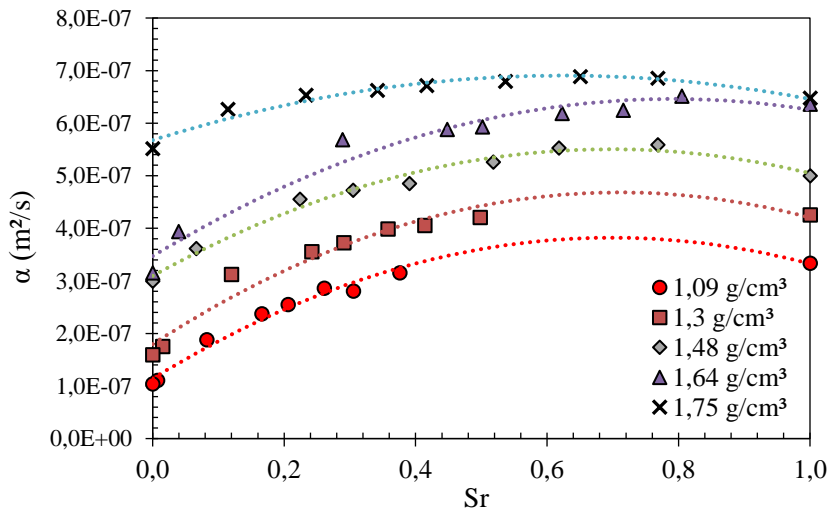
$$C_v = 0,2914 \cdot \rho_d + 0,0105 \cdot S_{r(\%)} + 1,6880 \quad r^2 = 0,96 \quad (4.8)$$

4.4.3 Comportamento da difusividade térmica

A partir das curvas obtidas dos dados experimentais, foi possível se obter as curvas de difusividade térmica do solo laterítico. Na Figura 4.8 (a) e na Figura 4.8 (b), mostra-se o comportamento da difusividade térmica do solo em função do teor de umidade volumétrica (Figura 4.8 (a)) e do grau de saturação (Figura 4.8 (b)) para diferentes condições de massa específica.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Difusividade térmica do solo laterítico estudado em função do teor de umidade volumétrica (θ_w) e do grau de saturação relativo (S_r).

Como pode-se observar nas Figura 4.8 (a) e Figura 4.8 (b), mostra-se que há uma tendência de queda da difusividade térmica quando o solo tende a saturar, isso ocorre devido as curvas de capacidade térmica apresentarem menores taxas de variação em zonas de saturação em relação as taxas de variações das curvas de condutividade térmica. Tal comportamento se assemelha também com o trabalho de Maciel Neto (2011) na qual é perceptível a queda da difusividade para condições de umidade mais elevadas.

Nas Figuras 4.9 (a) e (b), mostram-se os gráficos de superfície da difusividade térmica do solo laterítico estudado [$m^2 \cdot s^{-1}$] em função da massa específica aparente seca, do teor de umidade volumétrica (Figura 4.9 (a)), e do grau de saturação relativo do solo (Figura 4.9 (b)).

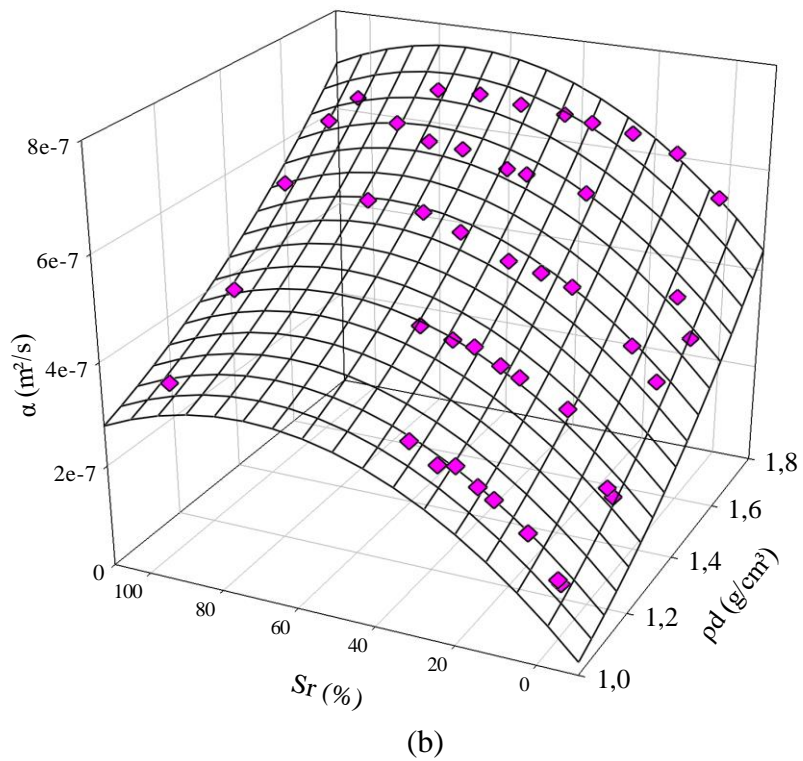
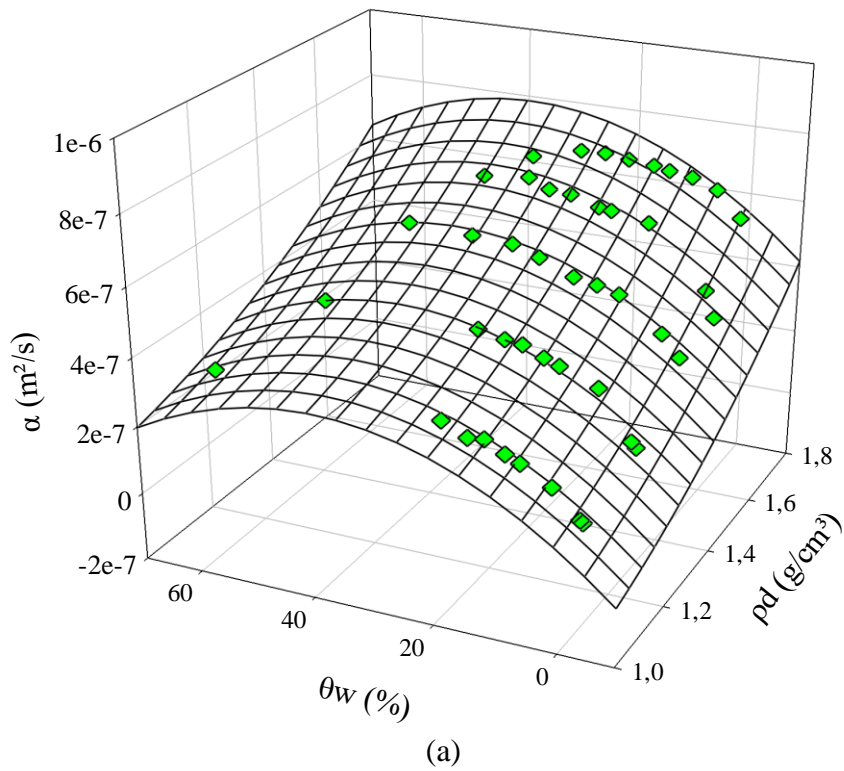


Figura 4.9 – Condutividade térmica em função da massa específica aparente seca (g/cm^3) e da umidade (a), umidade volumétrica (b) e do grau de saturação (%) do solo laterítico estudado nesta tese.

É interessante observar que os valores de difusividade térmica para o solo laterítico estudado deram na ordem de 10^{-7} m²/s. Tais valores de grandeza e comportamento termofísico se assemelham bastante com os resultados de Maciel Neto (2011), como foi mostrado no capítulo 2 desta tese. É válido ressaltar também que os valores encontrados de difusividade térmica possuem uma ordem de valores inferior aos valores utilizados por Loveridge & Powrie (2013) e Loveridge & Powrie (2014), que foram em torno da ordem de 10^{-6} , que estudaram solos do Reino Unido. Tal diferença evidencia que o solo laterítico estudado nesta tese possui menor capacidade de difusão térmica em relação aos solos estudados por Loveridge & Powrie (2013) e Loveridge & Powrie (2014), fato evidenciado também pelos valores de alta capacidade térmica obtidos no solo laterítico. A partir de tal resultado pode-se afirmar que o solo laterítico estudado possui uma maior capacidade de armazenar energia em relação aos solos típicos do Reino Unido, estudados por Loveridge & Powrie (2013) e Loveridge & Powrie (2014).

A partir dos dados experimentais plotados em 3D na Figura 4.9, mostra-se que foi possível ajustar as curvas de superfície com ajuste polinomial, dado por:

$$\alpha = a. \rho_d^2 + b. (\mathbf{A})^2 + c. \rho_d + d. \mathbf{A} + e \quad (4.9)$$

onde:

ρ_d = Massa específica aparente seca do solo [g.cm⁻³];

E quanto ao parâmetro \mathbf{A} , pode ser:

w = Umidade do solo [%];

θ_w = Teor de umidade volumétrica do solo [%];

S_r = Grau de saturação do solo [%].

Na Tabela 4.5, mostram-se os valores dos parâmetros ajustados da função polinomial com forma dada pela Eq. (4.9). Percebe-se que o ajuste (r^2) para as equações em função do teor de umidade volumétrica (%) e do grau de saturação (%) foram de 0,9629 e 0,9662, respectivamente. Tal situação de ajuste não é ideal, porém pode ser uma boa forma de estimar a difusividade térmica do solo laterítico de Brasília para obtenção de critério de tempo de ensaio

TRT uma vez que não se possui um consenso amplo de tempo do ensaio por se desconhecer totalmente os parâmetros de difusividade térmica do solo.

Portanto, para uma condição de estimativa as equações empíricas desenvolvidas podem ser uma forma prática de se obter resultados mais acurados de ensaios de campo de resposta térmica em Brasília – DF, uma vez respeitados os limites geotécnicos impostos pelos pela equação empírica para o solo laterítico compactado em questão.

Tabela 4.5 – Parâmetros de ajuste da função polinomial de superfície da condutividade térmica do solo (λ_{solo}), em função do peso específico aparente seco (ρ_d) e do grau de saturação (S_r).

| Parâmetros | Parâmetro (A) | |
|------------|-------------------|-------------------|
| | θ_w (%) | S_r (%) |
| a | $3,6044.E^{-7}$ | $3,0624.E^{-7}$ |
| b | $-1,5566.E^{-10}$ | $-4,6691.E^{-11}$ |
| c | $-4,5251.E^{-7}$ | $-3,3769.E^{-7}$ |
| d | $1,2351.E^{-8}$ | $6,7799.E^{-9}$ |
| e | $1,8799.E^{-7}$ | $1,2928.E^{-7}$ |
| r^2 | 0,9629 | 0,9662 |

4.5 Calibração dos principais modelos de previsão de condutividade térmica

A partir dos dados obtidos em laboratório foi possível realizar um ajuste de parâmetros dos principais modelos de previsão de condutividade térmica do solo laterítico estudado nesta pesquisa. Os principais modelos utilizados foram: Johansen (1977), Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007). Tais modelos tem em comum propor previsão de condutividade térmica em solos, de modo geral, tanto arenosos e siltosos, quanto argilosos, sendo ajustados por meio de parâmetros da curva da condutividade térmica normalizada (número de Kersten, obtido por Johansen (1977) na Tabela 2.2) versus Grau de saturação relativa do solo.

Na Figura 4.10, mostra-se a comparação do método de Johansen (1977) com a condutividade térmica normalizada, dos dados experimentais medidos em laboratório. Pode-se observar que, o modelo proposto por Johansen (1977) não é válido para valores abaixo de 20% de grau de saturação relativa, uma vez que os valores preditos são muito diferentes dos valores medidos. Abaixo de 20% de saturação, o erro quadrático médio (*root mean square error* -

RMSE) da curva é igual a 0,550 W/m.K ,valor não muito diferente do erro quadrático médio (RMSE) total, de 0,477 W.m⁻¹.K⁻¹.

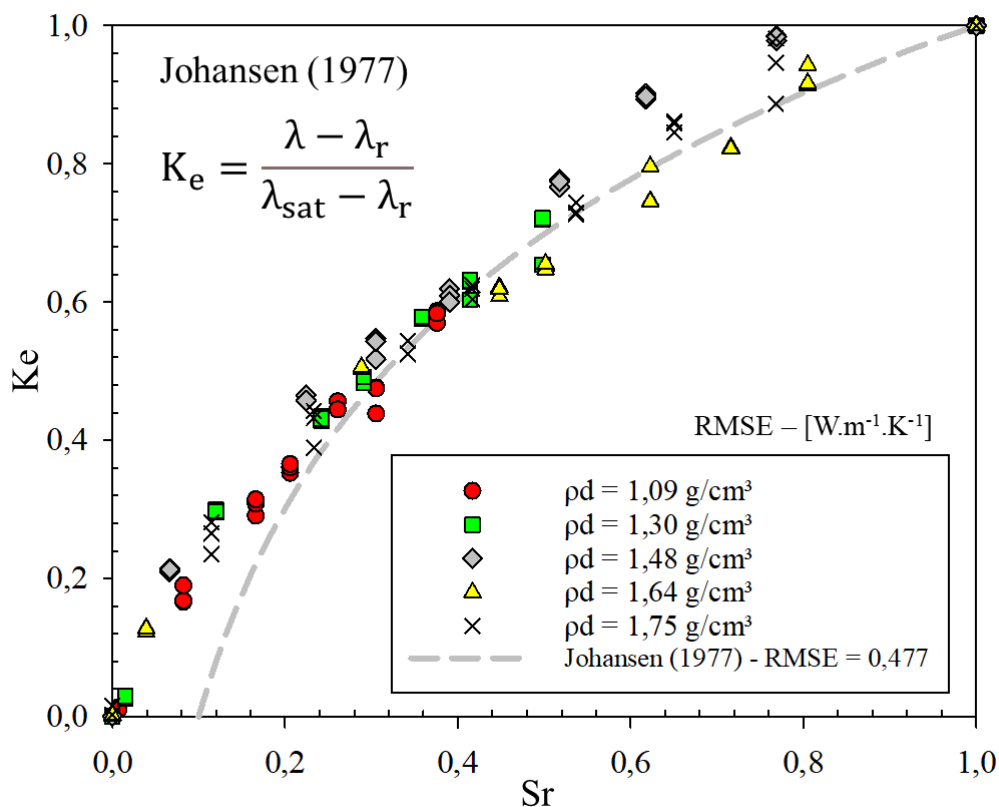


Figura 4.10 – Comparação do método de Johansen (1977) em relação aos dados experimentais desta tese.

Apesar de visualmente o modelo de Johansen (1977) tender o ajuste com os dados medidos em laboratório após 20% de saturação e haver uma diminuição considerável do erro quadrático médio nesse intervalo (RMSE = 0,217W.m⁻¹.K⁻¹), ainda assim têm-se um considerável erro de estimativa. Apesar da simplicidade de aplicação do modelo e da vasta utilização do mesmo em previsões de condutividade térmica de solos, este não se mostrou como um bom método a ser utilizado para se prever a condutividade térmica do solo laterítico de Brasília de forma acurada, podendo ser recomendado somente a estimativas grosseiras de ordem de valor, tendo em vista a simplicidade de utilização do método.

Na Figura 4.11, mostra-se o modelo de Coté & Konrad (2005) comparado com os dados medidos em laboratório do solo laterítico. Observa-se que os valores da condutividade térmica normalizada para solos argilosos cujo parâmetro de ajuste (κ) indicado pelos autores ($\kappa = 1,9$),

forneçam valores que subestimam os valores medidos apresentando um erro quadrático médio (RMSE) de aproximadamente $0,498 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (RMSE = $0,498 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Por outro lado, quando é utilizado o parâmetro para solos arenosos e siltosos, cujo parâmetro de ajuste (κ), indicado pelos autores é de 3,55, ($\kappa = 3,55$) os valores calculados são superestimados dos valores medidos apresentando um erro quadrático médio (RMSE) de aproximadamente $0,610 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (RMSE = $0,610 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

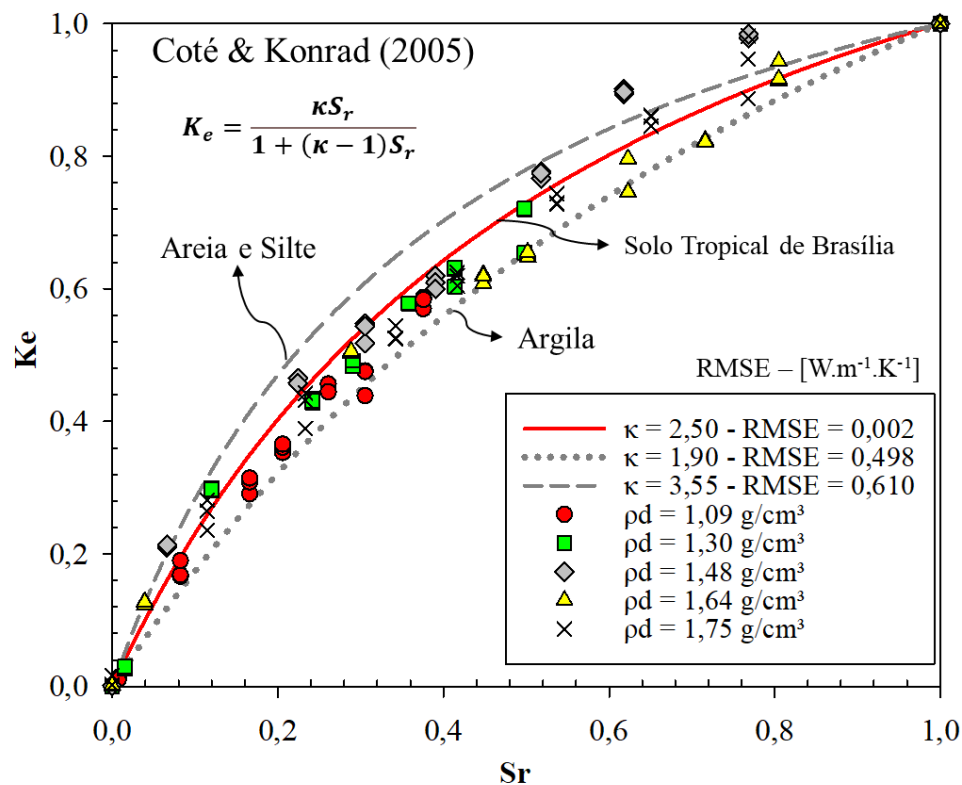


Figura 4.11 – O número de Kersten medido e ajustado versus a saturação relativa para solos arenosos e siltosos ($\kappa = 3,55$) solos argilosos ($\kappa = 1,9$) com melhor ajuste para solo tropical de Brasília desenvolvido nesta tese ($\kappa = 2,5$).

Os erros quadráticos médios (RMSE) calculados para os parâmetros de argila, silte e areia, propostos por Coté & Konrad (2005) expressam a impossibilidade de aplicação de tais parâmetros para obtenção de uma estimativa de condutividade térmica do solo laterítico estudado de forma acurada, principalmente para estados mais compactados (valores acima de $1,5 \text{ g/cm}^3$). Com isso, buscou-se ajustar o modelo de Coté & Konrad (2005) com um parâmetro aplicado a solos lateríticos ($\kappa = 2,5$) cujo erro quadrático médio (RMSE) calculado deu aproximadamente igual a $0,002 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (RMSE = $0,002 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) erro bastante baixo, o que permite se obter estimativas bastante acuradas para o solo estudado. Podendo-se

recomendar a utilização do modelo de Coté & Konrad (2005) com bastante acurácia para um parâmetro de ajuste ($\kappa=2,5$).

Na Figura 4.12, compara-se a condutividade térmica normalizada versus o grau de saturação relativa na qual mostra o modelo de Lu *et al.* (2007) para solos arenosos ($\alpha = 0,96$), com $RMSE = 0,454 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, e solos argilosos ($\alpha = 0,27$) com $RMSE = 0,238 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. O ajuste que considera solos arenosos, tende a proporcionar valores superestimados de condutividade térmica. Quanto ao parâmetro de ajuste para solo argiloso proposto pelos autores ($\alpha = 0,27$), apesar de apresentar um erro quadrático médio RMSE inferior em relação ao parâmetro α para solos arenosos. Portanto, não se recomenda a utilização do parâmetro de argila para estimativa da condutividade térmica do solo laterítico, principalmente para condições de saturação inferiores a 20%.

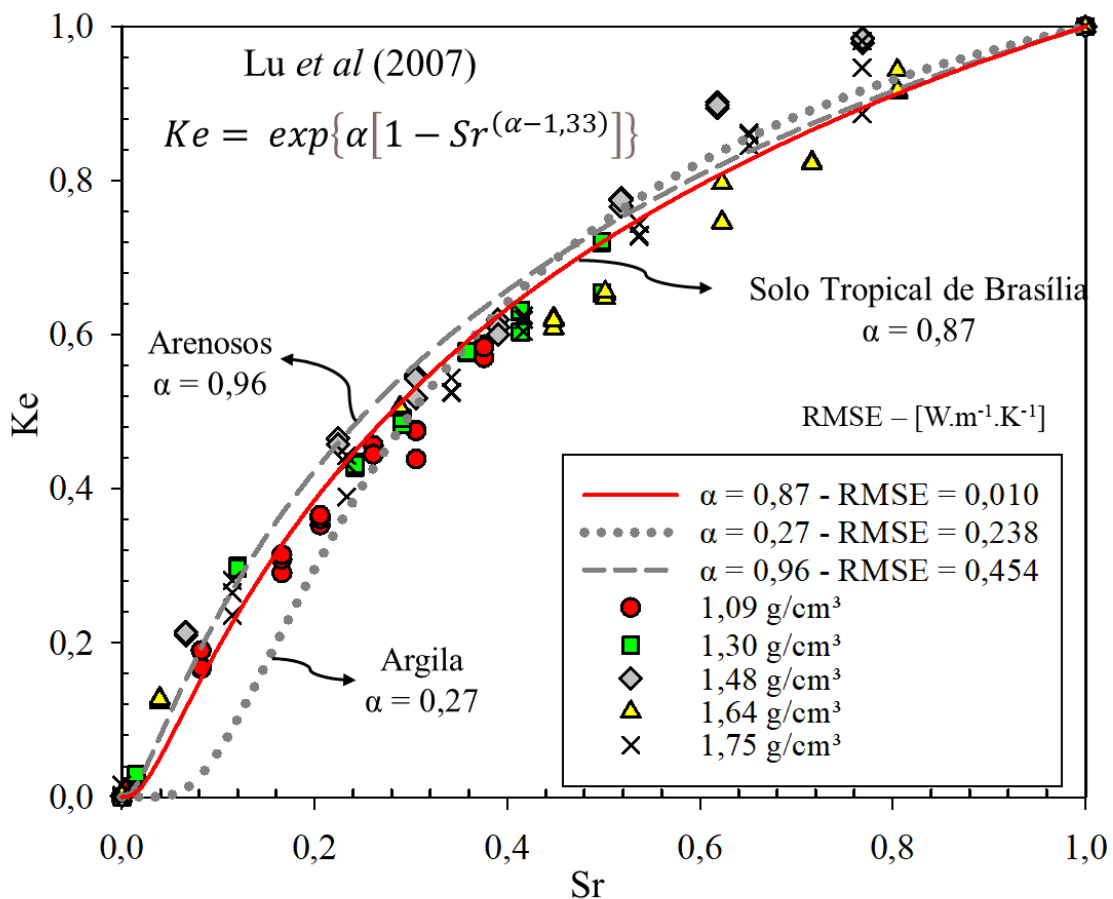


Figura 4.12 – Comparação entre o coeficiente de condutividade térmica normalizado medido de forma experimental desta tese e modelado por Lu *et al.* (2007) em função da saturação relativa do solo para as cinco condições de massa específica aparente seca estudado nesta tese.

Diante ao exposto, foi também realizado um ajuste do parâmetro α , para o modelo de Lu *et al.* (2007), que obteve o melhor ajuste para o solo laterítico estudado ($\alpha = 0,87$), na qual o erro quadrático médio RMSE de em torno de $0,010 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, erro bastante satisfatório em relação aos parâmetros propostos por Lu *et al.* (2007), porém percebe-se uma ligeira dispersão dos dados experimentais em relação a curva ajustada nesta tese para condições mais compactas.

Além do melhoramento dos parâmetros de ajustes propostos nesta tese, foi proposto um modelo adequado para o solo laterítico de Brasília, por meio de um ajuste matemático da condutividade térmica normalizada (K_e) dos dados experimentais obtidos em laboratório, versus o grau de saturação relativa do solo laterítico na condição compactada (Figura 4.13).

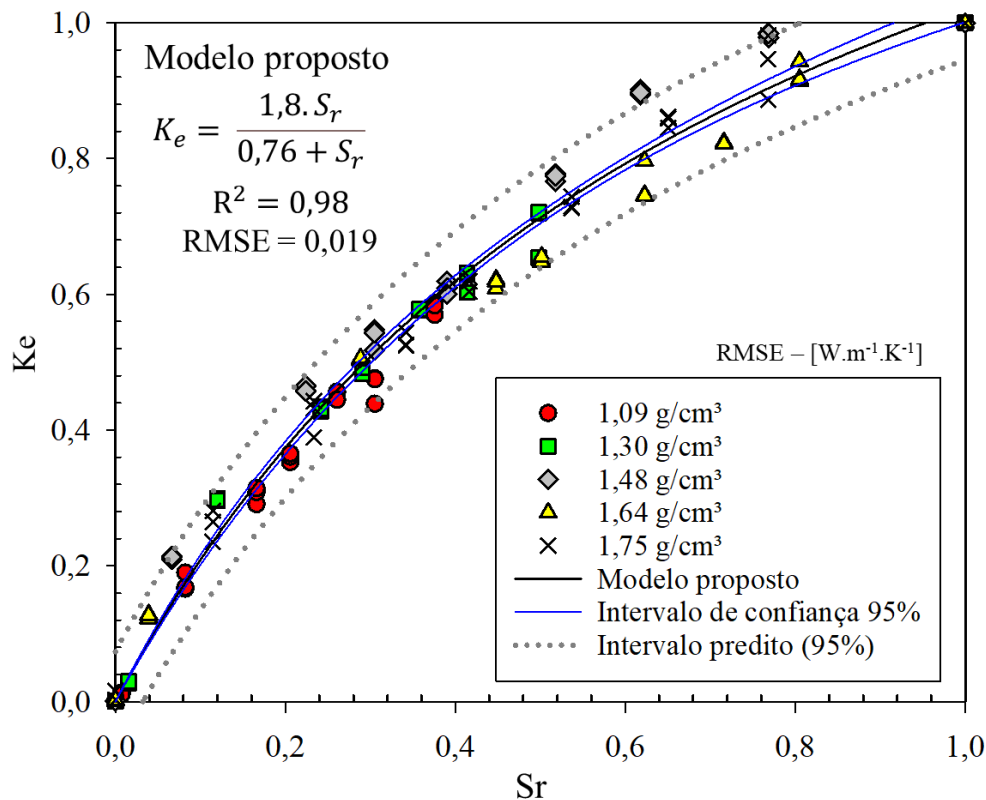
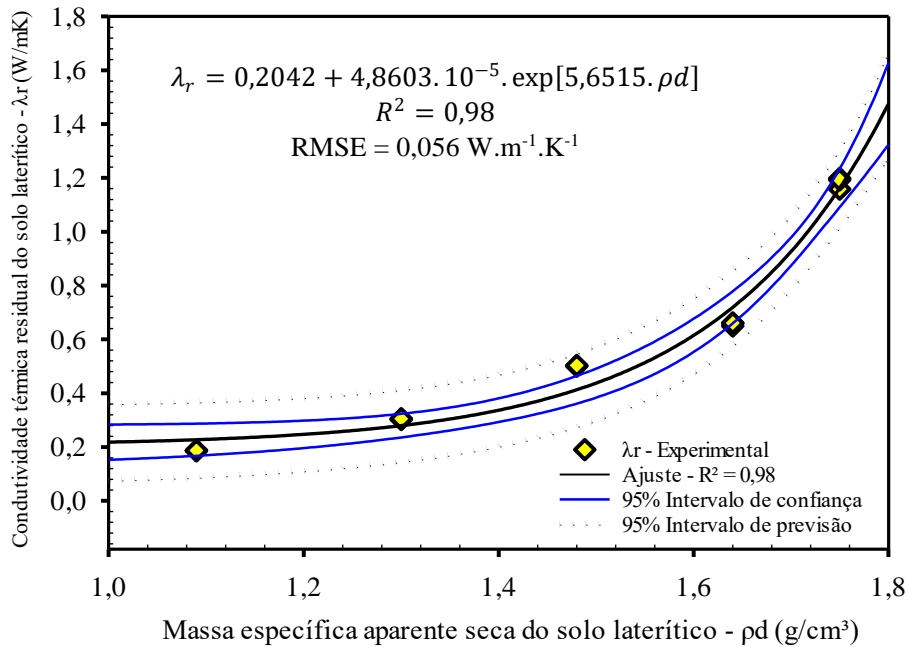


Figura 4.13 – Ajuste da condutividade térmica normalizada dos dados medidos em laboratório do solo laterítico de Brasília.

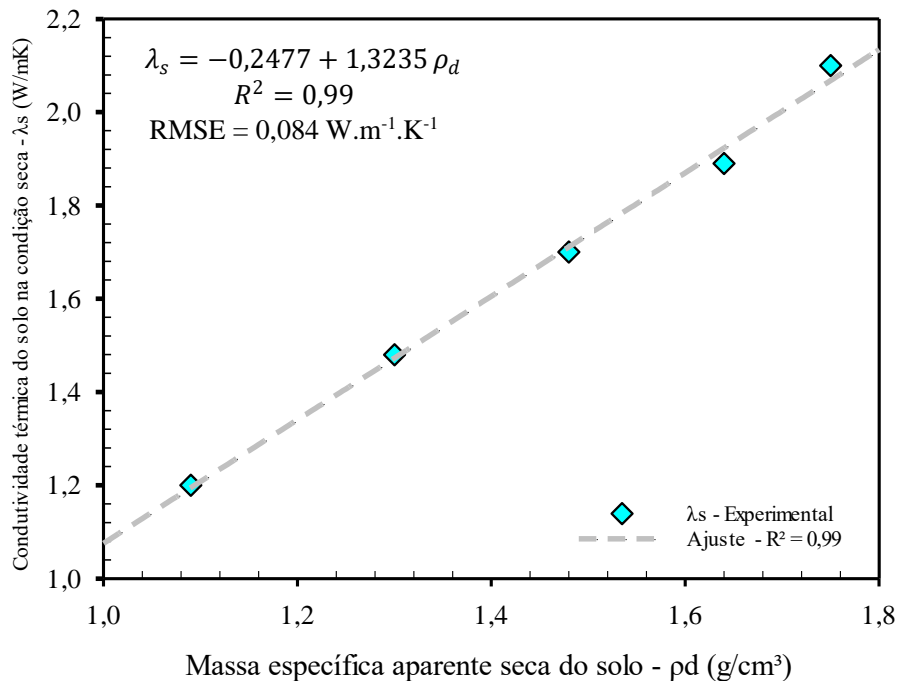
Por meio do software estatístico Sigmaplot, foi possível obter a equação de ajuste matemático mostrada na Figura 4.13 proporcionou um $RMSE = 0,019 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, o que mostra que o modelo proposto possui uma boa acuracidade para o solo estudado em questão.

Com o número de Kersten ajustado para solos lateríticos ajustou-se também de forma matemática, a condutividade térmica residual ou seca (λ_r) e a condutividade térmica saturada

(λ_s), respectivamente, em função da massa específica aparente seca do solo ρ_d (g/cm³), a partir dos gráficos obtidos nas Figuras 4.14 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 4.14 – (a) Ajuste da condutividade térmica residual - λ_r (na condição seca) do solo laterítico em função da massa específica aparente seca - ρ_d . (b) ajuste da condutividade térmica do solo laterítico na condição saturada (λ_s) em função da massa específica aparente seca do solo laterítico estudado.

Na Figura 4.15, mostra-se o gráfico com o comparativo dos dados medidos de condutividade térmica, em laboratório, e os resultados previstos com o modelo proposto por esta tese, na qual mostra um comportamento com uma boa proporção linear (1:1).

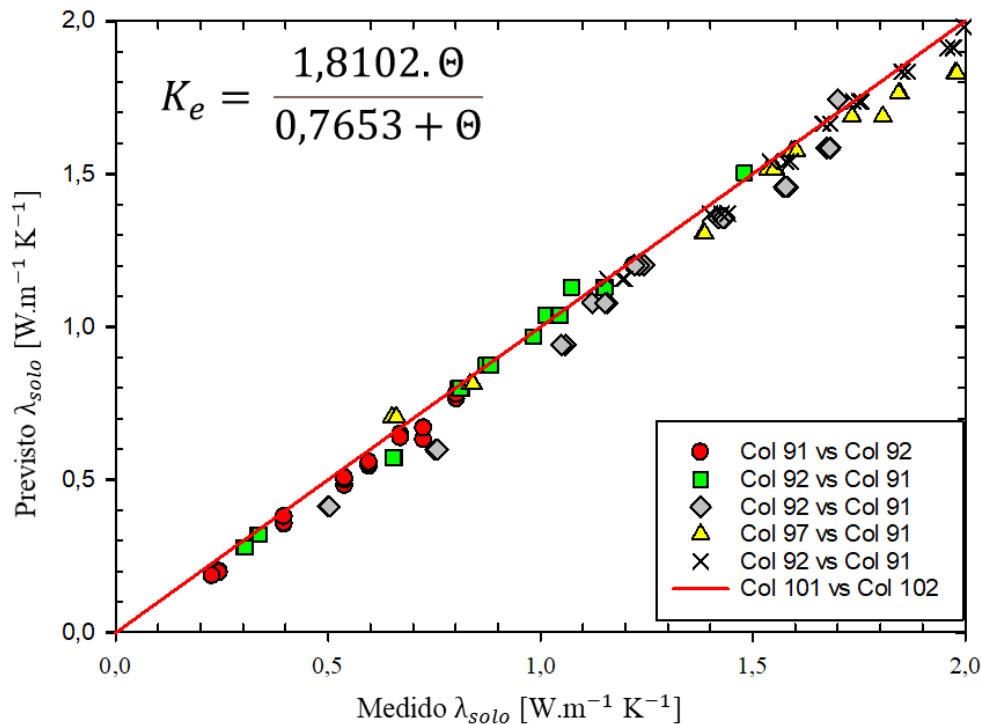


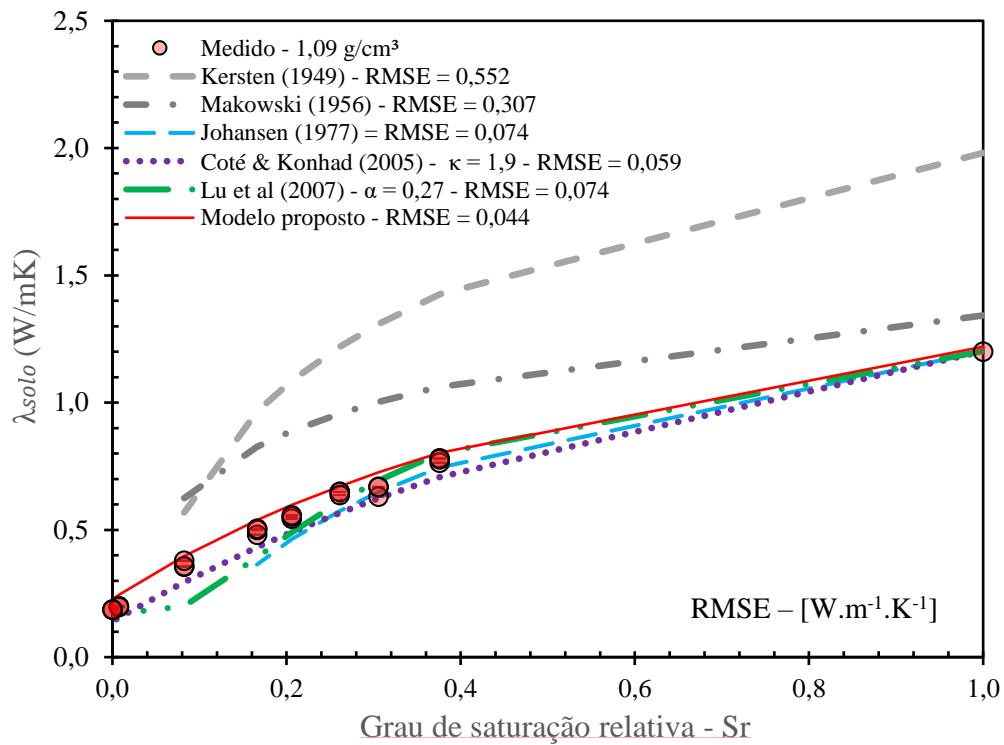
Figura 4.15 – Comparativo entre os resultados medidos em laboratório da condutividade térmica do solo laterítico estudado nesta tese com os dados previstos de condutividade térmica do solo a partir modelo desenvolvido nesta tese.

Vale ressaltar que tanto o modelo proposto nesta tese, quanto os modelos de ajustes dos métodos de Coté & Konrad (2005), Lu *et al.* (2007) possuem limitações quanto a aplicação em solos no estado natural, uma vez que todos os ensaios foram realizados sobre a condição compactada, sendo assim necessário se avaliar as propriedades térmicas de solo no seu estado natural e comparar o erro entre os valores medidos e os valores ajustados.

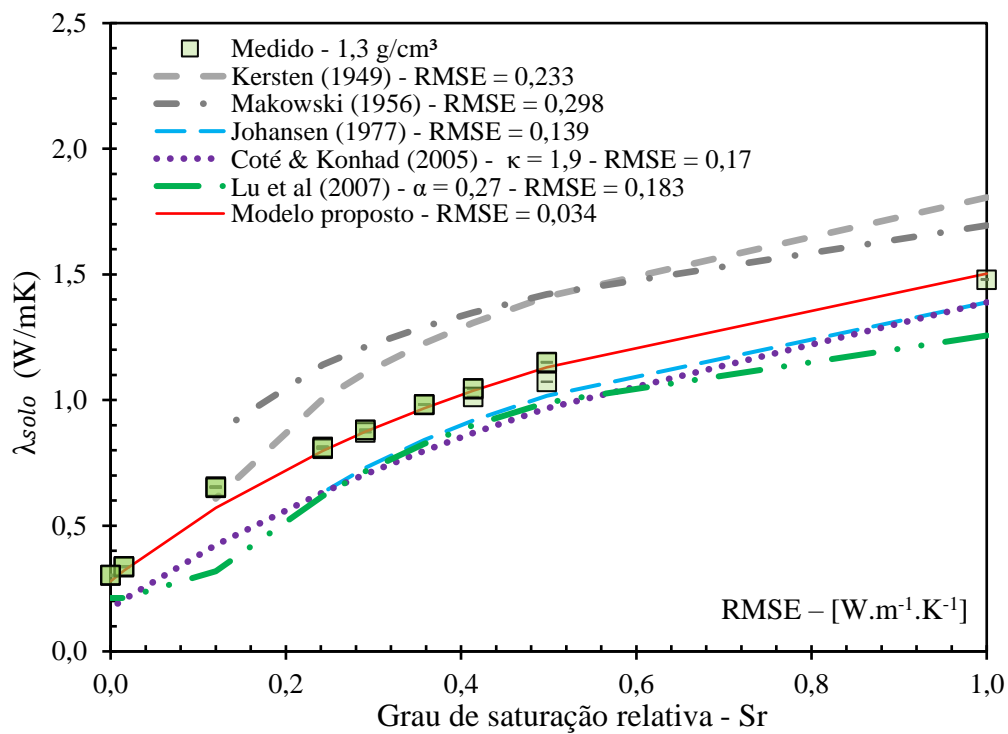
4.6 Discussão de comparação da condutividade térmica com os principais métodos vigentes na literatura

Na Figura 4.16, mostra-se o comparativo entre os principais modelos de estimativa da condutividade de solos, tais como: Kersten (1949), Makowski (1956), Johansen (1977), Coté & Konrad (2005), Lu *et al.* (2007), e o modelo proposto nessa tese, sobre 5 diferentes estados

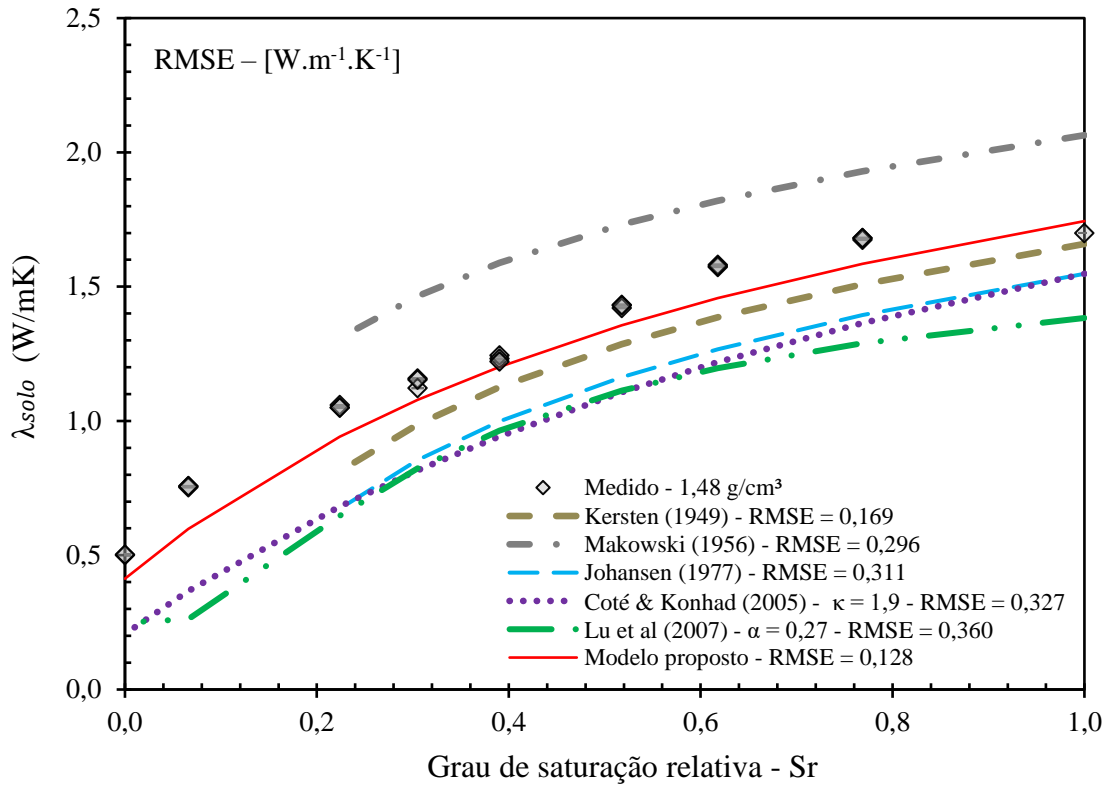
de massa específica aparente seca, (a) 1,09g/cm³, (b)1,3 g/cm³, (c) 1,48 g/cm³,(d) 1,64 g/cm³e (e) 1,75 g/cm³.



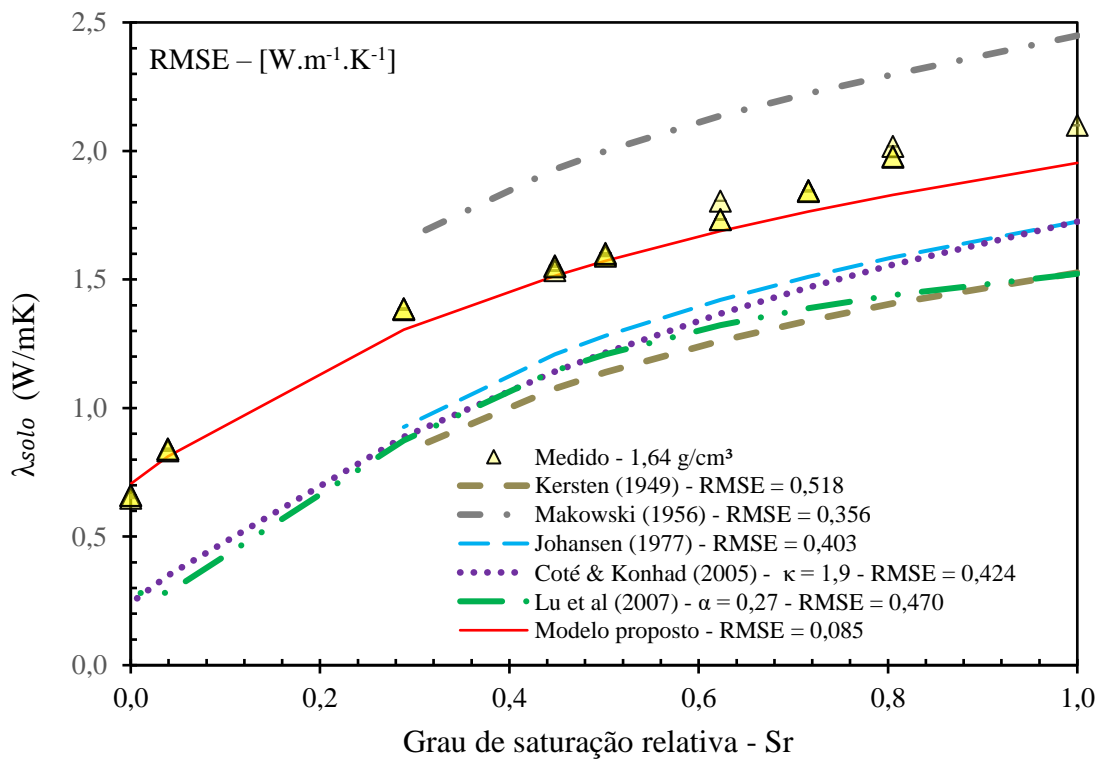
(a)



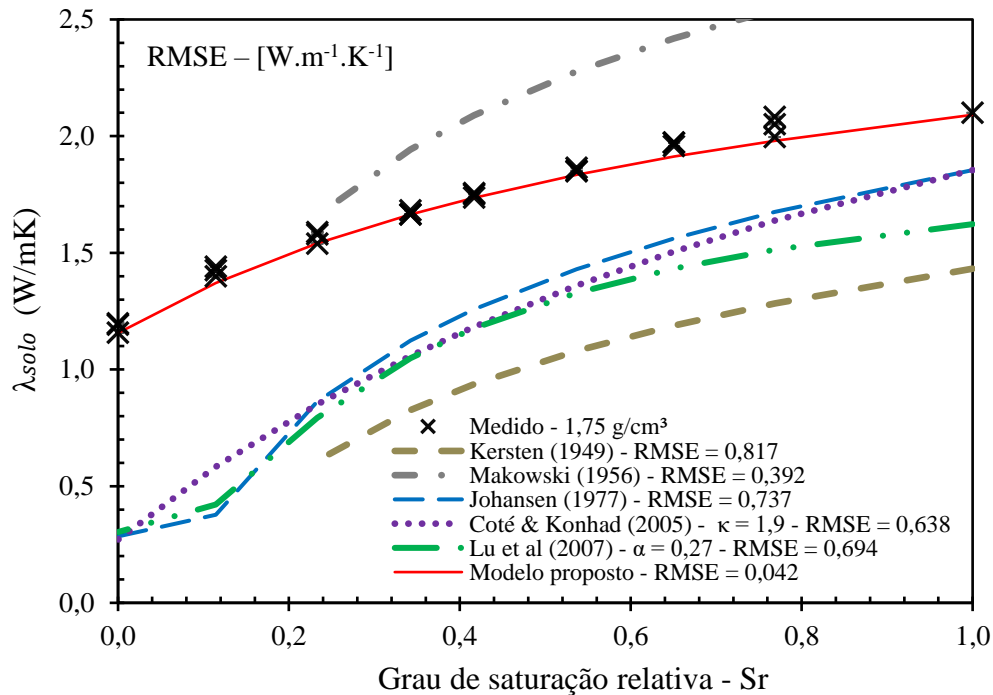
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.16 – Comparativo da condutividade térmica do solo laterítico com os principais métodos de estimativa de condutividade térmica para solos finos, em 1,09 g/cm³ (a); 1,3 g/cm³ (b); 1,48 g/cm³ (c); 1,64 g/cm³ (d) e 1,75 g/cm³ (e).

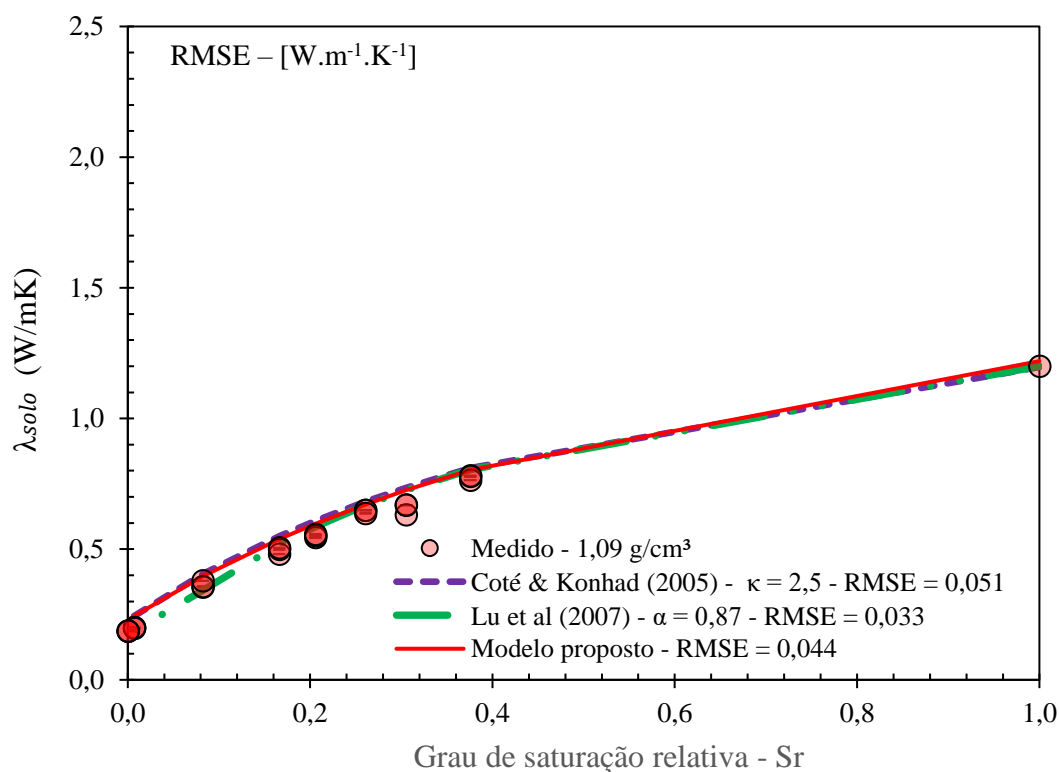
É possível observar que os modelos de Kersten (1949) e Makowsky (1956) apresentam altíssimas discrepâncias em relação aos dados medidos em laboratório. O que mostra uma grande inadequação de tais métodos para utilização em solos tropicais. É possível observar também que os modelos de previsão de condutividade térmica propostos por Johansen (1977), Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007) apresentam consideráveis discrepâncias, na medida que aumenta o peso específico do solo, perdendo confiabilidade em pesos específicos aparente seco acima de 1,5 g/cm³. No entanto, o modelo proposto nesta tese, apresenta confiabilidade tanto para baixos pesos específicos aparente secos, quanto para altos pesos específicos, apresentando baixos erros quadráticos médios (RMSE's). Tais resultados mostram o grau de confiabilidade e segurança de aplicação do modelo de previsão de condutividade térmica utilizando o método proposto por esta tese quando comparado com os demais métodos de estimativa da condutividade térmica propostos pela bibliografia aqui exposta.

Pode-se observar com clareza que não houve convergência de nenhum método de previsão de condutividade térmica de solo com os respectivos parâmetros de ajuste propostos pelos modelos da bibliografia abordada nesta tese.

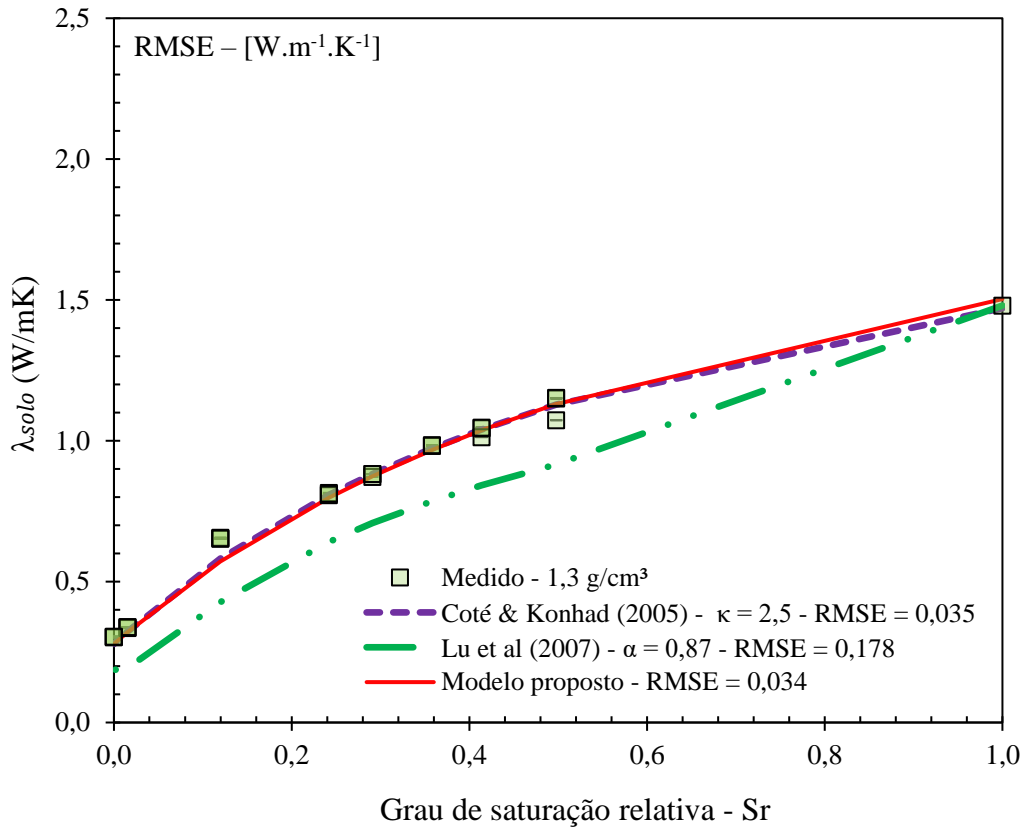
Nesse sentido, pode-se afirmar que o método desenvolvido de previsão da condutividade térmica do solo laterítico nesta tese, vem para preencher uma lacuna ainda não abordada para tal particularidade. Uma vez que os métodos convencionais da bibliografia exposta nesta tese não atendem tal finalidade.

Ante ao exposto, buscou-se melhorar os parâmetros de ajuste dos métodos de Lu *et al.* (2007) e Coté & Konrad (2005) afim de propor previsões mais acuradas na utilização dos métodos para uso em solos lateríticos. Sendo assim, na Figura 4.17 mostra-se o comparativo dos métodos Lu *et al.* (2007), Coté & Konrad (2005) e o modelo proposto na tese com os ajustes propostos para o solo estudado em questão, $\alpha=0,87$ e $\kappa = 2,5$ respectivamente e com o modelo de ajuste matemático desenvolvido.

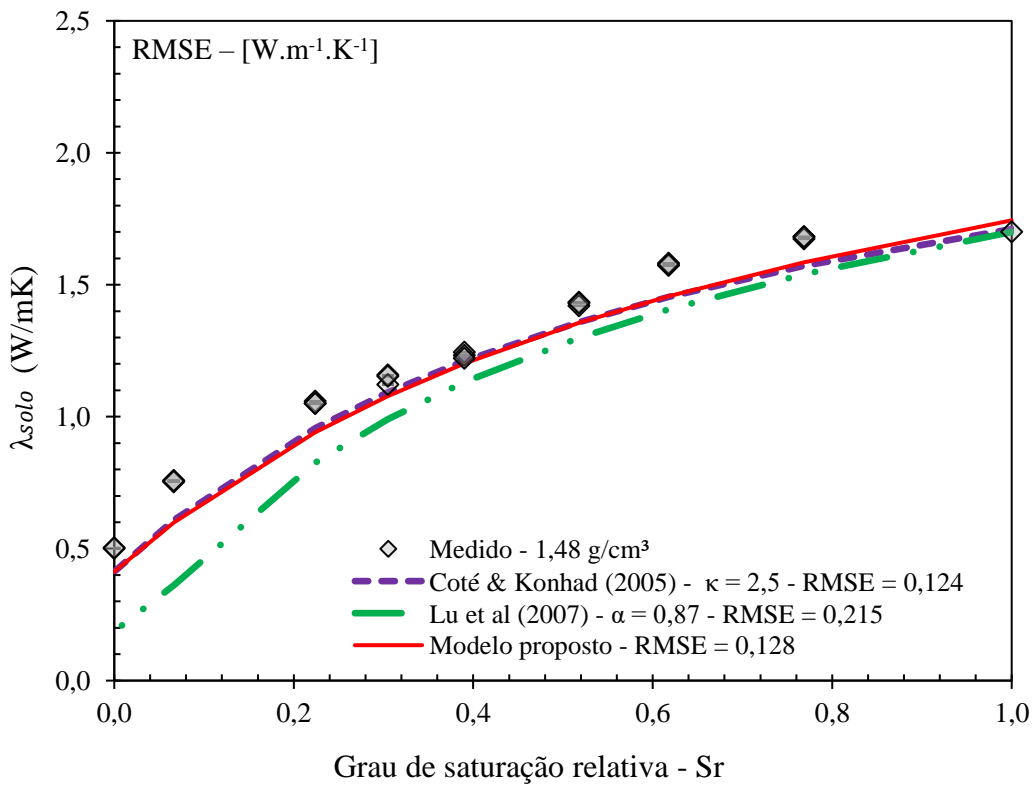
É possível notar que o ajuste do modelo de Lu *et al.* (2007), com parâmetro proposto nesta tese ($\alpha=0,87$) mesmo apresentando baixo erro quadrático médio (RMSE) na análise adimensional, como mostrado na Figura 4.17, ele não apresenta confiabilidade para pesos específicos elevados, apresentando elevados erros. Isso já era perceptível, como mostrado na Figura 4.17 (d) e na Figura 4.17 (e), quando pode-se observar uma elevação de dispersão dos dados experimentais com a curva de ajuste para maiores pesos específicos aparente seco.



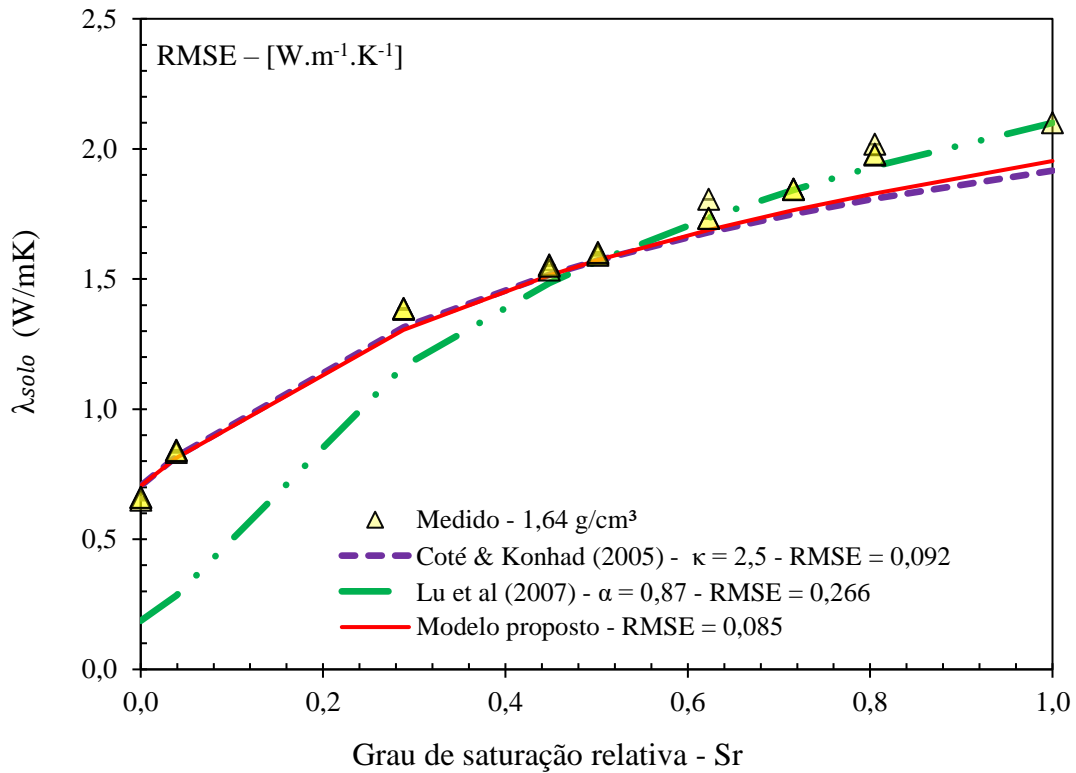
(a)



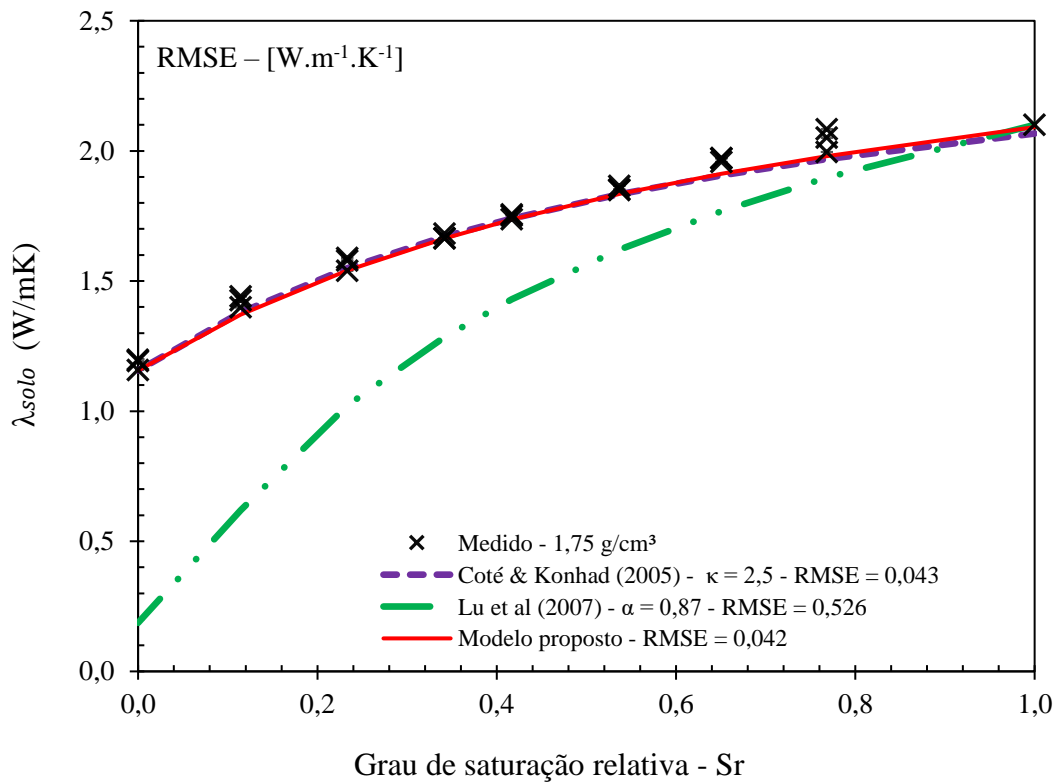
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.17 – Comparativo da condutividade térmica do solo laterítico com os principais métodos de estimativa de condutividade térmica para solos finos, em 1,09 g/cm³ (a); 1,3 g/cm³ (b); 1,48 g/cm³ (c); 1,64 g/cm³ (d) e 1,75 g/cm³ (e).

Na Figura 4.18, mostra-se um resumo em ordem decrescente dos erros quadráticos médios (RMSE) dos métodos utilizados nesta tese para os diferentes pesos específicos aparente seco. Percebe-se que os modelos mais confiáveis para previsão da condutividade térmica do solo laterítico estudado nesta tese foram Coté & Konrad (2005) para κ ajustado em 2,5 e o modelo de ajuste matemático proposto nesta tese.

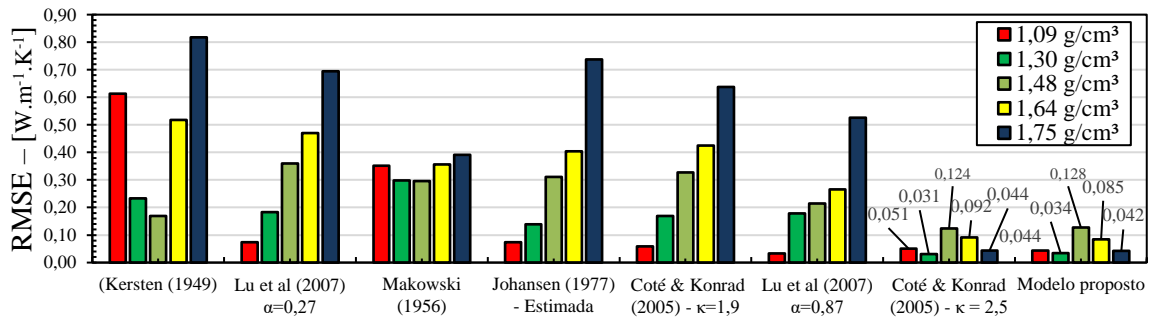


Figura 4.18 – Resultados dos erros quadráticos médios (RMSE), dos principais métodos abordados na tese, em ordem crescente de grau de importância.

4.7 Discussão dos ensaios TRT realizados na câmara térmica em laboratório

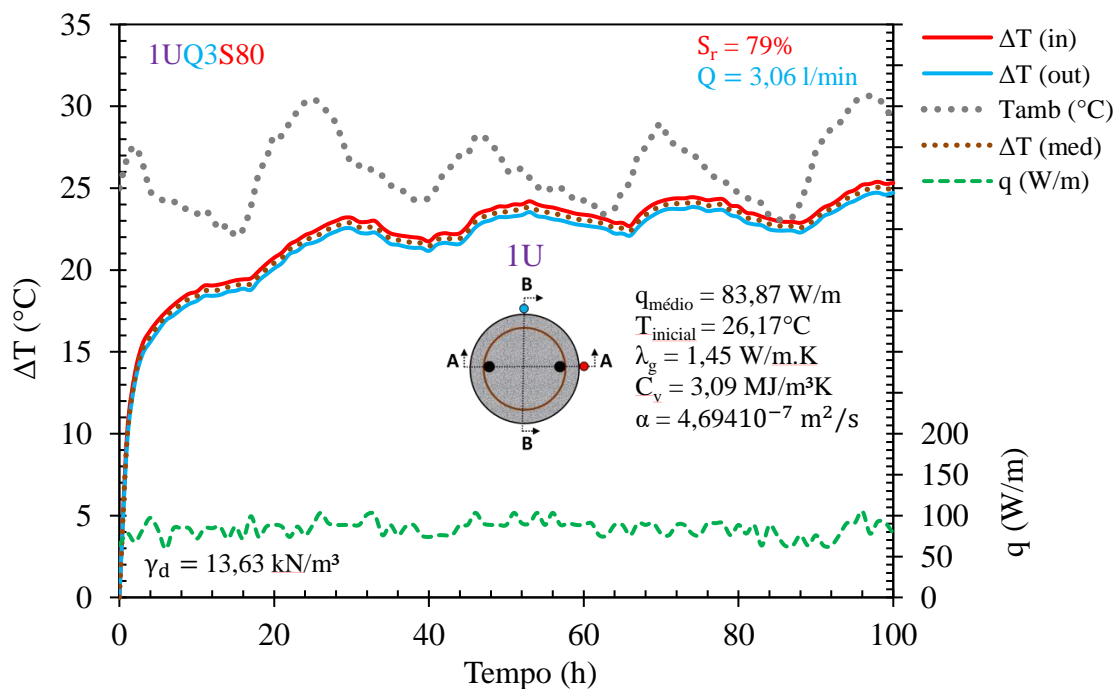
Nesta sessão será apresentado o estudo de resposta térmica dos ensaios TRT realizados na câmara térmica com as diferentes configurações de protótipos (1U, 2U e 4U). Inicialmente, será apresentado os resultados dos ensaios TRT, posteriormente será apresentado e discutido um gradiente de dissipação térmica de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento de cada ensaio. Por fim, será discutido o aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio em 1D. Todas as análises e discussão foram realizadas variando a configuração do tubo nos protótipos. O objetivo destas análises está em observar avaliar e discutir como o gradiente térmico difunde no solo ao longo do espaço e tempo, variando a configuração de tubos (1U, 2U e 4U) o grau de saturação do solo (S_r) e a vazão imposta nos tubos, para todos os ensaios TRT realizados na câmara térmica.

Vale ressaltar que, devido à dificuldade de controlar a temperatura ambiente do laboratório e conseqüentemente, a temperatura inicial de cada ensaio, os ensaios TRT foram analisados em termos de variação térmica (ΔT) a partir da temperatura inicial do ensaio.

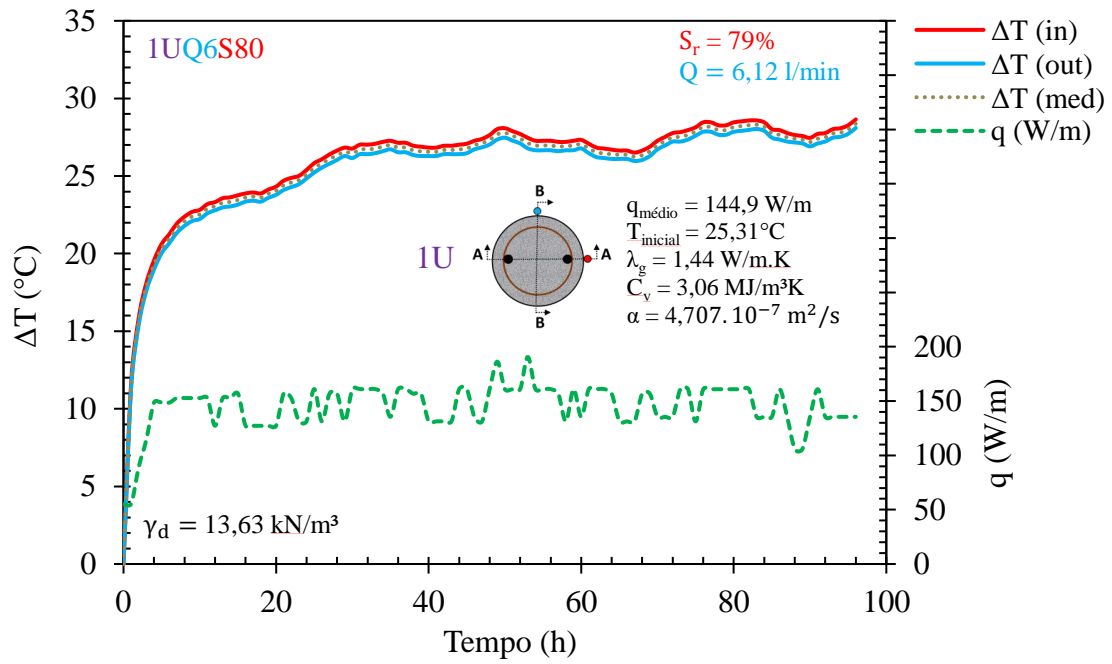
Foram realizados ensaios de resposta térmica – TRT, na configuração 1U, sobre duas condições de grau de saturação médio de ($S_r = 0,80$ e $S_r = 0,33$). Em cada grupo realizou-se

ensaios com fluxos de calor médios ($q_{\text{médio}}$) de aproximadamente 83,87; 144,89 e 237,64 W/m. Valores estes obtidos pela média aritmética dos fluxos calor obtidos em cada hora de ensaio. O fluxo de calor foi calculado em função da vazão de água em circulação no tubo e pela diferença térmica de entre as temperaturas de entrada e saída do tubo, como é mostrado na Equação 2.11. Vale ressaltar que o primeiro fluxo de calor (83,87W/m) corresponde ao fluxo de calor convencional que se encontra normalmente em ensaios TRT na bibliografia. Quanto aos demais fluxos de calor (144,89 W/m e 237,64 W/m) foram impostos com o objetivo de avaliar situações de troca de calor no solo com fluxos mais intensos, a fim de avaliar prováveis aplicações industriais.

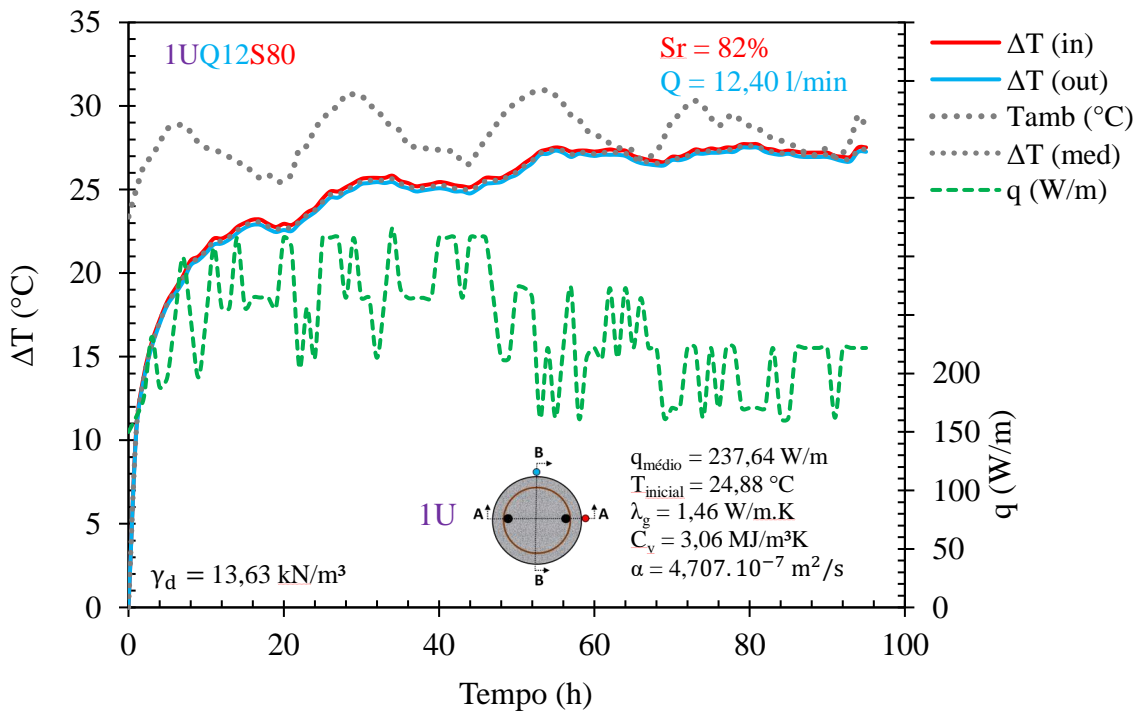
Nas Figuras 4.19, mostram-se os resultados de seis ensaios TRT na configuração 1U desenvolvidos nesta tese com grau de saturação médio de aproximadamente 80%, ($S_r = 0,8$), como mostrado na Figura 4.19 (a), Figura 4.19 (b) e na Figura 4.19 (c), bem como o grau de saturação relativa média de 33%, ($S_r = 0,33$), como mostrado nas Figura 4.19 (d), (e) e (f), todos submetidos a vazões médias de aproximadamente 3,06; 6,12 e 12,41 l/min, respectivamente. E resumo, foram três ensaio 1U variando a condição de grau de saturação, na condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$) e a vazão de circulação do fluido ambas para vazões médias de 3,06; 6,12 e 12,41 l/min.



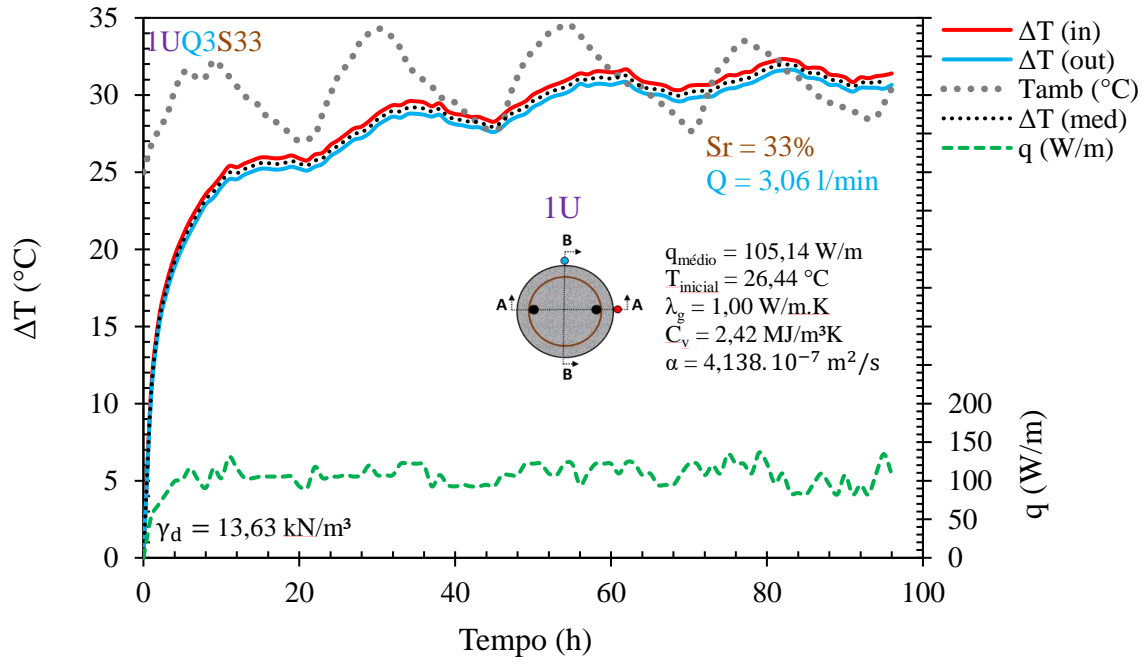
(a)



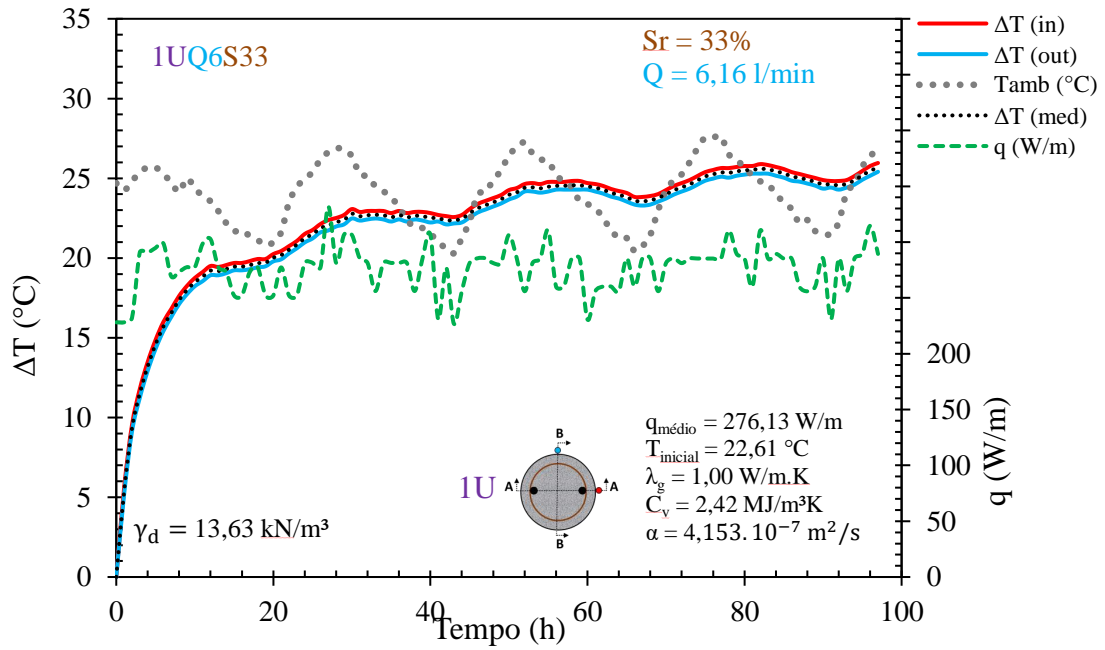
(b)



(c)



(d)



(e)

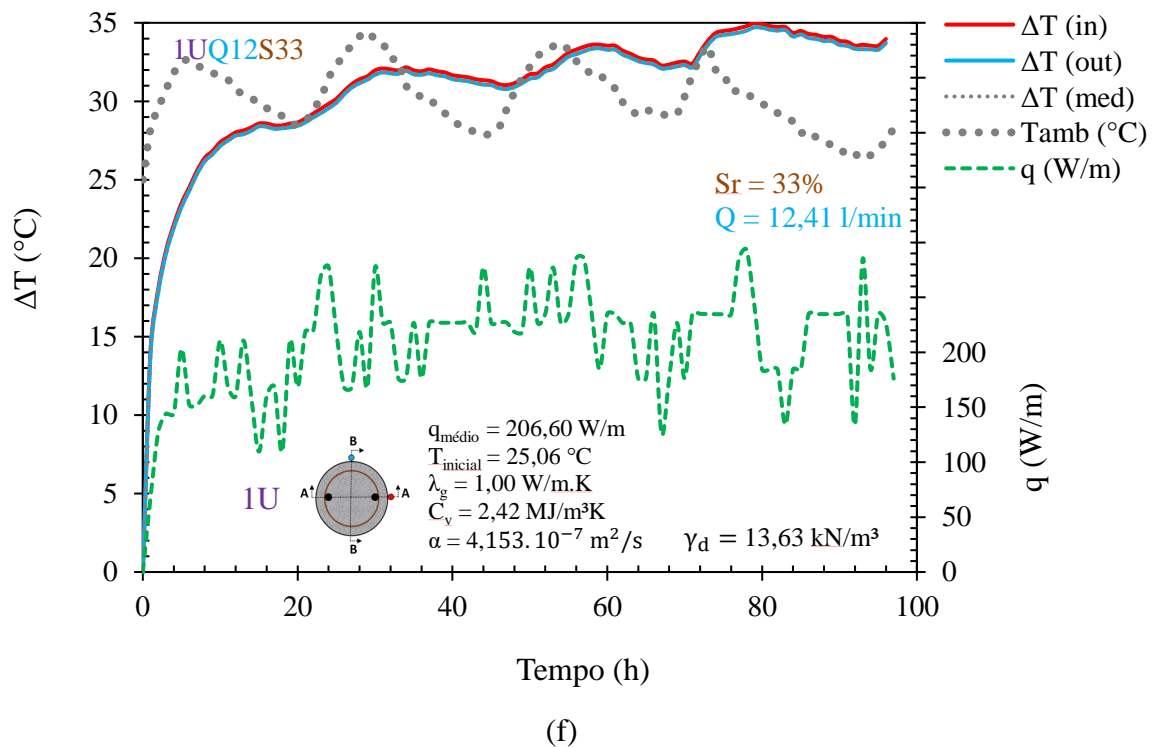


Figura 4.19 – (a) ensaio TRT1UQ3S80, (b) ensaio TRT1UQ6S80, (c) ensaio TRT1UQ12S80, (d) ensaio TRT1UQ3S33, (e) TRT1UQ6S33 e (f) ensaio TRT1UQ12S33

Observa-se nos gr\u00e1ficos da Figura 4.19, que maiores vaz\u00f5es implicaram em maiores turbul\u00eancias internas nos tubos ativos da estaca, e conseq\u00fcentemente, ocorrem instabilidades nas medi\u00e7\u00f5es de vaz\u00e3o no flux\u00edmetro e nos sensores de temperatura. Tal situa\u00e7\u00e3o implicou em grandes varia\u00e7\u00f5es do fluxo de calor (q) para altas vaz\u00f5es, como pode-se observar na Figura 4.19 (e) e na Figura 4.19 (f). Por outro lado, velocidades de fluxo de \u00e1gua mais baixas implicaram em leituras mais est\u00e1veis de temperatura e vaz\u00e3o nos sensores, o que permitiu a obten\u00e7\u00e3o de fluxos t\u00e9rmicos mais est\u00e1veis durante os ensaios, como se observa na Figura 4.19 (a) e na Figura 4.19 (d). Todo esse comportamento de instabilidade de fluxo t\u00e9rmico para as vaz\u00f5es mais elevadas pode ser observado em todos os ensaios TRT para vaz\u00f5es de 12,41 l/min. Assim, \u00e9 importante ressaltar aqui que a necessidade de se obter um valor m\u00e9dio de fluxo de calor (q) para as an\u00e1lises nessa tese, se deu devido a sua grande variabilidade durante os ensaios de maior vaz\u00e3o. Nesse sentido foi por meio do valor m\u00e9dio de fluxo t\u00e9rmico da estaca que se calculou os valores de resist\u00eancia t\u00e9rmica dos materiais envolvidos no ensaio e da resposta t\u00e9rmica na face das estacas. Tal situa\u00e7\u00e3o n\u00e3o \u00e9 o ideal, no entanto foi a condi\u00e7\u00e3o poss\u00edvel de ser feita, uma vez que adotando-se um fluxo t\u00e9rmico para cada instante, geraria consider\u00e1veis

discrepâncias de valores de resistência térmica para um mesmo ensaio TRT, principalmente para ensaios de maiores vazões.

Não obstante, observa-se também que velocidades maiores se obteve menores diferenças de temperatura de entrada e saída do fluido no tubo ativo da estaca, como pode ser observado nas Figura 4.19 (c) e (f). Por outro lado, para vazões menores apresentaram maior diferença térmica de entrada e saída da água no tubo (Figura 4.19 (a) e Figura 4.19 (d)).

Ademais, é possível observar também, que ensaios realizados no solo em condições mais secas ($S_r = 33\%$), como visto na Figura 4.19 (d), Figura 4.19 (e) e na Figura 4.19 (f), apresentaram amplitudes térmicas maiores do que ensaios TRT realizados na condição de solo saturado ($S_r = 80\%$). Tais diferenças de amplitudes térmicas ocorreram devido a condição não saturada do meio ensaiado na qual há menos presença de água para armazenar energia em forma de calor uma vez que a capacidade calorífica diminui em função do grau de saturação e consequentemente a inércia térmica do meio também diminui.

Além disso, vale destacar que apesar de todos os esforços de isolamento térmico do equipamento de ensaio TRT, desenvolvida nessa tese, ainda assim foi possível perceber interferência térmica externa durante todos os ensaios, este efeito foi percebido pelas variações das temperaturas de entrada e saída medidas ao longo do tempo nos ensaios, conforme mostrado em todos os ensaios TRT da Figura 4.19. Sendo assim, apesar de não ser uma condição ideal, tal situação não tornou impossível de se realizar as análises de resposta térmica, uma vez que tais interferências impossibilitaram tais análises.

Nesse interim, na Figura 4.20 mostra-se os valores das taxas de calor, média, por metro de estaca de cada ensaio realizado nessa tese. Observa-se que apesar de mantido constante a configuração de tubos ativos e vazão, obteve-se taxas de calor (q) distintas para condições saturadas e não saturadas. Outra observação importante é que, esperava-se que a taxa de calor trocada por metro de estaca (q) aumentaria com o aumento da vazão do ensaio - *Coeteris Paribus*, assim como é possível observar nos ensaios de configuração 1U, na condição saturada. No entanto houve um comportamento atípico do esperado no ensaio na configuração 1U, vazão 6,14l/min e grau de saturação de 33% (1UQ6S33), que apresentou uma taxa de calor média (q) superior ao ensaio com as mesmas configurações e grau de saturação (1UQ3S33). Uma hipótese para tal situação é que durante o ensaio 1UQ6S33 foi o último ensaio na condição não saturada realizado da campanha de ensaios, e notou-se problemas na leitura do sensor de

vazão, podendo ter ocorrido erros de leitura na vazão mássica para essa situação. O mesmo problema ocorrido pode ter ocorrido no ensaio de configuração 2U, vazão de 3,06 l/min na condição não saturada (2UQ3S33) que apresentou uma taxa de calor média por metro (q) superior ao ensaio de mesma configuração e grau de saturação, porém com vazão superior. Outra observação de comportamento atípico notado, foi nos ensaios 2UQ3S80 e 2UQ6S80 que apresentaram praticamente a mesma taxa de calor por metro (q). Apesar de se buscar sempre aferir o sensor de vazão durante os ensaios, e apesar do fabricante recomendar a funcionalidade do sensor em até 60°C, pode ser que tenha ocorrido um problema na medição da vazão para esses ensaios, pois a campanha de ensaios levou cerca de 1 ano de funcionamento do equipamento de ensaio TRT, dando intervalos de 4 dias para resfriamento do solo. Vale ressaltar que os ensaios 4UQ6S80 e 4UQ12S80, seriam os dois últimos ensaios da campanha, no entanto não foram realizados por problemas técnicos, tanto no sensor de vazão, quanto em alguns sensores de temperatura.

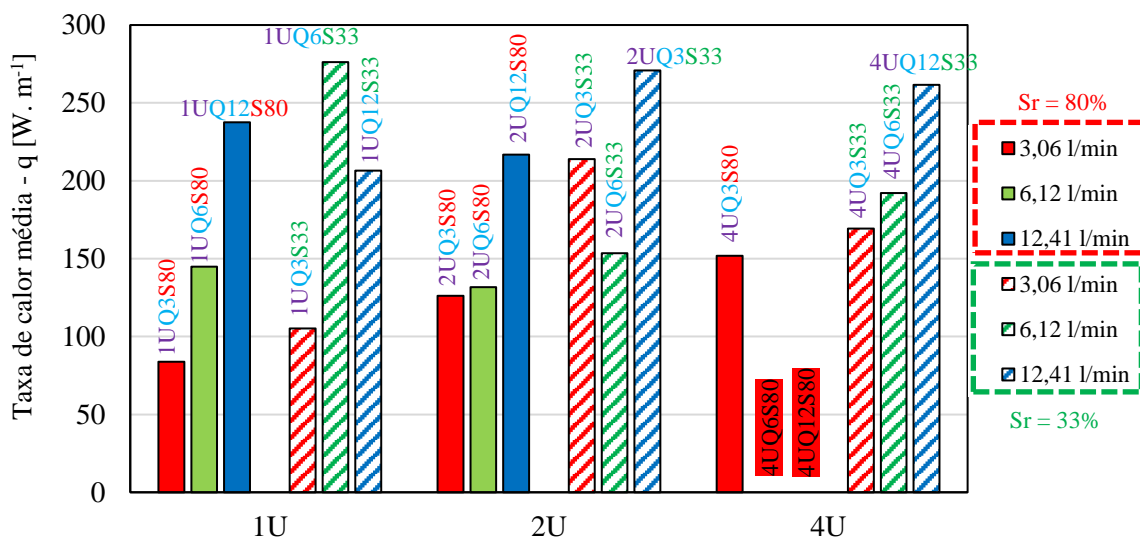


Figura 4.20 – Taxa de calor média por metro de estaca (q) para todos os ensaios TRT realizados nessa tese.

Nesse interim, a instrumentação dos sensores de temperatura distribuídas no solo ao longo da distância radial na câmara térmica permitiu realizar medições de temperatura no tempo e espaço ao longo dos ensaios TRT desta tese. Foi por meio dos sensores distribuídos na câmara que foi possível apresentar os mapas térmicos de forma bidimensional (2D) e unidimensional (1D) para todos os ensaios. Vale ressaltar que alguns sensores de temperatura apresentaram falhas progressivas durante a realização dos últimos ensaios TRT, sendo impossibilitado de se realizar os dois últimos ensaios da campanha (4UQ6S80 e 4UQ12S80).

Uma hipótese para tal problemática foi devido à baixa qualidade dos sensores de temperatura que não suportaram o longo período de horas de uso durante a campanha de ensaios. Nesse sentido, e como “golpe” de sorte, alguns dados de temperatura puderam ser salvos devido a instalação redundante de sensores no mesmo ponto.

Na Figura 4.21 mostra-se os mapas térmicos medidos, para os ensaios na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de 80% (1UQ3S80) em uma vista superior e em corte nas direções A-A e B-B dos eixos perpendiculares ao protótipo de estaca. Observa-se de a existência de assimetria do gradiente térmico entre os eixos na direção A-A e na direção B-B, por meio da vista superior. Isso ocorreu devido a configuração 1U apresentar apenas tubos ativos nas na direção A-A, já na direção B-B não houve tubos ativos aquecendo a estaca, o que provocou um gradiente térmico assimétrico A-A foi mais favorecida em relação a direção B-B.

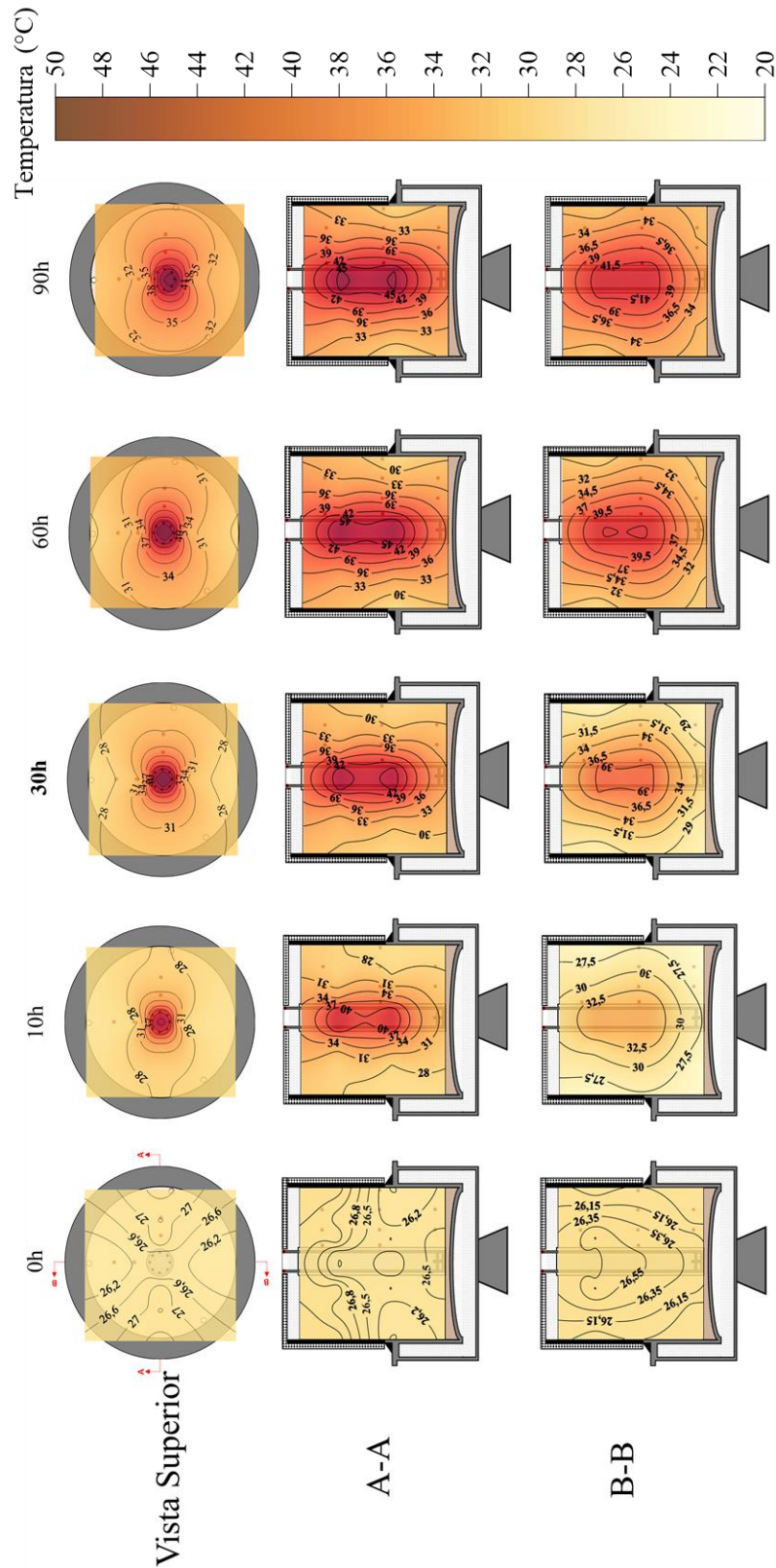
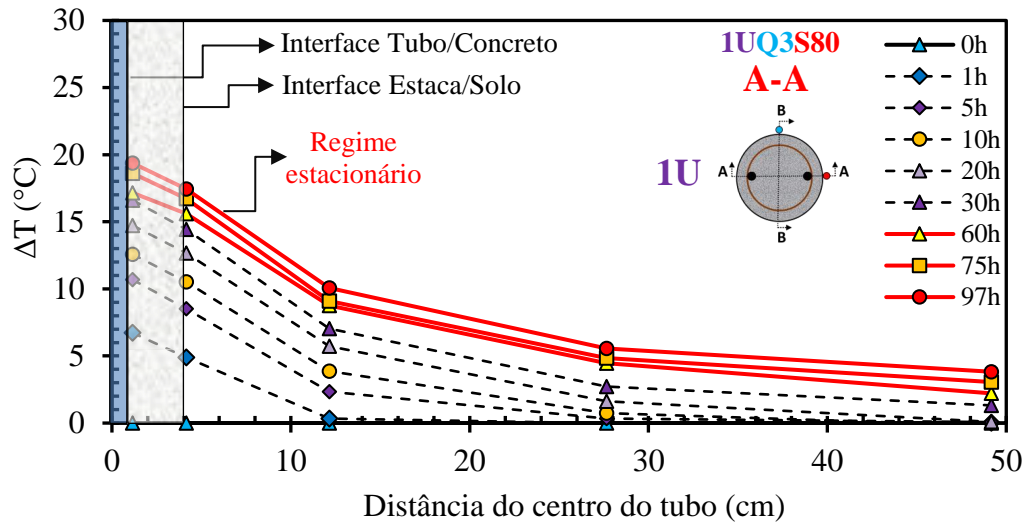


Figura 4.21 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo da estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 80% (1UQ3S80).

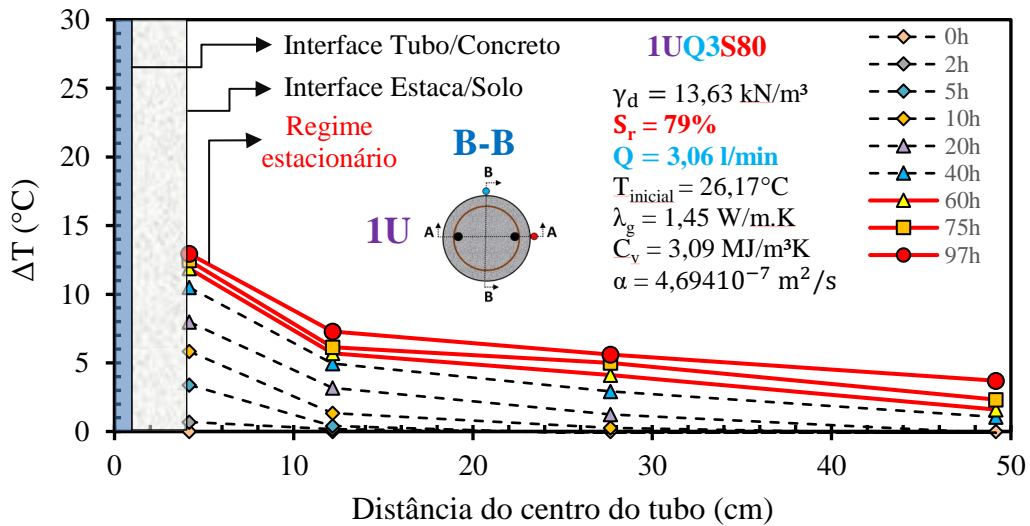
Nas Figuras 4.22 (a) e (b), mostram-se de forma mais detalhada, a variação da temperatura para os ensaios na configuração 1U, para vazão 3,06 l/min e grau de saturação de 80% (1UQ3S80) a partir da temperatura inicial de ensaio ΔT ($T_{\text{inicial do solo}} - T_{\text{instante de tempo}}$), em função da distância radial do solo para diferentes instantes de tempo, nas direções perpendiculares ao eixo central do protótipo, na direção A-A (Figura 4.22 (a)) e na direção B-B (Figura 4.22 (b)). Pode-se observar com clareza a mudança do regime transiente de ensaio (linhas tracejadas) para o regime estacionário a partir do instante de 60 horas, na qual houve percepção de poucas variações de temperatura no espaço-tempo e as inclinações das retas entre as temperaturas na distância radial variaram mais em função do tempo. Observa-se também a assimetria térmica entre as direções A-A e B-B, na qual as temperaturas na interface estaca/solo para a direção B-B (Figura 4.22 (b)) atingiram temperaturas inferiores em relação as temperaturas medidas na direção A-A da estaca.

Na Figura 4.22 mostra-se os mapas térmicos medidos, em 2D, para os ensaios na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de 33% (1UQ3S33) em uma vista superior e em corte nas direções A-A e B-B dos eixos perpendiculares ao protótipo de estaca. Observou-se também a existência da assimetria do gradiente térmico, que ocorreu entre os eixos da direção A-A e a direção B-B, como pode-se visualizar na vista superior do ensaio.

Vale destacar aqui que todas as análises realizadas nos mapas térmicos bidimensionais – 2D, foram realizadas a partir das medições de temperaturas a cada instante de tempo de ensaio, durante o período de aquecimento. A temperatura inicial de ensaio foi em torno de 28°C (Figura 4.23), um pouco próxima da temperatura inicial do ensaio na condição saturada (Figura 4.22), que ficou em forno de 27°C.



(a)



(b)

Figura 4.22 – (a) aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A. (b) aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B.

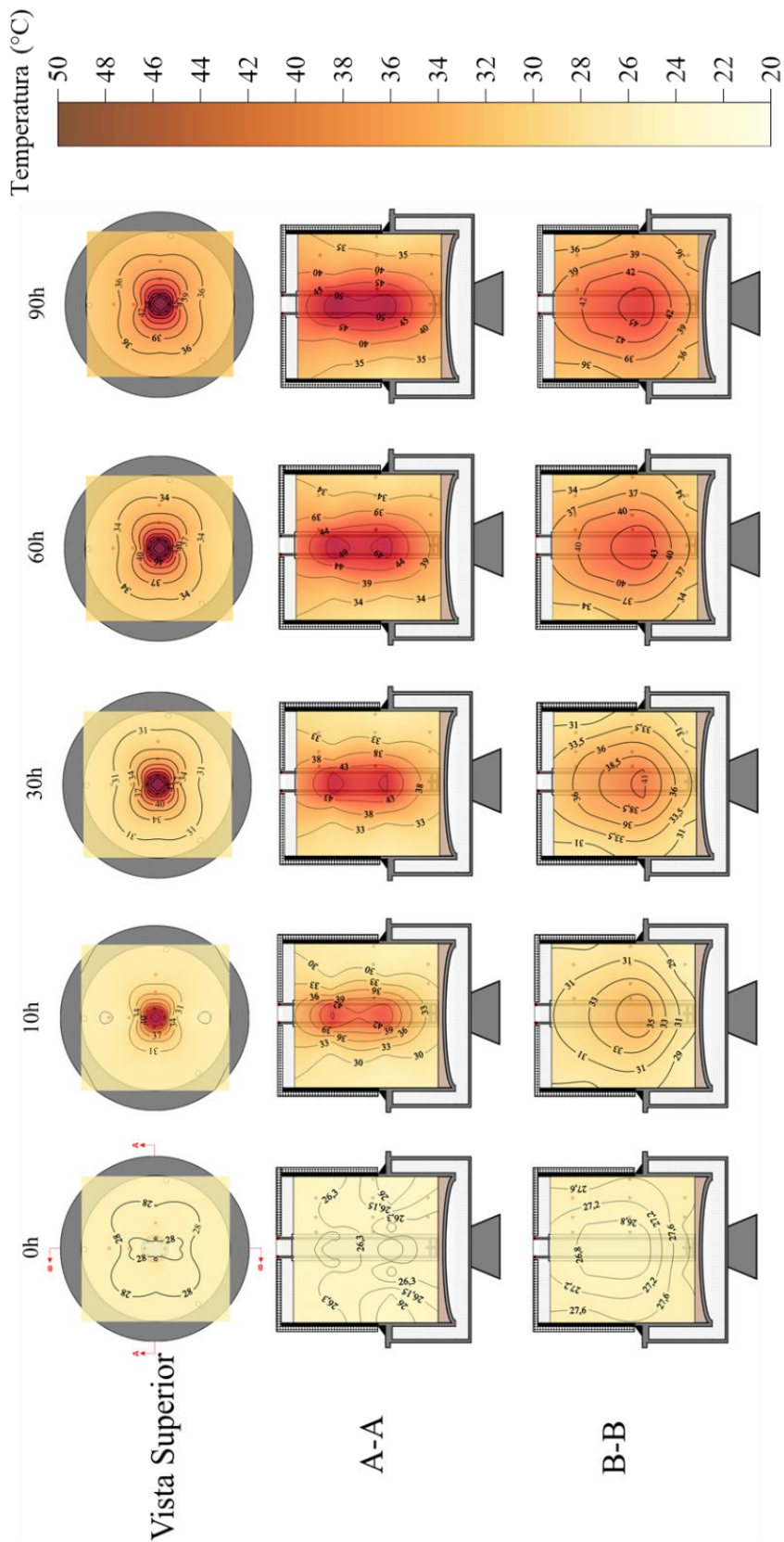


Figura 4.23 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 33% (1UQ3S33).

Nesse sentido, nas Figuras 4.24 (a) e (b), mostram-se de forma mais detalhada, a variação da temperatura para os ensaios na configuração 1UQ3S33, a partir da temperatura inicial de ensaio – ΔT (em 1D), em função da distância radial do solo no interior da câmara térmica para diferentes instantes de tempo nas direções perpendiculares ao eixo central do protótipo, na direção A-A (Figura 4.24 (a)) e na direção B-B (Figura 4.24 (b)). Pode-se observar com clareza a mudança do regime transiente de ensaio (linhas tracejadas) para o regime estacionário a partir do instante de 60 horas de ensaio, na qual há percepção de poucas variações de temperatura no espaço-tempo e as inclinações das retas entre as temperaturas na distância radial variam mais em função do tempo. Ou seja, atingiu-se o estacionário de troca de calor a partir do instante de 60 horas de ensaio TRT. Ademais, observou-se também a existência de uma baixa assimetria térmica entre as direções A-A e B-B, na qual as temperaturas na interface estaca/solo para a direção B-B atingem temperaturas próximas no regime estacionário (Figura 4.24 (b)) em relação as temperaturas medidas na direção A-A da estaca (Figura 4.24 (a)).

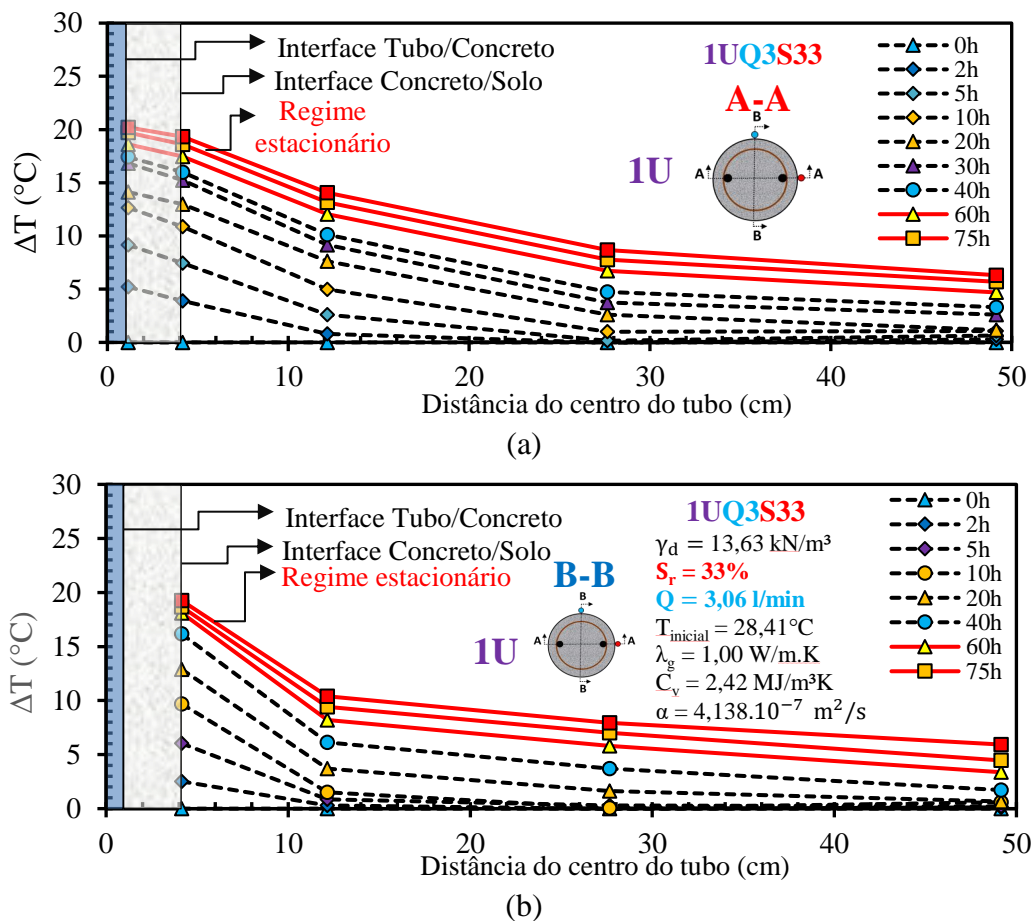


Figura 4.24 – (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes instantes de tempo de ensaio na direção A-A para o ensaio 1UQ3S33. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes instantes de tempo de ensaio na direção B-B para o ensaio 1UQ3S33.

Nesse sentido, a diferença de assimetria do gradiente térmico entre os ensaios 1UQ3S80 e 1UQ3S33 é melhor observado na Figura 4.25, quando se compara em vista superior os gradientes térmicos no espaço-tempo de forma bidimensional (2D) entre si. Esse resultado foi um tanto interessante, o grau de saturação influenciou na forma que o fluxo de calor dissipou no solo. Tais observações foram melhor detalhadas e discutidas com as funções de resposta térmica do solo nas subseções a seguir.

Ademais, ao se observar o instante de tempo de 90h na Figura 4.25, percebe-se que a condição não saturada ($S_r=33\%$) atingiu temperaturas mais elevadas em relação ao mesmo ensaio na condição saturada ($S_r=80\%$). Vale ressaltar que essa observação só foi possível pois ambos os dois ensaios partiram de temperaturas iniciais próximas, 28°C para a condição saturada (1UQ3S80) e 27°C para a condição não saturada (1UQ3S33).

Com o objetivo de não deixar a o texto dessa tese muito extenso quanto a apresentação dos gráficos dos ensaios TRT, bem como dos gráficos de análises unidimensionais e bidimensionais dos ensaios TRT realizados para as configurações 1U, 2U e 4U, optou-se por inserir os gráficos citados em Anexo. Sendo assim, caso haja interesse ao leitor em observar melhor todos os ensaios TRT desta tese, acessar o Anexo IV e para os gráficos unidimensionais, acessar o Anexo V. Além disso, no Anexo VI mostra-se, de forma mais detalhada, os mapas térmicos bidimensionais, de forma isolada, para os demais ensaios 1U, 2U e 4U, para a vazão de 3,06 l/min nas condições saturadas e não saturadas. Nesse sentido, será mostrado aqui no texto somente um comparativo dos mapas térmicos bidimensionais dos ensaios em vista superior para os principais instantes de ensaio para as configurações 1U, 2U e 4U, apenas na vazão de 3,06 l/min, na condição saturada e não saturada. Em adendo, os demais mapas, para vazões (6,12 e 12,41 l/min) não foram possíveis de serem desenvolvidos devido a problemas técnicos com alguns sensores de temperatura distribuídos no solo durante tais ensaios.

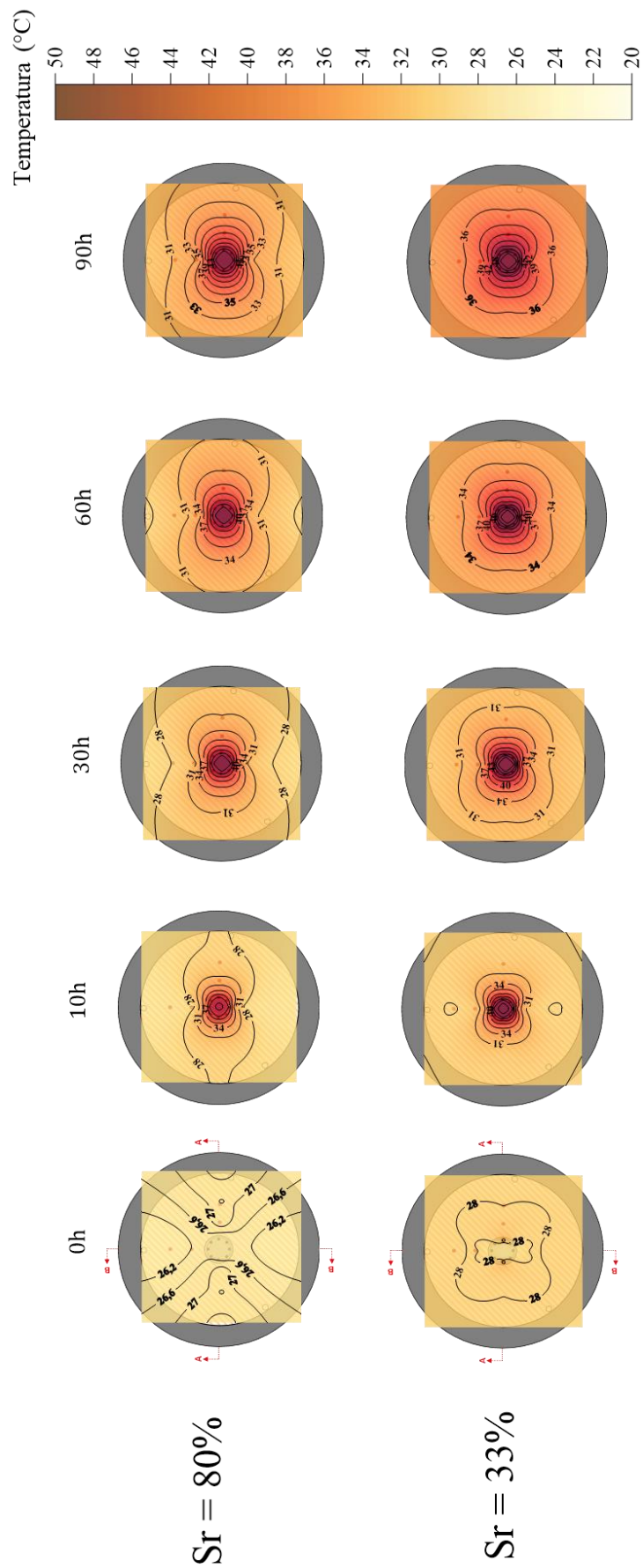


Figura 4.25 – Comparativo entre as assimetrias na dissipação de calor no solo no espaço tempo para os ensaios 1UQ3S80 e 1UQ3S33.

Ademais, nas Figuras 4.26 e 4.27 mostram-se os mapas térmicos medidos, para os ensaios na configuração 1U, 2U e 4U, para vazão de 3,06 l/min, na condição saturada ($S_r = 80\%$), ensaios 1UQ3S80, 2UQ3S80 e 4UQ3S80 (Figura 4.26) e na condição não saturada ($S_r = 33\%$), ensaios 1UQ3S33, 2UQ3S33 e 4UQ3S33 (Figura 4.27) em uma vista superior. Observa-se a comparação de simetria do fluxo de calor entre o ensaio 1U e os ensaios 2U e 4U, tanto na condição saturada quanto na condição não saturada. Além disso, é possível observar também que a partir de 60 horas de ensaio, não houve mais aumento significativo do gradiente de temperatura, o que configura o regime estacionário do ensaio. Ademais, para os ensaios na Figura 4.26, observa-se que as temperaturas de início de ensaio foram próximas, isso permitiu observar o avanço do gradiente de temperatura. No entanto, para a Figura 4.27, o ensaio 1U, teve uma temperatura de início bem distinta das temperaturas iniciais dos ensaios nas configurações 2U e 4U. O que permite observar que no ensaio 1U o gradiente de temperatura obteve um avanço bem maior em relação aos demais ensaios.

Sendo assim, vale ressaltar que nos gráficos unidimensionais realizadas as comparações em termos de ΔT , partindo da temperatura inicial, na qual foi observado o avanço real do gradiente de temperatura em relação a temperatura inicial de ensaio.

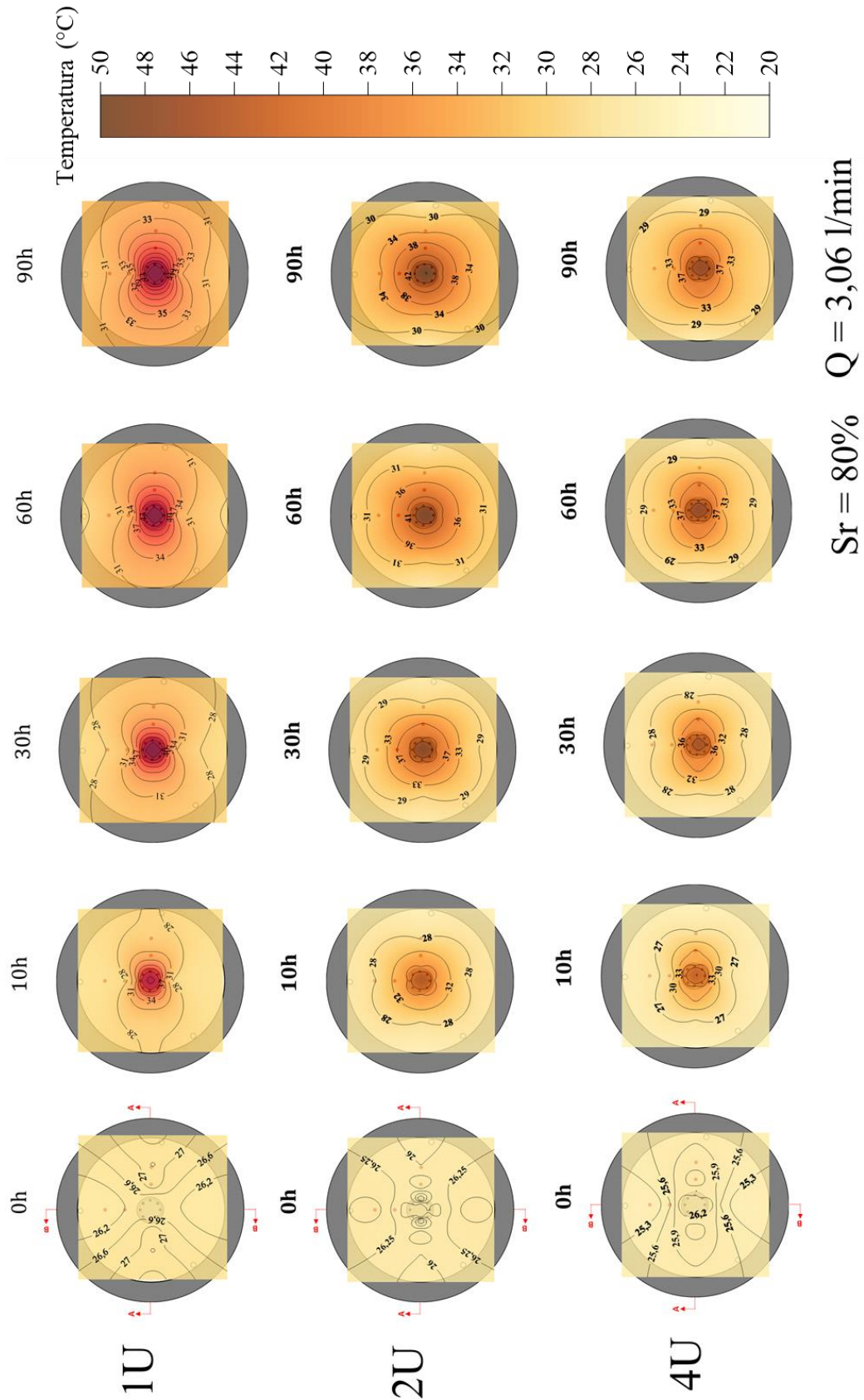


Figura 4.26 – Comparativo de gradiente de temperatura no espaço tempo para os ensaios na condição saturada (80%) e vazão 3,06 l/min para as configurações 1U, 2U e 4U, referente aos ensaios 1UQ3S80, 2UQ3S80 e 4UQ3S80, respectivamente.

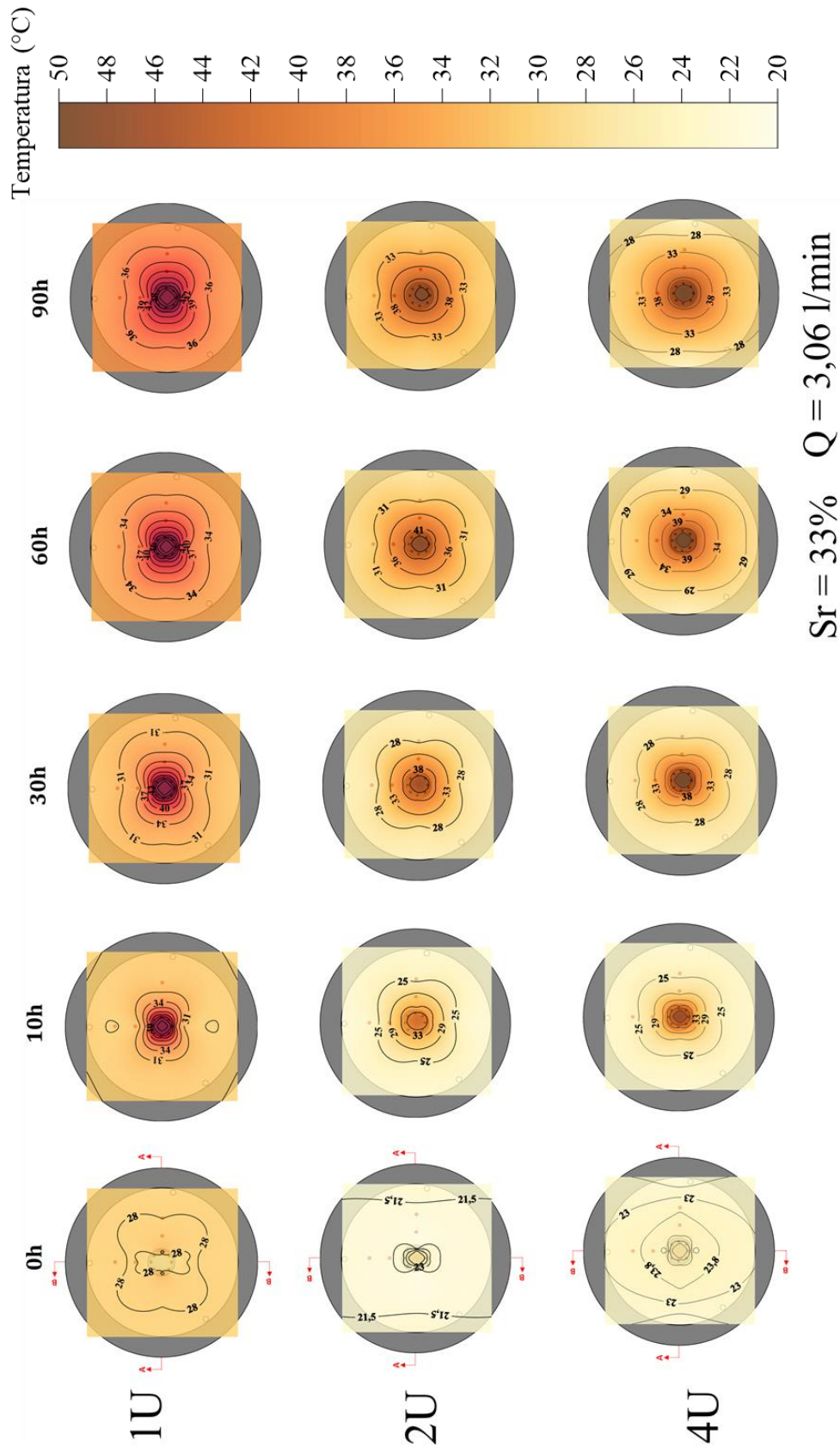


Figura 4.27 – Comparativo de gradiente de temperatura no espaço tempo para os ensaios na condição saturada (33%) e vazão 3,06 l/min para as configurações 1U, 2U e 4U, referente aos ensaios 1UQ3S33, 2UQ3S33 e 4UQ3S33, respectivamente.

4.8 Discussão da influência da vazão na resposta térmica (Φ_g) para diferentes vazões e grau de saturação relativa nas configurações 1U 2U e 4U

Nesta seção será discutida o comportamento da resposta térmica dos protótipos de estaca trocadora de calor em função dos parâmetros de da vazão (3,01; 6,12 e 12,41 l/min), configuração de tubos (1U, 2U e 4U) e grau de saturação de solo ($S_r = 33\%$ e $S_r = 80\%$) tudo feita de forma adimensional. O objetivo dessas análises foi em avaliar a resposta térmica (Φ_g) na face dos protótipos de estacas trocadoras de calor, nas direções perpendiculares A-A e B-B, e propor Funções G por meio de ajustes polinomiais que descrevem o comportamento de resposta térmica de cada ensaio. Em primeiro lugar foi feito o comparativo de resposta térmica fixando-se a configuração 1U, e variando a vazão em 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, para a condição saturada ($S_r = 80\%$) e para a condição não saturada ($S_r = 33\%$). Posteriormente, foi realizada as mesmas análises, com as mesmas variações para as configurações 2U e 4U.

Nesse sentido, vale relembrar que os ensaios na configuração 4U na condição saturada ($S_r = 80\%$) e nas vazões 6,12 e 12,41 l/min (4UQ6S80 e 4UQ12S80), que assim como comentado anteriormente, foram impossibilitados de ser realizados devido ao problema técnico no equipamento de ensaio TRT, durante a campanha de ensaios, logo aparecerão em branco no momento da apresentação de comparação dos gráficos a seguir.

Sendo assim, na Figura 4.28, mostra-se o comparativo do comportamento de resposta térmica adimensional (Φ_g) nas faces dos protótipos de estacas, referente aos todos os ensaios TRT para a configuração 1U em função do Número de Fourier (Fo), em escala logarítmica, nas duas direções perpendiculares entre si das faces da estaca, A-A e B-B (ponto A e ponto B) bem como a resposta térmica média ($\Phi_{g\text{média}}$) dada pela média aritmética entre a resposta térmica no ponto A e a resposta térmica média no ponto B.

Na primeira coluna, Figuras 4.28(a), (b) e (c), mostra-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, fixados a configuração 1U e grau de saturação de aproximadamente 80%, variando a vazão em 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, referente aos ensaios 1UQ3S80 (Figura 4.28(a)), 1UQ6S80 (Figura 4.28(b)) e 1UQ12S80 (Figura 4.28(c)). Na segunda coluna mostra-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, Figuras 4.28(d), (e) e (f), fixados a configuração 1U e o grau de saturação em aproximadamente 33% ($S_r = 33\%$), variando a vazão dos ensaios, 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, referente aos ensaios 1UQ3S33 (Figura 4.28(d)), 1UQ6S33 (Figura 4.28(e)) e 1UQ12S33 (Figura 4.28(f)).

A diferença entre as respostas térmicas (Φ_g) entre direção A-A (ponto A) e a direção B-B (ponto B) evidencia que a temperatura distribuída na face da estaca não possui uniformidade ao longo de sua superfície. Quanto maior essa diferença, mais desuniforme será a distribuição da temperatura na face do protótipo de estaca, o que evidencia maior assimetria do fluxo de calor dissipado da estaca para o solo. Em contrapartida, quanto menor a diferença de resposta térmica na face da estaca nas direções perpendiculares A-A (ponto A) e B-B (ponto B), mais uniforme é a distribuição de temperatura na face da estaca e conseqüentemente, maior a simetria do fluxo de calor no ensaio.

Nesse sentido, é possível observar que o grau de assimetria de fluxo de calor no protótipo diminuiu com o aumento da vazão imposta, como observa-se, em sequência, nas Figuras 4.28 (a), (b) e (c) e Figuras 4.28 (d), (e) e (f) respectivamente. Ademais, observou-se também que a simetria do fluxo de calor na estaca diminuiu em todas as situações que houve diminuição do grau de saturação. É interessante notar que, mesmo tendo apenas tubos ativos na direção A-A, como no caso 1U, observou-se praticamente total uniformidade de distribuição de temperatura na face das estacas, e conseqüentemente total simetria de fluxo de calor, para os ensaios na condição não saturada ($S_r=33\%$) e maiores vazões (6,12 e 12,41 l/min) dos ensaios 1UQ6S33 e 1UQ12S33, como observa-se nas Figuras 4.28 (e) e (f) respectivamente.

Ademais, analisando a agora a configuração 2U, na Figura 4.29, mostra-se o comportamento de resposta térmica adimensional (Φ_g) nas faces dos protótipos de estacas, referente aos todos os ensaios TRT para a configuração 2U em função do Número de Fourier (Fo), em escala logarítmica, nas duas direções perpendiculares entre si das faces da estaca A-A e B-B (ponto A e ponto B) bem como a resposta térmica média ($\Phi_{g\text{média}}$). Na primeira coluna, Figuras 4.28(a), (b) e (c), mostra-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, fixados a configuração 2U e grau de saturação de aproximadamente 80%, variando a vazão dos ensaios, 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, referente aos ensaios 2UQ3S80 (Figura 4.28(a)), 2UQ6S80 (Figura 4.28(b)) e 2UQ12S80 (Figura 4.28(c)). Na segunda coluna mostra-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, Figuras 4.28(d), (e) e (f), fixados a configuração 2U e o grau de saturação em aproximadamente 33% ($S_r = 33\%$), variando a vazão dos ensaios, 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, referente aos ensaios 2UQ3S33 (Figura 4.28(d)), 2UQ6S33 (Figura 4.28(e)) e 2UQ12S33 (Figura 4.28(f)).

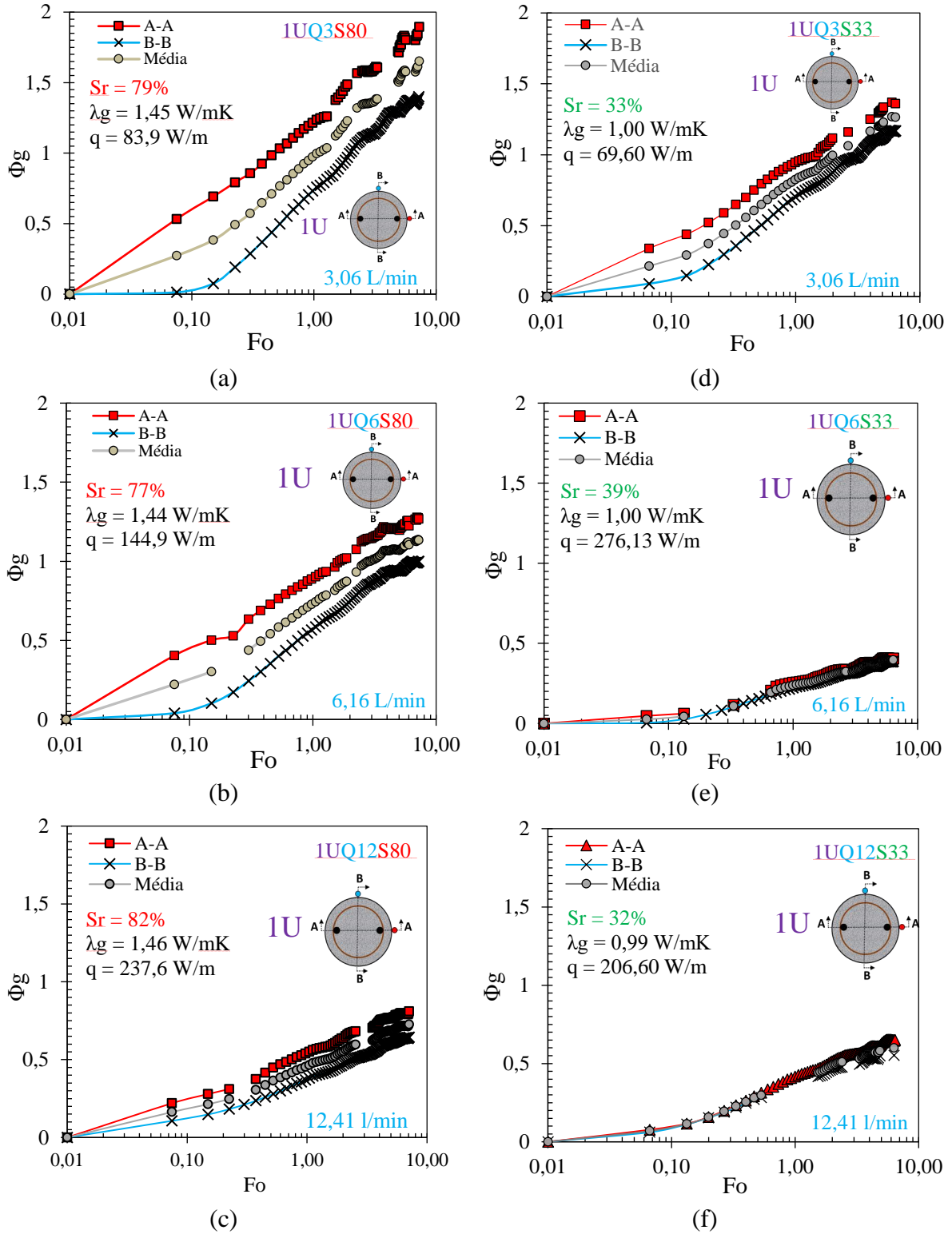


Figura 4.28 – Comparativo geral dos gráficos de resposta térmica adimensional (Φ_g) na face das estacas em função do tempo adimensional (Fo) nas direções A-A e B-B, na configuração 1U, para os ensaios **1UQ3S80** (a), **1UQ6S80** (b) **1UQ12S80** (c) **1UQ3S33** (d), **1UQ6S33** (e) e **1UQ12S33** (f), respectivamente.

Comparando os gráficos da Figura 4.28, observa-se um comportamento similar ao observado na configuração 1U, no que desrespeito a simetria do fluxo de calor variar em função do grau de saturação e da velocidade do fluido no interior do tubo. No entanto as amplitudes dos efeitos foram menores devido os tubos na direção B-B (ponto B) estarem também ativos, assim como os tubos na direção A-A (ponto A). Observa-se também que há uma leve assimetria de fluxo de calor nas primeiras horas de ensaio, como observa-se nas Figuras 4.28(a), (b) e (c). O que não se observa o mesmo comportamento quando comparado na condição não saturada ($Sr = 33\%$) que apresentou praticamente total uniformidade no fluxo de calor na face da estaca, como pode ser observado nas Figuras 4.28(d), (e) e (f).

Finalmente, analisando a configuração 4U, nas Figuras 4.29, mostram-se o comportamento de resposta térmica adimensional (Φ_g) nas faces dos protótipos de estacas, referente aos todos os ensaios TRT para a configuração 4U em função do Número de Fourier (Fo), em escala logarítmica, nas duas direções perpendiculares entre si nas faces da estaca A-A e B-B (ponto A e ponto B), bem como a resposta térmica média ($\Phi_{g\text{média}}$). Na primeira coluna, Figuras 4.29(a), (b) e (c), mostra-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, fixados a configuração 4U e grau de saturação de aproximadamente 80%, variando a vazão dos ensaios, 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, referente aos ensaios 4UQ3S80 (Figura 4.29(a)), 4UQ6S80 (Figura 4.29(b)) e 2UQ12S80 – (Figura 4.29(c)). Na segunda coluna mostrou-se a resposta térmica adimensional (Φ_g) dos ensaios TRT, Figuras 4.29(d), (e) e (f), fixados a configuração 4U para a condição não saturada ($Sr = 33\%$) variando a vazão do fluido em 3,01; 6,12 e 12,41 l/min, respectivamente, referente aos ensaios 4UQ3S33 (Figura 4.29(d)), 4UQ6S33 (Figura 4.29(e)) e 4UQ12S33 (Figura 4.28(f)).

É válido ressaltar aqui que os valores utilizados para obtenção das temperaturas normalizadas foram obtidos a partir dos valores de condutividade térmica obtidas em laboratório, pelo método de ajuste matemático proposto nessa tese.

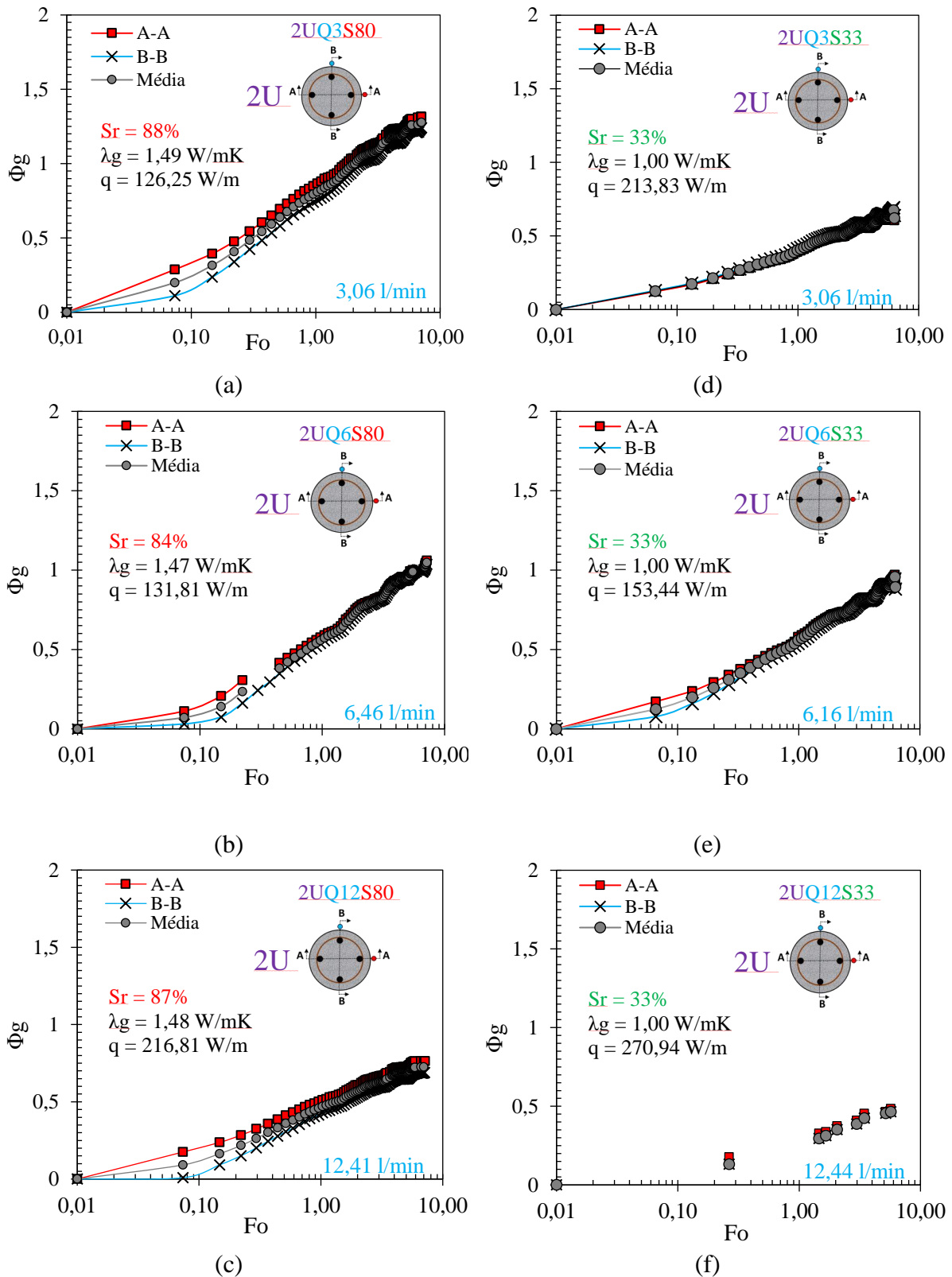
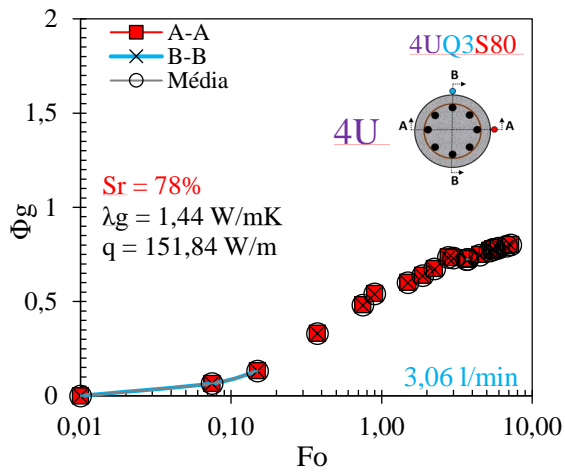


Figura 4.29 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (Fo), na configuração 2U, para os ensaios 2UQ3S80 (a), 2UQ6S80 (b) 2UQ12S80 (c) 2UQ3S33 (d), 2UQ6S33 (e) e 2UQ12S33 (f), respectivamente.

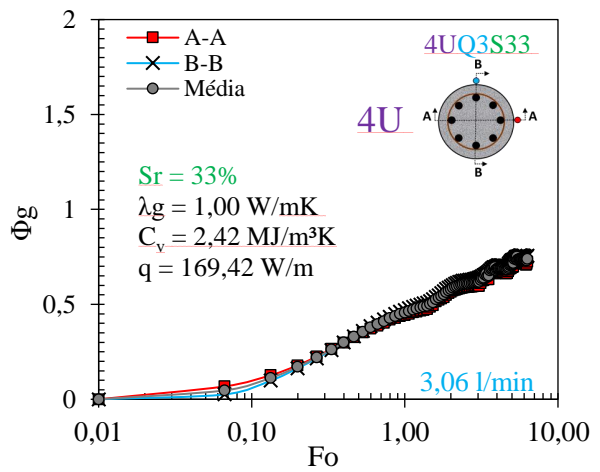
Comparando os gráficos da Figura 4.30, é possível observar que praticamente não houve assimetria de fluxo de calor na face da estaca, tal fato é evidenciado por não haver existido diferença de resposta térmica entre as direções perpendiculares da face das estacas nas direções A-A (ponto A) e B-B (ponto B), o que total uniformidade de temperatura distribuída na face do protótipo. Isso ocorreu devido os tubos na configuração 4U estarem todos ativos ao longo da face dos protótipos, o que contribuiu para uma melhor distribuição da temperatura na face da estaca, em relação as configurações 1U e 2U.

Em resumo e fazendo um comparativo geral entre a Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29, percebe-se que, ressalvados os limites físicos observados nesta tese, a distribuição de temperatura ficou mais uniforme e conseqüentemente, o fluxo de calor tornou-se mais simétrico na medida que ocorreu o aumento do número de tubos ativos nos protótipos (1U, 2U e 4U). Observou-se também que na medida que a vazão aumentou houve um aumento da simetria de fluxo de calor nas estacas, tal fenômeno foi principalmente observado na condição saturada da configuração 1U, na Figura 4.27 (a), (b) e (c). Nesse sentido, observou-se também que a simetria do fluxo de calor aumentou na medida que o grau de saturação do solo diminuiu, tal fenômeno foi melhor observado na Configuração 1U (Figuras 4.27(d), (e) e (f)). No entanto, para as configurações 2U e 4U, na condição não saturada, não se notou variação de assimetria de fluxo de calor quando se variou a vazão, como pode ser observado nas Figuras 4.28(d), (e) e (f) e Figura 4.30(d), (e) e (f).

Ademais, objetivando-se avaliar o efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) na face dos protótipos de estacas trocadoras de calor a partir dos ensaios TRT realizados nesta tese. Foi realizado um comparativo dos efeitos de não linearidade entre as curvas, bem como foi proposto suas descrições matemáticas por ajuste polinomial (Funções G) de todas as curvas de resposta térmica média dos ensaios que descreveram o comportamento dos ensaios TRT, tudo variando os parâmetros de configuração (1U, 2U e 4U), vazão (3,01; 6,12 e 12,41 l/min) e do grau de saturação ($S_r = 33\%$ e $S_r=80\%$).



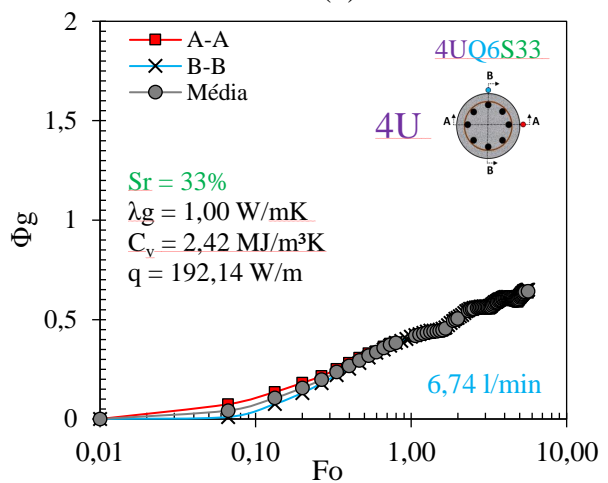
(a)



(d)

NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ6S80

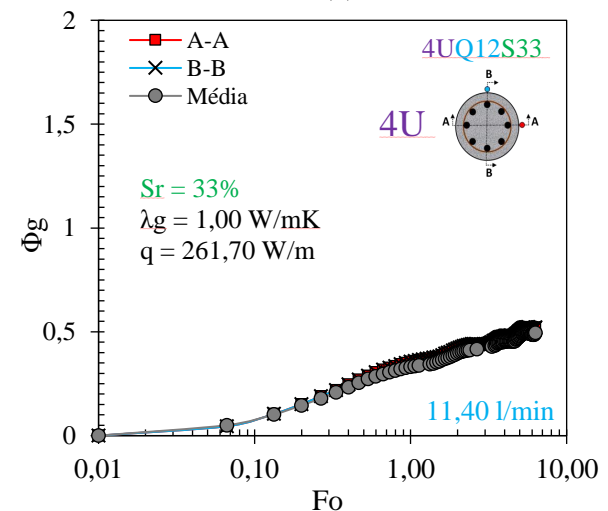
(b)



(e)

NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ12S80

(c)

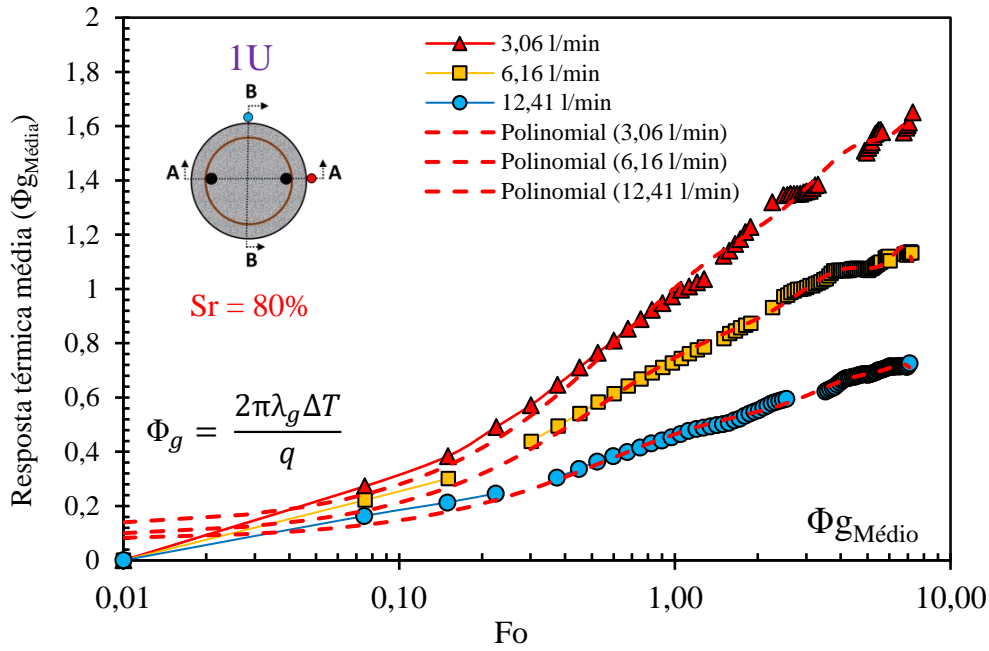


(f)

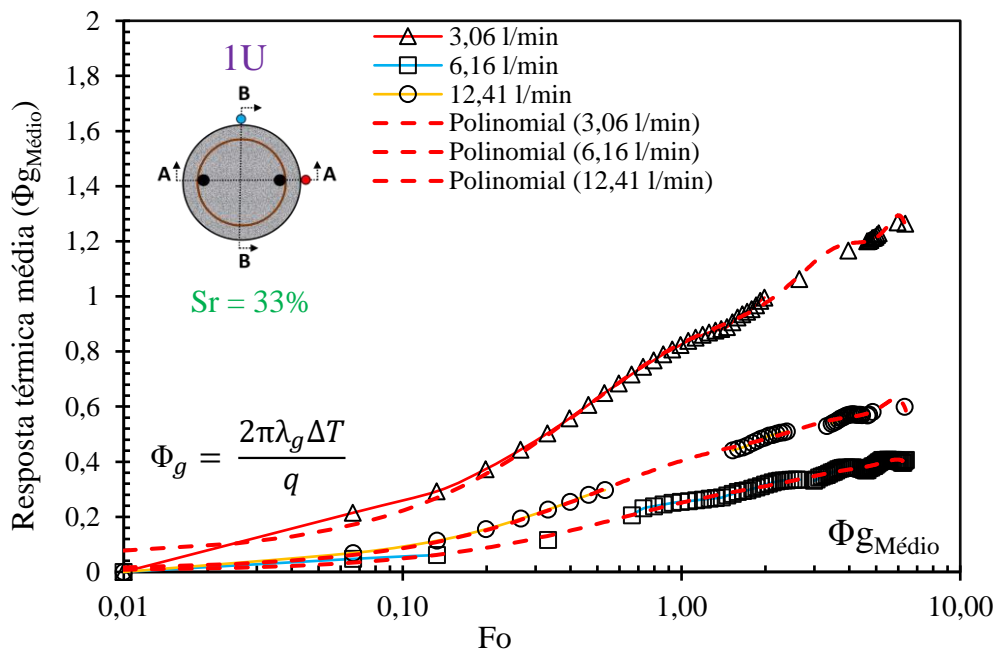
Figura 4.30 – Resposta térmica adimensional (Φ_B) em função do tempo adimensional (Fo), na configuração 4U, para os ensaios 4UQ3S80 (a), 4UQ3S33 (b), 4UQ6S33 (c) e 4UQ12S33 (d) respectivamente.

Na Figuras 4.31 (a) e (b), mostram-se melhor a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) dos ensaios TRT na configuração 1U, na condição saturada (Figuras 4.31 (a)) e na condição não saturada (Figuras 4.31 (b)) ambas variando-se a vazão em 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, dos ensaios 1UQ3S80 (Figura 4.27 (a)), ensaio 1UQ6S80 (Figura 4.27 (b)) e ensaio 1UQ12S80 (Figura 4.27 (c)). Nesse sentido, observou-se aqui que houve um aumento do abatimento da curva de resposta térmica média referente aos ensaios na condição saturada na medida que a houve aumento da vazão, com pode ser observado na Figura 4.31 (a). No entanto, para a condição não saturada (Figura 4.31 (b)) não ocorreu o mesmo padrão, como observado na curva de resposta térmica média do ensaio com vazão de 6,01 l/min (1UQ6S33) que apresentou um abatimento superior a curva de vazão 12 l/min (1UQ12S33). Isso ocorreu devido o ensaio ter apresentado uma elevada taxa de calor por metro de estaca (q) que atingiu um valor médio de 276,13W/mK, valor superior a todos os ensaios realizados nessa pesquisa. Como, por definição, a resposta térmica é inversamente proporcional ao fluxo de calor (q), isso levou a curva de resposta térmica média ($\Phi_{Média}$) desse ensaio sofrer o maior abatimento em relação aos demais ensaios. Como discutido no início dessa sessão, uma hipótese para esse comportamento atípico pode estar relacionada com problemas observados no sensor de vazão, que pode ter descalibrado durante o ensaio. Além disso, vale ressaltar que os ensaios na condição não saturada foram realizados dentro de uma faixa de umidade, entre 35 e 31%, na qual não houve monitoramento de umidade entre o primeiro e último ensaio na condição não saturada. O que pode ter influenciado também no comportamento atípico. Nesse sentido, vale ressaltar que esse ensaio foi um dos primeiros a serem realizados na campanha de ensaios, e durante os primeiros ensaios não houve coleta de amostras de umidade, uma vez que se esperava que os sensores de umidade funcionassem, o que não aconteceu.

Não obstante, é possível observar também que os efeitos de não linearidade das curvas de resposta térmica evidenciam como a distribuição de temperatura e, conseqüentemente, o fluxo de calor ao longo da face da estaca, variou no tempo para a direção A-A (ponto A) e B-B (ponto B). Nesse sentido, observou-se que o efeito de não linearidade da curva diminuiu na medida que houve aumento da vazão



(a)



(b)

Figura 4.31 – (a) Resposta térmica adimensional média ($\Phi_{gMédia}$) na face das estacas para ensaios na configuração 1U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (1UQ3S80, 1UQ6S80 e 1UQ12S80) e (b) resposta térmica adimensional média ($\Phi_{gMédia}$) na face das estacas para ensaios na configuração 1U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33).

A fim de descrever matematicamente o comportamento de resposta térmica médio dos ensaios TRT, na Tabela 4.6, mostra-se os parâmetros de ajuste polinomial das respostas térmicas médias (Função G) no regime transiente e permanente na face dos protótipos para a configuração 1U, em três vazões de 3,06, 6,16 e 12,41 l/min respectivamente na condição

saturada ($Sr = 80\%$). Vale ressaltar que a aplicação da equação de ajuste é válida para número de Fourier (temperatura adimensional) maior ou igual a 0,1 ($Fo \geq 0,1$), com um bom ajuste ($r^2 > 0,99$). A equação polinomial de ajuste é dada por:

$$\Phi_g = a. [\log(Fo)]^6 + b. [\log(Fo)]^5 + c. [\log(Fo)]^4 + d. [\log(Fo)]^3 + e. [\log(Fo)]^2 + f. [\log(Fo)]^1 + g \quad (4.10)$$

Tabela 4.6 – Ajuste polinomial de resposta térmica adimensional (Função G) para protótipo de estaca trocadora de calor, na configuração 1U, para vazões 3,06, 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada.

| | 3,06 l/min (1UQ3S80) | 6,16 l/min (1UQ6S80) | 12,41 l/min (1UQ12S80) |
|-------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| a | -0,0004 | -0,0005 | -0,0002 |
| b | 0,0089 | 0,0113 | 0,0049 |
| c | - 0,0884 | - 0,1019 | - 0,0469 |
| d | 0,4365 | 0,4523 | 0,2239 |
| e | - 1,1426 | - 1,056 | - 0,5642 |
| f | 1,6666 | 1,3546 | 0,7721 |
| g | 0,1234 | 0,0866 | 0,0753 |
| r^2 | 0,9924 | 0,9939 | 0,9917 |

Nesse sentido, na Tabela 4.7, mostra-se também os parâmetros de ajuste polinomial das respostas térmicas médias no regime transiente e estacionário, na face dos protótipos na configuração 1U para a condição não saturada ($Sr = 33\%$), para as três vazões estudadas de 3,06, 6,16 e 12,41 l/min respectivamente. Vale ressaltar que a aplicação da equação de ajuste é válida para número de Fourier (tempo adimensional) maiores ou iguais a 0,1 ($Fo \geq 0,1$), com um bom ajuste ($r^2 > 0,99$). A equação polinomial de ajuste é dada pela Eq. (4.10).

Tabela 4.7 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33, respectivamente.

| | 3,06 l/min (1UQ3S33) | 6,16 l/min (1UQ6S33) | 12,41 l/min (1UQ12S33) |
|-------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| a | -0,0014 | -0,0003 | -0,0004 |
| b | 0,0284 | 0,0074 | 0,0092 |
| c | - 0,2284 | - 0,0697 | - 0,0755 |
| d | 0,9197 | 0,3295 | 0,3100 |
| e | - 1,9773 | - 0,8282 | - 0,6707 |
| f | 2,3849 | + 1,1158 | 0,7675 |
| g | 0,0067 | 0,0091 | 0,0155 |
| r^2 | 0,995 | 0,9931 | 0,993 |

Finalmente, para se obter uma visão geral de todos os ensaios realizados na configuração 1U, na condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$) os gráficos da Figura 4.30(a) e (b) foram todos sobrepostos de forma mais didática, como pode ser observado na Figura 4.32. Como já esperado, o ensaio 1U, vazão 6.16 l/min na condição não saturada (1UQ6S33) mostrou-se fora do padrão de comportamento esperado, fato este já comentado anteriormente. Para as demais curvas de resposta térmica média, observou-se que o abatimento da curva de resposta térmica média também diminuiu na medida que o grau de saturação do solo reduziu.

Ademais, uma outra observação importante a ser feita na Figura 4.32, está na diminuição dos efeitos de não linearidade de resposta térmica média com a diminuição do grau de saturação em todos os ensaios na configuração 1U. Tal efeito é evidenciado pela presença de água na estrutura porosa do solo, que aumenta a inércia térmica do sistema e retardam a dissipação de calor da estaca do solo. Observa-se também, em todos os ensaios, que os efeitos de não linearidade cessam na face da estaca a partir de Fourier igual a 1 ($Fo = 1$), que ocorre a partir de 15 horas de ensaio.

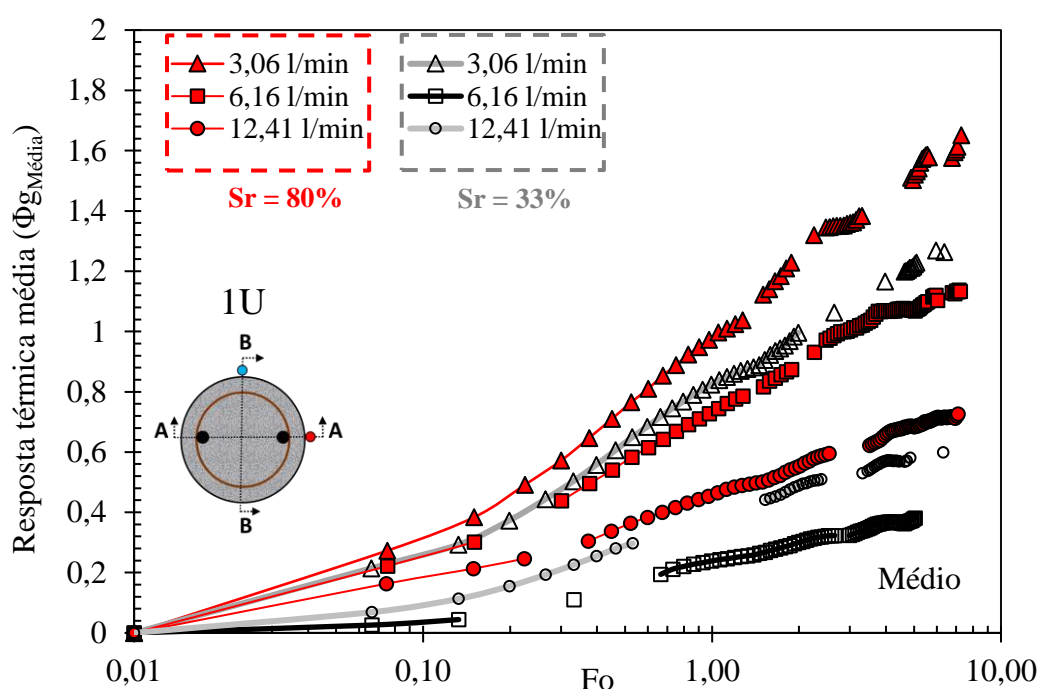


Figura 4.32 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{g,Média}$) em função do tempo adimensional (Fo) na configuração 1U variando a vazão (3,06; 6,16 e 12,41 l/min) e o grau de saturação (33% e 80%) para os ensaios TRT 1UQ3S80, 1UQ6S80, 1UQ12S80, 1UQ3S33, 1UQ6S33 e 1UQ12S33.

Para a configuração 2U, conforme observados no comparativo de todos os gráficos de resposta térmica, variando a vazão e o grau de saturação do solo, referente aos ensaios 2UQ3S80, 2UQ6S80, 2UQ12S80, 2UQ3S33, 2UQ6S33 e 2UQ12S33, assim como para todos os demais ensaios nas configurações 1U, 2U e 4U, foram disponibilizados no Anexo VII. Sendo assim, nesta sessão foi exposto e discutido somente um comparativo do efeito de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) para 2U.

Nas Figuras 4.32(a) e (b), mostram-se a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) referente aos ensaios TRT na configuração 2U, na condição saturada (Figuras 4.33(a)) e na condição não saturada (Figuras 4.33(b)) ambas variando-se a vazão em 3,06; 6,16 e 12,41 l/min. Observou-se que houve um abatimento da curva e a diminuição dos efeitos de não linearidade das curvas de resposta térmica média na medida que aumentou a vazão nos tubos ativos nos ensaios TRT. No entanto, o ensaio de vazão 3,06 l/min (2UQ3S33) apresentou um comportamento distinto, com um abatimento superior a curva de vazão 6,46 l/min (2UQ6S33), isso ocorreu devido ao ensaio TRT com vazão 3,06 l/min (2UQ3S33) ter apresentado um comportamento atípico devido a problemas técnicos observados com o sensor de vazão. Que apresentou um fluxo de calor médio por metro de estaca (q) de aproximadamente 206,36 W/mK, valor superior ao fluxo de calor trocado do ensaio 2UQ6S33, que apresentou uma troca térmica por metro de estaca média (q) de 153,44 W/m. Como a resposta térmica é inversamente proporcional ao fluxo de calor (q), isso levou a curva de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) desse ensaio sofrer o maior abatimento.

Observou-se também que, os efeitos de não linearidade para a configuração 2U diminuíram na medida que aumentou a vazão dos ensaios, isso pode ser observado tanto na condição saturada (Figura 4.33(a)) quanto na condição não saturada (Figura 4.33(b)).

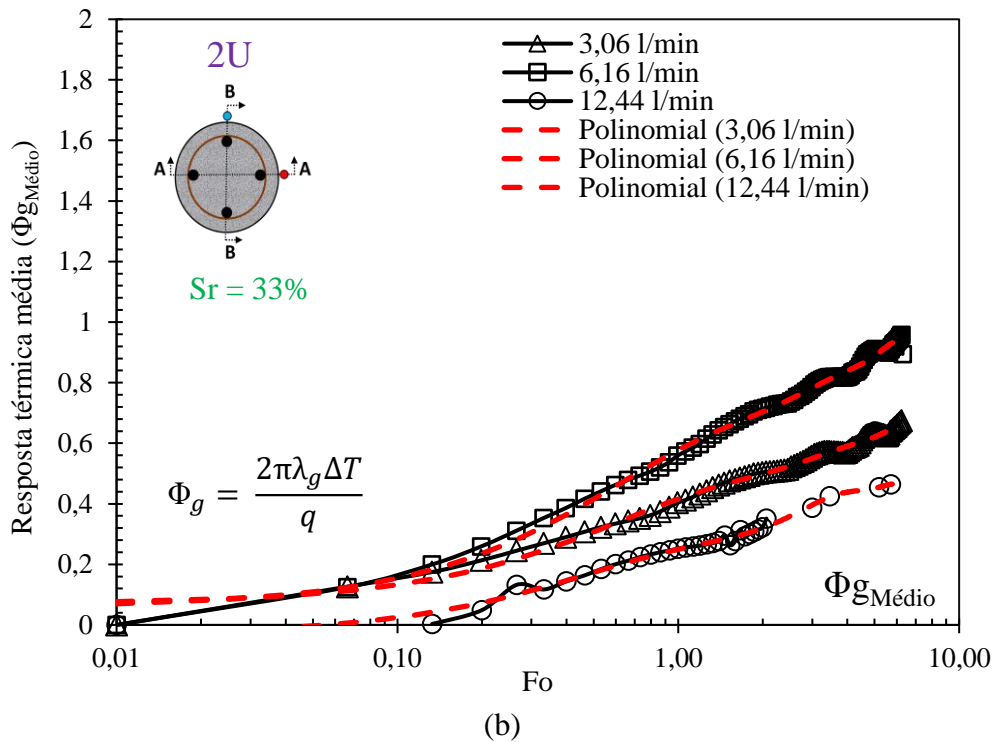
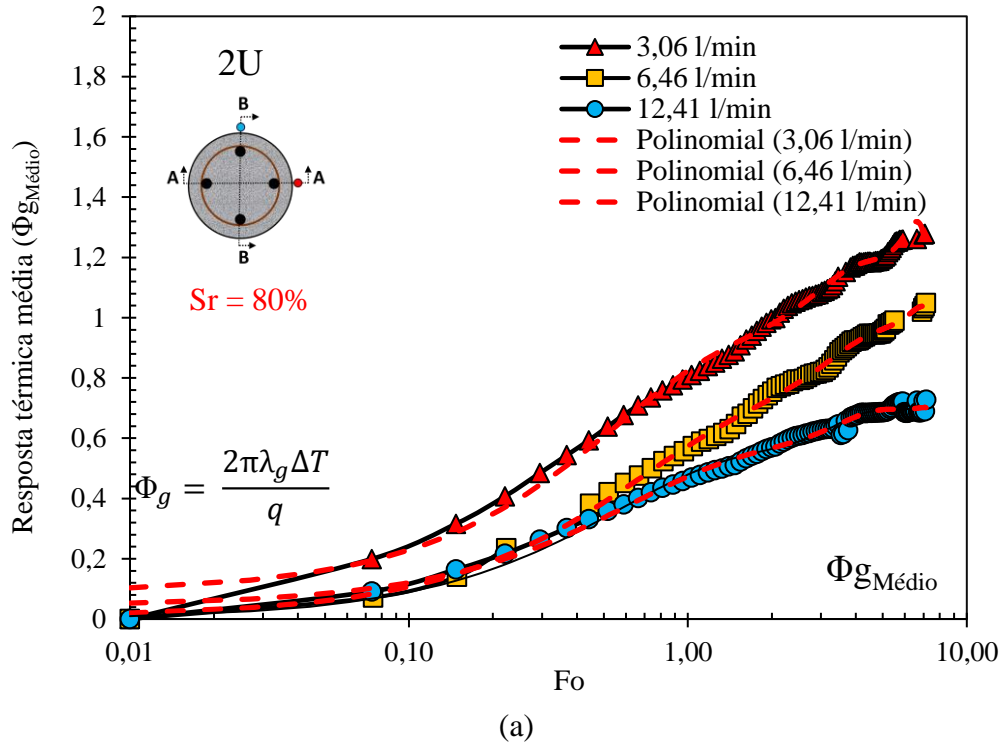


Figura 4.33 – (a) Resposta térmica adimensional média na face das estacas para ensaios na configuração 2U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (2UQ3S80, 2UQ6S80 e 2UQ12S80) e (b) resposta térmica adimensional média na face das estacas para ensaios na configuração 2U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição saturada (2UQ3S33, 2UQ6S33 e 2UQ12S33).

Afim de se obter uma melhor descrição matemática do comportamento de resposta térmica média de cada ensaio TRT, tanto no regime transiente quanto no regime estacionário, nas Tabelas 4.8 e 4.9, mostram-se os parâmetros de ajuste polinomial das respostas térmicas médias (Funções G) no regime transiente e estacionário, na face dos protótipos na configuração 2U, para as três vazões estudadas de 3,06, 6,16 e 12,41 l/min respectivamente. Vale ressaltar que, assim como na condição 1U, a aplicação da equação de ajuste é válida somente para número de Fourier (tempo adimensional) maiores ou iguais a 0,1 ($Fo \geq 0,1$), com um bom ajuste ($r^2 > 0,99$). Vale ressaltar que a equação polinomial de ajuste (Função G) obtida pelo software Sigmaplot, é dada pela Eq. (4.10).

$$\Phi_g = a. \log(Fo)^6 + b. \log(Fo)^5 + c. \log(Fo)^4 + d. \log(Fo)^3 + e. \log(Fo)^2 + f. \log(Fo)^1 + g \quad (4.10)$$

Tabela 4.8 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 2UQ3S80, 2UQ6S80 e 2UQ12S80, respectivamente.

| | 3,06 l/min (2UQ3S80) | 6,16 l/min (2UQ6S80) | 12,41 l/min (2UQ12S80) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| a | 0,0006 | - 0,0002 | - 0,0001 |
| b | 0,0132 | 0,0058 | 0,0037 |
| c | - 0,1169 | - 0,0556 | - 0,0385x ⁴ |
| d | 0,5136 | 0,2689 | 0,2 |
| e | - 1,1936 | - 0,6994 | - 0,5489 |
| f | 1,5197 | 1,045 | 0,8122 |
| g | 0,0884 | +0,0093 | 0,0448 |
| r ² | 0,9936 | 0,9965 | 0,9895 |

Tabela 4.9 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 2UQ3S33, 2UQ6S33 e 2UQ12S33, respectivamente.

| | 3,06 l/min (2UQ3S33) | 6,16 l/min (2UQ6S33) | 12,41 l/min (2UQ12S33) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| a | -0,0002 | -0,0004 | -0,0005 |
| b | 0,0048 | 0,0088 | 0,0094 |
| c | - 0,0432 | - 0,0737 | - 0,0753 |
| d | 0,1965 | 0,3177 | 0,2944 |
| e | - 0,4846 | - 0,751 | - 0,5903 |
| f | 0,6726 | 1,016 | 0,6466 |
| g | 0,0701 | 0,0598 | - 0,0345 |
| r ² | 0,989 | 0,9934 | 0,984 |

Finalmente, na Figura 4.34 mostra-se a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) dos ensaios TRT na configuração 4U, na condição não saturada ($Sr = 33$), variando-

se a vazão em 3,06; 6,16 e 12,41 l/min. Observou-se que praticamente não houve variação no comportamento do abatimento da curva de resposta térmica média dos ensaios com o aumento da vazão para os ensaios de vazão 3,06 e 6,12 l/min, tal comportamento atípico também foi evidenciado devido os dois ensaios terem apresentado um fluxo de calor (q) semelhante. Vale ressaltar que não foi possível mostrar o comparativo das curvas na condição saturada, pois os ensaios TRT foram impossibilitados de serem realizados devido a problemas técnicos no equipamento de ensaio TRT desenvolvida.

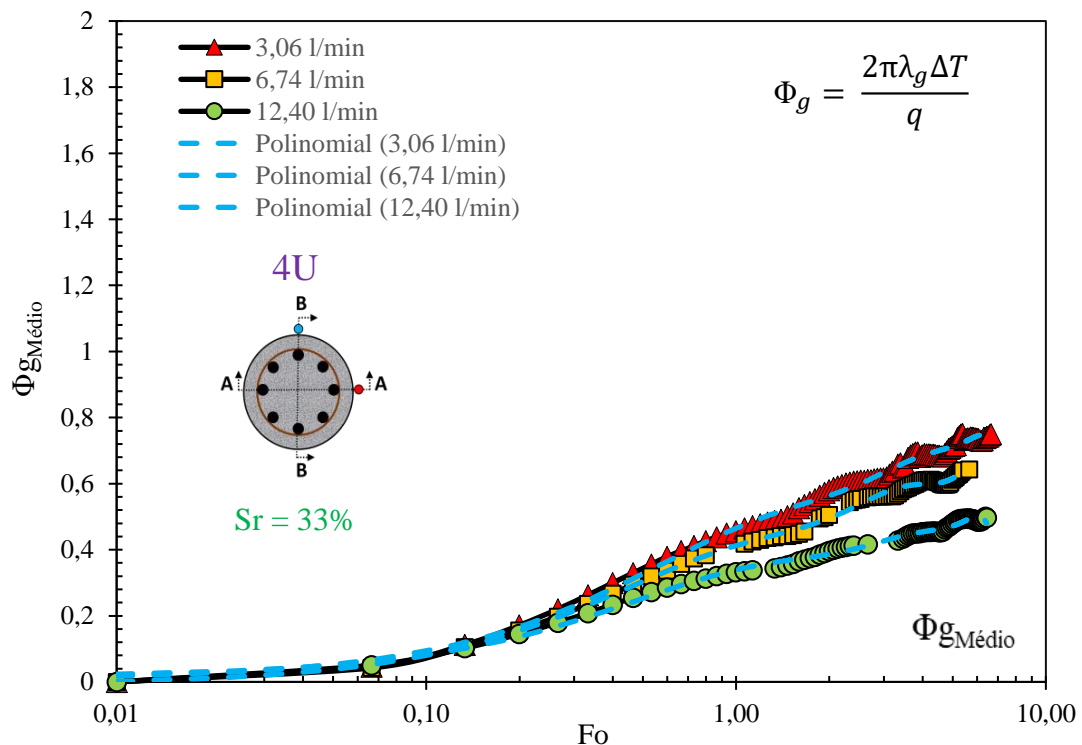


Figura 4.34 – Resposta térmica adimensional média ($\Phi_{gMédia}$) na face das estacas para ensaios na configuração 4U, as vazões 3,06; 6,16 e 12,41 l/min, na condição não saturada (4UQ3S33, 4UQ6S33 e 4UQ12S33).

Nesse sentido, na Tabela 4.10, mostra-se os parâmetros de ajuste polinomial das respostas térmicas médias no regime transiente e estacionário, na face dos protótipos na configuração 4U (Função G) para as três vazões estudadas de 3,06, 6,16 e 12,41 l/min respectivamente. Vale ressaltar que, assim como na condição 1U e 2U, a aplicação da equação de ajuste é válida para número de Fourier (tempo adimensional) maiores ou iguais a 0,1 ($Fo \geq 0,1$), com um bom ajuste ($r^2 > 0,99$). A equação polinomial de ajuste é dada pela Eq. (4.10).

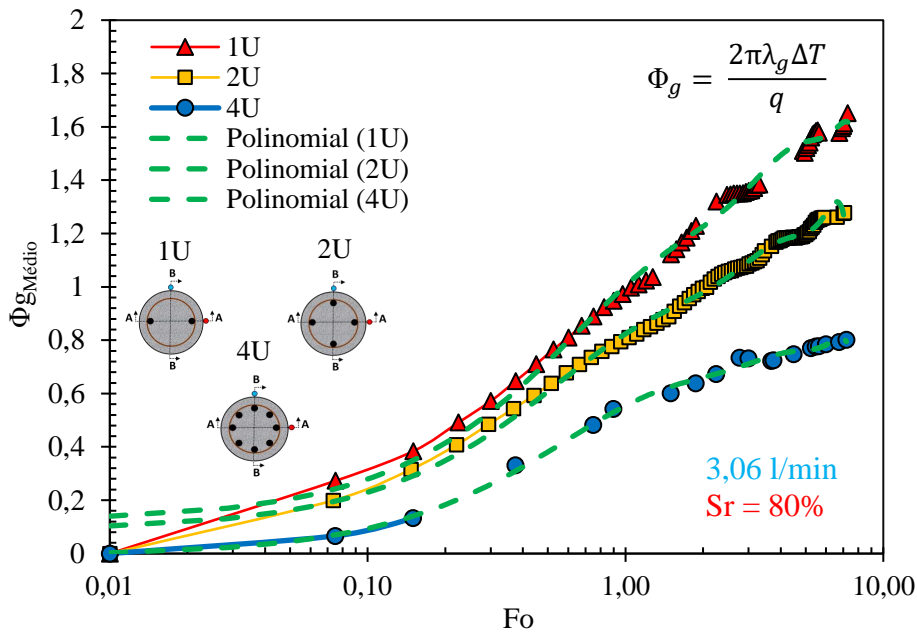
Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste polinomial do comportamento de resposta térmica adimensional para os ensaios 4UQ3S33, 4UQ6S33 e 4UQ12S33, respectivamente.

| | 3,06 l/min (4UQ3S33) | 6,16 l/min (4UQ6S33) | 12,41 l/min (4UQ12S33) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| a | -0,0003 | -0,0008 | -0,0004 |
| b | + 0,0074 | + 0,0163 | 0,008 |
| c | - 0,0659 | - 0,1247 | - 0,0666 |
| d | + 0,2941 | + 0,4717 | + 0,279 |
| e | - 0,7008 | - 0,9311 | - 0,6165 |
| f | + 0,9222 | 0,9933 | 0,7196 |
| g | 0,0084 | - 0,0089 | + 0,0161 |
| r ² | 0,9935 | 0,9958 | 0,9925 |

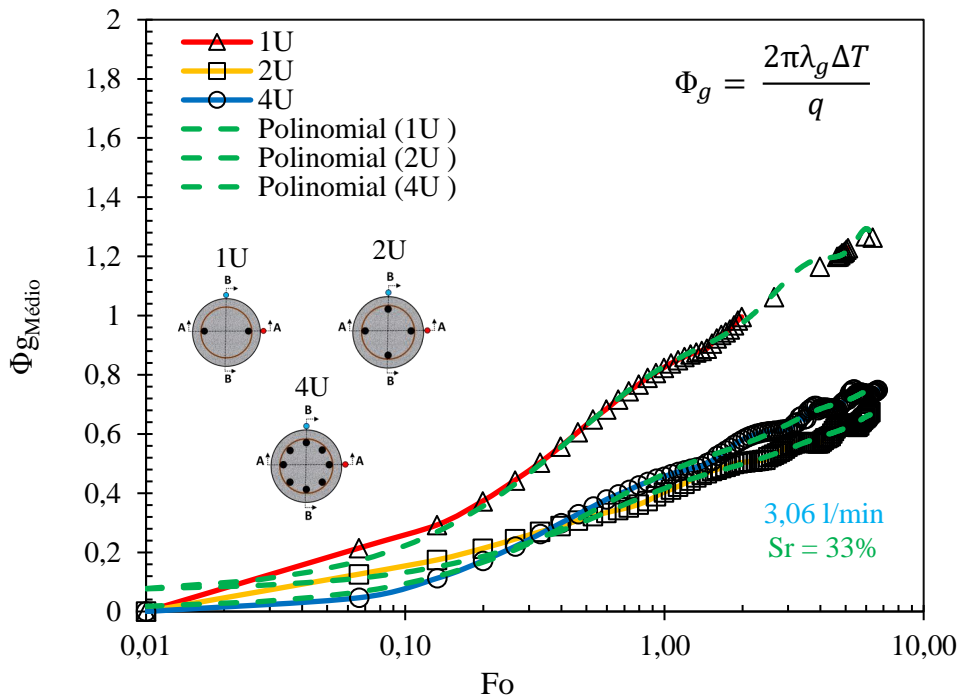
4.9 Discussão da influência de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) em relação a configuração dos tubos ativos na estaca

Na sessão anterior foram discutidos os efeitos do comportamento das curvas de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) fixando-se a configuração dos tubos ativos (1U, 2U e 4U) e variando os parâmetros de vazão (3,06; 6,16 e 12,41 l/min) e de grau de saturação (33% e 80%). Nessa sessão será discutida a influência no comportamento de resposta térmica média dos ensaios TRT variando sua configuração de tubos (1U, 2U e 4U), fixando-se a mesma vazão imposta nos tubos nos ensaios (3,06; 6,16 e 12,41 l/min) e o grau de saturação (33% e 80%). Vale ressaltar que, da mesma forma feita na sessão anterior, as discussões a seguir serão realizadas sobre o ponto de vista de abatimento e efeitos de não linearidade das curvas de resposta térmica média.

Nas Figuras 4.35 (a) e (b), mostram-se a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) referente aos ensaios TRT para a vazão 3,06 l/min, para as configurações configuração 1U, 2U e 4U na condição saturada (Figuras 4.35(a)) e na condição não saturada (Figuras 4.35(b)). Observou-se que o abatimento das curvas de resposta térmica média aumentou na medida que se aumentou o número de tubos ativos. Tal efeito pode ser observado tanto na condição saturada (Figuras 4.35(a)), quanto na condição não saturada (Figuras 4.35(b)). Isso se deu, pois, por definição, com o aumento do número de tubos ativos, sobre a mesma vazão, a troca de calor por metro (q) aumenta em função do comprimento de tubos, como o calor trocado por metro de estaca (q) é inversamente proporcional a resposta térmica, maior foi o abatimento da curva. Ademais, observou-se também que para a condição não saturada (Figura 4.35(b)) não houve diferença de abatimento das curvas na configuração 2U e 4U.



(a)



(b)

Figura 4.35 – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 3,06 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente.

Na Figura 4.36 mostra-se uma visão geral da comparação entre o comportamento de resposta térmica média ($\Phi_{g\text{Média}}$) de todos os ensaios realizados na condição para vazão de 3,06 l/min, para as configurações 1U, 2U e 4U, na condição saturada ($Sr = 80\%$) e não saturada ($Sr = 33\%$), obtidos por meio da sobreposição das curvas de resposta térmica média da Figura 4.35(a) e (b). Observou-se que os ensaios na vazão 3,06 l/min na condição não saturada

apresentaram um maior abatimento nas curvas de resposta térmica média, para todas as configurações quando comparado com a condição saturada. Observou-se também que os efeitos de não linearidade diminuíram com a redução do grau de saturação.

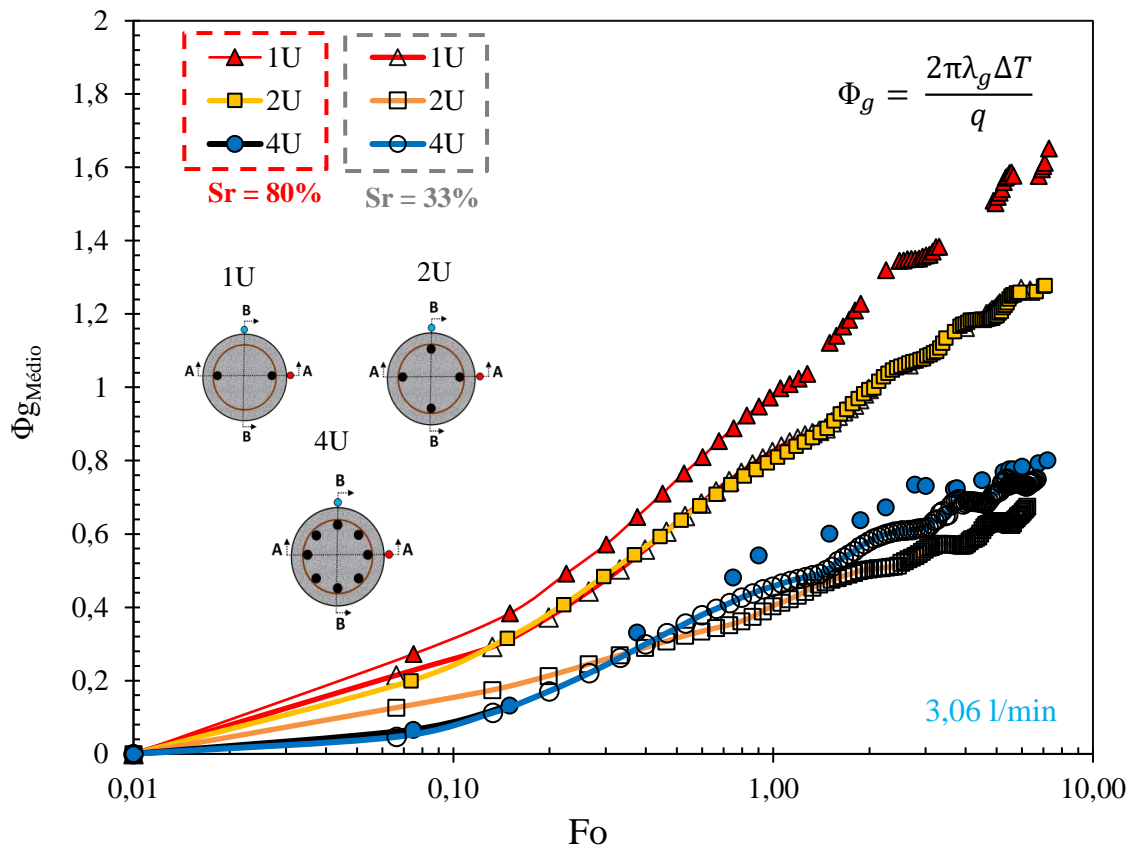


Figura 4.36 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{gMédia}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 3,06 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%).

Continuando as análises, nas Figuras 4.37 (a) e (b), mostram-se a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) referente aos ensaios TRT para a vazão 6,16 l/min, para as configurações configuração 1U e 2U na condição saturada (Figuras 4.37(a)) e os ensaios 1U, 2U e 4U na condição não saturada (Figuras 4.37(b)). Vale ressaltar que, por motivos técnicos, não foi possível realizar o ensaio na configuração 4U, vazão 6,16 l/min, para a condição saturada (4UQ6S80).

Observou-se que o abatimento das curvas de resposta térmica média aumentou na medida que aumentou o número de tubos ativos. Tal efeito pode ser observado tanto na condição saturada (Figuras 4.37(a)), quanto na condição não saturada (Figuras 4.37(b)). No entanto, o ensaio 1U na condição não saturada ($Sr = 33\%$) apresentou um maior abatimento em

relação as configurações 2U e 4U. Isso se deu devido ao comportamento atípico do ensaio já discutido anteriormente, que apresentou uma alta quantidade de calor trocado por metro de estaca (q), que contribuiu em um maior abatimento da curva de resposta térmica média em relação as demais configurações.

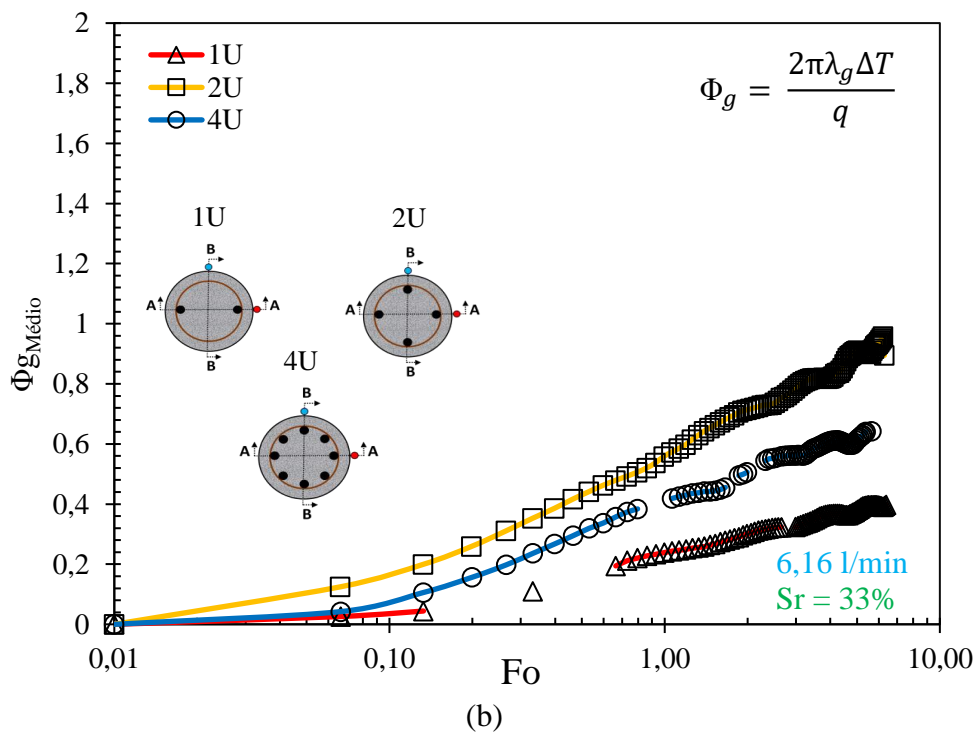
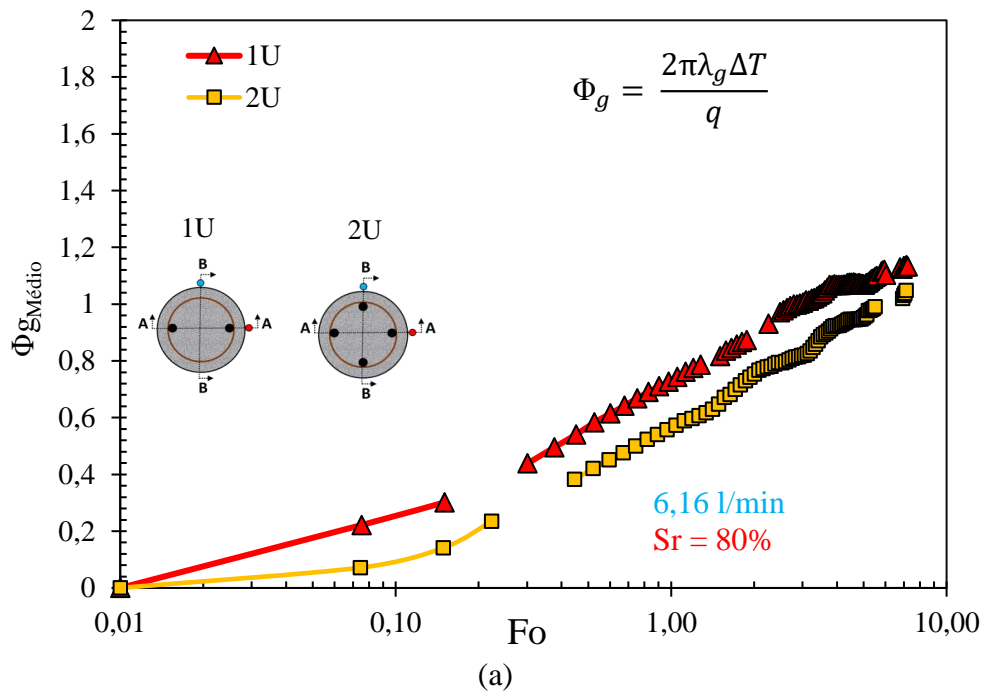


Figura 4.37 – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 6,16 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente.

Na Figura 4.38 mostra-se uma visão geral da comparação entre o comportamento de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) de todos os ensaios realizados na condição para vazão de 3,06 l/min, para as configurações 1U, 2U e 4U, na condição saturada ($Sr = 80\%$) e não saturada ($Sr = 33\%$), obtidos por meio da sobreposição das curvas de resposta térmica média da Figura 4.37(a) e (b). Observou-se também que o abatimento da resposta térmica média para a mesma vazão (6,16 l/min) aumentou com o a diminuição do grau de saturação. Observou-se também que os efeitos de não linearidade diminuiram com a redução do grau de saturação.

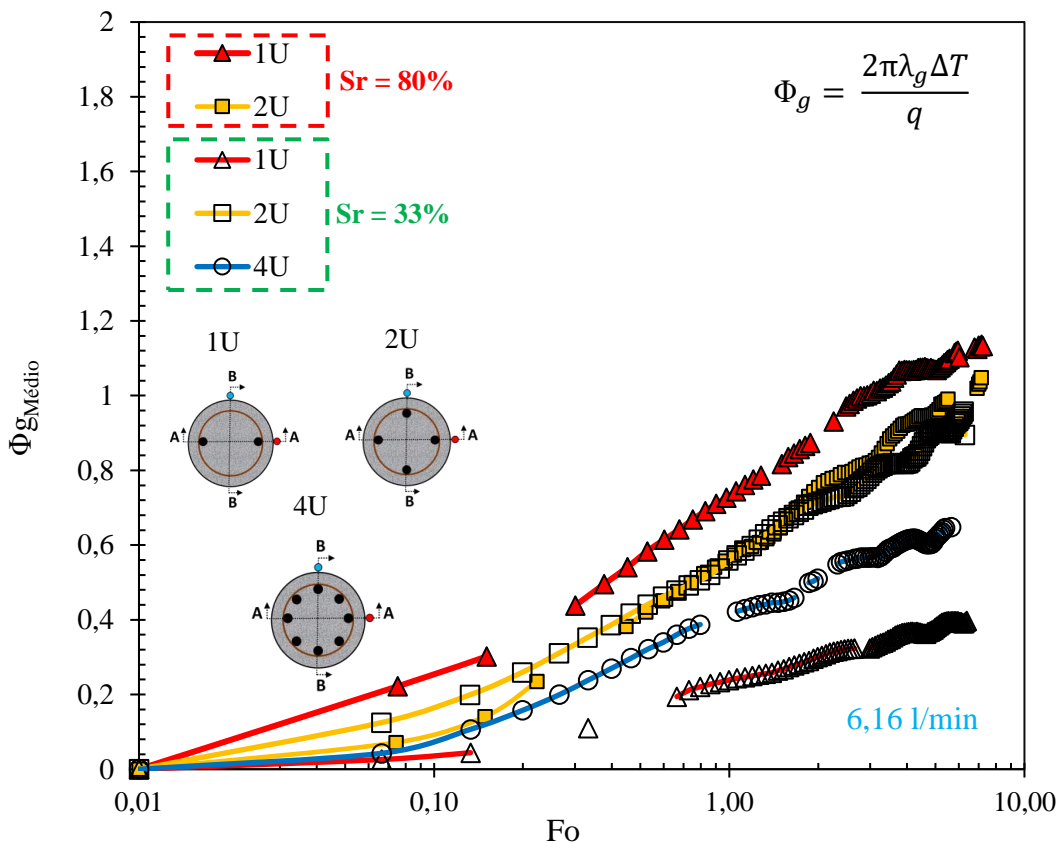


Figura 4.38 – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{gMédia}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 6,16 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%).

Finalmente, nas Figuras 4.39 (a) e (b) mostram-se a comparação do efeito da resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) referente aos ensaios TRT para a vazão 12,41 l/min, para as configurações configuração 1U e 2U na condição saturada (Figuras 4.38(a)) e os ensaios 1U, 2U e 4U na condição não saturada (Figuras 4.39(b)). Observa-se que não houve variações significativas do abatimento das curvas de resposta térmica média, assim como não foi observado uma baixa não linearidade das curvas, quando se variou o número de tubos ativos,

tanto na condição saturada (Figuras 4.39(a)) quanto na condição não saturada (Figuras 4.39(b)). Isso mostra que em situações de altas vazões, e consequentes altos fluxos de calor por metro de estaca (q), o comportamento de resposta térmica foram semelhantes, independente da configuração de tubos ativos e do grau de saturação do solo.

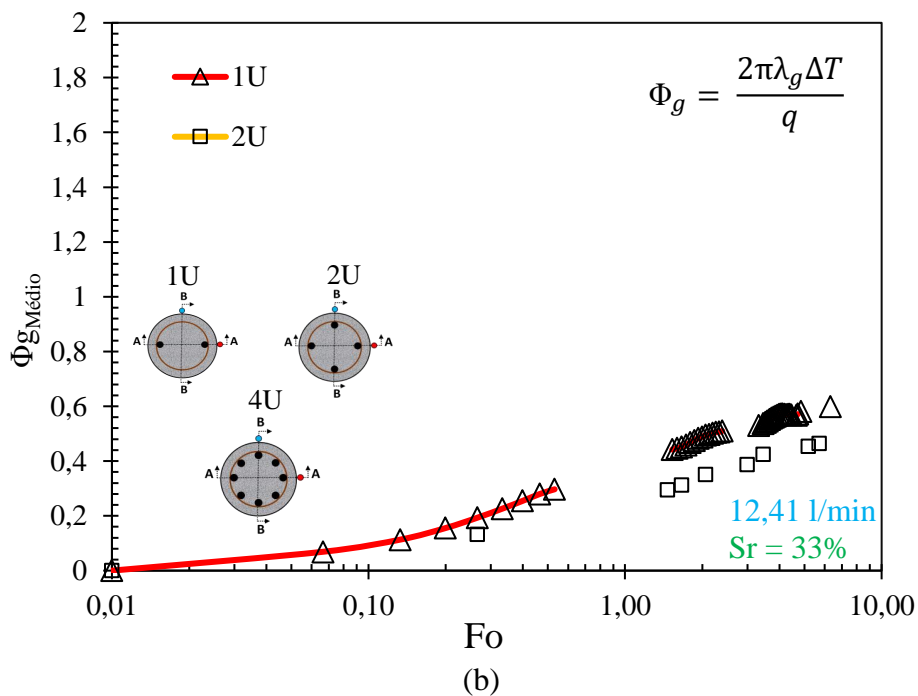
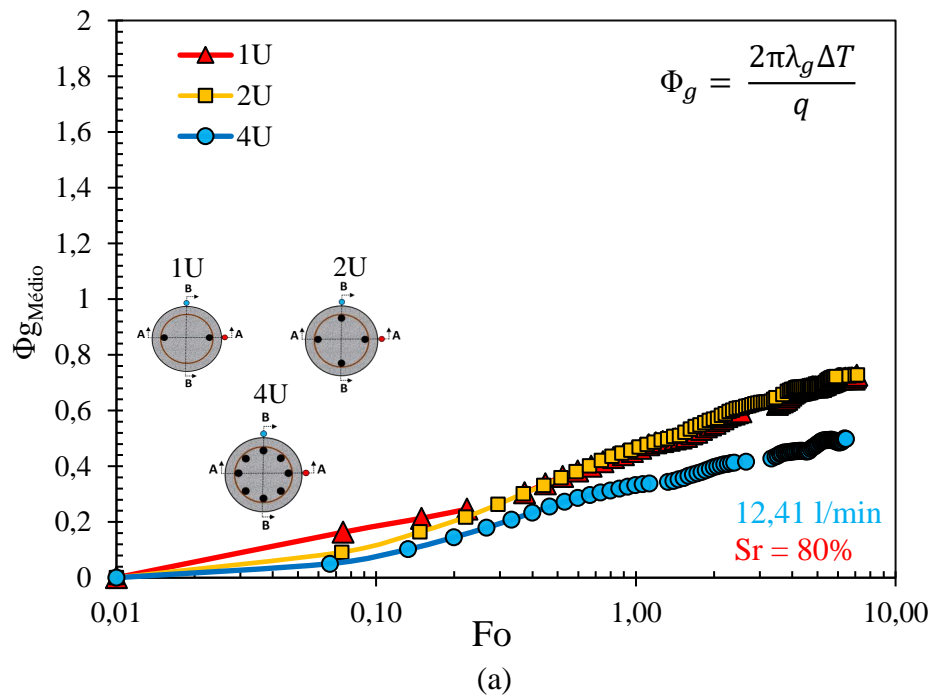


Figura 4.39 – Comparação entre as curvas de resposta térmica média dos ensaios TRT em relação a configuração (1U, 2U e 4U), para a vazão de 12,41 l/min na condição saturada (a) e não saturada (b) dos protótipos de estaca trocadora de calor para as configurações 1U, 2U e 4U respectivamente.

Nesse sentido, o efeito de semelhança de comportamento de resposta térmica média ($\Phi_{gMédia}$) pode ser melhor visualizada na Figura 4.40, na qual mostra a sobreposição de todos os ensaios para a vazão 12,41 l/min, para as condições saturada ($Sr = 80\%$) e não saturada ($Sr = 33\%$) para as configurações 1U, 2U e 4U.

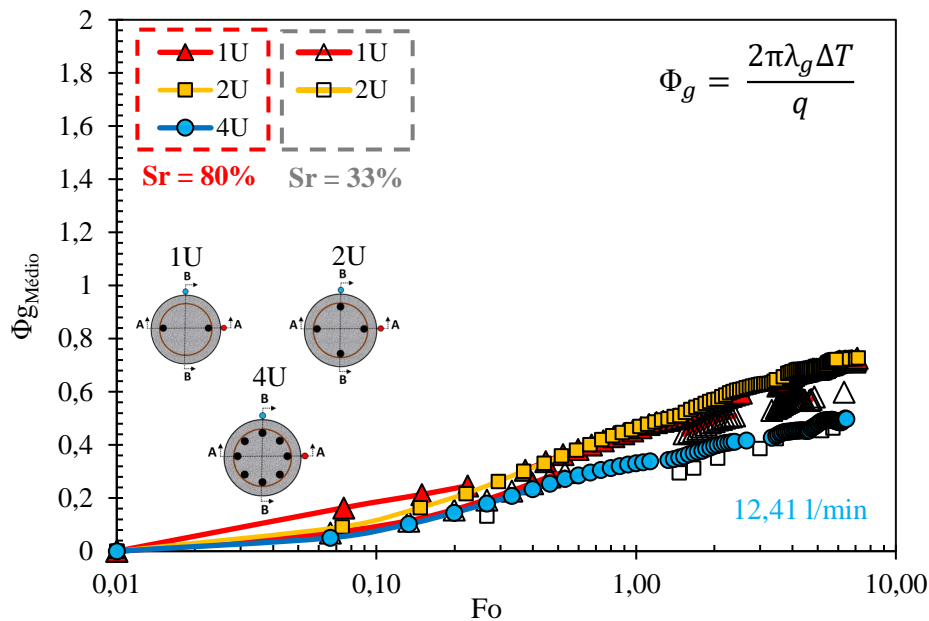


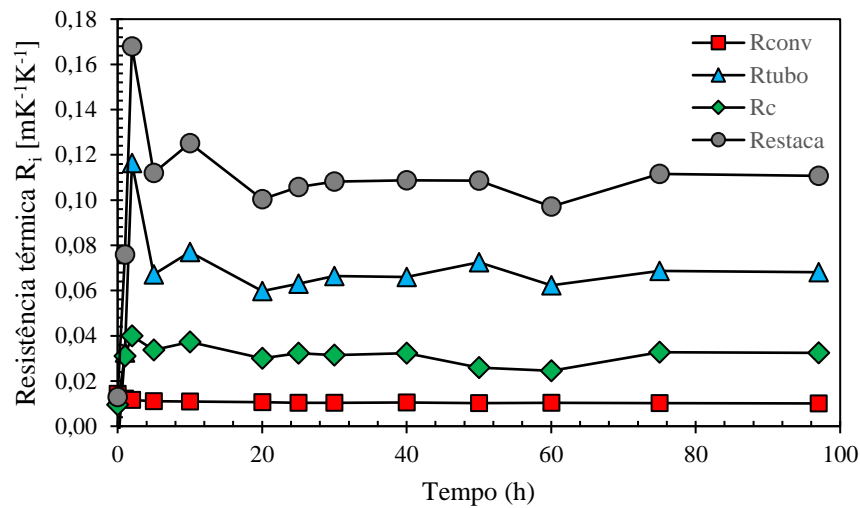
Figura 4.40. – Comparativo geral de respostas térmicas média ($\Phi_{gMédia}$) em função do tempo adimensional (Fo) referente a todos os ensaios TRT para vazão de 3,06 l/min variando a configuração de tubos ativos (1U, 2U e 4U) e o grau de saturação (33% e 80%).

4.10 Discussão da variação e da resistência térmica média da estaca em relação a configuração de tubos

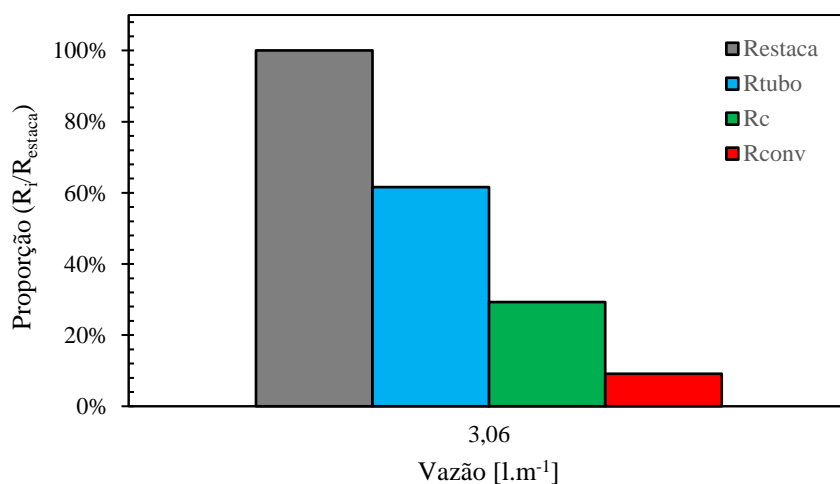
A instrumentação aplicada nessa tese possibilitou observar os ensaios TRT sobre o ponto de vista de resistência térmica em todas as seções atuantes dos materiais envolvidos nos protótipos de estacas trocadoras de calor. Nessa sessão objetiva-se em observar e discutir, o comportamento da variação das resistências térmicas de: convecção (R_{conv}), tubo (R_{tubo}), cobrimento de concreto (R_{conc}) e por indução simples, a resistência da estaca, todos em função da configuração 1U, 2U e 4U, da vazão da água nos tubos e das condições de saturação (80% e 33%).

A Figura 4.41 (a) mostra, respectivamente, a variação da resistência térmica dos principais componentes envolvidos na troca de calor referente ao ensaio TRT - 1UQ3S80.

Observou-se que houve estabilização das variações de resistência térmica a partir do instante de tempo de 20 horas de ensaio, fenômeno interessante uma vez que se esperaria estabilização das variações de resistência térmica somente a partir de 60 h de ensaio, instante de tempo percebido como início do regime estacionário. Observa-se também, por meio da Figura 4.41 (b), que, para o ensaio em questão, a resistência térmica dos tubos (R_{tubo}) foram responsáveis por cerca de 61,6% da resistência térmica da estaca (R_{estaca}), o cobrimento de concreto (R_c) foi responsável por cerca de 29,3% da resistência térmica da estaca e a resistência térmica convectiva (R_{conv}) exerceu uma influência de cerca de 9,1% da resistência da estaca. É interessante observar o quanto os tubos de PEAD exercem influência na resistência total da estaca.



(a)



(b)

Figura 4.41 – (a) Distribuição da resistência térmica (R_i) em função do tempo para os materiais envolvidos no protótipo de estaca trocadora de calor para o ensaio TRT 1UQ3S80 e (b) a distribuição relativa das contribuições das resistências térmicas de cada componente da estaca trocadora de calor.

Nesse sentido, nas Figuras 4.42(a), (b) e (c) mostram-se, de forma resumida, o comparativo da resistência térmica relativa (R_i/R_{estaca}) dos principais trechos atuantes no ensaio TRT (R_{conv} , R_{tubo} , R_c) para as configurações de tubos ativos 1U (Figura 4.42(a)), 2U ((Figura 4.42(b)) e 4U ((Figura 4.42(c))), variando a vazão (3,06; 6,14 e 12,41 l/min), na condição saturada ($Sr = 80\%$) e não saturada ($Sr = 33\%$). Vale relembrar, conforme exposto na revisão bibliográfica dessa tese, que, por definição, a resistência térmica da estaca é dada pela soma das resistências do da convecção interna no interior do tubo, a resistência do tubo e a resistência do cobrimento de concreto ($R_{estaca} = R_{conv} + R_{tubo} + R_c$).

Não obstante, por meio das medições de temperatura no espaço e tempo, na distância radial da câmara térmica, foi possível calcular e observar, em cada trecho atuante na distância radial de resistência atuante durante o ensaio TRT (R_{conv} , R_{tubo} , R_c , R_{estaca}). Na qual, de forma resumida, a Figura 4.42 (a), (b) e (c) mostra um comparativo de resistência térmica de todos os ensaios TRT realizados nessa tese, para a configuração 1U (Figura 4.42(a)), 2U (Figura 4.42(b)) e 4U(Figura4.42(c)), variando a vazão (3,06; 6,14 e 12,41 l/min) e o grau de saturação ($Sr = 80\%$ e $Sr = 33\%$).

Pode-se observar, de modo geral, que na medida que se aumentou o número de tubos ativos, houve uma tendencia de diminuição da resistência térmica da estaca em todos os ensaios. Essa observação é mais evidente quando se compara as configurações 1U e 2U (Figuras 4.42 (a) e (b)), no entanto, quando se compara as configurações 2U e 4U (Figuras 4.42 (b) e (c)), percebe-se que houve uma estabilização na perda de resistência térmica, o que mostra que o aumento do número de tubos ativos de 2U para 4U não exerceu influência na perda de resistência térmica da estaca.

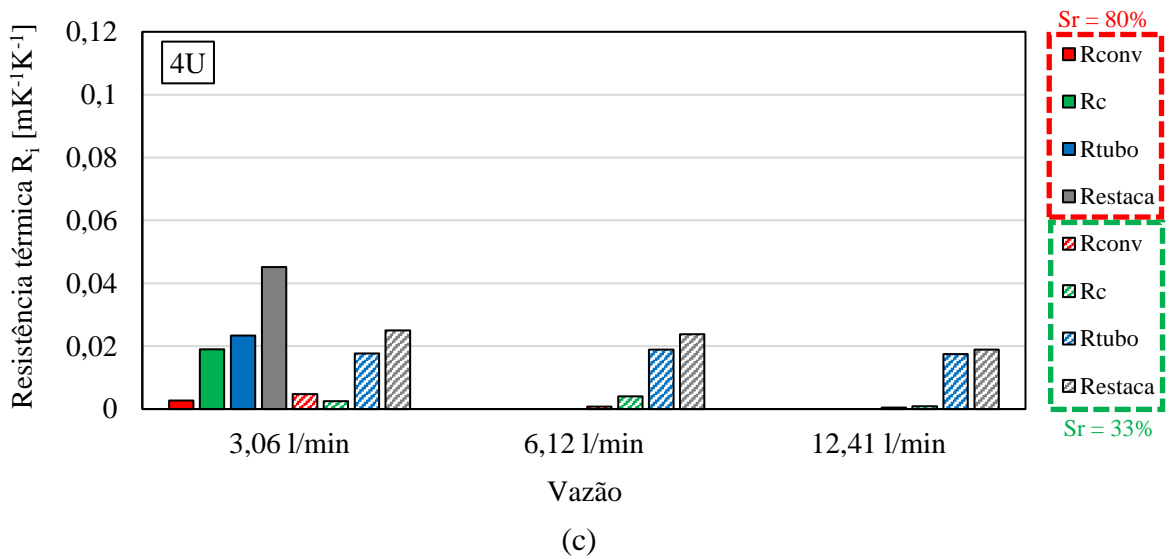
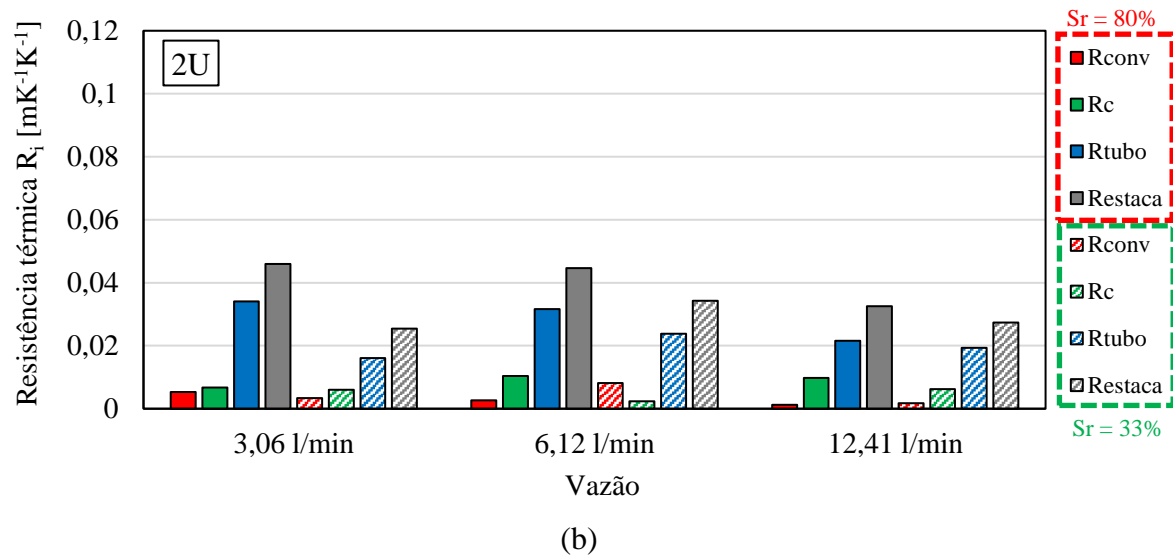
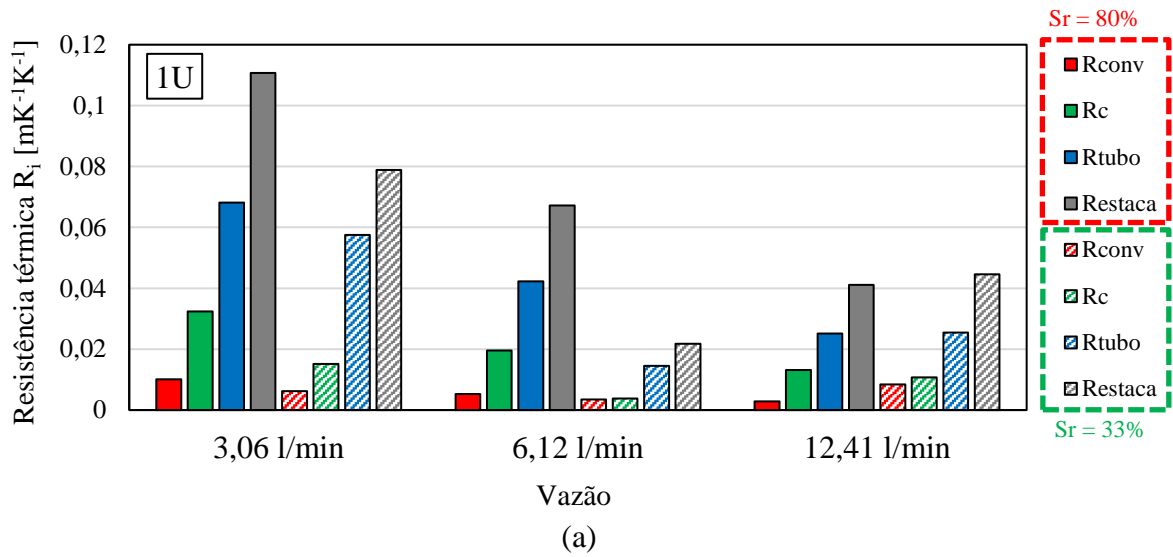


Figura 4.42 – Comparativo da variação das resistências térmicas (R_{conv} , R_{tubo} , R_c , R_{estaca} , R_{solo} e R_{total}) referente aos ensaios TRT variando a vazão (3,06; 6,12 e 12,41 l/min) na condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$) para a configuração de tubos ativos 1U(a), 2U (b) e 4U (c).

De modo geral, foi possível ranquear a influência de cada resistência térmica em relação a resistência da estaca de cada ensaio TRT realizado. Nesse sentido, na Figura 4.43(a), (b) e (c) observa-se, de modo geral que a resistência relativa dos tubos aumentou na medida que aumentou o número de tubos ativos nas estacas, é possível observar isso tanto na condição saturada, quanto na condição não saturada.

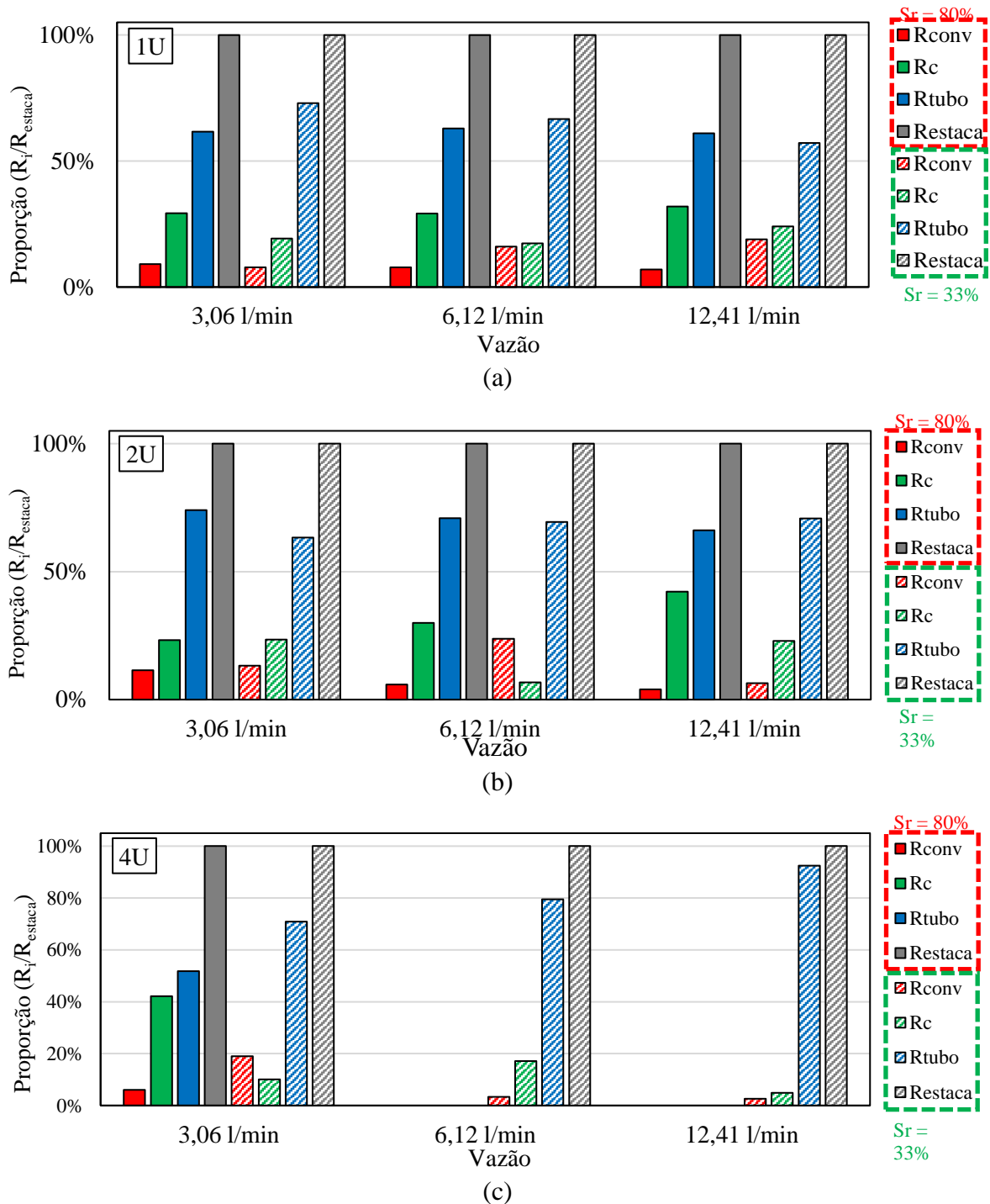


Figura 4.43 – Comparativo da resistência térmica relativa (R_i/R_{estaca}) dos principais trechos presentes nos ensaios TRT realizados nessa tese, para a configuração 1U (a), 2U (b) e 4U (b).

4.11 Medição da variação térmica do perfil de solo estudado

Durante todos os ensaios realizados na câmara térmica, buscou-se realizar os ensaios TRT dentro uma faixa de amplitudes térmicas equivalente ao que ocorreria em campo. Para isso foi executado um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, de 12m de profundidade, na qual foram feitos monitoramentos da temperatura no perfil de solo com sensores instalados a cada 3m de profundidade, ao longo de alguns dias do ano. O objetivo da execução do poço se deu em avaliar a influência da temperatura externa sobre o subsolo e o quanto a temperatura iria variar ao longo do ano e da profundidade. Nesse sentido, buscou-se representar, com o isolamento térmico da câmara, amplitudes térmicas semelhantes ao que ocorreu no poço. Vale aqui ressaltar, que devido a baixa qualidade nos sensores instalados no poço, houve inúmeras dificuldades de se realizar as medições de temperatura, incluindo problemas com aterramento e quedas de energia no local instalado, o que levou a perda de muitos dados de medições térmicas no poço ao longo do dia, exatamente às 7 horas, as 14 horas e por fim as 21 horas, na qual obteve-se a temperatura média diária para cada profundidade do poço.

Sendo assim, na Figura 4.44, mostra-se as medições da temperatura média diária do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, ao longo da profundidade para apenas alguns dias dos meses de agosto e setembro de 2020. Observou-se que, a partir de seis metros de profundidade as temperaturas medidas permanecem praticamente constantes. Isso se deu devido a influência do prédio, como cobertura da superficial, que agiu como isolante térmico para o subsolo, na qual amorteceu as amplitudes térmicas ao longo da profundidade.

Nesse sentido, observou-se que as temperaturas do subsolo, a partir de 3m de profundidade mantiveram-se entre 23 e 25°C, variação de apenas 2°C. Já na superfície (cota 2), região interna do prédio, foram observadas amplitudes térmicas diárias média de até 5,5°C. Para a cota zero (0 m) já abaixo do contrapiso do prédio, foram observadas amplitudes térmicas menores na ordem de 3°C. A partir da cota -2 m no solo, foram observadas amplitudes térmicas inferiores a 1°C. Tal resultado mostrou o forte impacto do isolamento térmico do prédio sobre o subsolo.

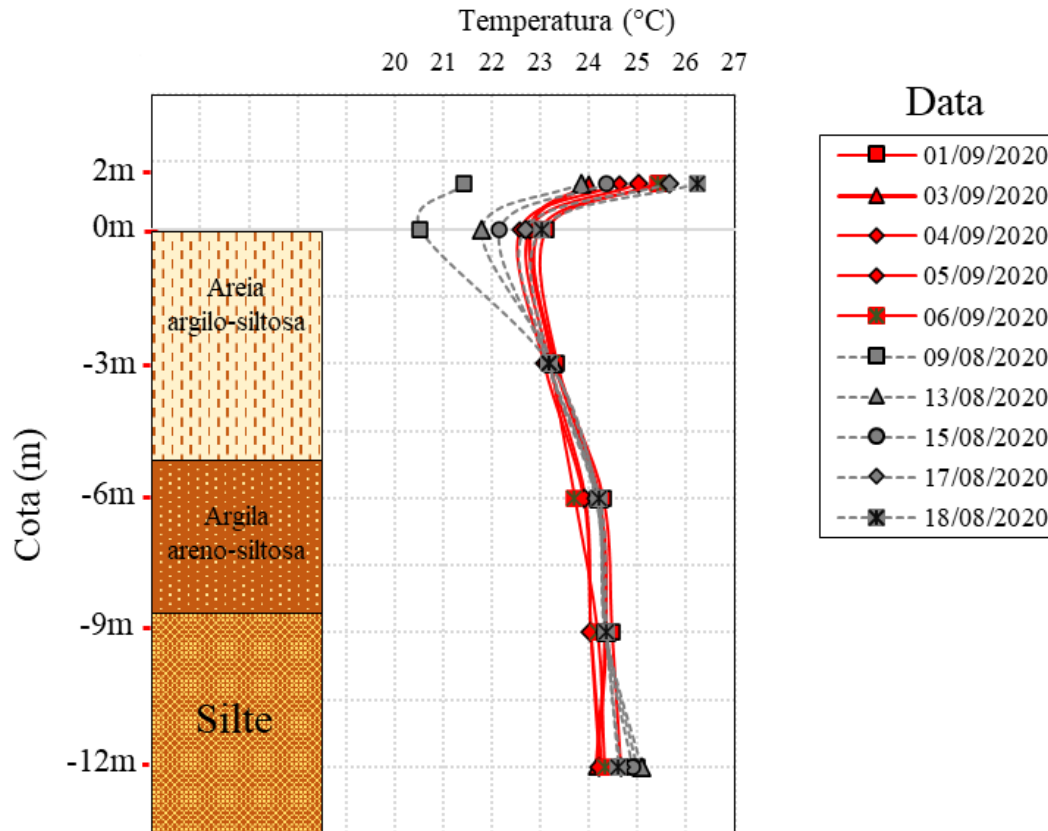


Figura 4.44 – Medição da temperatura do subsolo com profundidade para 10 dias, nos meses de agosto e setembro de 2020.

Não obstante, é válido destacar que a maioria dos ensaios TRT convencionais em estacas são realizados em superfície descoberta, tal situação pode mascarar os resultados reais de operação de uma estaca trocadora de calor, uma vez que em condições normais, a edificação funciona como um isolante térmico do subsolo como é mostrado na Figura 3.48. Ademais, deve-se recomendar que ensaios de resposta térmica para estacas trocadoras de calor devam ser realizados sobre condições de superfície coberta, a fim de buscar representar de forma mais realista os resultados de condutividade térmica do solo.

Por fim, é válido destacar que durante a realização da campanha dos ensaios TRT, as medições de temperatura inicial do solo apresentara temperaturas semelhantes as temperaturas medidas no poço de monitoramento de temperatura do subsolo, para profundidades abaixo de 3 metros, com pode ser observado nas medições de temperaturas no instante 0h dos mapas bidimensionais das Figuras 4.26 e 4.26. No entanto alguns ensaios apresentaram medições de temperaturas iniciais inferiores e outros superiores, porém com temperaturas variando de uma

média de 21°C à 27 °C, valores não tão razoáveis, porém dentro da faixa de amplitude térmica do poço estudado.

4.12 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram discutidos os principais resultados obtidos nesta pesquisa. Apresentou-se os resultados da caracterização geotécnica do solo laterítico do antigo campo experimental do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB. Foram discutidas as principais propriedades térmicas do solo em questão, sobre o ponto de vista da condutividade térmica e da capacidade térmica, ambos em função do grau de saturação relativa e da massa específica aparente seca.

Nesse sentido, tais resultados foram comparados com os principais modelos de previsão de condutividade térmica dos solos. De forma geral, utilizou-se os métodos de Kersten (1949), Makowski (1956), Johansen (1977), Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007). Foram calibrados, parâmetros de ajustes para os métodos Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007), adaptados para o solo tropical em questão. Não obstante, foi proposto um modelo por ajuste matemático, de previsão da condutividade térmica para o solo tropical na condição não saturada, a partir dos parâmetros geotécnicos de graus de saturação relativa e peso específico aparente seco.

Foram apresentados e discutidos também a influência da vazão e do grau de saturação no comportamento de transferência térmica de protótipos de estacas trocadoras de calor de forma paramétrica, na qual apresentou-se as Funções G. Todos submetidos a duas condições geotécnicas de grau de saturação ($S_r = 0,33$ e $S_r = 0,80$), nas configurações 1U, 2U e 4U, submetidos a três tipos de vazões. Ambas variações, também foram avaliados sobre o ponto de vista de resistência térmica do sistema em relação a configuração de tubos.

Por fim, foram analisados também a variação térmica sazonal de um perfil de solo, por meio de um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, de 12m de profundidade sobre uma superfície coberta, afim de avaliar a influência do isolamento térmico da edificação sobre o subsolo.

Por fim, foram observados a influência do isolamento térmico que a edificação exerce sobre o perfil térmico sazonal do solo na região do DF, por meio das medições de temperatura de um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, sobre superfície coberta.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este capítulo apresenta as principais observações e conclusões obtidas com a realização destes ensaios, e, também traz sugestões de temas futuros, que embora relacionados a esta pesquisa, não puderam ser desenvolvidos em sua totalidade.

5.1 Sumário da pesquisa

Portanto, em suma, pode-se observar que esse trabalho se destinou em analisar de forma paramétrica o comportamento térmico de protótipos de estaca trocadora de calor, executado em solo tropical não saturado na condição compactada, na faixa de 1m de estaca em ambiente controlado de laboratório. Foi realizada uma ampla campanha experimental de ensaios de resposta térmica em protótipos de estacas trocadoras de calor na câmara térmica, na qual foi analisado o comportamento de resposta térmica do sistema de forma adimensional (Funções G) variados os parâmetros de configuração de tubos, vazão de circulação do fluido interno e grau de saturação relativa do solo em condições controladas de laboratório. Devido ao baixo comprimento de estaca (1m), foi possível observar uma baixa variação de temperatura entre a entrada e a saída da tubulação da estaca.

Foi mostrado também, de forma detalhada, a construção e o desenvolvimento do equipamento de ensaio TRT de baixo custo relativo, adaptada para condições de laboratório, na qual foram mostrados os principais desafios construtivos e vantagens de controle utilizando a plataforma Arduíno, bem como os principais materiais e componentes utilizados na construção do equipamento de ensaio TRT. Além disso, foi necessário, quando possível, realizar a aferição da calibração do sensor de vazão, devido as possibilidades de danos da turbina ao longo dos ensaios. A calibração do mesmo foi realizada com fluxo de água submetida as mesmas temperaturas médias de ensaio.

Ademais, mostrou-se também as principais etapas da metodologia de compactação do solo na câmara térmica, na qual foi realizado o controle padronizado de umidade uniforme e peso específico aparente seco por camada. Pôde-se obter um eficiente controle de compactação do solo.

Os ensaios de condutividade térmica se mostraram bastante eficientes e fáceis de se realizar, respeitando-se o tempo de ensaio para estabilização térmica entre a agulha e o corpo

de prova, bem como a garantia de isolamento térmico do sistema e o controle de temperatura do ambiente de ensaio. Estas são observações imprescindíveis para a garantia da qualidade de obtenção dos resultados. Ademais, a metodologia e a qualidade do controle de compactação dos corpos de prova são também fatores importantes, uma vez que foi necessário garantir homogeneidade estrutural dos CP's. Além disso, apesar de não ser ideal, a metodologia de secagem parcial dos corpos de prova na estufa se mostrou eficaz para a aplicação do ensaio de condutividade térmica, desde que sejam respeitados os períodos de estabilização térmica e do gradiente de umidade na massa do corpo de prova. Para isso é necessário se esperar um período de 4 horas de estabilização, após retirada das amostras da estufa;

Esta tese mostrou também importantes resultados quanto a utilização mais acurada dos métodos de previsão de condutividade térmica para solo laterítico típico do DF, na qual apresentou um melhoramento dos parâmetros de ajuste de condutividade térmica dos modelos de Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007). Pôde-se observar também a ineficiência dos modelos de Johansen (1977) e dos demais modelos supracitados, quando estes adotam parâmetros propostos na bibliografia vigente. Nesse sentido, foi proposto um modelo por ajuste matemático, de alta acurácia, para o solo laterítico estudado em questão. Tais resultados contribuirão de grande valia para trabalhos futuros de desenvolvimento de modelos constitutivos de solos lateríticos na condição não saturada.

Além disso, foram medidas e analisadas as temperaturas sazonais diárias de um poço de monitoramento de temperatura do subsolo, sobre superfície coberta no DF. Tais medições contribuíram de forma significativa para a observação do isolamento térmico que a edificação exerce sobre a superfície do solo. O que pode não representar completamente a realidade de medições de ensaios TRT em campo, já que a grande maioria dos ensaios TRT em campo são realizados em superfície descoberta.

Por fim, buscou-se nesse trabalho a conjugação de importantes áreas da engenharia, como a geotecnia, uso de trocadores de calor e a eletrônica no desenvolvimento do equipamento de ensaio TRT. A aplicação deste trabalho contribui no entendimento e aplicação de problemas concretos na geotecnia aplicado a solos não saturados. A seguir, resumem-se as principais conclusões dos resultados obtidos e documentados neste trabalho.

5.2 Conclusões

Por meio do estudo desenvolvido nesta tese e a partir das observações gerais obtidas acima, é possível levantar considerações e concluir os seguintes tópicos em questão.

Quanto ao solo laterítico do antigo campo experimental e da metodologia dos ensaios de condutividade térmica em laboratório, pode-se concluir que:

- O solo do Antigo campo experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPG-UnB) é muito bem caracterizado, tal situação se dá em consequência das diversas pesquisas realizadas utilizando este material, como pode ser observado nos trabalhos de Guimarães (2002), Silva (2007), Silva (2009), Fuji (2012), Restrepo (2010), Borges (2014) e Queiroz (2015);
- Ensaios de condutividade térmica com o equipamento de medição de propriedades térmicas de solos e rochas - KD2 Pro, é um dos métodos de ensaios laboratoriais mais utilizados em solos, atualmente, ademais, este fornece resultados com acurácia média de 10%;
- Apesar de pequenos, a utilização de corpos de prova cilíndricos 5cmx10cm atendem as norma de ensaio de condutividade térmica (ASTM D5334-08/2008);
- A metodologia de compactação e isolamento para a realização dos ensaios laboratoriais de condutividade térmica, com o KD2 Pro se mostraram eficazes na estabilização térmica dos corpos de prova durante a aplicação dos ensaios.

Quanto ao equipamento de ensaios TRT e os protótipos de estaca térmica podem-se concluir que:

- O equipamento de ensaios TRT de baixo custo desenvolvida nesta tese se mostrou eficiente durante a realização de todos os ensaios. Porém, é necessário observar melhor as limitações da plataforma Arduino, tanto em termos de proteção elétrica, em blindagem eletrostática, quanto em termos de memória interna na obtenção dos dados;
- Apesar dos esforços de isolamento do equipamento de ensaio TRT, ainda assim foi possível observar interferência de fuga de calor, porém não houve influência a ponto de comprometer totalmente as análises dos resultados;

- O inversor de frequência no controle de vazão dos ensaios TRT mostrou-se eficiente para a realização dos ensaios em laboratório e permitiu fazer ajustes finos e precisos no controle da vazão da água na tubulação dos protótipos;
- A aplicação do variador de tensão se mostrou eficiente para a realização do controle de potência elétrica injetada por meio da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT. Esta possibilidade facilita um melhor controle e uniformidade de injeção da potência elétrica sobre o sistema, quando se deseja utilizar o equipamento de ensaios TRT em ensaios de menores escalas em ambiente controlado de laboratório;
- O sistema de segurança e proteção elétrica, de baixo custo, foi de extremamente importante para um o equipamento de ensaios TRT, uma vez que protegeu o equipamento de toda e qualquer flutuação e picos da rede elétrica durante os ensaios, na qual evitou-se superaquecimento da resistência elétrica do equipamento de ensaio TRT, em caso de falhas de circulação da água e consequentemente acidentes;
- O uso dos sensores de vazão de baixo custo se mostraram bastante problemáticos durante a realização dos ensaios, sendo necessário se realizar aferição a cada ensaio realizado, uma vez que o sistema de turbina pode apresentar defeitos mecânicos. Sendo assim, não é recomendado o uso de sensores de turbina, que funcionem por efeito *Hall*. Sensores de vazão que utilizam o sistema de ultrassom, devem ser mais eficientes para essa finalidade;
- É possível estimar a capacidade térmica de um solo por meio do ensaio de Fluorescência de raio X (FRX) do mesmo. Neste caso, deve-se utilizar a média ponderada das capacidades térmicas das proporções dos óxidos presentes;
- A metodologia de compactação do solo na câmara mostrou-se eficiente em homogeneidade de peso específico aparente seco e umidade ao longo de todas as camadas executadas, apesar da dificuldade de se aplicar muitos golpes necessários para atingir este objetivo;
- A metodologia de escolha de configuração geral dos tubos, no protótipo, permitiu realizar todos os ensaios térmicos em todas as configurações possíveis sem precisar mudar as condições estruturais geotécnicas do solo.

Quanto a instrumentação e isolamento na câmara térmica, pode-se concluir que:

- Apesar do esforço de inserir sensores de temperatura embebidos com pasta térmica, não foi possível observar diferenças significativas de temperatura para se avaliar uma possível resistência térmica de interface;

- O uso de pasta térmica não se mostrou eficiente na obtenção da resistência térmica de interface. Isso se deu, provavelmente, devido à baixa variação térmica entre os sensores, que apresentou uma diferença térmica entre eles na ordem da magnitude do erro do sensor. É necessário utilizar sensores com maior precisão e acurácia caso se queiram avaliar as resistências de interfaces tubo/estaca e estaca/solo;
- Para realização de ensaios TRT com baixos comprimentos de tubos, é necessário a utilização de sensores de temperatura com maior acurácia e precisão, uma vez que houve uma baixa diferença térmica entre a entrada e saída da água na tubulação. Apesar de baixa, foi possível observar a diferença térmica entre os sensores de entrada e saída;
- As interferências térmicas ocorridas na câmara durante o ensaio não foram suficientemente significativas a ponto de atrapalhar as análises dos resultados.

Quanto as observações de temperatura do poço de monitoramento de temperatura do subsolo, pode-se concluir que:

- Ensaios TRT em estacas trocadoras de calor, devem ser avaliados em superfícies cobertas, uma vez que representam melhor a situação real de operação do sistema. Tal situação é necessário, uma vez que a incidência solar afeta de forma efetiva, a temperatura dos primeiros metros de profundidade do subsolo.

Quanto as propriedades térmicas do solo laterítico observado, pode-se concluir que:

- A condutividade térmica do solo laterítico varia em função do peso específico aparente seco e do grau de saturação;
- O ajuste polinomial de superfície, da condutividade térmica do solo laterítico de Brasília, se mostrou bastante preciso, para as principais condições geotécnicas reais;
- A capacidade térmica varia de forma direta e linear, em função do peso específico aparente seco e do grau de saturação do solo;
- O ajuste polinomial de superfície, da capacidade térmica do solo estudado, apresentou uma boa precisão, principalmente em função da umidade e do teor de umidade volumétrica. Porém apresentou uma baixa correlação quanto ao grau de saturação;
- A difusividade térmica do solo aumenta em função do peso específico aparente seco, e apresenta inicialmente um aumento nos estágios iniciais de grau de saturação, e atinge um patamar máximo em torno de 60% de saturação, diminuindo após esta etapa, a partir de 60%;

- Valores de difusividade térmica encontrados nesta pesquisa, se mostraram inferiores aos valores comuns de difusividade, para solos convencionais, na ordem de 10 vezes menores;
- O solo laterítico do antigo campo experimental apresentou elevados índices de difusividade térmica, e isso se dá devido à elevada concentração de óxido de ferro em sua microestrutura, porém é necessário aprofundar investigações acerca desse assunto;
- Com estimativas mais precisas da difusividade térmica do solo estudado nesta tese, é possível realizar cálculos mais acurados da estimativa de tempo de ensaio TRT para um solo na região de Brasília DF;
- Apesar da simplicidade de aplicação do modelo de Johansen (1977), e da vasta utilização do mesmo em previsões de condutividade térmica de solos, este não se mostrou como um bom método a ser utilizado para se prever a condutividade térmica do solo laterítico de Brasília de forma acurada, podendo ser recomendado somente a estimativas grosseiras de ordem de valor, e para solos com grau de saturação acima de 20%;
- Os parâmetros de ajuste (κ), do modelo de Coté & Konrad (2005), tanto para solos arenosos, siltosos e argilosos, não se mostraram efetivos para aplicação dele no caso do solo laterítico de Brasília. No entanto, foi proposto um novo parâmetro de calibração do modelo aplicado para o solo em questão, na qual apresentaram erros quadráticos médios aceitáveis;
- Para o modelo de Coté & Konrad (2005) é recomendado utilizar o parâmetro de ajuste (κ) igual a 2,5, para utilização do solo em questão;
- Os parâmetros de ajuste (α), propostos do modelo de Lu *et al.* (2007) não apresentam uma boa convergência para o solo em questão. No entanto, também foi proposto um novo parâmetro de calibração do modelo aplicado para o solo laterítico de Brasília, na qual apresentaram erros quadráticos médios aceitáveis, para a utilização do modelo;
- Para utilização do modelo de Lu *et al.* (2007) no solo laterítico de Brasília, é recomendado utilizar o parâmetro de ajuste (α) igual a 0,87, para utilização do solo em questão. No entanto, os dados não convergem para pesos específicos aparente seco acima de 1,5g/cm³;
- O modelo de ajuste matemático da condutividade térmica do solo laterítico de Brasília em função do grau de saturação apresentou um melhor ajuste da curva em relação aos demais métodos Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007);
- Os modelos de previsão de condutividade térmica propostos por Johansen (1977), Coté & Konrad (2005) e Lu *et al.* (2007), apresentam consideráveis discrepâncias, na medida que

aumenta o peso específico do solo, perdendo confiabilidade em pesos específicos aparente seco acima de 1,5 g/cm³;

- Não houve convergência de nenhum método de previsão de condutividade térmica de solo, com os respectivos parâmetros de ajuste propostos pelos modelos da bibliografia abordada nesta tese. No entanto o modelo de ajuste matemático, bem como os parâmetros propostos para solos lateríticos, apresentaram uma alta convergência em relação aos valores medidos do modelo de Coté & Konrad (2005);
- O modelo de Lu *et al.* (2007), mesmo com o parâmetro de ajuste (α) igual a 0,87, apresentam alto erros quando se aumenta o peso específico aparente seco do solo. O que pode limitar o uso do modelo para pesos específicos acima de 1,5 g/cm³;
- Para estimativas precisas e acuradas da condutividade térmica do solo laterítico de Brasília, é recomendado o uso do método de ajuste matemático desenvolvido nesta tese, ou o método de Coté & Konrad (2005), com o parâmetro (κ) igual a 2,5;

Quanto as análises dos ensaios TRT na câmara térmica, pode-se concluir que:

- No regime permanente, as propriedades térmicas do solo permanecem inalteradas. Por outro lado, no regime transiente, as propriedades térmicas do solo encontram-se em estado de mudança;
- Maiores vazões, implicam em maior uniformidade da distribuição da temperatura no perímetro da face da estaca, e conseqüentemente, maior será a tendência de estabilização das propriedades térmicas da estaca e do solo, em menores tempos de ensaio;
- Apesar de implicar em maiores dificuldades de se estimar o fluxo térmico, para grandes vazões, os efeitos de não linearidades nas medições térmicas tendem a diminuir com o aumento da vazão;
- O aumento da vazão do fluido no interior dos tubos, provoca uma diminuição da resposta térmica da estaca;
- Os parâmetros de ajuste das Funções G apresentam um avanço no entendimento e comportamento da resposta térmica ao longo do ensaio TRT, em situações na qual o modelo da agulha infinita não é recomendado;
- Quanto maior o número de tubos ativos no interior da estaca menores são os efeitos de assimetria no fluxo de calor;
- A estabilização da resistência térmica na face da estaca ocorreu bem antes da estabilização total do sistema de fundação, em todos os casos;

- A configuração 2U se mostrou mais eficiente, do ponto de vista de custo benefício, uma vez que não apresentou variações significativas da perda de resistência térmica na configuração 4U;
- Elevadas vazões apresentam menores variações de resposta térmica, menores assimetrias no fluxo térmico e menores distorções nas curvas de Função G. Isso implica em maiores aproximações da condição ideal de se aplicar o modelo da fonte linear infinita, para previsão da condutividade térmica dos solos. No entanto, a dificuldade de medições precisas de vazão impossibilitam a obtenção de dados precisos e acurados do fluxo de calor, o que limita a aplicação de TRT's em altas vazões térmicas.

5.3 Aprendizados da pesquisa

Esta sessão destina-se em apresentar os principais desafios e aprendizados que contribuíram de forma positiva e negativa ao longo dos 4 anos de pesquisa. Nesse sentido, o objetivo aqui está em auxiliar futuros pesquisadores da área com alertas, recomendações e até conselhos, a fim de evitar que haja repetição dos mesmos problemas, que poderiam ter sido evitadas. A seguir será listado as principais dificuldades, problemas e prováveis erros que ocorreram ao longo dessa tese de doutorado:

- A plataforma Arduíno, apesar de ser uma plataforma relativamente fácil e de baixo custo, apresentou diversos problemas de armazenamento de memória, o que levou a necessidade de ficar sempre zerando a memória ao término de cada ensaio. Tal problema gerou algumas dificuldades na obtenção dos dados de temperatura do solo e do equipamento de ensaio TRT que dificultaram muito no processo de curadoria deles. Nesse sentido, a plataforma Arduíno não possui sistema de proteção elétrica o que levou a necessidade de substituição de cerca de 6 novos Arduinos por problemas de aterramento. Além disso, a plataforma Arduíno apresentou muitas limitações técnicas quanto a complexidade das necessidades da pesquisa, o que necessitou de um conhecimento mais técnico de eletrônica, principalmente durante o desenvolvimento do *datalogger* de 10 canais de temperatura;
- O laboratório não tinha controle de temperatura, o que dificultou em garantir que todos os ensaios, tivessem início em temperaturas diferentes, apesar da amenização do isolamento térmico da câmara térmica. Além disso, os ensaios foram desenvolvidos durante o de *lockdown*, devido a pandemia, o que dificultou o acesso ao laboratório e consequentemente a campanha de ensaios;

- Essa pesquisa foi desenvolvida sem financiamento específico de algum órgão de fomento, o que dificultou e muito a compra de alguns equipamentos e sensores mais caros, e conseqüentemente de melhor qualidade. Nesse sentido, os sensores de temperatura DS18B20, não apresentaram uma boa qualidade de isolamento contra água, apesar de serem recomendados para atuarem debaixo d'água, apresentaram uma vida útil baixa, quando ficaram cerca de 6 meses debaixo da água. No entanto, caso fosse feito um melhoramento do isolamento na base da capsula com silicone, ou até mesmo confeccionado os próprios sensores dentro da cápsula, talvez a vida útil dos sensores teria aumentado;
- Inicialmente foram instalados sensores de umidade na câmara térmica também, no entanto, por serem sensores capacitivos, houve muitas interferências de leitura devido a câmara ser metálica, estarem operando em temperatura superior a 40°C e estarem atuando próximos. Essa sobreposição de efeitos, impossibilitou este pesquisador de conseguir fazer medições de umidade, precisando assim realizar medições manuais durante os ensaios TRT;
- Os sensores de vazão apresentaram muitos problemas de uso devido ao tempo de uso durante os ensaios, o que necessitou, diversas vezes fazer manutenção e aferição entre os ensaios. Isso aconteceu pois o sensor, apesar de ser metálico e ter a recomendação técnica de trabalho em temperaturas de até 80°C, não suportaram a intensidade de uso e apresentaram problemas mecânicos nas hélices ao longo dos últimos ensaios. Apesar de trabalhar com vazões de até 30 l/min, para ensaios que necessitaram de uma vazão de 12 l/min, apresentaram dificuldades de medições estáveis. Nesse sentido, recomenda-se que sejam utilizados sensores de vazão que trabalhem por ultrassom, pois apresentam leituras mais estáveis e não necessitam de manutenções. No entanto, devido a problemas de orçamento, foi possível somente a aquisição do fluxímetro por efeito *Hall*;
- O local de instalação do equipamento de ensaio TRT não possuía aterramento elétrico, o que necessitou instalar hastes de aterramento afim de evitar flutuações na leitura dos sensores;
- A primeira versão do equipamento de ensaio TRT teve uma bomba hidráulica com hélices de plástico, isso apresentou diversos problemas nos testes iniciais, o que precisou trocar o sistema de bombas para hélices metálicas;
- Finalmente, mesmo com todas as limitações financeiras e técnicas, ressalvados os problemas ocorridos com os sensores de vazão e alguns de temperatura, foi possível desenvolver uma pesquisa

5.4 Recomendações para pesquisas futuras

A partir das reflexões realizadas acerca dos feitos do trabalho, são sugeridas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios TRT em campo, submetidos as mesmas variações paramétricas, sobre o ponto de vista da resposta térmica adimensional na face da estaca;
- Realizar ensaios de curvas de retenção de água no solo para as mesmas condições geotécnicas e estruturais que as amostras do solo laterítico compactado foram submetidas, e assim, correlacionar melhor as propriedades térmicas do solo com sucção mátrica;
- Desenvolver análises das propriedades térmicas do solo laterítico sobre uma abordagem estrutural dos macros e micro poros;
- Realizar ensaios de resposta térmica sobre temperatura constante afim de se avaliar a performance de saturação térmica em função do número e disposição de tubos, bem como grau de saturação do solo;
- Realizar simulações numéricas dos ensaios realizados em laboratório afim de calibrar o modelo e extrapolar o modelo para estacas de grandes dimensões.

REFERÊNCIAS

- ABU-HAMDEH, N.H (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Siosystems Engineering*, (86), 97-102.
- AHMADIPUR, A. & BASU, P. (2017). Temperature-induced alterations of the shaft and base resistances of a model geothermal pile in dry sand. *Geo-Chicago, Chicago*, pp. 155–165.
- AKROUCH, G. A. (2014). Energy piles in cooling dominated climates. Tese de Doutorado, Texas A&M University, Texas, 193p.
- AKROUCH, G. A., SÁNCHEZ, M., BRIAUD, J., L. (2015). Effect of the unsaturated soil condition on the thermal efficiency of energy piles. *IFCEE*, 2015. 1618 – 1627.
- AKROUCH, G. A., SÁNCHEZ, M., BRIAUD, J., L. (2016). An experimental, analytical and numerical study on the thermal efficiency of energy piles in unsaturated soils. *Computers and Geotechnics*, (71), 207 – 220.
- ALBERDI-PAGOLA, M., POULSEN, S.E., JENSEN, R.L. & MODSEN, S. (2018b). A case study of the sizing and optimization of an energy pile foundation (Rosborg, Denmark). *Renewable Energy*, on-line, pp. 1-12.
- ALBERDI-PAGOLA, M.A., JENSEN, R.L., MADSEN, S. & PULSEN, S.E. (2018a). Method to obtain g functions for multiple precast quadratic pile heat exchangers. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical Reports, No. 243, 34 p.
- ALLANI, M., VAN LYSEBETTEN, G. & HUYBRECHTS, N. (2017). Experimental and numerical study of the thermo-mechanical behavior of energy piles for Belgian practice. *Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soil and Shales (ATMSS)*, Springer Series in Geomechanics, pp. 405-412.
- AMATYA B.L., SOGA K., BOURNE-WEBB P.J., AMIS T. & LALOUI L. (2012). Thermo-mechanical behavior of energy piles. *Geotechnique*, 62(6), pp. 503–19.
- AMIS, T., BOURNE-WEBB, P.J., DAVIDSON, C., AMATYA, B. & SOGA, K. (2008). The effects of heating and cooling energy piles under working load at Lambeth College, UK. *Proc. 33rd Annual 11th Int. Conf. Deep Foundations*, 10.
- ASTM D5334-08. (2008). Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure, Unites states, 8p.
- AUSTIN W. A., C. YAVUZTURK, J.D. SPITLER. (2000). Development of an InSitu System for Measuring Ground Thermal Properties. *ASHRAE Transactions*. 106(1): 365-379.
- BANKS (2008). *An Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*, John Wiley & Sons, United Kingdon, England, v1, 333p.
- BAO, X., QI, X., CUI, H., TANG, W., CHEN, X. (2022). Experimental study on thermal response of a PCM energy pile in unsaturated clay. *Renewable Energy*, 185, pp. 790-803.
- BIDARMAGHZ, A., NARSILIO, G. & JOHNSTON, I. (2013). Numerical modelling of ground heat exchangers with different ground loop configurations for direct geothermal applications. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: 2-6 Paris*.
- BLACK, J. A. & TATARI, A. (2015). Transparent soil to model thermal processes: An energy pile example. *Geotechnical Testing Journal*, 38(5), pp. 752 – 764.
- BLÀZQUEZ, C.S., NIETO, I.M., MARTIIN, F.A., AQUILERA, D.G. & GARCIA, P.C. (2019). Comparative analysis for diferent methodologies used to estimate the ground thermal conductivity in low enthalpy geothermal systems. *Energies*, 12p.

- BORGES, C. R. (2014). Estudo microestrutural do comportamento hidromecânico do solo de Brasília-DF, Distrito Federal, 2014. tese de Doutorado, Publicação G.TD-102/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 112p.
- BOURNE-WEBB, P.J. & BODAS FREITAS, T.M. (2019). Thermally activated piles and pile groups under monotonic and cyclic thermal loadind-A review. *Renewable Energy*, Elsevier, (147), 2572-2581.
- BOURNE-WEBB, P.J., AMATYA, B., SOGA, K., AMIS, T., DAVIDSON, C. & PAYNE, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, 59, pp. 237-248.
- BOURNE-WEBB, P.J., BODAS FREITAS, T.M. & FREITAS ASSUNÇÃO, R.M. (2016). Soil-pile thermal interactions in energy foundations. *Geotechnique* 66(2), pp. 167-171.
- BOURNE-WEBB, P.J., DE SOUSA FIGUEIRA, J.D., BODAS FREITAS, T.M. (2020). On the resistance to heat flow across soil-structure interfaces. *Energy and Buildings*, (228), art. no. 110488.
- BRANDL, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Géotechnique*, (2): 81–122.
- CARDOSO DE FREITAS MURARI, M., DE HOLLANDA CAVALCANTI TSUHA, C., LOVERIDGE, F. (2022). Investigation on the thermal response of steel pipe energy piles with different backfill materials. *Renewable Energy*, 199, pp. 44-61.
- CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 517p.
- CECINATO, F. & LOVERIDGE, F.A. (2015). Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy*, (8)2: 1021–1033.
- ÇENGEL, Y.A. & GHAJAR, A.J. (2012). *Transferência de Calor e Massa*. 4. ed. AMGH Editora Ltda., Porto Alegre, 914p.
- CFMS, S.I. (2017). *Recommendations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques*, Syntec Ingenierie, França, 1ed, 16p.
- CHAVES, C.P., DA SILVA, J.D.J.C., DA CUNHA, R.P., CAVALCANTE, A.L.B. (2022). Laboratory experimental and numerical thermal response tests in thermal piles prototypes in tropical soil. *Soils and Rocks*, 45 (1), art. no. e2022078921.
- CHOI J., LEE S. & LEE D. (2011). Numerical simulation of vertical ground heat exchangers: Intermittent operation in unsaturated soil conditions. *Computer and Geotechnics*, 38(8), pp. 949–958.
- COTÉ, J., & KONRAD, J.-M. (2005). “A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials.” *Can. Geotech. J.*, 42(2), 443–458.
- CRUICKSHANKS, f., j. BARDSLEY, H., R. WILLIAMS. (2000). In Situ Measusement of thermal Properties of Cunard Formation in Borehole, Halifax, Nova Sctoia. *Proceesings of Terrastock 2000*, Stuttgart, Alemanha, pp. 177 – 175
- CUNHA, R.P. (2019). *Study of Geothermal Energy Piles (GEPs) for Sustainable Climatization of Structures in Brazil Report on State-of-Art Knowledge and Research on GEP Systems*, Relatório de Pós Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 112p.
- CUNHA, R.P., BOURNE-WEBB, P.J. (2022) A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, art. no. 112072.
- CURTIS R H., (2001). *Earth Energy in the UK*, Proc. International Geothermal Days Conference, Bad Urach, Germany, Sept. also in *Quarterly Bulletin GeoHeat Center Vol 22, No 4*, Klamath Falls, Oregon, USA, Dec 2001.

- DE ALMEIDA, C.R., BOSCOV, M.E.G., ALBUQUERQUE NETO, C., DE H.C. TSUHA, C. (2020). Numerical modelling of a geothermal pile in tropical environment based on a TRT Test. E3S Web of Conferences, 205, art. no. 05023.
- DE VRIES, D. A. (1963). "Thermal properties of soils." Physics of plant environment, W. R. Van Wijk, ed., Wiley, New York, 210–235.
- DONG, Y., MCCARTNEY, J. S., LU, NING. (2015). Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. Springer. Geotech Geol Eng., (S/N)
- DUARTE, A.P.L. (2004). Avaliação de Propriedades Termo Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 290p.
- EUGSTER, W.J. (2001) Eugster Langzeitverhalten der EWS-Anlage in Elgg (ZH) – Spotmessungim Herbst 2001. Swiss Federal Office of Energy, Bern, Switzerland (2001) 14 pp
- FAIZAL, M., BOUAZZA, A. & SINGH, R.M. (2016). An experimental investigation of the influence of intermittent and continuous operating modes on the thermal behavior of a full-scale geothermal energy pile. Geomechanics for Energy and the Environment, 8, pp. 8–29.
- FAROUKI, O.T. (1981). Thermal properties of soils. Tese de Doutorado, United States Army Corps of engineers, New Hampshire, Estados Unidos, 137p.
- FEL, K. & DAI, D. (2018). Experimental and numerical study on the behavior of energy piles subjected to thermal cycles. Advances in Civil Engineering, 2018, pp. 1-13.
- FERREIRA, M. DE S. (2017). Resposta termomecânica de estaca geotérmica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Rio de Janeiro, 98p.
- FUJI, L. M. T., (2012), Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias. Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-215/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.
- GAO, J., ZHANG, X., LIU, J., LI, K, S, & YANG, J. (2008b). Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. Applied Thermal Eng., 28(17), pp. 2295-2304.
- GAO, J., ZHANG, X., LIU, J., LI, K. & YANG, J. (2008a). Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application. Applied Energy, 85(10), pp. 901-910.
- GEHLIN S., G. HELLSTRÖM. (2000). Recent Status of In-situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. Proc. Terrastock'2000, August 28-September 1 2000, Stuttgart, Germany, pp 159-164.
- GEHLIN, S. (2002). Thermal Response Test Method Development and Evaluation. Tese de Doutorado, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 191p.
- GEOPLASMA-CE. (2017). Joint report on chosen approaches and methods for calibration. Manual técnico D.T3.5.1. Versão 2 – 08/2017
- GOODE, J.C. & MCCARTNEY, J.S. (2015). Centrifuge modeling of end-restraint effects in energy foundations. Journal Geot. and Geoenv. Engineering, ASCE, 141(8), pp. 1-13.
- GUIMARÃES, R. C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-090ª/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- HAMADA, Y., SAITOH, H., NAKAMURA, M., KUBOTA, H. & OCHIFUJI, K. (2007). Field performance of an energy pile system for space heating. Energy and Buildings, 39(5), pp. 517–524.

- HASHEMI SENEJANI, H., GHASEMI-FARE, O., YAZDANI CHERATI, D., JAFARZADEH, F. (2020). Investigation of thermo-mechanical response of a geothermal pile through a small-scale physical modelling. *E3S Web of Conferences*, 205, art. no. 05016,
- HU, B., GONG, Q., ZHANG, Y., YIN, Y., CHEN, W. (2022). Reliability- based load and resistance factor design model for energy piles. *Nature. Scientific reports* (12:14704).
- JALALUDDIN, MIYARA, A., TSUBAKI, K., INOUE, S. & YOSHIDA, K. (2011). Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation. *Renewable Energy*, 36(2), pp. 764–771
- JOHANSEN, O. (1977). “Thermal conductivity of soils.” Ph.D. thesis, Univ. of Trondheim, Trondheim, Norway, 231p.
- KALANTIDOU, A., TANG, A.M., PEREIRA, J.M. & HASSEN, G. (2012). Preliminary study on the mechanical behavior of heat exchanger pile in physical model. *Geotechnique* 62(11), pp.1047-1051.
- KERSTEN, M.S., (1949). Thermal properties of soils. *Bull. Univ. Minn. Inst. Technol.* 52, 1-225.
- KRAMER, C.A. & BASU, P. (2014). Performance of a model geothermal pile in sand. *Proceed. 8th Intern. Conf. Physical Modelling in Geotechnics - ICPMG 2014, Perth, Vol. 2, pp. 771-777.*
- KRAMER, C.A., GHASEMI-FARE, O. & BASU, P. (2015). Laboratory thermal performance tests on a model heat exchanger pile in sand. *Geotech. Geol. Eng.*, 33(2): 253–271.
- KYOTO, P. (2012). Doha amendment do the Kyoto Protocol, Doha, 6p.
- LALOUI, L. & LORIA, A.F.R. (2020). *Analysis and Design of Energy Geostructures Theoretical Essentials and Practical Application*, Elsevier, United Kingdom, England, v1, 1043p.
- LALOUI, L. & MORENI, M. (1999). In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile. *Proc. 4th Int. Conf. on Deep Foundation Practice*, pp. 273–279.
- LALOUI, L., NUTH, M. & VULLIET, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of heat exchanger pile, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30, pp. 763-781.
- LALOUI, L., SUTMAN, M., (2021) Experimental investigation of energy piles: From laboratory to field testing. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 27, art. no. 100214,
- LEITE, J.A.M., TIBANA, (2022), S. Physical modeling of thermal improvement in normally consolidated and over consolidated soil. *Soils and Rocks*, 45 (1), art. no. e2022076421,
- LI, D.Q., TANG, W. H., ZHANG, L. M., (2008). Updating occurrence probability and size of defect for bored piles. *ScienceDirect*, 30, pp 130 – 143.
- LIM, K., LEE, S.& LEE, C. (2007). An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, pp. 985 – 990
- LONGO, J, A. (2014). *Instrumentação eletrônica para levantamento do perfil geotérmico superficial visando a troca sustentável de calor. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 96p.*
- LOPES, B. C. F. L. (2016). *Microstructural based approach to the modelling of clays and transitional soils behavior, Distrito Federal. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-115/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 133p.*
- LOU, Y., FANG, P.-F., XIE, X.-Y., CHONG, C.S.A., LI, F.-Y., LIU, C.-Y., WANG, Z.-J., ZHU, D.-Y. (2021). Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow *Geomechanics for Energy and the Environment*, 28, art. no. 100257.
- LOVERIDGE, F. & POWRIE, W. (2013). *Pile heat exchangers: thermal behavior and interactions* 166: ICE-Institution of Civil Engineers, United Kingdom: 178–196.

- LOVERIDGE, F. & POWRIE, W. (2013). Temperature response functions (G-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57, pp. 554-564.
- LOVERIDGE, F. & POWRIE, W. (2014a). 2D thermal resistance of pile heat exchangers. *Geothermics*, 50, pp. 122-135.
- LOVERIDGE, F. & POWRIE, W. (2014b). G-Functions for multiple interacting pile heat exchangers. *Energy*, 64, pp. 747-757.
- LOVERIDGE, F.A. & POWRIE, W. (2016). The average temperature of energy piles, *Geo-Chicago 2016 GSP 270*, ASCE, pp 166–175.
- LU, S., REN, T., GONG, Y., HORTON, R. (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Physics. SSSAJ* (71). 8 – 14.
- MACIEL NETO, J. DE A. M. (2011). Caracterização térmica de solos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 55 p.
- MAKOWSKI, M.W., MOCHLINSKI, K., (1956). An evaluation of two rapid methods of assessing the thermal resistivity of soil. *Proc. IEE Part A Power Eng.* 103 (11), 453-470.
- MCCARTNEY, J.S. & MURPHY, K.D. (2012). Strain distributions in full-scale energy foundations. *Journal of the Deep Foundations Institute*, 6(2), pp. 26–38.
- MCCARTNEY, J.S. & MURPHY, K.D. (2017). Investigation of potential drag down/uplift effects on energy piles. *Geomechanics for Energy and the Environment* 10, pp. 21-28.
- MCCARTNEY, J.S. & ROSENBERG, J.E. (2011). Impact of heat exchange on side shear in mechanical behavior of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica*, 9(3), pp. 385–398.
- MINTO, A., LEUNG, A.K., VITALI, D. & KNAPPETT, J.A. (2016). Thermomechanical properties of a new small-scale reinforced concrete thermo-active pile for centrifuge testing. *Proc. 1st. Int. Conf. on Energy Geotechnics*, Kiel, pp. 37-44.
- MOEL, M. DE, BACH, P.M., BOUAZZA, A., SINGH, R.M. & SUN, J.O. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 28p.
- MORADSHAHI, A., FAIZAL, M., BOUAZZA, A., MCCARTNEY, J.S. (2022). Thermomechanical Responses of Thermally Interacting Field-Scale Energy Piles. *International Journal of Geomechanics*, 22 (11), art. no. 04022212
- MORAIS, T. DA S.O., SOUSA, J.D. & TSUHA, C. DE H.C. (2019). Measurement of thermal conductivity of unsaturated tropical soils by a needle probe method. *Conference: XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)*, 2379–2387.
- MORAIS, T. DA S.O., TSUHA, C. DE H.C., NETO, L.A.B. & SINGH, R.M. (2020). Effects of seasonal variations on the thermal response of energy piles in an unsaturated Brazilian tropical soil. *Energy Build.*, 216: 109971.
- MURPHY, K.D. & MCCARTNEY, J.S. (2015). Seasonal response of energy foundations during building operation. *Geotechnical and Geological Eng.*, 33(2), pp. 343-356.
- MURPHY, K.D., MCCARTNEY, J.S. & HENRY, K.S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), pp. 179-195.
- NBR 6118. (2014). Projeto de estruturas de concreto - procedimento Rio de Janeiro, 238p.
- NG, C.W., MA, Q.J. & GUNAWAN. (2016). Horizontal stress change of energy piles subjected to thermal cycles in sand. *Computers and Geotechnics*, 78, pp. 54–61.
- NG, C.W.W., FARIVAR, A., GOMAA, S.M.M.H., SHAKEEL, M., JAFARZADEH, F. (2021). Performance of elevated energy pile groups with different pile spacing in clay subjected to cyclic non-symmetrical thermal loading. *Renewable Energy*, 172, pp. 998-1012.

- NG, C.W.W., SHI, C., GUNAWAN, A. & LALOUI, L. (2014). Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay. *Geotechnique Letters*, 4(4), pp. 310–316
- NG, C.W.W., SHI, C., GUNAWAN, A., LALOUI, L. & LIU, H.L. (2015). Centrifuge modelling of installation effects on helical anchor performance in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, pp. 1045–1057.
- NGUYEN, V.T, TANG, A.M. & PEREIRA, J.M. (2017). Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. *Acta Geotechnica*, 12(4), pp. 729-737.
- NING LU AND YI DONG. (2015). Closed -Form Equation for Thermal CONduTivity of Unsaturated Soils at Room Temperature. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, (12): 04015016.1 - 04015016.12.
- OLGUN, C.G., GEYIN, M. & OZUDOGRU, T.Y. (2017). Long-Term Performance of Heat Exchanger Boreholes at Different Climatic Conditions. *Proc. Geotech. Frontiers 2017: Geotechnical Materials, Modeling, and Testing*. Orlando, GSP 280, pp. 153-164.
- OLGUN, C.G., OZUDOGRU, T.Y. & ARSON, C.F. (2014). Thermo-mechanical radial expansion of heat exchanger piles and possible effects on contact pressures at pile-soil interface. *Geotechnique Letters* 4(3), pp. 170-178.
- OLGUN, C.G., OZUDOGRU, T.Y., ABDELAZIZ, S.L. & SENOL, A. (2015). Long-term performance of heat exchanger piles. *Acta Geotechnica*, 10(5), pp. 553-569.
- OROZCO, H.C. (2016). Validação do Ensaio TRT para Estudo Paramétrico da Troca de Calor de uma Estaca de Energia em um Solo Tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-262/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.
- PAGOLA, M. A., JESEN, R. L., MADSEN, S., & POULSEN, S. E. (2018). Method to obtain g-functions for multiple precast quadratic pila heat exchangers. Alborg: Department of Civil Engineering, Alborg University. DCE Technical Reports, No. 243
- PAKSOY H.Ö., ANDERSSON O., ABACI S, EVLIYA H. VE. TURGUT B. (2000) Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in aquifer, *Renewable Energy*, (19). 117-122.
- PARK, H., LEE, S.R., YOON, S. & CHOI, J.C. (2013). Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. *Applied Energy*, 103, pp.12–24. Pp. 1-14.
- PENG, H., KONG, G., LIU, H. ABUEL-NAGA, H. & HAO, Y. (2018). Thermo-mechanical behavior of floating energy pile groups in sand. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 19(8), pp. 638-649.
- PERON, H., KNELLWOLF, C. & LALOUI, L. (2011). A method for the geotechnical design of heat exchanger piles. *Proc. Geotech. Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, Dallas, GSP 211, pp. 470-479
- PESSIN, J. (2021) Estudo experimental de desempenho de fundações por estacas hélice contínua trocadoras de calor em solo arenoso saturado, 2021.Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 264p.
- PIMENTEL DE S. J., R., PINTO CUNHA, R., DE JESUS DA COSTA FARIAS, R. (2020). Geothermal response of a geothermal system for energy piles in a typical Brazilian tropical soil. *E3S Web of Conferences*, 205, art. no. 05005.
- QUEIROZ, A. C. G. (2015). Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados, Distrito Federal, 2015. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-104/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 108p.
- REES, S.W., ADJALI, M.H., ZHOU, Z., DAVIES, M. & THOMAS, H.R. (2000). Ground heat transfer e effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 4: 213–265.

- RESTREPO, J. S. (2010), Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-188/10, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114p.
- ROTH, P., GEORGIEV, A., BUSSO, A. & BARRAZA, E. (2004). First in situ determination of ground a borehole thermal property in Latin America. *Renewable Energy* 29, pp. 1947-1963.
- ROTTA LORIA, A.F., GUNAWAN, A., SHI, C., LALLOUI, L. & NG, C.W.W. (2015). Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 1(15), pp. 1–15.
- SABOYA, F., JR., DE SOUZA FERREIRA, M., MCCARTNEY, J.S., TIBANA, S. (2022). Thermal Response Testing of a Thermal Pile in a Tropical Climate Region. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40 (5), pp. 2513-2531.
- SANI, A.K. & SINGH, R. M. (2018). Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile. *Renewable Energy*. 2018, pp.1-15.
- SANI, A.K., MARTAND, R. & IGNAZIO, S. (2018a). Numerical investigation on the performance of geothermal energy contiguous flight auger (CFA) pile. 15th BGA Young Geotech. Eng. Symp. Guildford, pp. 69–70.
- SANI, A.K., SINGH, R.M., AMIS, T. & CAVARRETTA, I. (2019a). A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, pp. 54-78.
- SANI, A.K., SINGH, R.M., CAVARRETTA, I. & BHATTACHARYA, S. (2018c). Heat storage performance of a pile heat exchanger installed in partially saturated swelling clay. 7th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Hong Kong, pp.1–6.
- SANI, A.K., SINGH, R.M., CAVARRETTA, I., TSUHA, C.H.C. & BHATTACHARYA, S. (2018b). Inlet & outlet pipe heat interaction in a Contiguous Flight Auger (CFA) Pile. In: Ferrari A, Laloui L, editors. *Energy Geotechnics*. Springer, pp. 113–122.
- SANI, A.K., SINGH, R.M., TSUHA, C. DE H.C. & CAVARRETTA, I. (2019). Pipe–pipe thermal interaction in a geothermal energy pile. *Geothermics*, 81(May): 209–223.
- SANI, A.K., SINGH, R.M., TSUHA, C.H.C. & CAVARRETTA, I. (2019b). Pipe-pipe thermal interaction in a geothermal energy pile. *Geothermics*, 81, pp. 209-223.
- SANNER B., M. REUSS, E. MANDS. (2000a). Thermal Response Test – Experiences in Germany. Proceedings of Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, August 28-September 1, 2000. pp. 177-182.
- SANNER, B., HELLSTROM, G., SPITLER, J. & GEHLIN, S. (2005). Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application. Proceeding World Geothermal Congress, Turquia, pp. 1-9.
- SANTOS, B.C.B. (2020). Avaliação termomecânica de uma estaca escavada submetida a gradientes térmicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, RJ, 89p
- SCHNURER, H., SASSE, C. & FISCH, M.N. (2006). Thermal energy storage in office buildings foundations. Proc. 10th. Int. Conf. on Thermal Energy Storage. ECOSTOCK, Galloway. Pp. 1-8.
- SHARQAWY, M.H., SAID, S.A., MOKEHEIMER, E.M., HABIB, M.A., BADR, H.M., A-SHAYEA, N.M. (2009). First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia, *Renewable Energy*, 34, pp. 2218-2223
- SILVA, J. P. (2007), Estudos Preliminares para implantação de trincheiras de infiltração. Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicado G.DM-154/07, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p.

- SILVA, M. T. M. G. (2009). Metodologia para Determinação de Parâmetros para Solos não Saturados Utilizando Ensaio com Umidade Conhecida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- SINGH, R.M., BOUAZZA, A., WANG, B., HABERFIELD, C.H., BAYCAN, S., CARDEN, Y. (2015a). Thermal and thermo-mechanical response of a geothermal energy pile. World Geothermal Congress. pp. 1-7.
- SOUZA JUNIOR, R.P. (2017). Estudo paramétrico da resposta térmica de grupos de estacas trocadoras de calor em um solo tropical típico do DF. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p.
- STEWART M.A., MCCARTNEY J.S. (2014). Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations. *ASCE Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Eng.*, 140(4), pp. 1-11.
- STEWART, M.A. & MCCARTNEY, J.S. (2012). Strain Distributions in Centrifuge Model. *Energy Foundations*, pp. 4376–4385.
- SURYATRIYASTUTI, M.E., MROUEH, H. & BURLON, S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp. 3344–3354.
- SUTMAN, M., OLGUN, C.G. & LALOUI, L. (2019). Cyclic load-transfer approach for the analysis of energy piles. *Journal Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 145(1), pp. 1-16.
- SYKULSKI, J.R. (1999). Building services engineering research and technology. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 20(3): 119–129.
- SZYMKIEWICZ, F., BURLON, S., GUIRADO, F., MINATCHY, C. & VINCESLAS, G. (2015). Experimental study of heating-cooling cycles on the bearing capacity of CFA piles in sandy soils. *Proc. XVI European Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.*, Edinburgh, pp. 2647-2652.
- THOMAS H. R., REES S. W. (1999). The thermal performance of ground floor slabs – a full scale in-situ experiment. *Building and Environment*, 34, pp 139 – 164.
- WANG, C., LIU, H., KONG, G. & NG, C.W.W. (2017). Different types of energy piles with heating-cooling cycles. *Proc. Inst. Civil Engineers, ICE*, 170, pp. 220-231.
- WANG, C., LIU, H., KONG, G., NG, C.W.W. & WU, D. (2016). Model tests of energy piles with and without a vertical load. *Environmental Geotechnics*, 3(4), pp. 203-213
- WANG, Z., ZHANG, R., FANG, P., WANG, W. & WANG, H. (2019). Analysis of an energy pile enduring cyclic temperature loads. *Geotechnical Research*, pp.1-7.
- WITTE H. J. L. (2001). Geothermal Response Tests with heat-extraction and heatinjection: application in research and design of Geothermal Ground Heat Exchangers. *Europaischer Workshop uber Geothermische response test. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne 25 - 26 10 2001.*
- YANG, W., Lu, P. & Chen, Y. (2016). Laboratory investigations of the thermal performance of an energy pile with spiral coil ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, 128(15), pp.491–502.
- YANG, W., SUN, T., YANG, B., WANG, F. (2022). Laboratory study on the thermo-mechanical behaviour of a phase change concrete energy pile in summer mode, *Journal of energy storage*, 41, pp. 1-12.
- YAVARI, N., TANG, A.M., PEREIRA, J.M. & HASSEN, G. (2014). Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica*, Springer Verlag, 9 (3), pp.385-398.
- YAZDANI, S., HELWANY, S. & OLGUN, G. *et al.*, (2019). Investigation of thermal loading effects on the shaft resistance of energy pile using laboratory scale model. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 145(9).

- YOON, S., LEE, S.R., GO, G.H., XUE, J., PARK, H. & PARK, D. (2014). Thermal transfer behavior in two types of W-shape ground heat exchangers installed in multilayer soils. *Geomechanics and Engineering*, 6(1) pp.79–98.
- YOU, S., CHENG, X., GUO, H. & YAO, Z. (2016). Experimental study on structural response of CFG energy piles. *Applied Thermal Engineering*, 96(5), pp.640–651.
- ZARRELLA, A., EMMI, G., ZECCHIN, R. & DE CARLI, M. (2017). An appropriate use of the thermal response test for the design of energy foundation piles with U-tube circuits. *Energy and buildings*, 134, pp. 259-270.

ANEXO I

Principais conclusões dos estudos em **escala de campo** sobre o comportamento termomecânico e o desempenho térmico de estacas térmicas.

| Referência | Principais conclusões sobre comportamento termomecânico |
|--|---|
| <p>Universidade de Tecnologia Bad Schallerbach, Áustria Brandl (2006)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Durante a fase de hidratação da estaca térmica de concreto fresco, o calor gerou tensões residuais internas, o que pode gerar fissuras na estaca; • A extração de calor (modo de Inverno) resulta na contração das estacas, diminuindo assim a pressão na ponta da estaca e redução do atrito lateral; • A extração excessiva de calor pode levar ao congelamento do solo; • O aquecimento/arrefecimento das estacas como grupo induz tensões térmicas axiais mais baixas na cabeça das estacas, em comparação com aquecimento/arrefecimento de uma única estaca no grupo; • A carga axial transmitida ao pé da estaca permaneceu constante durante a aplicação de carga térmica. |
| <p>Escola Federal Politécnica de Lausanne Suíça Laloui <i>et al.</i> (2006) Laloui & Moreni, (1999)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O aumento de temperatura afeta o comportamento mecânico da estaca térmica, na qual resulta em aumento de atrito lateral e das tensões compressivas na ponta; • Cargas térmicas cíclicas resultam na expansão e contração da estaca térmica, na qual provoca assim o desenvolvimento de tensões de natureza termo elásticas; • A carga axial aplicada em uma estaca térmica, devido a um carregamento térmico, depende da restrição final da cabeça e da ponta da estaca; • A carga axial induzida em uma estaca térmica, aumenta uniformemente sobre a profundidade, quando esta encontra-se totalmente contida na cabeça e na ponta; |

| | |
|---|--|
| <p>Bourne-Webb <i>et al.</i> (2009)</p> <p>Amatya <i>et al.</i> (2012)</p> | |
| <p>Universidade de Cambridge</p> <p>Lambeth College,</p> <p>Reino Unido</p> <p>Amis <i>et al.</i> (2008)</p> <p>Bourne-Webb <i>et al.</i> (2009)</p> <p>Amatya <i>et al.</i> (2012)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A fase de aquecimento extremo resultou na recuperação da cabeça estaca, depois de ter sido deslocada durante a fase de arrefecimento extremo; • A carga cíclica térmica aumenta e diminui a resistência de interface da estaca/solo; • A tensão axial induzida, aumenta de forma não uniforme com a profundidade, para uma estaca térmica parcialmente contida; • As forças de tração induzidas, devido ao ciclo de resfriamento extremo, não são suscetíveis de causar fissuras nas estacas térmicas de concreto; • Uma estaca térmica, na condição totalmente contida, submetida a uma carga térmica de aquecimento, induz uma tensão térmica axial na estaca, entre 50-100% dos valores teóricos previstos; • O tipo de contenção, na cabeça e na ponta da estaca térmica, ou seja, superestrutura e solo rígido, ou rocha, pode alterar a magnitude das tensões desenvolvidas ao longo da estaca. |
| <p>Universidade A & M do Texas</p> <p>Estados Unidos</p> <p>Akrouch <i>et al.</i> (2014)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A carga cíclica térmica aumenta ou diminui a resistência lateral da estaca; • A carga axial desenvolvida numa estaca térmica, parcialmente contida, aumenta de forma não uniforme com a profundidade; • As forças de tração induzidas devido ao ciclo de arrefecimento extremo, não são susceptíveis de causar fissuras nas estacas de concreto; • Uma estaca térmica, submetida a um aquecimento, induziu uma tensão térmica axial, que se encontrou entre 50-100% dos valores teóricos; • O tipo de retenção na cabeça da estaca e da ponta, pode alterar a magnitude das tensões desenvolvidas na estaca térmica; • O aumento da temperatura do solo resulta no aumento da taxa de deslizamento de estacas em argilas; |

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • A extração de calor em climas dominados pelo arrefecimento, aumenta o mecanismo viscoso das argilas, resultando em recalques a longo prazo; • O deslocamento de uma estaca de energia é 2,35 vezes superior ao de uma estaca convencional, após 50 anos de calor contínuo. |
| <p>Universidade do Colorado</p> <p>Estados Unidos</p> <p>McCartney & Murphy (2012)</p> <p>Murphy <i>et al.</i> (2015)</p> <p>Murphy & McCartney (2015)</p> <p>McCartney & Murphy (2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Para os trabalhos desenvolvidos nestes artigos, durante os ciclos de aquecimento e resfriamento, as tensões térmicas axiais observadas estavam dentro de limites aceitáveis de exigências estruturais. As deformações totais medidas devido à carga termomecânica, estavam dentro dos limites aceitáveis na indústria; • As tendências e a magnitude das tensões axiais induzidas nas estacas, não causaram fissuras no concreto; • Foram avaliadas 8 estacas térmicas, em escala real, onde as 3 que foram instrumentadas demonstraram tensões termomecânicas induzidas de até 25% da resistência total à compressão do concreto; • O máximo deslocamento ascendente foi pequeno e não causou problemas de engenharia à superestrutura; • Foram observadas taxas de tensões induzidas de 210 a 260 kPa/°C. • Foram monitoradas 2 estacas térmicas, em escala real, sob um edifício de 8 andares, durante 658 dias, com cargas de extração de calor de 91-95 W/m; • Foram medidas tensões axiais máximas, induzidas, de cerca de 10 MPa, dentro dos limites estruturais; • Durante o aquecimento, foram observadas um aumento das tensões axiais na ponta da estaca, e tensões cisalhantes, mobilizadas, seguiram um perfil não-linear; • Foram observados deslocamentos dentro dos limites de máximo de 2mm para cima, no aquecimento e, 1mm para baixo, no resfriamento. |
| <p>Universidade de Paris-Est</p> <p>França</p> <p>Szymkiewicz <i>et al.</i> (2015)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Executaram e instrumentaram 3 estacas térmicas (L12m e Dia 52cm), na qual foram carregados termicamente e mecanicamente em solo arenoso. Submeteram-nas e ciclos de resfriamento de aquecimento de 14 dias e 7 dias cada; • A influência dos ciclos térmicos foi quase insignificante em termos de deslocamentos. No entanto, os ciclos térmicos tiveram um impacto positivo sobre a capacidade de carga das estacas. • O atrito de interface foi responsável pelo aumento da capacidade de carga da estaca, devido ao rearranjo, ou seja, devido a densificação do solo no atrito de interface estaca/solo. |

| | |
|--|---|
| <p>Universidade de Ciência e Tecnologia de Beijing, Tsinghua</p> <p>China</p> <p>You <i>et al.</i> (2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A distribuição das tensões axiais térmicas, ao longo da estaca se deu de maneira uniforme, devido à contenção parcial na cabeça e na ponta da estaca; • O ciclo de resfriamento induz um acentuado recalque das estacas e uma diminuição de sua capacidade de carga. |
| <p>Instituto de pesquisas Belgas e Universidade Católica de Leuven</p> <p>Bélgica</p> <p>Allani <i>et al.</i> (2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foi realizado uma campanha de análises numéricas, por elementos finitos (MEF), no Plaxis 2D, em 5 estacas térmicas (L 11,5m e Dia 60cm), na configuração 1U; • O confinamento impediu a dilatação parcial da estaca, na qual elevou a tensão axial de cerca de 0,8-2 MPa durante aquecimento e 0,4-1,3 MPa durante o resfriamento; • Foram observados pequenos deslocamentos da cabeça da estaca térmica (< 3mm); • Houve uma boa concordância entre os valores medidos e estimados numericamente, de carga e temperaturas; • O aumento da carga térmica axial variou de +50% a +250%, quando comparado com as cargas mecânicas. |
| <p>Instituto Superior Técnico</p> <p>Portugal</p> <p>Bourne-Webb & Bodas Freitas (2019)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Há uma concordância entre o movimento e a alteração das tensões internas na estaca térmica, entre testes em escala real e modelos numéricos; • O resfriamento e o aquecimento de grupos de estacas, poderão levar a movimentos maiores e mudanças menores de tensão, em comparação com uma estaca unitária, dependendo das restrições e do número de estacas no grupo. |
| <p>Universidade de Brasília UnB</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A taxa de troca térmica aumenta com o aumento do nível d'água, e diminui com a redução dela; • Para blocos com uma e duas estacas de 30cm e 40cm, de diâmetro, é recomendado uso de tubos com apenas duas voltas. Para mais de 2 estacas por bloco, é recomendado apenas duas voltas de tubos por estaca; |

| | |
|--|--|
| <p>Pimentel (2020)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Para estacas de 60 cm, acredita-se que estacas com 4 ou mais voltas de tubos apresentam melhores condições de troca térmica. |
| <p>Instituto Superior Técnico Portugal</p> <p>Bourne-Webb (2020)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Estudou a influência da resistência térmica de interface estaca/solo, para estacas térmicas; • Aponta a necessidade de se considerar a resistência de interface solo/estrutura geotécnica, afim de aproximar o comportamento térmico da estada do comportamento real de campo; • Análises numéricas mostram que a melhor estimativa de medição e resistência de interface, está em medir o fluxo de calor na interface da estaca; • A resistência de interface é sensível a densidade dos solos e da variação de umidade; • |
| <p>Universidade de Hohai China</p> <p>Li <i>et al.</i> (2021)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Investigaram a influência do resfriamento intermitente sobre as respostas térmicas e mecânica de uma estaca térmica em escala real; • A mudança de temperatura da estaca sob operação de resfriamento intermitente, também foi afetada pelas condições do solo; • A operação intermitente induziu cargas térmicas mais baixas sobre a estaca, em comparação a operação de carregamento térmico contínuo; • Sobre as condições de resfriamento intermitente, observou uma redução nas tensões térmicas induzidas, de compressão, em todas as estacas, de aproximadamente 25,8 a 35,7% menores, quando comparado ao resfriamento contínuo; |
| <p>Instituto Federal de tecnologia de Lausanne Suíça</p> <p>Laloui & Sutman (2021)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Os resultados de testes em campo de uma única estaca térmica, revelou que operações geotérmicas causam mudanças de estado de tenções nas estacas, cuja extensão é altamente governada pelas restrições na ponta; • Na presença de cargas estruturais, estacas térmicas apresentam menores graus de liberdade, e, portanto, tensões axiais mais elevadas; • Os testes de campo realizados em grupos de estacas térmicas, operando de forma parcial, apresentaram interações termomecânicas entre estacas ativas e inativas; • Os efeitos cíclicos de degradação, tanto mecânicos como do ponto de vista térmico, devem ser considerados na análise de projeto de estacas de energia, quando as variações cíclicas de temperatura são significativas. |

| | |
|---|---|
| <p>Universidade Federal do Norte Fluminense – UENF</p> <p>Brasil</p> <p>Saboya <i>et al.</i> (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Buscou adequar estacas térmicas em clima tropical, com o objetivo de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (CFC); • Altos valores de condutividade térmica foram observadas em ensaios de resposta térmica de 12m de comprimento, na qual foram realizados três ensaios de resposta térmica da mesma estaca em diferentes épocas do ano; • Foi observado uma queda de 3,5m do lençol freático entre o segundo e o terceiro TRT, o que levou a um aumento inesperado da condutividade térmica do solo. • O rebaixamento do lençol freático também contribuiu para aumentar as tensões efetivas no solo, que pode ter densificado o solo ao longo da estaca, contribuindo assim ao aumento da condutividade térmica; • O aquecimento resultou na expansão da temperatura em todos os TRT's como esperado; • A magnitude das tensões térmicas induzidas foi maior, a 2/3 de comprimento da estaca, com valores mais baixos próximo a cabeça da estaca. |
| <p>Universidade de São Carlos - UFSCAR</p> <p>Brasil</p> <p>Cardoso <i>et al.</i> (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A condutividade térmica do solo e a resistência térmica de uma estaca de 244 mm de diâmetro com tubos de aço, com alta relação de esbeltez (~94) pode ser estimado a partir de TRT's com duração de 72 h usando a solução analítica simples de agulha térmica. No entanto, em um caso, a condutividade e resistência foram superestimadas, durante a injeção de calor, mostrando a importância de incluir uma fase de recuperação para determinação independente da condutividade térmica; • Para uma estaca na condição de tubos submersos, as soluções analíticas testadas neste estudo, demonstraram não ser apropriados, por não considerarem os efeitos de troca térmica por convecção; • Uma simulação numérica em 3D realizada para uma estaca térmica com tubo submerso, expos o mecanismo da convecção ao longo do comprimento da estaca, e mostrou um valor de resistência térmica 30% menor do que os resultados encontradas por soluções analíticas; • As análises numéricas mostraram que a resistência térmica da estaca de aço cheia de argamassa é cerca de 20% maior do que a da estaca cheia de água; • O uso de argamassa com fibras de aço proporcionou um pouco mais resistência térmica da estaca, em comparação com a estaca cheia de água, porém os custos totais desta alternativa são muito mais altos em comparação para os outros materiais de enchimento testados. Além disso, a construção de estacas térmicas cheias de água ou cheias de areia saturada, contribui para uma menor emissão de CO₂, quando comparado com os casos de estacas preenchidas com materiais que utilizam cimento. |

| | |
|--|--|
| <p>Universidade de Brasília – UnB Brasil Cunha (2022)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O conhecimento geral do comportamento termomecânico ainda é restrito a condições específicas, mas já é conhecido que tensões térmicas induzidas surgirão e irão se sobrepôr as cargas mecânicas atuantes nas estacas, exigindo assim uma reavaliação de projeto geotécnico estrutural; • O Comportamento de grupo de estacas influencia na temperatura da laje do edifício, o que ainda é um ponto a ser explorado; |
| <p>Referências</p> | <p>Principais conclusões sobre o desempenho térmico</p> |
| <p>Escola de Engenharia de Cardiff Inglaterra Thomas & Rees (1999)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Realizaram um experimento, em verdadeira grandeza sobre um prédio do complexo de Engenharia da escola de Cardiff, com laje de concreto de 150 mm de altura; • Experimento de campo, na qual monitorou o desempenho térmico de lajes reais, durante 1,5 anos em um edifício moderno. As variações sazonais da temperatura do solo foram monitoradas; • A temperatura do solo variou significativamente até 3 m de profundidade, mas sob a laje ocorreu um efeito de isolamento. |
| <p>Universidade técnica Frederico Santa Maria e Universidade Nacional do Nordeste Chile e Argentina Roth <i>et al.</i> (2004)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Primeiro TRT em poço provençal, realizado na América Latina, foi realizado no laboratório de energia solar da UFSM em Valparaíso. Foi realizado um teste de 9 dias em um furo de 16,9 m e 15 cm de diâmetro com tubulação em U. Foram estimados a condutividade e difusividade térmica do solo circundante e a resistência térmica do furo de sondagem; • Valores de 1,8 W/mK e 0,3 W/mK foram encontrados respectivamente para a condutividade e resistência do furo. |
| <p>Universidade de Tecnologia de Viena</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O diâmetro das estacas, as propriedades térmicas e hidrológicas têm um impacto significativo sobre a quantidade de calor que pode ser trocado com o meio geotécnico; |

| | |
|--|---|
| <p>Áustria</p> <p>Brandl (2006)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A composição do concreto, tais como finura do cimento e aditivos, influenciam a taxa de troca de calor das estacas térmicas. |
| <p>Universidade Técnica de Braunschweig</p> <p>Alemanha</p> <p>Schnurer <i>et al.</i> (2006)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foram avaliados o desempenho térmico de 10 edifícios na Alemanha. A análise térmica, foi feita em termos de condições geológicas, configuração do sistema, desempenho energético, investimento e custos de operação; • Concluíram que é possível adequar sistemas de armazenamento subterrâneo de energia térmica nos conceitos atuais de energia dos edifícios. Eles são ideais para serem combinados com esquemas de aquecimento de baixa temperatura ou resfriamento de alta temperatura, como ativação de concreto. |
| <p>Universidade de Hokkaido</p> <p>Japão</p> <p>Hamada <i>et al.</i> (2007)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Foram medidas taxas de rejeição de calor para os tipos de tubo em U, tubo duplo U e tubo duplo indireto, na qual as taxas de troca térmica foram de 53,81, 54,76 e 68,71 W/m, respectivamente; • Em termos de eficiência econômica e trabalhabilidade, a configuração 1U se mostrou a mais efetiva deste estudo. |
| <p>Universidade de Tongji</p> <p>China</p> <p>Gao <i>et al.</i> (2008a) e (2008b)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • As configurações de tubos em "U" duplos e triplos produziram, respectivamente, 28% e 56% a mais de saída de energia do que a configuração em forma de W; • A configuração em forma W com vazão de referência de 0,342m³/h resultou em uma produção de energia 43% maior do que a configuração em forma W para a mesma configuração a uma vazão de 0,171m³/h; • A configuração do tubo em forma de W foi considerada a mais eficiente do ponto de vista térmico se os custos não forem considerados. |

| | |
|--|--|
| <p>Universidade de Saga Japão</p> <p>Jalaluddin <i>et al.</i> (2011)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A configuração 2U tem a maior taxa de troca de calor, seguido pelo tubo múltiplo e por último o tubo em U; • A configuração 2U tinha uma superfície de contato maior de 8,73m², o que resultou em maior taxa de transferência de calor, em comparação com 4,15m² e 6,28m², para os tipos U e multitubo, respectivamente; • O tubo duplo e o multitubo mostraram um aumento na taxa de transferência de calor com aumento da taxa de fluxo. |
| <p>Instituto de Ciência e Tecnologia Avançadas da Coreia</p> <p>Coreia do Sul</p> <p>Park <i>et al.</i> (2013)</p> <p>Yoon <i>et al.</i> (2014)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O calor trocado na configuração 3U, em operação intermitente, diminuiu 51,7% em comparação com operação contínua. Da mesma forma, a forma W em modo intermitente diminuiu em 46,4% em comparação com o modo contínuo; • Em operação intermitente, a configuração 3U produziu uma taxa de troca térmica 15% maior em comparação com a configuração W. No entanto, não houve consideráveis distinções, em termos de troca térmica entre as duas configurações, para operação contínua; • As condutividades térmicas de sistemas estacas trocadoras de calor e do furo, foram de 2,32 e 2,15 W.m⁻¹.K⁻¹, respectivamente; • Foi proposto uma equação analítica simples que consiste em estimar a condutividade térmica equivalente do solo, a qual há um erro de 5-10%. |
| <p>Universidade de Monash</p> <p>Austrália</p> <p>Singh <i>et al.</i> (2015^a) e (2015^b)</p> <p>Faizal <i>et al.</i> (2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A propagação do calor nos solos ocorre em direção radial em relação a face da estaca; • Observou-se cerca de 4 vezes o tempo de teste de aquecimento para recuperar à temperatura inicial do solo; • O aumento da temperatura do solo induzido pela carga térmica não tem influência significativa sobre a taxa de troca de calor da estaca térmica; • A energia extraída durante as 8 e 16 h foi, respectivamente, 40,9% e 14,8% superior ao modo de aquecimento de 24 h. Assim, a energia média extraída ou injetada por metro de comprimento de estaca, é maior no modo intermitente do que no modo de contínuo. |
| <p>Universidade de Ciência e Tecnologia de Beijing,</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O teste da estaca térmica indicou que a água em circulação a uma velocidade de 0,5 m/s apresenta a melhor relação custo-benefício, em termos de taxa de troca de calor. |

| | |
|---|---|
| <p>China</p> <p>You <i>et al.</i> (2016)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A taxa de troca de calor em estacas de energia de cascalho de cimento é positivamente proporcional à temperatura água na entrada da estaca; • A taxa média de troca térmica por metro em operação intermitente é 20% maior em comparação com a contínua, e a energia térmica total trocada diminuiu em 14%. • Os testes da estaca térmica atingiram um estado estável em torno de 40 h, em comparação com os TRTs que se estabilizam em 72 h. • A taxa de injeção e extração de calor para o grupo de estacas diminuiu em 5% e 20% em comparação com estacas individuais, durante o teste de estaca térmica; • A distribuição do contorno de temperatura indica que a influência do bulbo de temperatura radial para uma única estaca se espalha mais de 4 m, portanto, o espaçamento entre as estacas não deve ser inferior a 8 m. |
| <p>Universidade de Padova</p> <p>Itália</p> <p>Zarrella <i>et al.</i> (2017)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Realizaram ensaios TRT sobre uma estaca térmica (D=62 cm L=20 m), em Veneza, equipado na configuração U. Foi interpretado por meio de ambos os modelos da fonte linear infinita e análise numérica. • Diferenças estimadas da condutividade térmica (2,8 x 1,5 W/mK) vêm de hipóteses distintas dos métodos estabelecidos; • O TRT padrão pode ser realizado, mas o modelo de fonte de linear infinita pode levar a consideráveis erros na estimativa da condutividade térmica de sistemas de estacas trocadoras de calor. |
| <p>Instituto Técnico Superior</p> <p>Portugal</p> <p>Bourne-Webb <i>et al.</i> 2019</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Quando se avalia o impacto da ativação térmica das fundações de estacas, somente considerando a carga térmica da estaca, pode não a favor da segurança, pois os efeitos do fluxo de calor do edifício, que ocorre em qualquer caso, também devem ser tomados em conta. |
| <p>Instituto Federal de Tecnologia de Lausanne</p> <p>Suíça</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Fizeram uma investigação experimental de estacas térmicas, estudando ensaios de laboratório com ensaios de campo do comportamento termomecânico do solo de interface solo/concreto; • Argilas normalmente adensadas apresentam um comportamento de retração com o aumento de temperatura, especialmente durante os ciclos iniciais, estabilizando ao logo do tempo; |

| | |
|--|--|
| <p>Laloui & Sutman (2021)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Argilas altamente sobre adensadas, apresentam um comportamento expansivo com o aumento da temperatura, que é recuperado, em sua maioria, durante subsequentes diminuições de temperatura. Portanto, deve-se tomar cuidado quanto ao comportamento termomecânico para argilas, levando em consideração a razão de sobre adensamento dela; • A contração de solos argilosos ao redor de estacas térmicas pode desenvolver tensões de cisalhamento negativo, principalmente em seções superiores da estaca; • Resultados dos testes triaxiais de temperatura controlada, revelaram mudanças de tensões desviadoras para altas temperaturas. Para argilas normalmente adensadas, o aumento da temperatura leva a uma significativa contração térmica; • O ângulo de atrito no estado crítico do solo, independe da mudança de temperatura; • Para solos siltosos e arenosos, o ângulo de atrito de interface, solo/estaca, é independente da mudança de temperatura; <p>8 Efeitos cíclicos de degradação, causados pelo atrito de interface solo/estrutura, podem ser consideradas nas análises de projetos de geoestruturas termo ativas.</p> |
| <p>Universidade de Brasília – UnB e Instituto Federal Goiano de Rio Verde Brasil Chaves <i>et al.</i> (2022)</p> | <p>9 Desenvolveram uma calibração de um modelo numérico de um protótipo de estaca térmica, desenvolvido em laboratório, imersa em um solo tropical na condição não saturada, para viabilidade de climatização de estruturas na região central do Brasil;</p> <p>10 A pesquisa empregou uma série de simulações de protótipos de estaca térmica, na faixa de 1m de comprimento, sobre diversas configurações, 1U, 2U e 4U, em uma câmara de calibração termicamente isolada;</p> <p>11 O modelo foi validado no software comercial multiphysics COMSOL, para calibrar e expandir os resultados para cenários possíveis de desempenho de uma estaca térmica;</p> <p>12 Após 50 horas de carregamento térmico, notou-se que o sistema, em todos os casos, atingiu o regime estacionário de troca térmica;</p> <p>13 O coeficiente angular dos resultados de resposta térmica, das diferentes configurações de tubos, permaneceu constante. Por outro lado, o calor dissipado pelo protótipo, variou consideravelmente em função da configuração de tubos, na qual a configuração 2U se mostrou mais eficiente, sobre o ponto de vista de custo-benefício;</p> <p>14 O aumento de área de contato do tubo, aumenta o fluxo de calor a ser dissipado na estaca;</p> |

ANEXO II

Principais resultados **análises numéricas** sobre o comportamento termomecânico e o desempenho térmico estacas térmicas

| Referência | Objetivos e software | Principais resultados | Propriedades |
|----------------------------|---|--|---|
| Choi <i>et al.</i> (2011) | <p>Avaliar o efeito da variação térmica e propriedades do solo não saturado, sobre a operação intermitente de uma estaca térmica</p> <p>ABAQUS 3D FEM</p> | <ul style="list-style-type: none"> - A operação intermitente é mais adequada para condições não saturadas sob condições térmicas desbalanceadas; Diferenças entre a carga de calor em modo intermitente e modo de operação contínua, aumenta à medida que a zona não saturada é mais profunda; Interferências térmicas entre estacas térmicas ativas adjacentes, dependem da profundidade do lençol freático, bem como a distância entre elas. Perceberam-se pequenas mudanças em temperaturas para distâncias > 10D. | <p>D=75cm</p> <p>L = 40m</p> <p>Configuração do tubo: U de 2.5 cm de diâmetro.</p> |
| Peron <i>et al.</i> (2011) | <p>Novo método geotécnico para estacas térmicas baseados em transferência de carga.</p> <p>Modelo 1D pelo método das diferenças finitas.</p> | <ul style="list-style-type: none"> Extensão do trabalho anterior deste mesmo grupo de pesquisa (Knellwolf <i>et al.</i> 2011) no qual desenvolveram um software, em Java, baseado no mecanismo de transferência de carga que permite contabilizar as cargas mecânicas e térmicas de estacas trocadoras de calor individuais; O aquecimento da estaca térmica induz compressão adicional aumentando a mobilização e conseqüentemente a tensão de cisalhamento de interface, enquanto o resfriamento pode induzir uma liberação de tensão, levando a uma inversão do sinal de tensão e eventualmente ao desenvolvimento de tração nas tensões axiais da estaca; Há uma interação entre as mudanças de atrito mobilizado e esforços internos induzidos, causados por variações de temperatura. | <p>D = 50 cm</p> <p>L = 10m</p> <p>Estaca na condição flutuante e semiflutuante</p> |

| | | | |
|---|--|--|---|
| <p>Suryatriyastuti <i>et al.</i> (2012)</p> | <p>Avaliar o efeito da temperatura induzida no comportamento mecânico de estaca térmica sob diferentes tipos de solo e sob condições de interface, no contato perfeito e no contato deslizante.</p> <p>FLAC 3D, FDM 3D</p> | <ul style="list-style-type: none"> • As tensões e deslocamentos obtidos na interface solo-pilar para condição de contato deslizante foram menores, em comparação a condição de contato perfeito; • A aplicação de carga térmica altera o atrito de interface estaca/solo; | <p>Estaca quadrada</p> <p>$B = 0,6 \text{ m}$</p> <p>$L = 15 \text{ m}$</p> <p>Solo arenoso na condição fofa</p> |
| <p>Loveridge & Powrie (2013)</p> | <p>Desenvolvimento de Funções G para Sistemas de estacas térmicas individuais em diferentes condições.</p> <p>COMSOL 2D</p> <p>ABAQUS 3D FEM</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O artigo apresenta Funções G, que expressam o regime transiente do comportamento da variação de temperatura do fluido no tubo de uma estaca térmica de concreto; • As Funções G, foram expressas para combinações de limite superior e inferior relacionadas a diferentes tipos de estacas térmicas estudadas sobre diferentes configurações de tubos; • Um exemplo numérico do método indica que as estacas térmicas devem operar em faixas de baixas temperaturas, menores do que as operadas em poços provençais. Em cenários de longo prazo, há uma tendência a desequilíbrio na transferência líquida de calor, tanto na injeção de calor, quanto na extração dela. | <p>$D = 30, 60 \text{ \&} 120 \text{ cm}$</p> <p>$L/D = 15 \text{ a } 50$</p> <p>2 condutividades do solo e intervalos de tempo distintos</p> |
| <p>Olgun <i>et al.</i> (2014)</p> | <p>Investigação do aumento da capacidade de carga a altas temperaturas devido à</p> | <ul style="list-style-type: none"> • As pressões de contato radiais, normalmente aumentam menos de 15 kPa, o que não podem explicar de forma plena o aumento da resistência de atrito lateral durante o ciclo de aquecimento; | <p>$D = 60 \text{ cm}$</p> <p>Rigidez variável</p> |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | <p>expansão térmica radial de estacas trocadoras de calor.</p> <p>2D FEM</p> <p>COMSOL</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O aumento de temperatura, eleva a rigidez na resposta de deslocamento da estaca térmica, durante carregamento térmico e mecânico contínuo; • As estacas térmicas expandem quase livremente na interface, e ocorrem deformações radiais devido a expansão térmica tanto do solo quanto do concreto com efeitos compensadores; • O aumento do cisalhamento de interface, para carregamentos térmicos cíclicos é, no entanto, maior do que para carregamentos térmicos estacionários, devido à expansão térmica do solo. | <p>Argila rígida não drenada</p> |
| <p>Loveridge & Powrie (2014a) e (2014b)</p> | <p>Investigar a transferência de calor em uma estaca térmica por simulação numérica.</p> <p>Desenvolvimento das Funções G para estacas térmicas de interação múltipla com casos exemplificados.</p> <p>COMSOL, FEM 2D</p> <p>ABAQUS 2D</p> <p>MATLAB software</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Tubos de PEAD instalados no centro em uma estaca resulta em menores magnitudes de distribuição da temperatura na circunferência da estaca. Assim, há uma redução de influência associada à movimentação de estacas no projeto geotécnico; • O segundo artigo amplia um trabalho anterior dos mesmos autores em 2013, que têm Funções G gerados para estacas isoladas com diferentes esbeltezes, baseadas em procedimentos numéricos. No caso presente, as Funções G para grupo de estacas são uma resposta média de todas as estacas, interagindo umas com as outras, cada uma em particular interação com sua respectiva Função G, que depende da estaca, das características do solo, da carga térmica, distâncias de centro a centro e do tempo decorrido de ensaio; • Se várias estacas adjacentes forem usadas como trocadores de calor, haverá interação térmica entre elas. A interação aumentará com o aumento do número de estacas e diminuirá com o espaçamento entre elas. Não é sempre vantajoso utilizar todas as estacas ativas no mesmo bloco de fundação. | <p>D= 1.2m</p> <p>L/D = 5 to 50</p> <p>s/D = 1 to 100</p> <p>Valores baseados em condutividade do solo e difusividade normalizados.</p> |

| | | | |
|--|---|--|---|
| <p>Rotta Loria <i>et al.</i> (2015)</p> | <p>Avaliou o impacto de diferentes magnitudes e combinações de cargas termomecânicas.</p> <p>Lagamini Software</p> <p>FEM 2D</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O aumento da carga térmica e mecânica, em uma estaca térmica, aumenta a magnitude de carga vertical transmitida no pé de estaca; • Deformações plásticas desenvolvidas na interface solo/estaca, quando submetidas a grandes cargas térmicas e mecânicas, induz um carregamento horizontal na estaca, o que acaba afetando a resistência de interface dela; • O a linha neutra move-se para cima e para baixo, dependendo da magnitude da carga termomecânica aplicada; | <p>D =0,88 m</p> <p>L=19,6 m;</p> <p>Areia Saturada</p> |
| <p>Cecinato & Loveridge (2015)</p> | <p>Estudaram o feito de diferentes fatores sobre o desempenho térmico de estacas trocadoras de calor.</p> <p>ABAQUS, 3D MEF</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O fator mais importante consistiu em maximizar o contato de superfície da área dos tubos (aumentar o número de tubos). Porém, colocar os tubos juntos pode levar à interferência na interação térmica tubo/tubo; • Quanto maior condutividade térmica do concreto, o fluxo de calor trocado do sistema; • A vazão do fluido transportador de calor não tem um impacto muito significativo na troca de calor total da estaca térmica, desde que o fluxo turbulento seja mantido; • Foi estudado a influência do diâmetro e o comprimento das estacas; cobertura de concreto; condutividade térmica do concreto, o número e o diâmetro dos tubos, bem como a vazão do fluido, no desempenho térmico da estaca trocadora de calor. | |
| <p>Olgun <i>et al.</i> (2015)</p> | <p>Investigou o efeito de longo prazo sobre a distribuição de temperatura dentro de e ao redor de uma estaca térmica, submetida a</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A natureza e distribuição da temperatura em torno de uma estaca térmica e do solo ao circundante, depende da demanda sazonal de energia; • Em condições climáticas desequilibradas (por exemplo, Chicago, Illinois e Austin, Texas), o sistema perde sua eficiência com o tempo, especialmente em redes de estacas maiores. | <p>D=0.6m</p> |

| | | | |
|----------------------------------|--|--|---|
| | carregamento cíclicos de longo prazo. COMSOL 2D FEM | | |
| Ng <i>et al.</i> (2016) | Estudar o comportamento de estaca térmica semiflutuante sobre as mudanças de tensões horizontais devido a ciclo térmico ABAQUS FEM 2D-Axisimétrico | <ul style="list-style-type: none"> • As expansões e contrações repetidas das estacas, impõem cisalhamento cíclico na interface estaca/solo, diminuindo assim a tensão horizontal. Isto diminui a resistência de interface, o que leva a uma mobilização adicional de resistência de ponta, a fim de equilibrar a redução da capacidade de carga por atrito lateral; • O recalque atinge um estado estabilizado após alguns ciclos repetidos; • A amplitude dos ciclos térmicos e diâmetro da estaca governam a magnitude do atrito lateral na interface estaca/solo; • A tensão horizontal, após 50 ciclos térmicos, diminui em até 90%, e é independente do comprimento de estaca para a faixa de comprimento considerado: 20m a 35m; | D=1-1,75 m L=20-35 m; L/D = 20; Areia de Toyoura |
| Bourne-Webb <i>et al.</i> (2016) | Investigar o comportamento termomecânico de um conjunto de estacas térmicas, variando parâmetros termomecânicos. | <ul style="list-style-type: none"> • - A diferença entre a temperatura inicial do solo e da superestrutura estabelece a demanda de troca térmica a ser considerado no dimensionamento de fundações térmicas; • Valores conservadores são obtidos quando o solo é considerado termicamente inerte. | D=1m L=15, 30, 45m Análise térmica de estaca isolada. |

| | | | |
|--|--|---|---------------------------------|
| | ABAQUS Axi-simétrico 2D | | |
| Olgun <i>et al.</i> (2017) | Investigar o desempenho de estacas térmicas submetidas a carregamento térmico de longo prazo, sobre diferentes condições climáticas. COMSOL 2D-Planar FEM | <ul style="list-style-type: none"> • As amplitudes estimadas de aquecimento/refrigeração são linearmente proporcionais a temperatura da estaca térmica, quando submetida a longos processos de operação (30 anos); • É esperado que a eficiência da troca de calor do sistema de estaca térmica diminua com o tempo de operação. | D=15 cm |
| Sani <i>et al.</i> (2018a), (2018b) (2019b) e | Estudar o mecanismo de fluxo de calor em uma estaca térmica do tipo hélice contínua. COMPASS 2D-Planar FEM | <ul style="list-style-type: none"> • A barra de aço central instalada no meio de uma estaca térmica escavada do tipo hélice contínua, contribui na interferência térmica entre tubos dentro da estaca; • A utilização de barra plástica de resistência adequada, pode ser uma solução energeticamente eficiente para a instalação de loops em estaca térmica do tipo hélice contínua; • O aumento do espaçamento das entre os tubos de entrada e saída, aumenta a eficiência de troca de calor da estaca; • A transferência de calor entre os tubos de entrada e saída, torna-se significativa quando o regime permanente de troca térmica é atingido; • O aumento do número de loops dos tubos instalados, leva um aumento de transferência de calor entre os tubos; • A distribuição da temperatura na superfície da estaca, varia com o aumento do número de loops instalados; • A região termicamente ativa normalizada para uma estaca trocadora de calor, de 1U a 4U instalada, expandiu radialmente em até 7m de distância no solo. | D=60cm Argila de Londres |

| | | | |
|---|--|--|---|
| <p>Sani <i>et al.</i> (2018c)</p> | <p>Investigar o uso de estacas térmicas para armazenamento de calor em solo não saturado.</p> <p>COMPASS, 2D-Axisymm.</p> <p>MEF</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O processo de injeção de calor resulta na secagem do solo ao redor da estaca térmica, resultando assim em solo com menor grau de saturação; • Solos com menor saturação resultam em menor condutividade térmica. No entanto, apresentam uma maior capacidade de armazenamento de calor volumétrico. | <p>D = 60cm</p> <p>L = 30 m</p> |
| <p>Sani & Singh (2018)</p> | <p>Estudar a resposta térmica de estacas trocadoras de calor em solos não saturados sobre carga de aquecimento constante.</p> <p>COMPASS, 2D-Axisymm.</p> <p>MEF</p> | <ul style="list-style-type: none"> • A magnitude de temperatura observada no solo, ao redor da estaca, diminui com o aumento de saturação do solo; • As mudanças de temperatura no solo diminuem significativamente nos primeiros 10 dias, após o teste de aquecimento; • A magnitude do aumento da temperatura diminui com o aumento da granulometria do solo. Isso se dá, pois, solos mais granulares tendem possuir maiores condutividades térmicas em relação a solos mais finos; • A região termicamente ativa no domínio da estaca, aumenta com a granulometria do solo. | <p>D = 60cm</p> <p>L = 30 m</p> <p>Argila, silte e areia não saturadas.</p> |
| <p>Alberdi-Pagola <i>et al.</i> (2018a)</p> | <p>Desenvolver um método para obter as Funções G para múltiplas estacas térmicas pré-fabricadas.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Funções G, são fatores de resposta térmica, adimensional, que descrevem a mudança de temperatura no solo ao redor das estacas trocadoras de calor, dado uma carga térmica aplicada. A pesquisa é baseada em um modelo semiempírico simples, para obter numericamente Funções G, válidas para um tempo de operação de 20 anos, para sistemas isolados, com diferentes espaçamentos de estacas e com 3 condutividades térmicas diferentes do solo; | <p>Forma quadrática</p> <p>L/D = 15, 30, 45, 53</p> <p>Circuito 1U</p> |

| | | | |
|------------------------------------|---|---|--|
| | COMSOL 3D MEF | <ul style="list-style-type: none"> As Funções G apresentadas incorporam os coeficientes de resistência térmica tanto dos tubos como das estacas de concreto ao redor, junto com o solo tudo em termos de variação de tempo e mudança de temperatura, ambos normalizados. | Loop em forma de W para escala de tempo de 20 anos. |
| Alberdi-Pagola <i>et al.</i> 2018b | Desenvolver um procedimento de otimização para dimensionamento de grupos de estacas térmicas. Sub-rotina baseada em MATLAB Funções G. | <ul style="list-style-type: none"> Otimização de grupo de estacas térmicas que minimiza o número de estacas por meio de uma função de desejabilidade, com Funções G. O procedimento maximiza o espaçamento das estacas trocadoras de calor; Estimou que se poderia ter menos de 32% de estacas térmicas do que se estima nos métodos convencionais; A função de desejabilidade permite melhores condições de otimização racional, em função da demanda de energia. | D = 30x30 cm L = 15 m Argila pós-glacial sobre areia e pedregulho. |
| Wang <i>et al.</i> (2019) | Análise das características de uma estaca trocadora de calor, com efeitos térmicos cíclicos. 2D MEF | <ul style="list-style-type: none"> O aquecimento e o resfriamento cíclico levam a deslocamentos adicionais e tensões axiais induzidas ao longo da estaca; Existe um ponto neutro, na profundidade relativa do eixo da estaca, na qual os deslocamentos adicionais causados pela variação de temperatura são nulos; Os deslocamentos têm direção oposta, para cima e para baixo, em relação ao ponto neutro. | D=100cm L=40m |
| Sutman <i>et al.</i> (2019) | Estudaram a transferência térmica entre o solo e à | <ul style="list-style-type: none"> Há uma boa relação entre o modelo numérico e os resultados experimentais estudados, em termos de comportamento térmico cíclico; | D= 45.7 cm L = 15.2 m |

| | | | |
|---------------------------------|---|--|---|
| | <p>estaca por meio de análises numéricas por MEF.</p> <p>COMSOL 2D</p> <p>MEF</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O calor dissipado na superfície da estaca produz maior resistência de atrito lateral mobilizado; • Os deslocamentos relacionados a variações de temperatura são geralmente menores em comparação com a das cargas estruturais. | |
| De Almeida <i>et al.</i> (2020) | <p>Desenvolver um modelo numérico de resposta térmica (TRT) em uma estaca trocadora de calor em solo tropical.</p> <p>ANSYS CFX V. 19.2</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O modelo numérico se mostrou confiável para uma análise paramétrica, apresentando erros médios de 0,13% de temperatura, quando comparado com os valores calculados de temperatura de saída dos valores experimentais obtidos; • A taxa de transferência de calor, as temperaturas na interface e o bulbo de influência térmica aumenta de 50 para 200 horas de ensaio. Estabilizando assim após o instante 200 h; • Este estudo mostra que modelos numéricos baseados em CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>), pode ser uma ferramenta confiável para estudo de problemas geotérmicos de estacas trocadoras de calor; | |
| Lou <i>et al.</i> (2021) | <p>Este artigo discute uma modelagem numérica, 3D, que avalia o desempenho térmico de grupos de estacas trocadoras de calor, em solo submetido a um fluxo de percolação de água. O modelo de transferência de calor foi desenvolvido e validado por meio de dados de experimentos de campo.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • O COP médio dos grupos de estacas térmicas aumentou com a velocidade de percolação de água no interior do solo; • As zonas afetadas pelo calor das estacas térmicas foram significativamente afetadas pelo fluxo da água percolada; • Para fins de segurança, não é recomendado considerar o efeito do fluxo de água na verificação de capacidade de carga das estacas térmicas, pois percolação de água diminuirá a carga térmica axial; • É improvável que o fluxo de água induza uma falha na capacidade de carga a curto prazo (por exemplo, um mês). | <p>D = 65cm</p> <p>L = 52 m</p> <p>Diferentes tipos de solos.</p> |

| | | | |
|-----------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| <p>Hu <i>et al</i> (2022)</p> | <p>Apresenta, por meio de um estudo de caso, uma abordagem de carga baseada em confiabilidade de fator de resistência para projeto de estacas térmicas, considerando a degradação e desempenho da estaca a longo prazo. Com base no modelo de transferência de carga, foram investigados o estado limite de serviço das estacas térmicas.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Sobre um ponto de vista de vida útil, as cargas térmicas exercem um impacto significativo na operação das estacas de energia; • O desempenho da estaca é pouco afetado quando a mudança de temperatura é baixa ($\Delta T < +/-4^{\circ}\text{C}$); | <p>D = 42 a 57cm L = 10 a 14m</p> |
|-----------------------------------|---|--|---------------------------------------|

ANEXO III

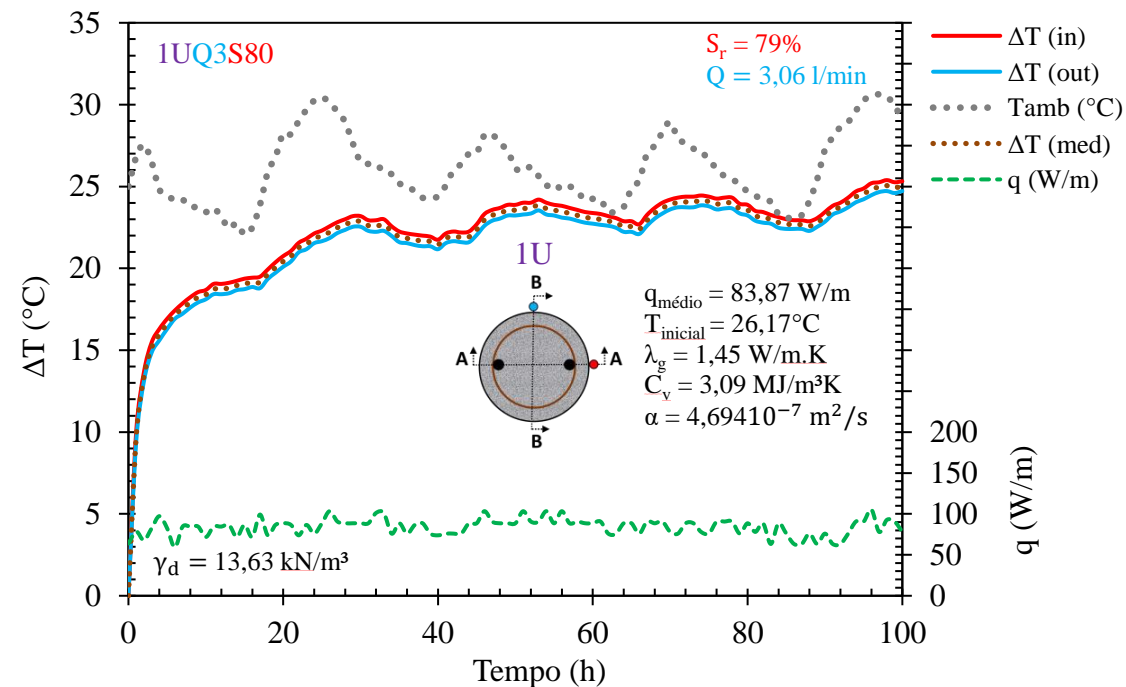
Relatório de sondagem do subsolo do laboratório de estruturas e hidráulica da Faculdade de Tecnologia da UnB.

| Cód.Obra | | CLIENTE: | | FURO N. | | SONDAGEM A PERCUSSÃO PARA FINS DE RECONHECIMENTO DO SOLO | |
|---|------------------|---|--|---|--|--|--|
| 6260 | | GRUPO DE ESTUDOS DE TECNOLOGIAS DA ENGENHARIA CIVIL - GETEC | | F01 | | | |
| LOCAL: | | | | DATA INICIO: | | N. RELATÓRIO: | |
| LABORATÓRIO HIDRAULICA UNB QUADRA 607 NORTE BRASÍLIA/DF | | | | 26/05/2020 | | 6260/2020 | |
| | | | | DATA TÉRMINO: | | FOLHA: | |
| | | | | 26/05/2020 | | 03 | |
| NÍVEL DE ÁGUA EMÉTODO | Profundidade (m) | DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS | ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO - SPT | | GRÁFICO DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO N 30cm INICIAIS/FINAIS | Limite sondagem= 16,45 m NA não encontrado | |
| | | | 30 cm Inicial 1. e 2. | 30 cm Final 2. e 3. | | CLASSIFICAÇÃO DO SOLO | |
| | 0,45 | Argila | 0 | 0 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Muito mole | |
| | 1,45 | Argila | 4 | 4 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Mole | |
| | 2,45 | Argila | 3 | 3 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Mole | |
| | 3,45 | Argila | 2 | 2 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Muito mole | |
| | 4,45 | Argila | 3 | 3 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Mole | |
| | 5,45 | Argila | 6 | 5 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Mole | |
| | 6,45 | Argila | 7 | 7 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Média(o) | |
| | 7,45 | Argila | 14 | 15 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 8,45 | Argila | 18 | 19 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 9,45 | Argila | 20 | 23 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Dura(o) | |
| | 10,45 | Argila | 13 | 13 | | Argila Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 11,45 | Argila | 13 | 16 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 12,45 | Argila | 13 | 14 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 13,45 | Argila | 16 | 20 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Dura(o) | |
| | 14,45 | Argila | 15 | 17 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| | 15,45 | Argila | 16 | 16 | | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Rija(o) | |
| 16,45 | Argila | 17 | 21 | Argila Siltosa Pouco Arenosa, Cor vermelha, Dura(o) | | | |

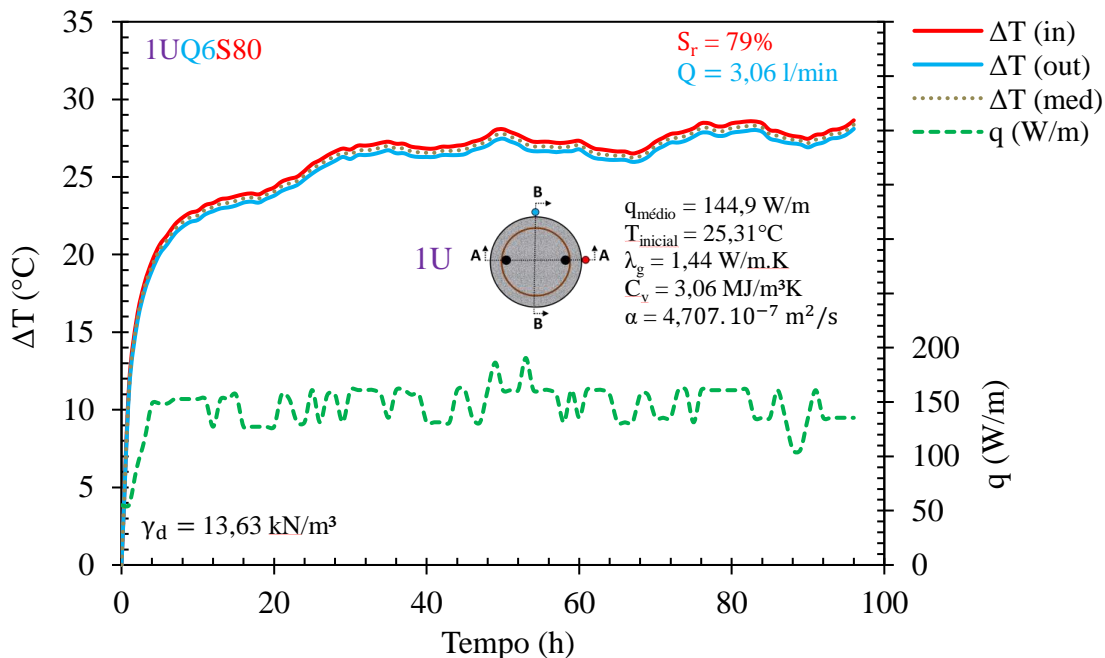
ANEXO IV

Resultados de todos os ensaios TRT realizados nessa tese, para as configurações 1U, 2U e 4U variando a vazão em 3,06; 6,14 e 12,41 l/min, para a condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$).

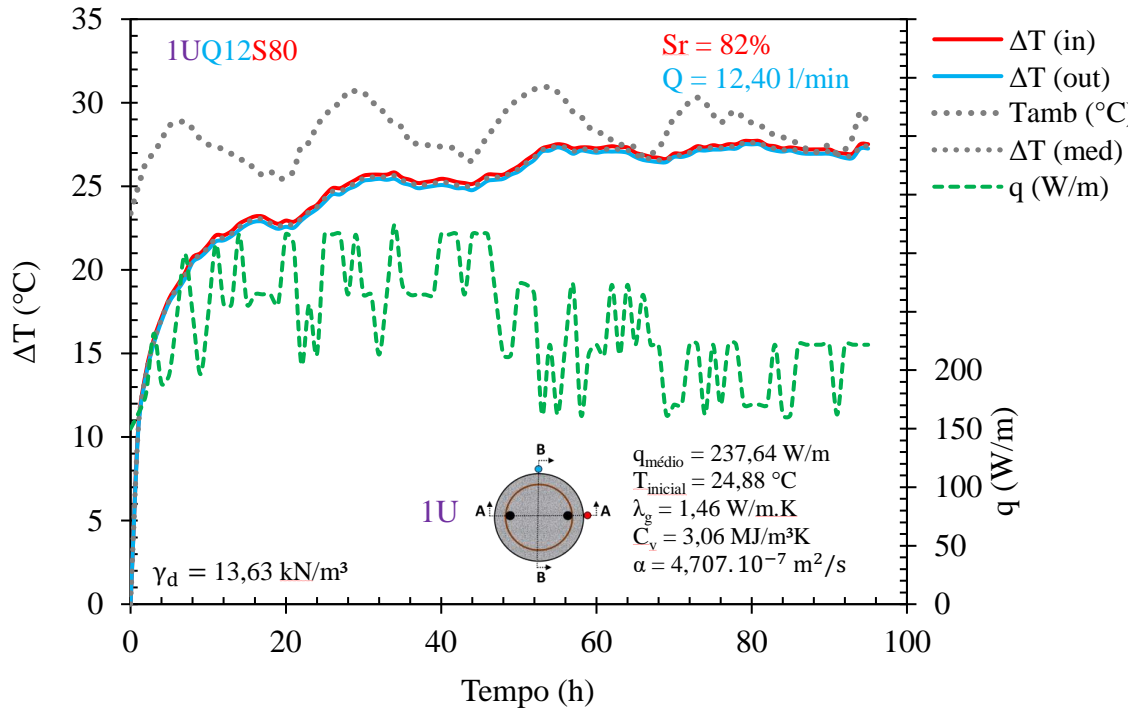
Ensaio TRT na configuração 1U



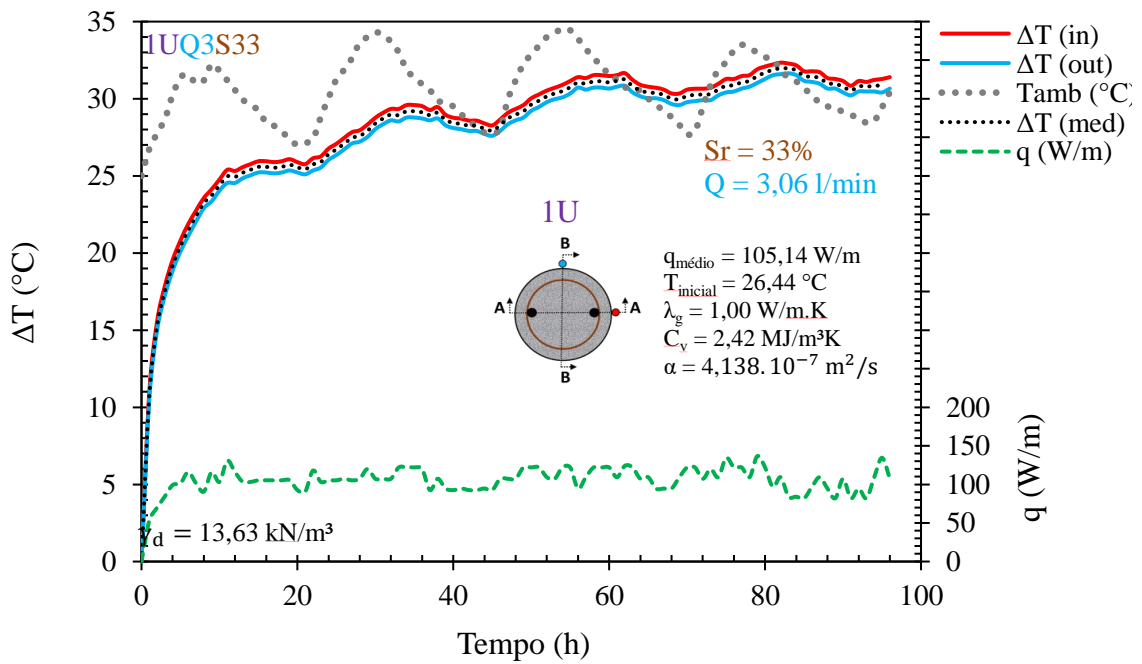
(a)



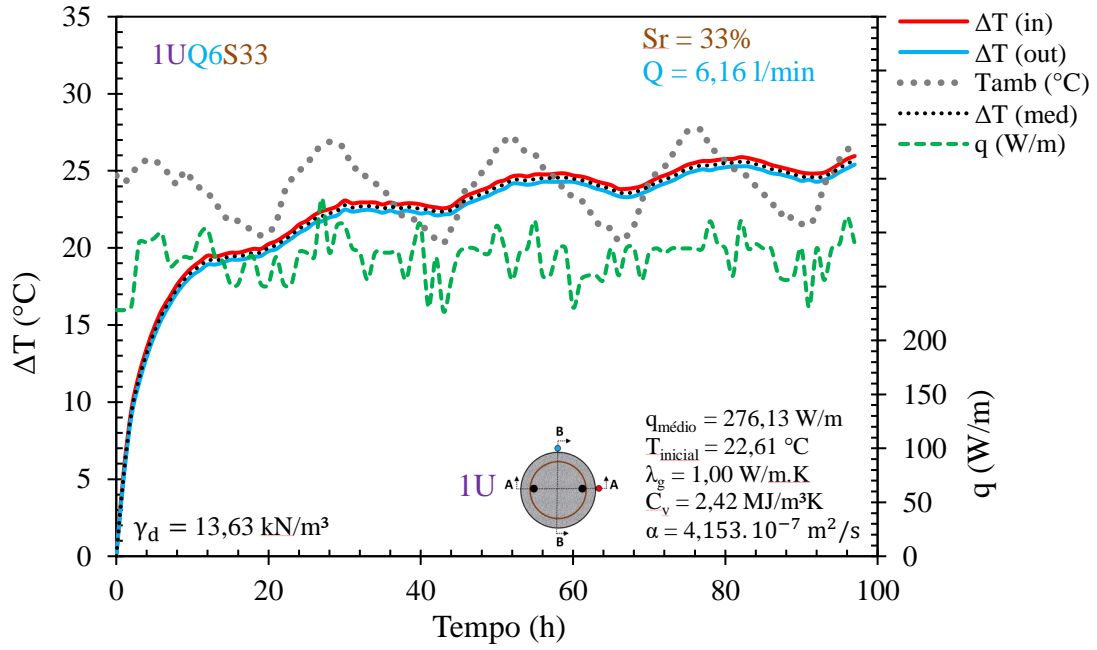
(b)



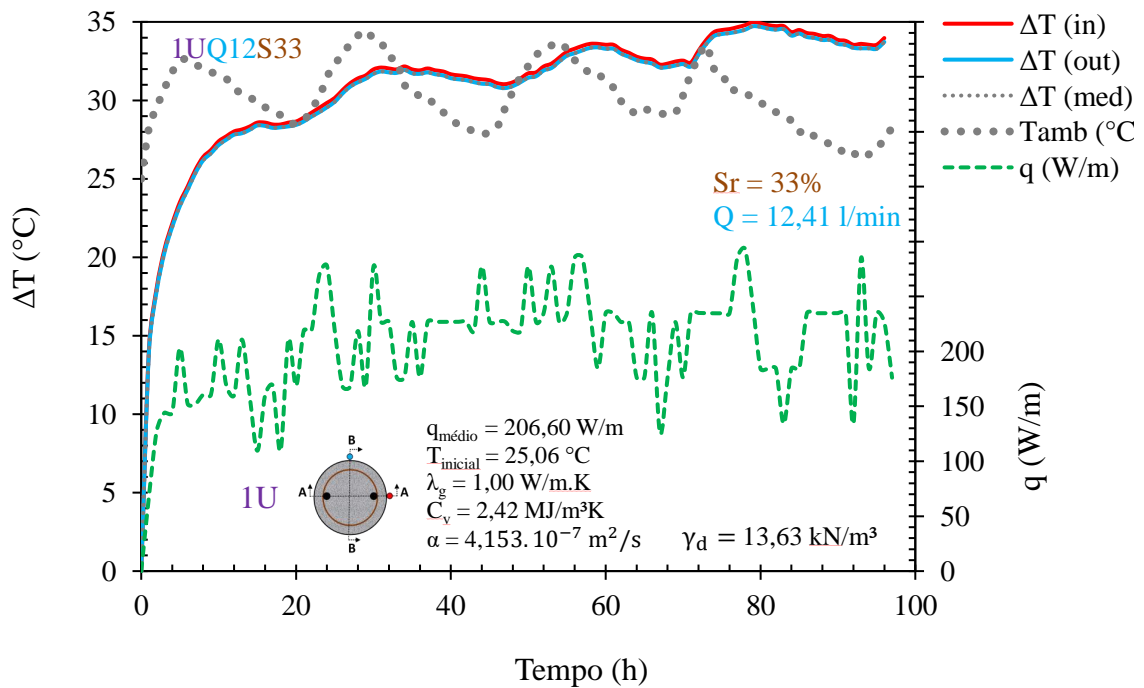
(c)



(d)



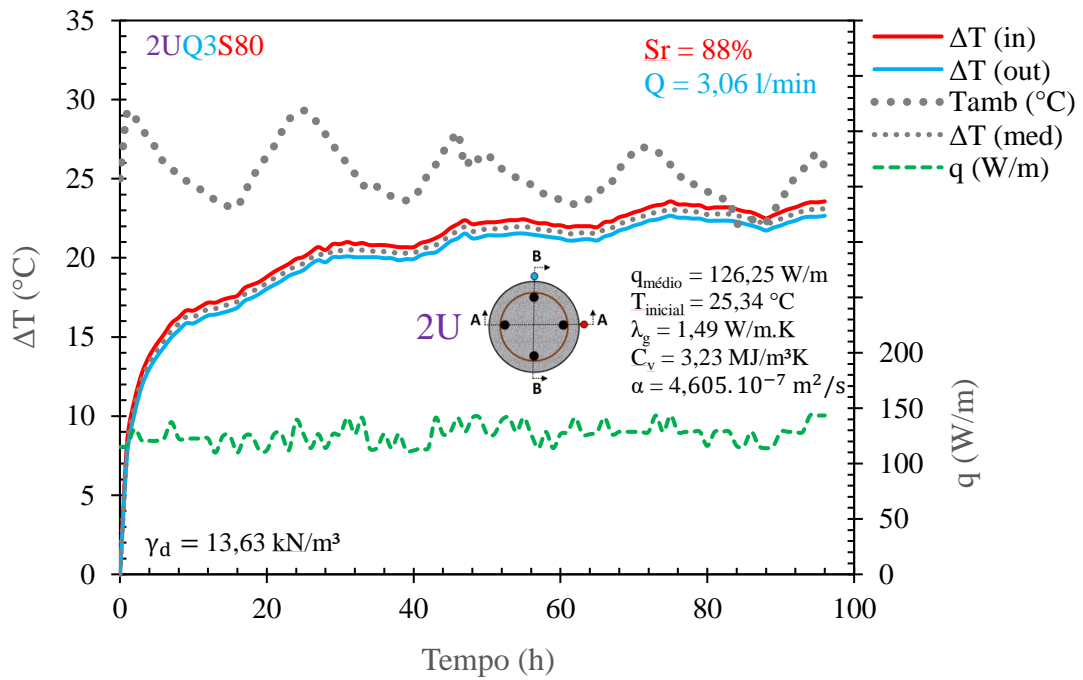
(e)



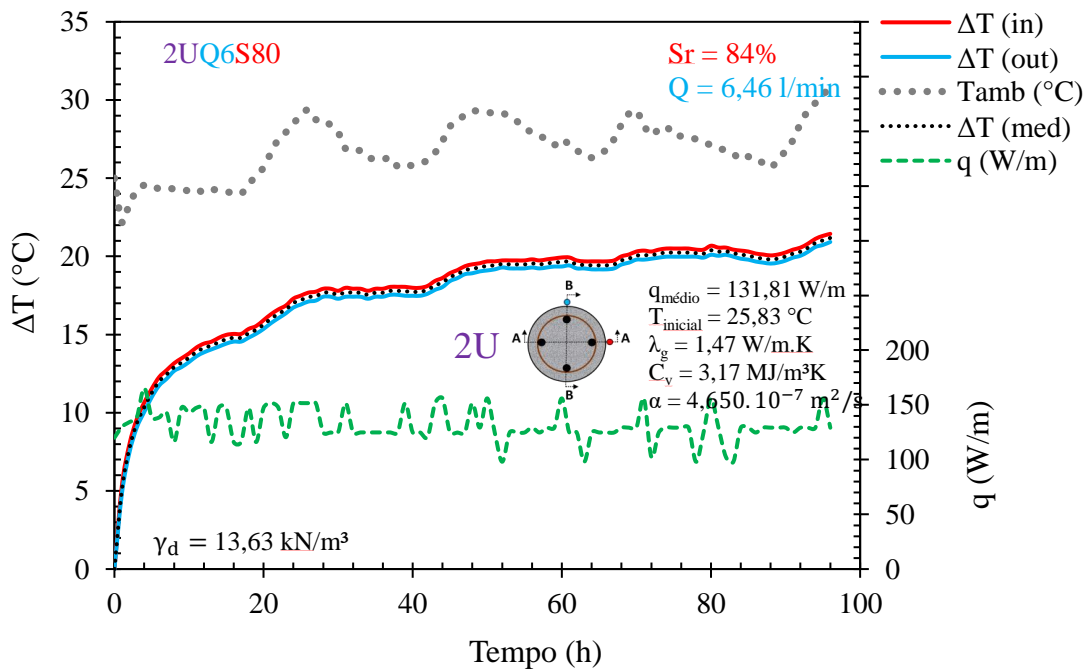
(f)

Figura 1 – (a) ensaio TRT1UQ3S80, (b) ensaio TRT1UQ6S80, (c) ensaio TRT1UQ12S80; (d) ensaio TRT1UQ3S33; (e) TRT1UQ6S33; (f) TRT1UQ12S33

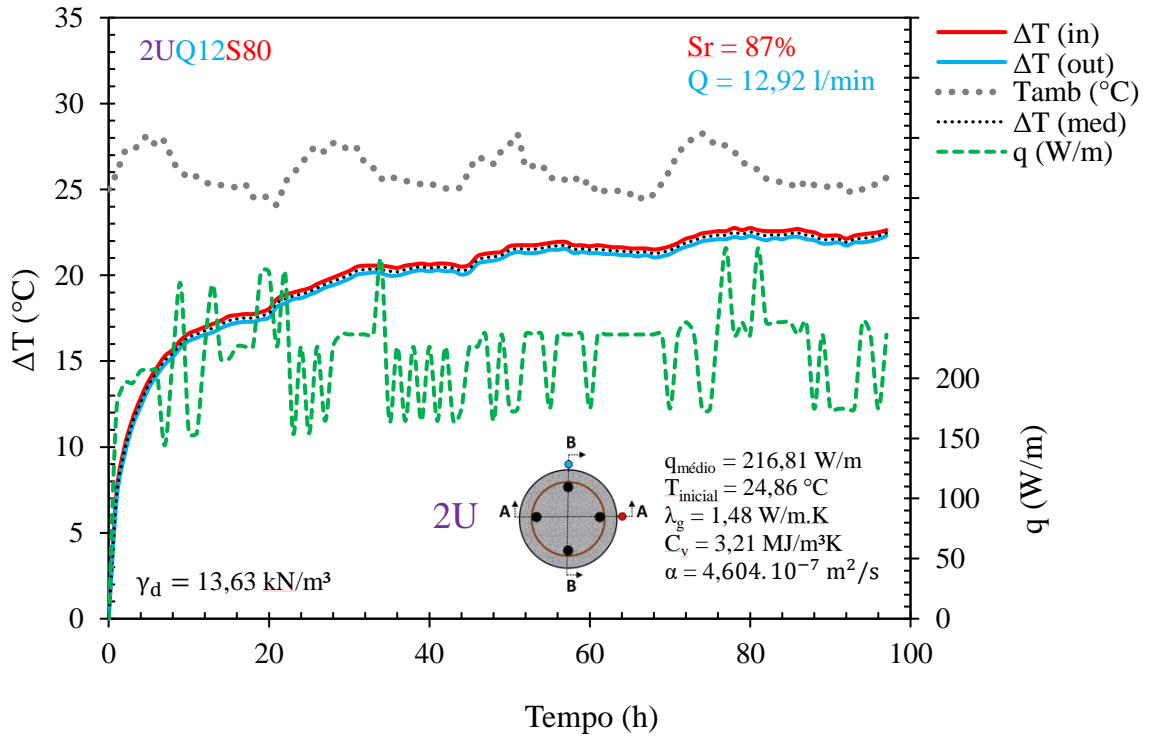
Ensaio TRT na configuração 2U



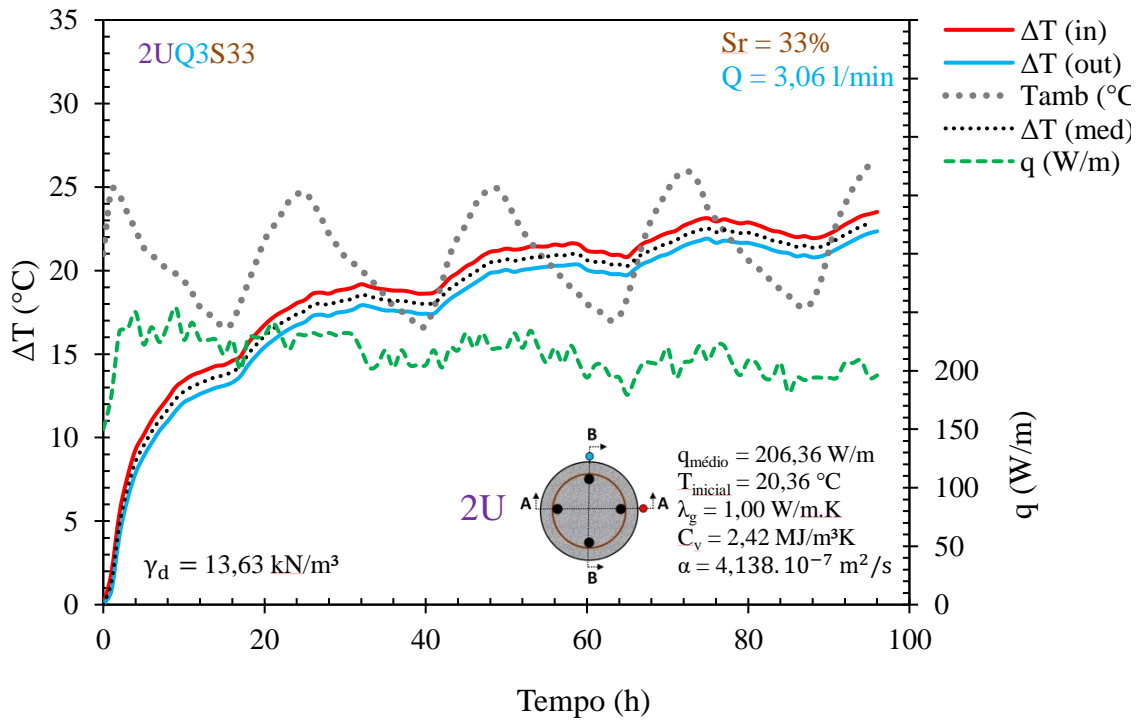
(a)



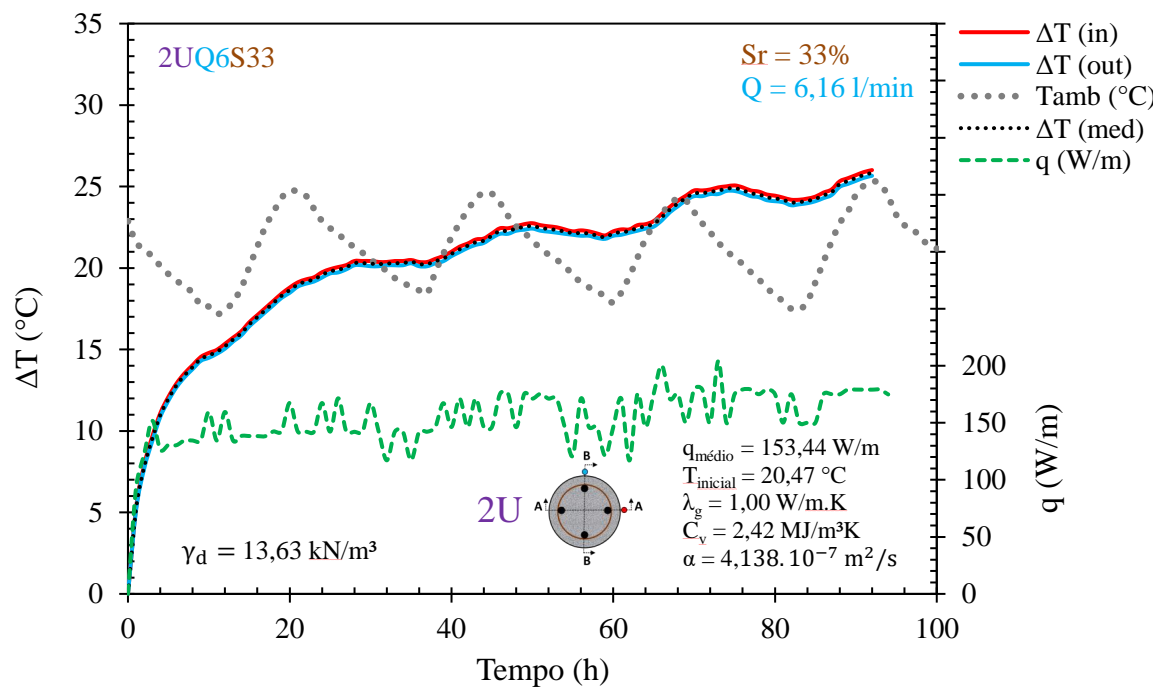
(b)



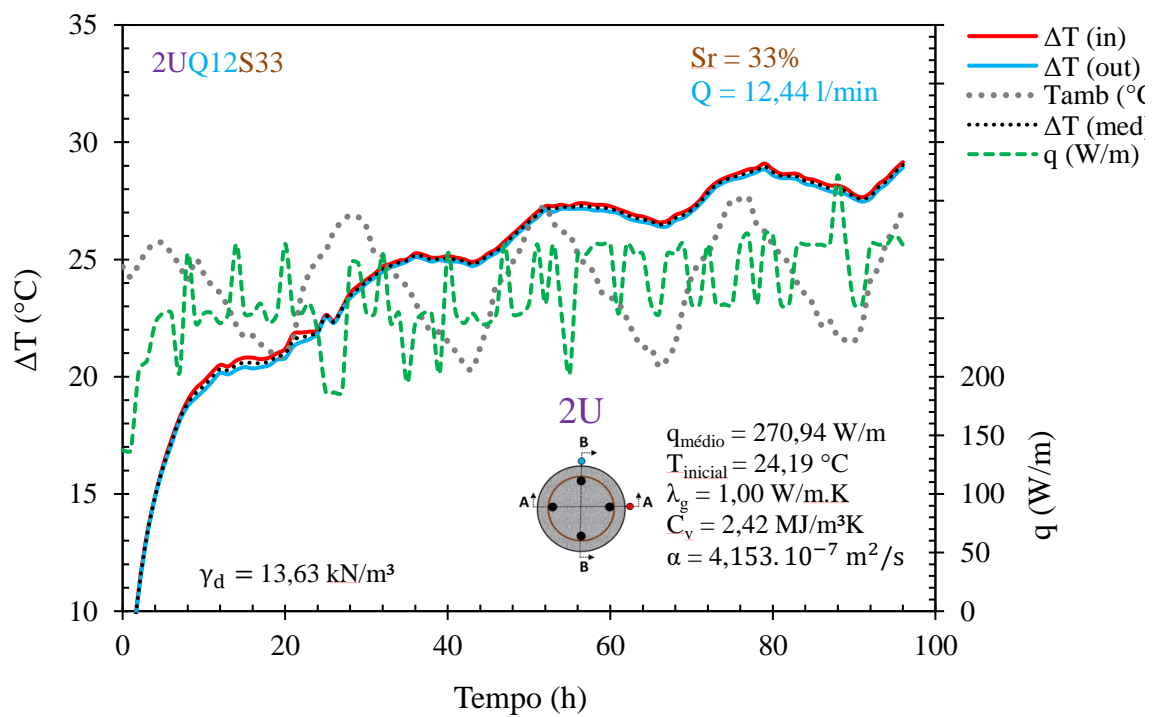
(c)



(d)

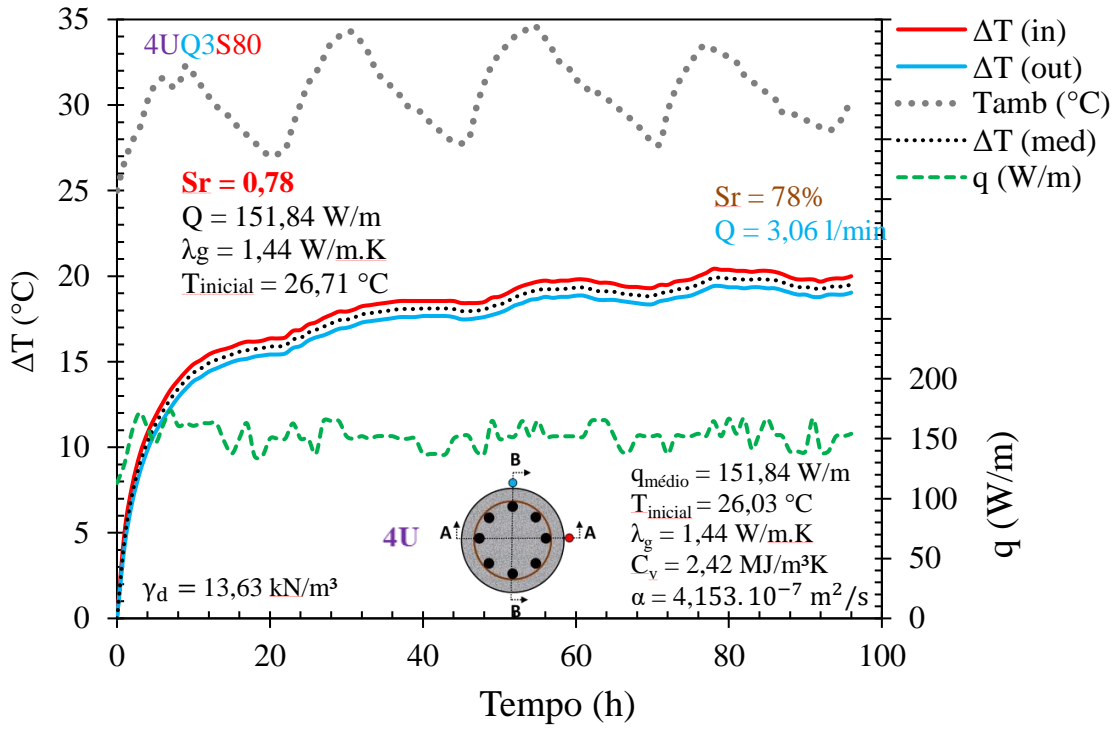


(e)

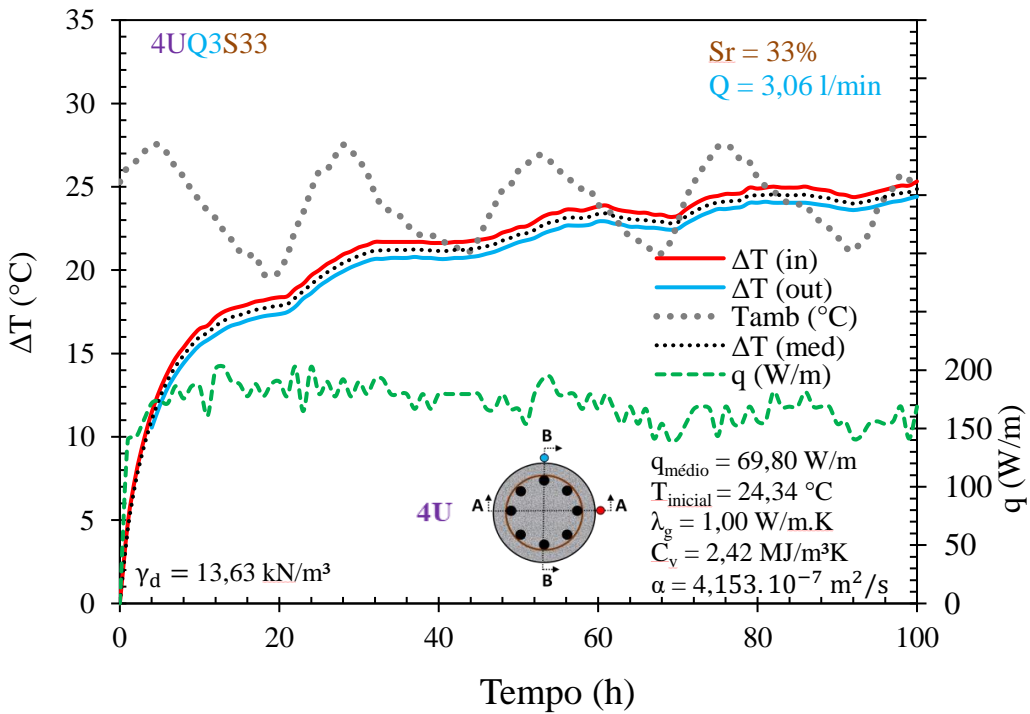


(f)

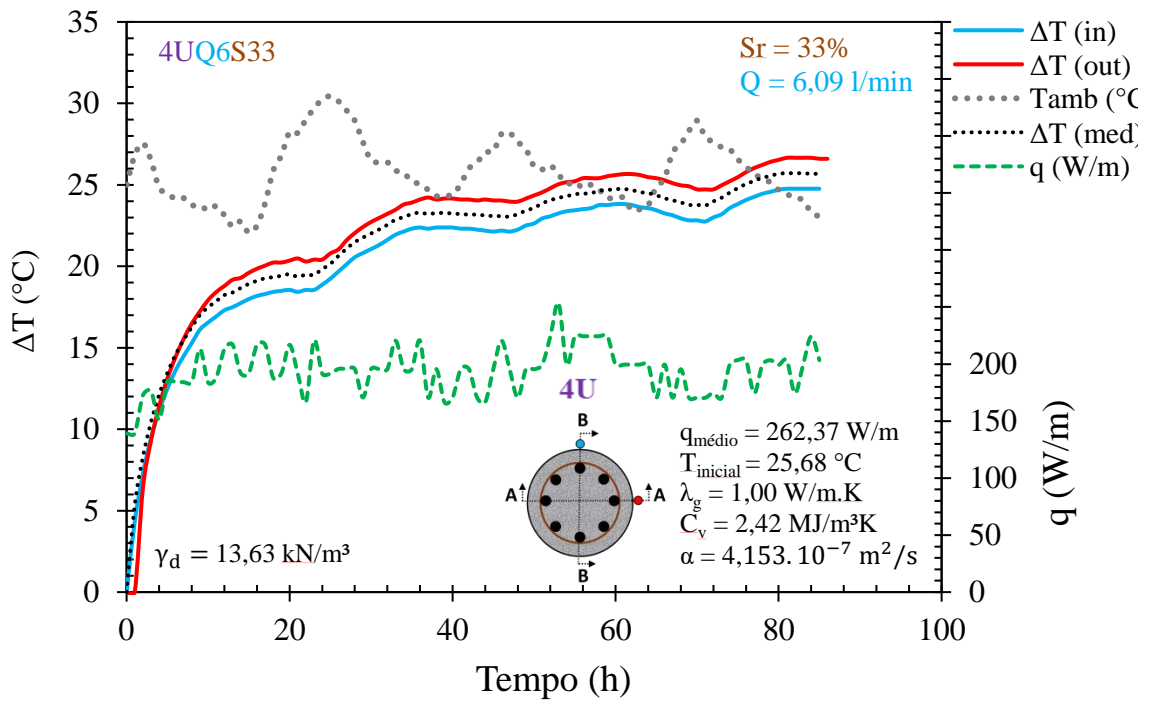
Figura 2– (a) ensaio TRT2UQ3S80, (b) ensaio TRT2UQ6S80, (c) ensaio TRT2UQ12S80; (d) ensaio TRT2UQ3S33; (e) TRT2UQ6S33; (f) TRT2UQ12S33.



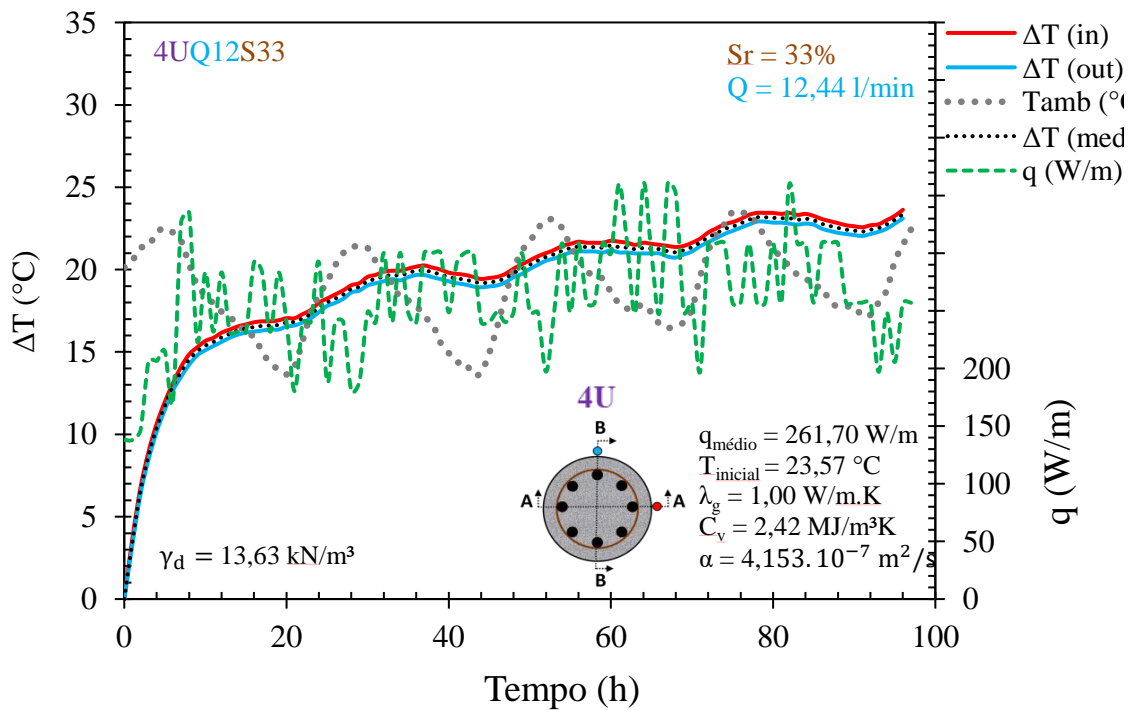
(a)



(b)



(c)



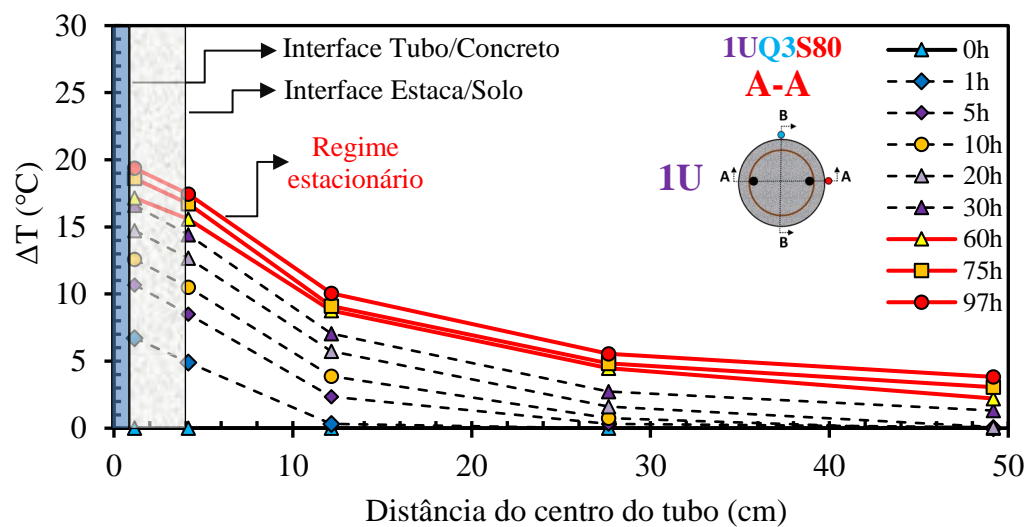
(d)

Figura 3 – (a) ensaio TRT4UQ3S80, (b) ensaio TRT4UQ3S33, (c) ensaio TRT4UQ6S33 e (d) ensaio TRT4UQ12S33.

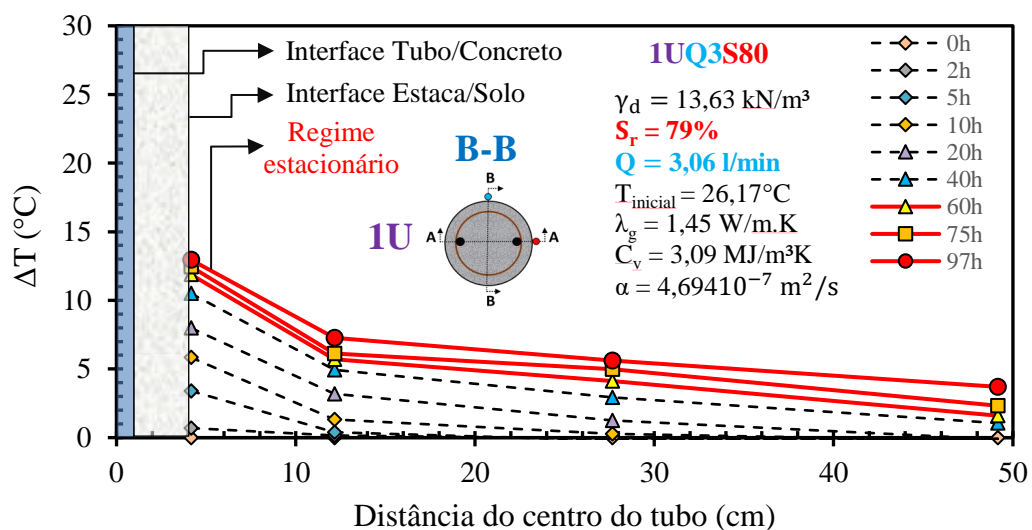
ANEXO V

Distribuição de temperaturas no espaço e tempo unidimensional para os ensaios de vazão 3,06 l/min e configuração 2U e 4U, na condição saturada ($S_r = 80\%$) e não saturada ($S_r = 33\%$).

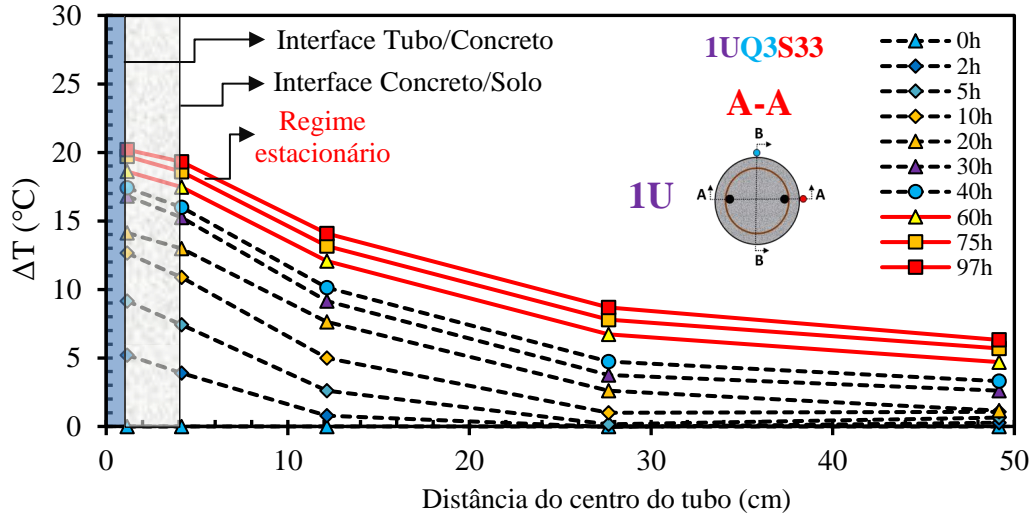
Ensaio TRT na configuração 1U Condição saturada e não saturada



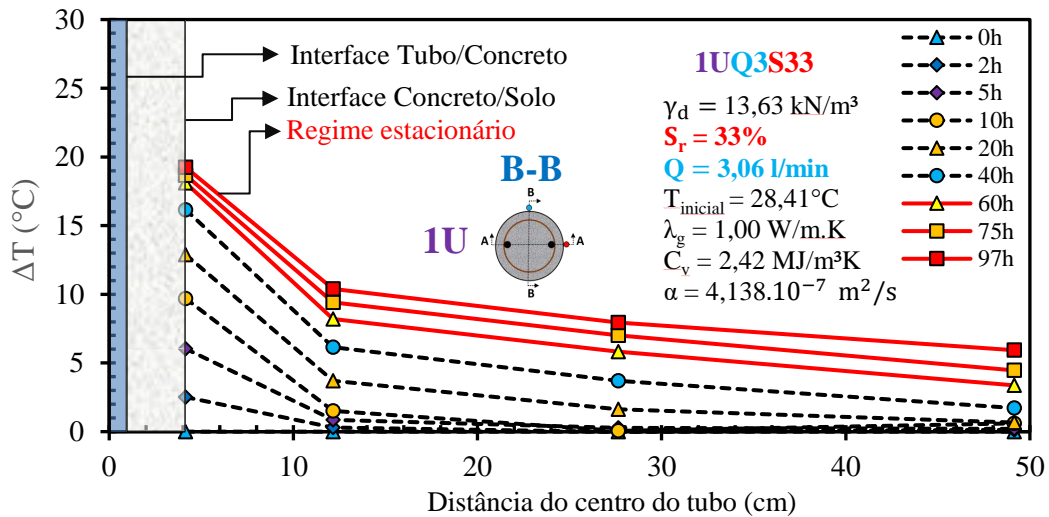
(a)



(b)



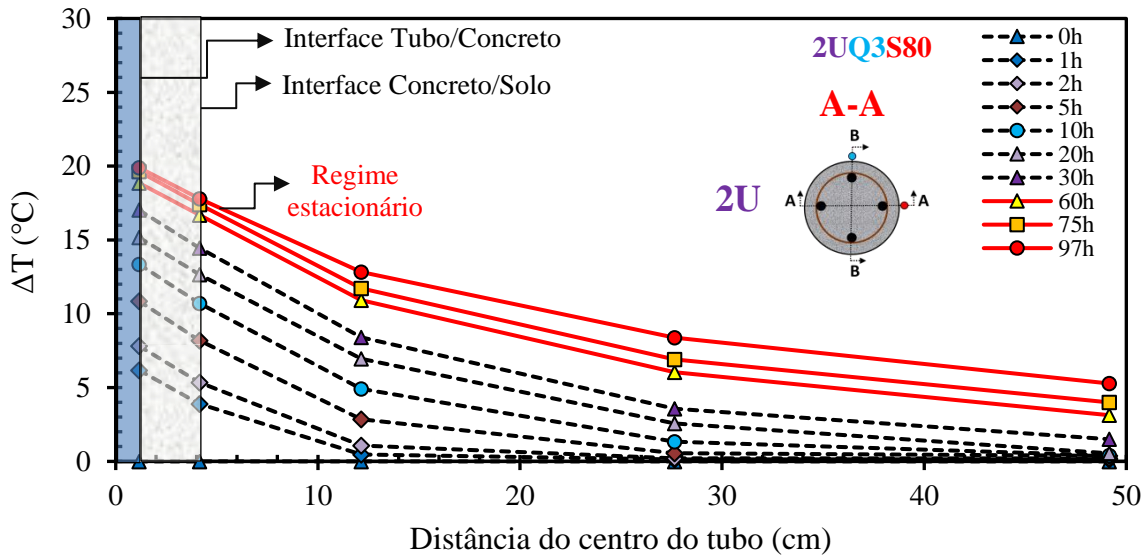
(c)



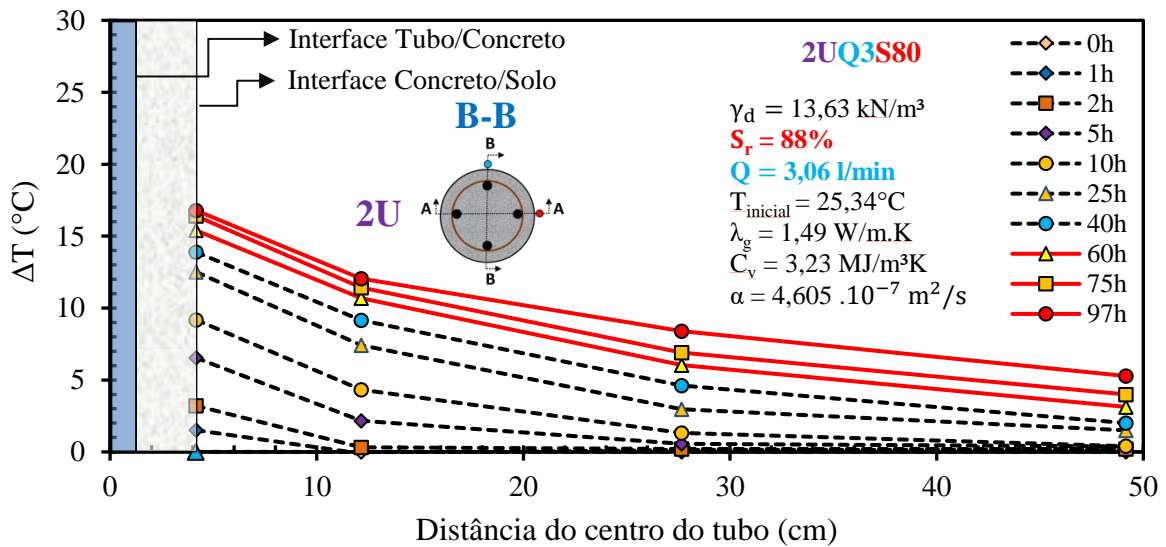
(d)

Figura 1 – (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 1UQ3S80. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 1UQ3S80, (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 1UQ3S33. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 1UQ3S33.

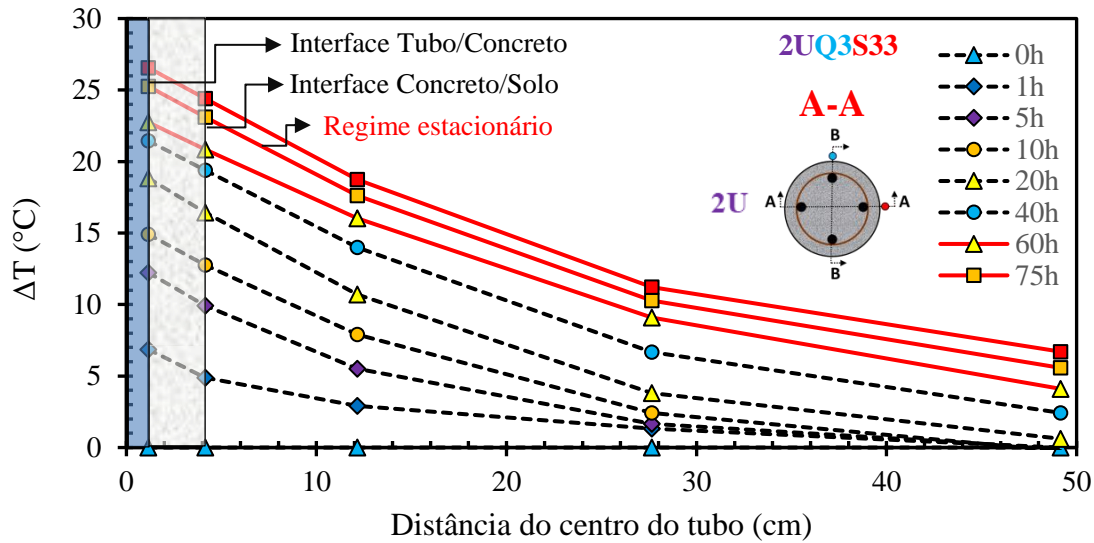
Ensaio TRT na configuração 2U na condição saturada e não saturada



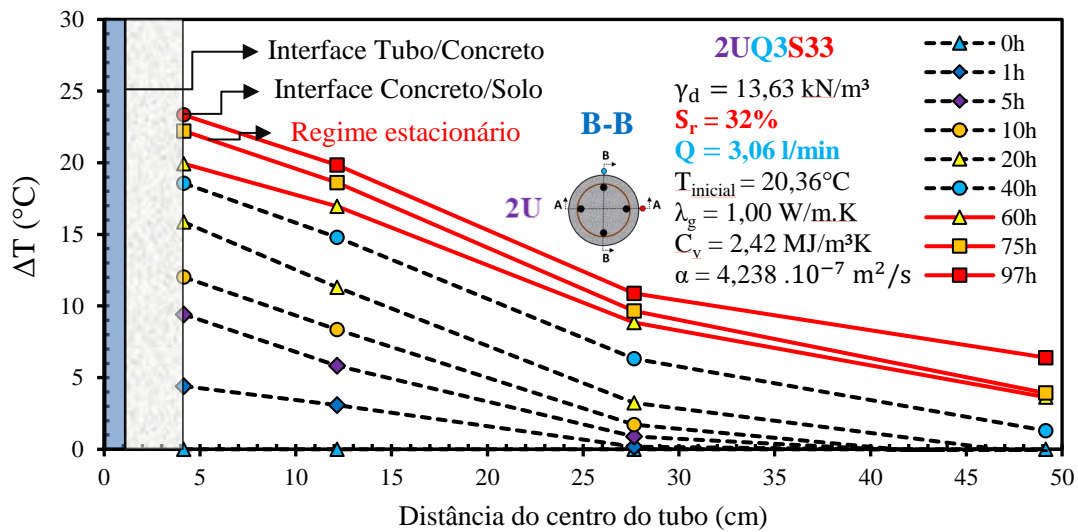
(a)



(b)



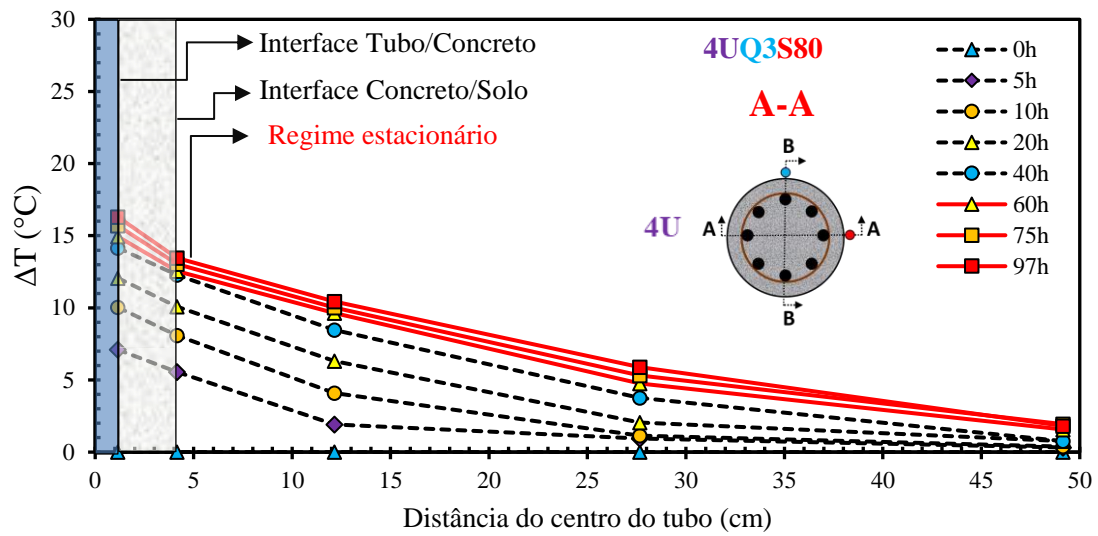
(c)



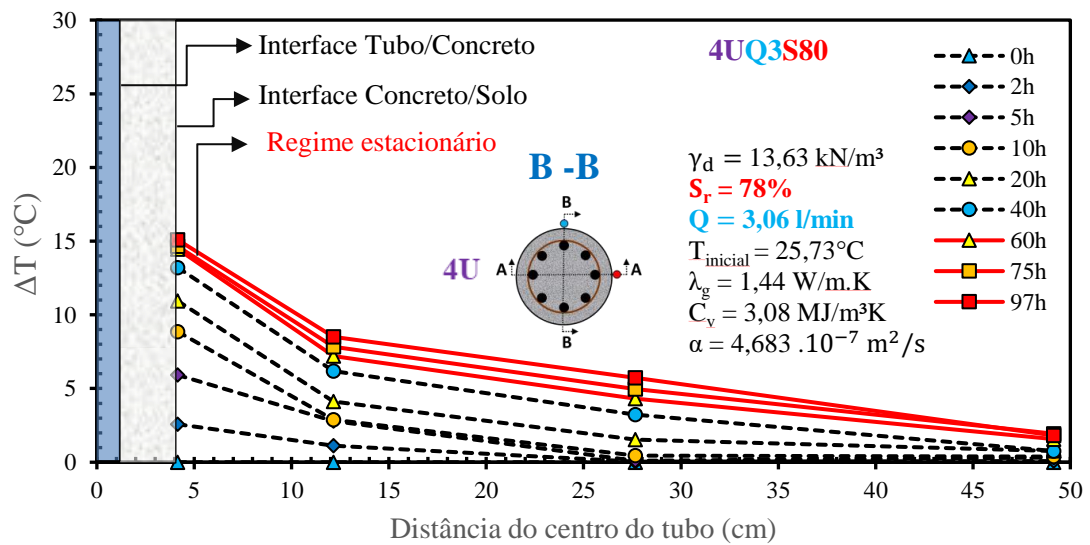
(d)

Figura 2 – (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 2UQ3S80. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 2UQ3S80, (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 2UQ3S33. (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 2UQ3S33.

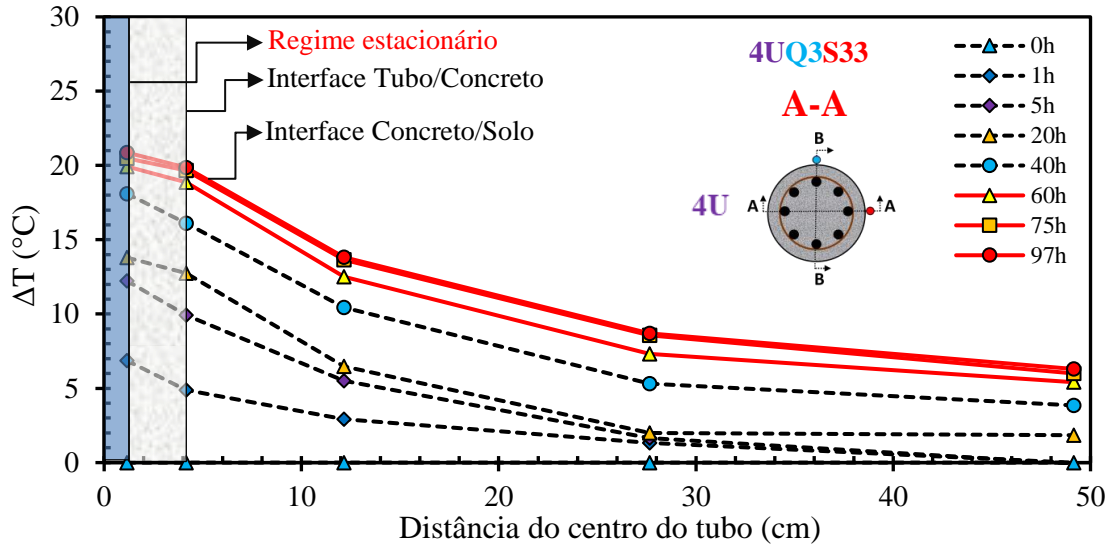
Ensaio TRT na configuração 4U na condição saturada e não saturada



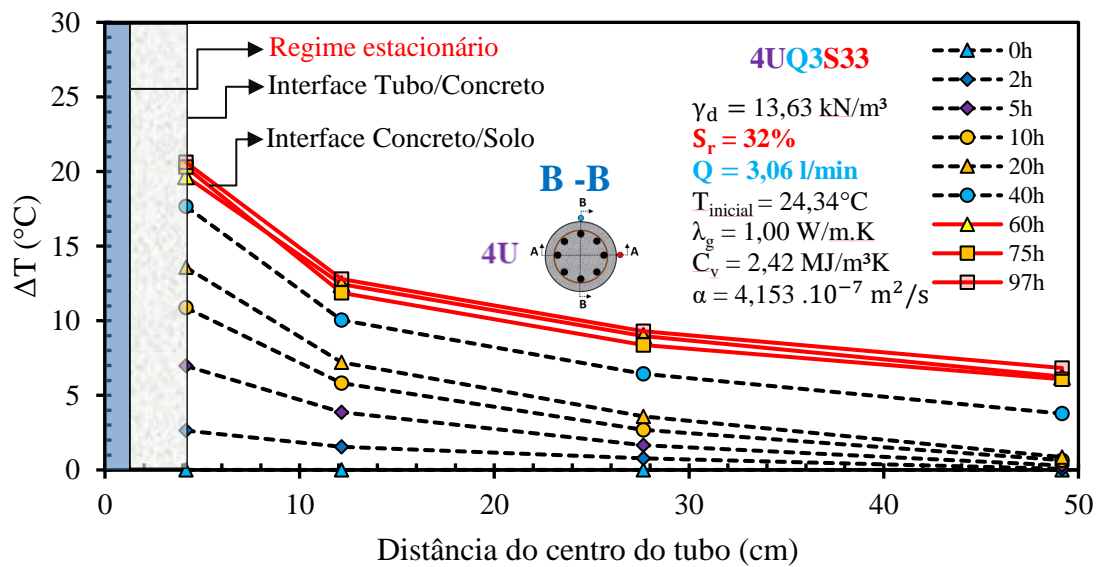
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 4UQ3S80, (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 4UQ3S80, (a) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção A-A para o ensaio 4UQ3S33, (b) Aumento de temperatura na distância radial em diferentes horas de ensaio na direção B-B para o ensaio 4UQ3S33.

ANEXO VI

Mapas térmicos bidimensionais, para os ensaios TRT nas configurações 1U, 2U e 4U, para a vazão de 3,06 l/min nas condições saturadas e não saturadas

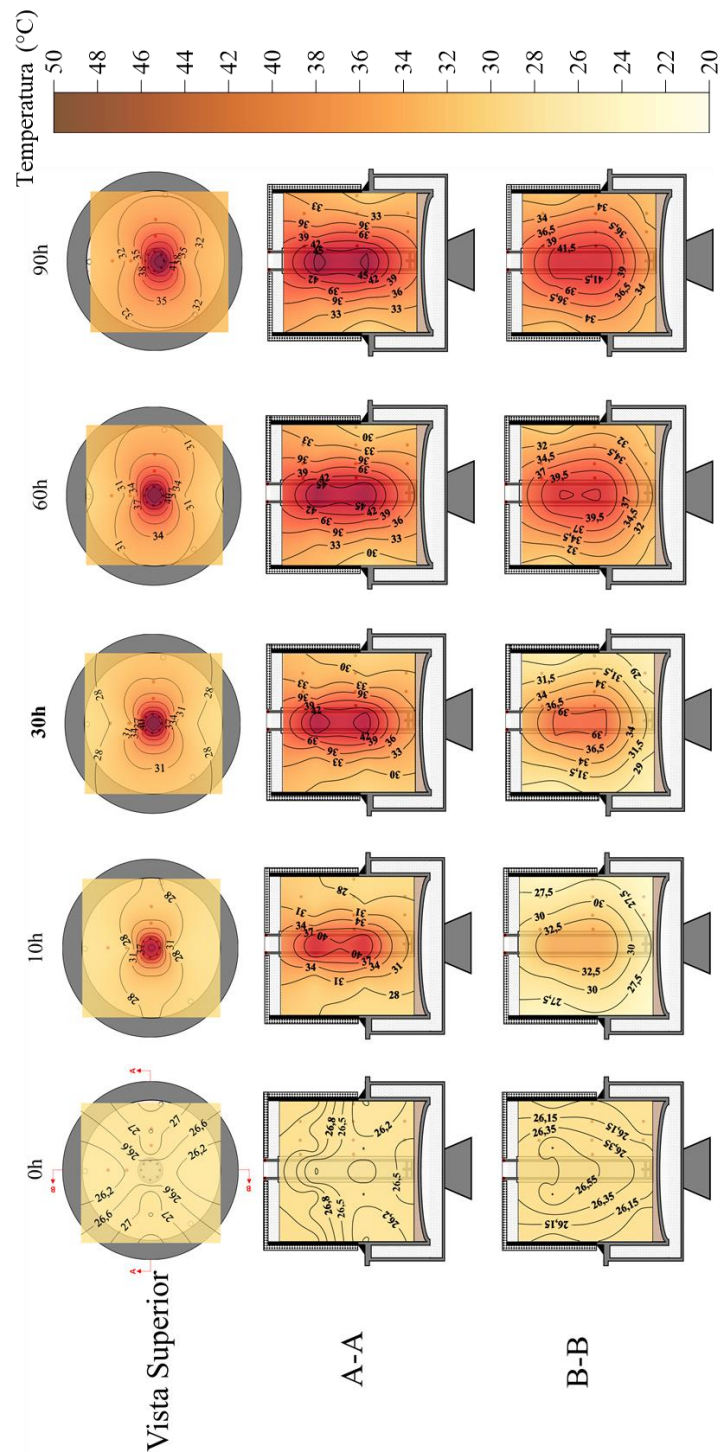


Figura 1 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo c a estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 80% (1UQ3S80).

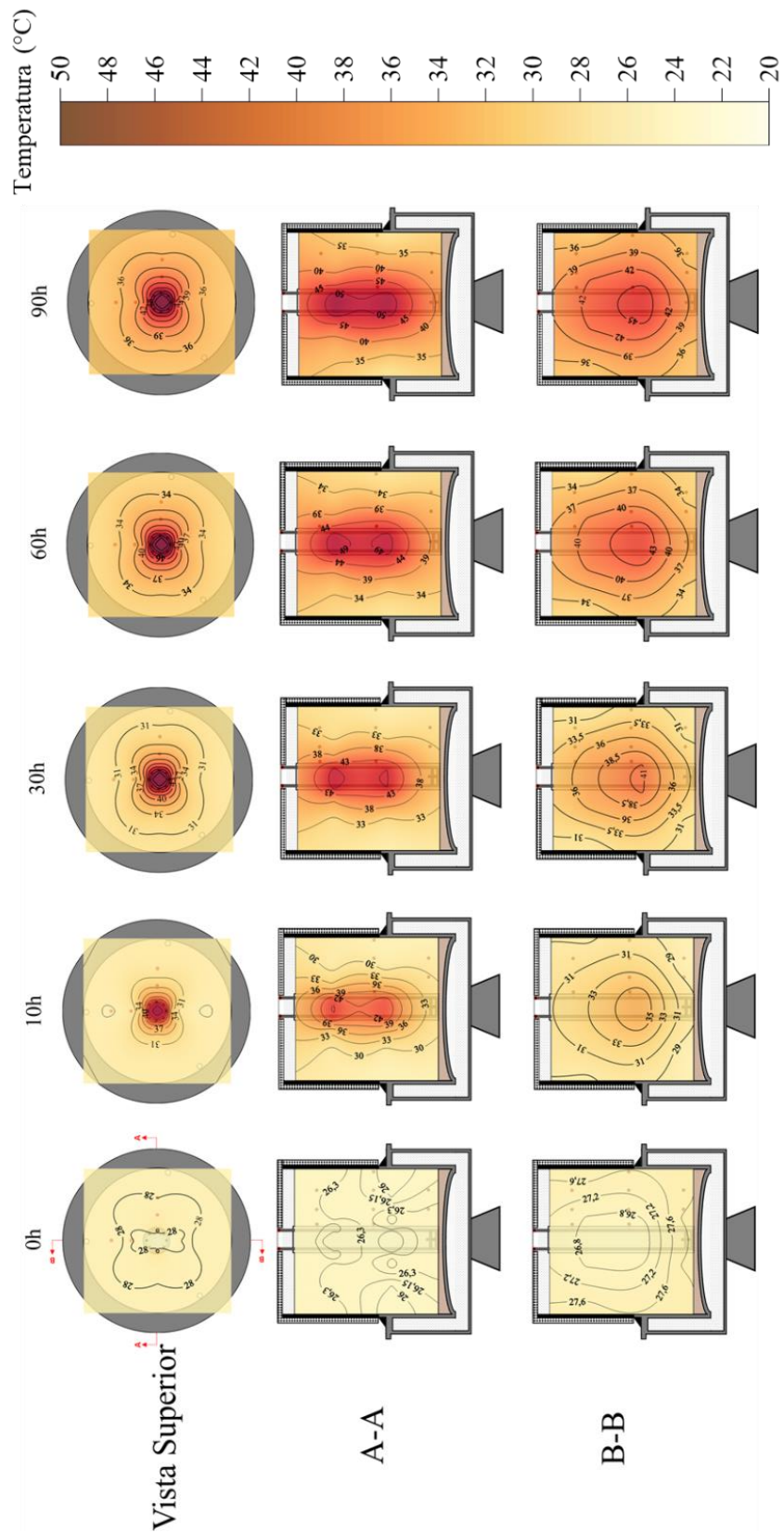


Figura 2 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 1U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 33% (1UQ3S33).

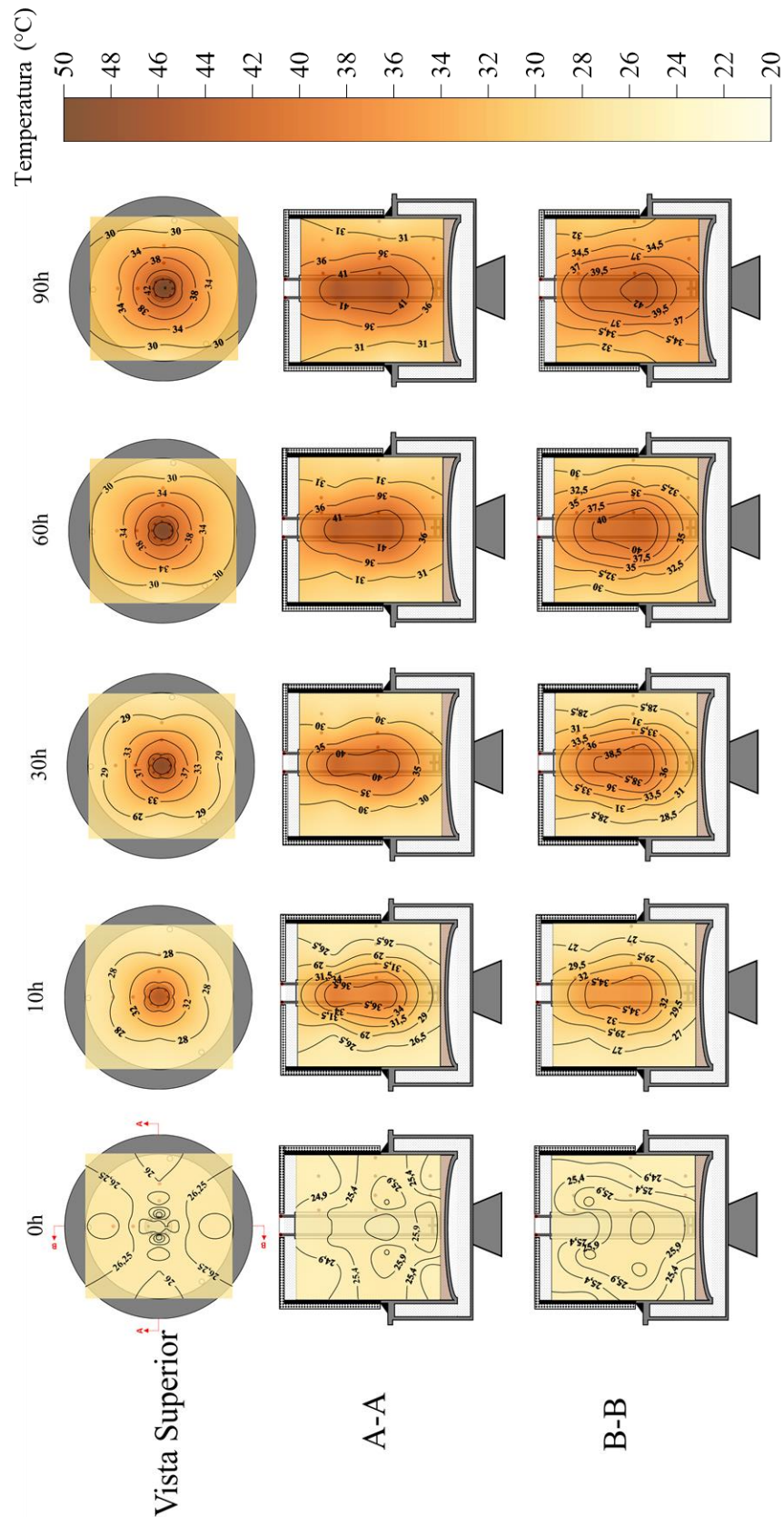


Figura 3 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 2U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 80% (2UQ3S80).

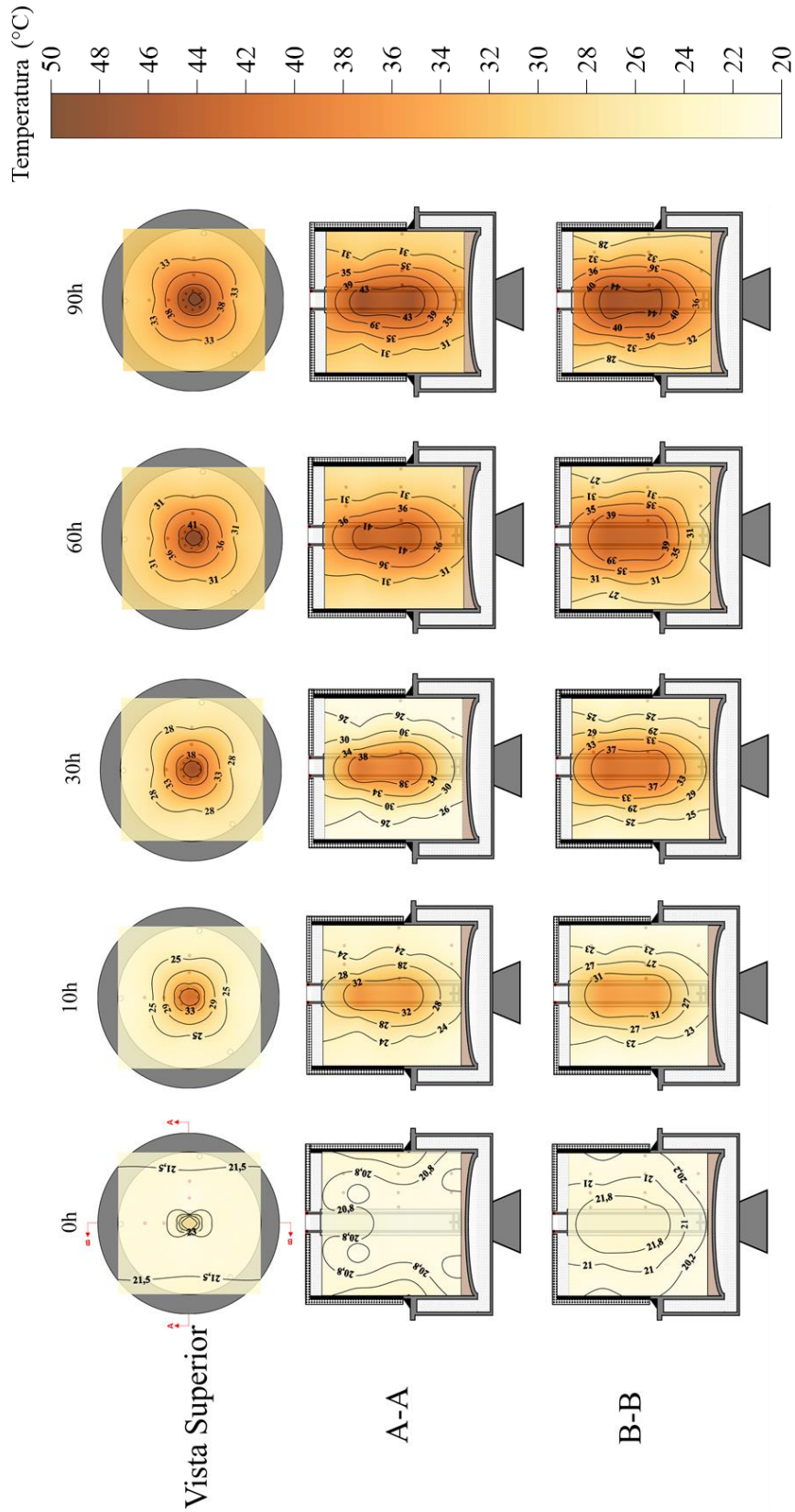


Figura 4 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 2U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 33% (2UQ3S33).

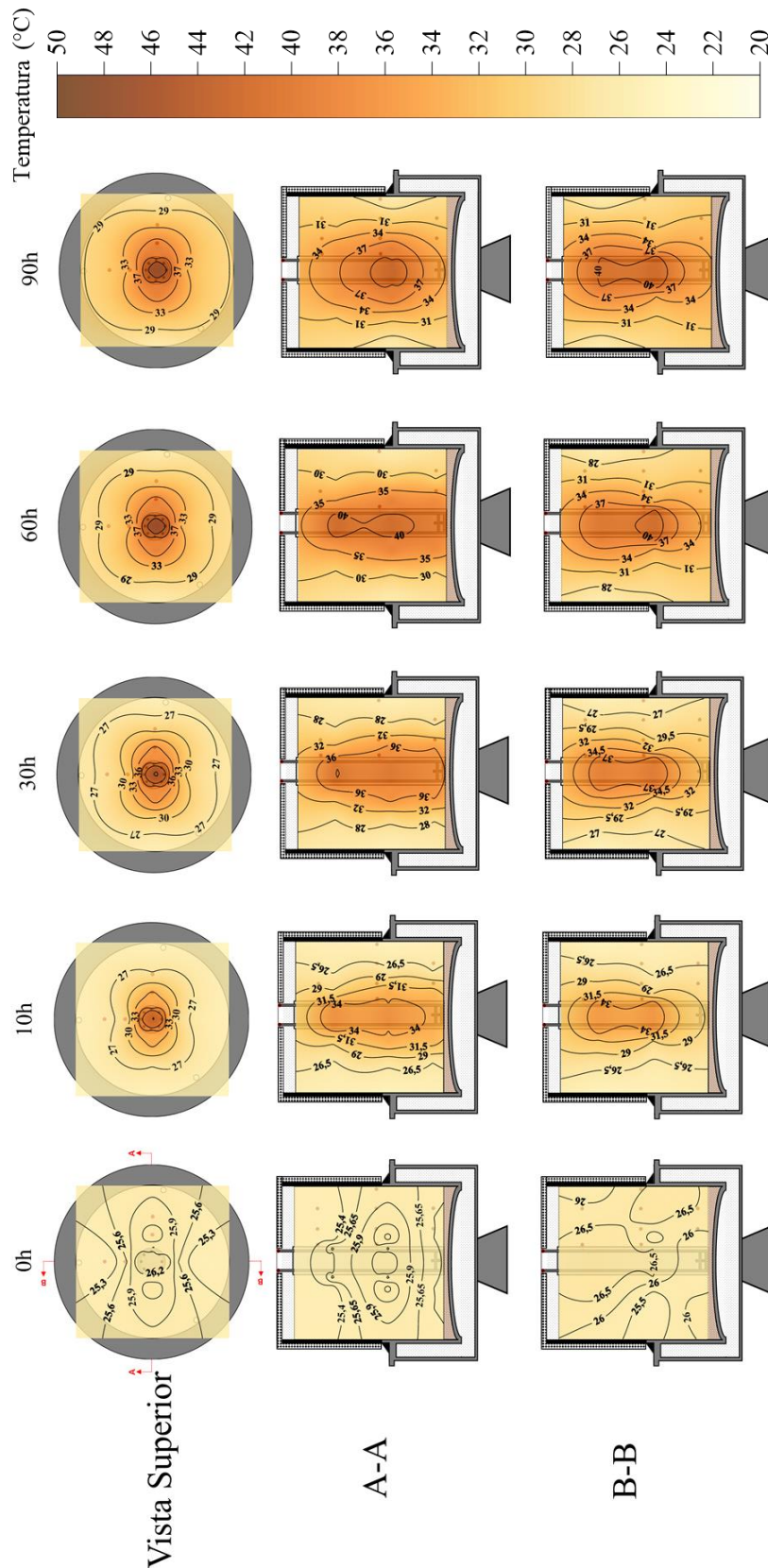


Figura 5 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 4U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 80% (4UQ3S80).

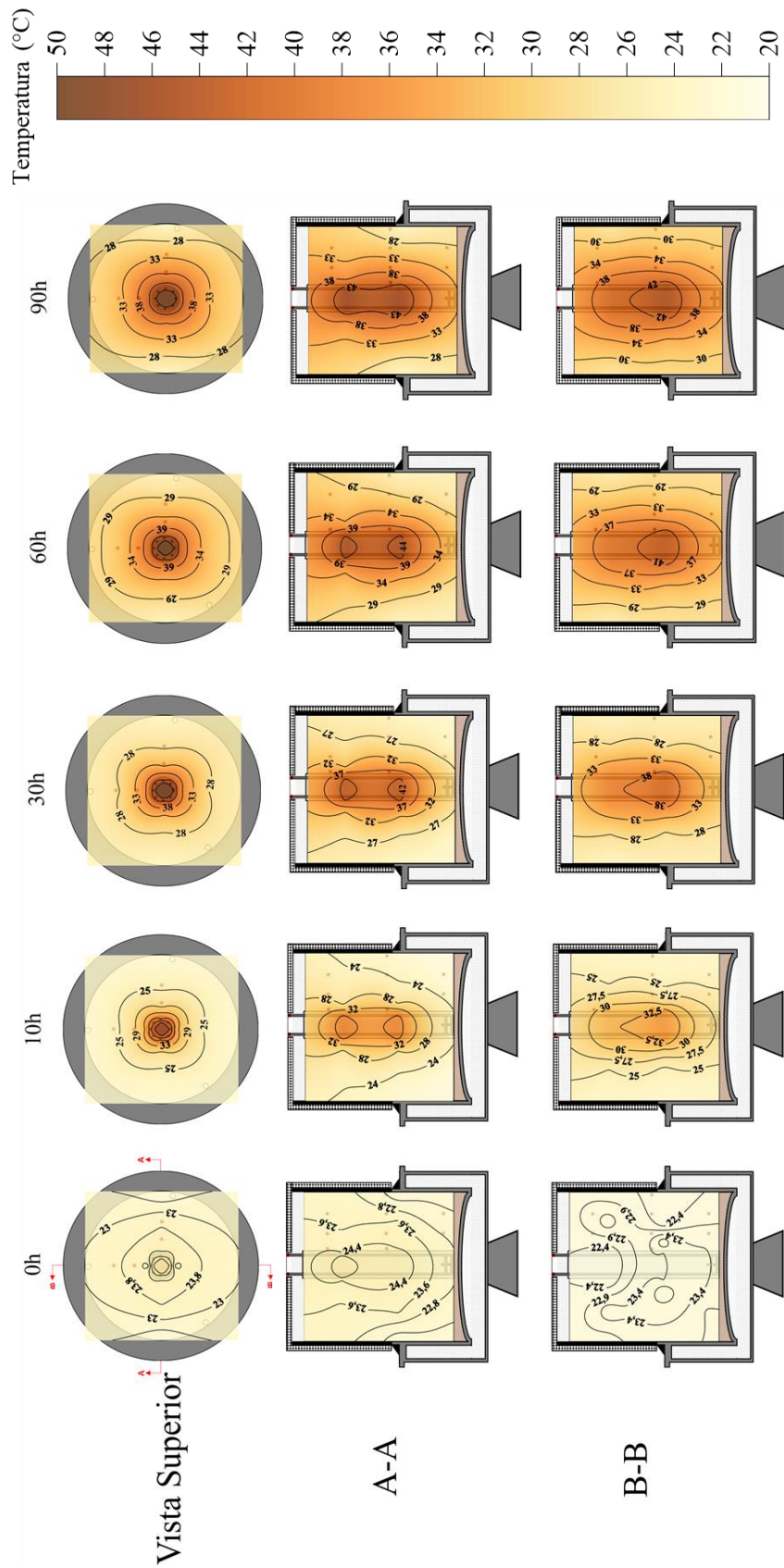


Figura 6 – Gradiente térmico no ensaio TRT de forma bidimensional nos principais instantes de tempo vigentes de aquecimento do sistema de protótipo de estaca trocadora de calor na configuração 4U, vazão de 3,06 l/min e grau de saturação de aproximadamente 33% (4UQ3S33).

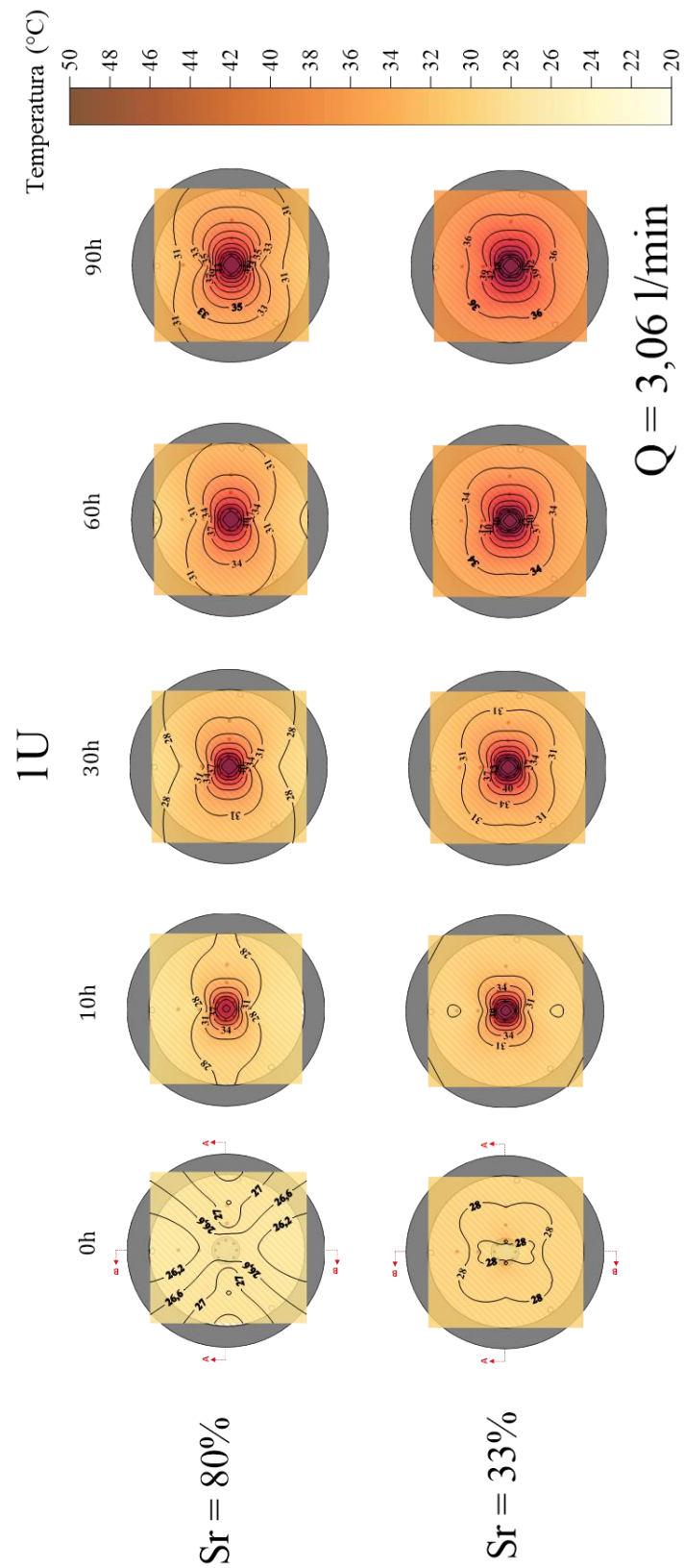


Figura 7 – Comparativo entre as assimetrias na dissipação de calor no solo no espaço tempo para os ensaios 1UQ3S80 e 1UQ3S33.

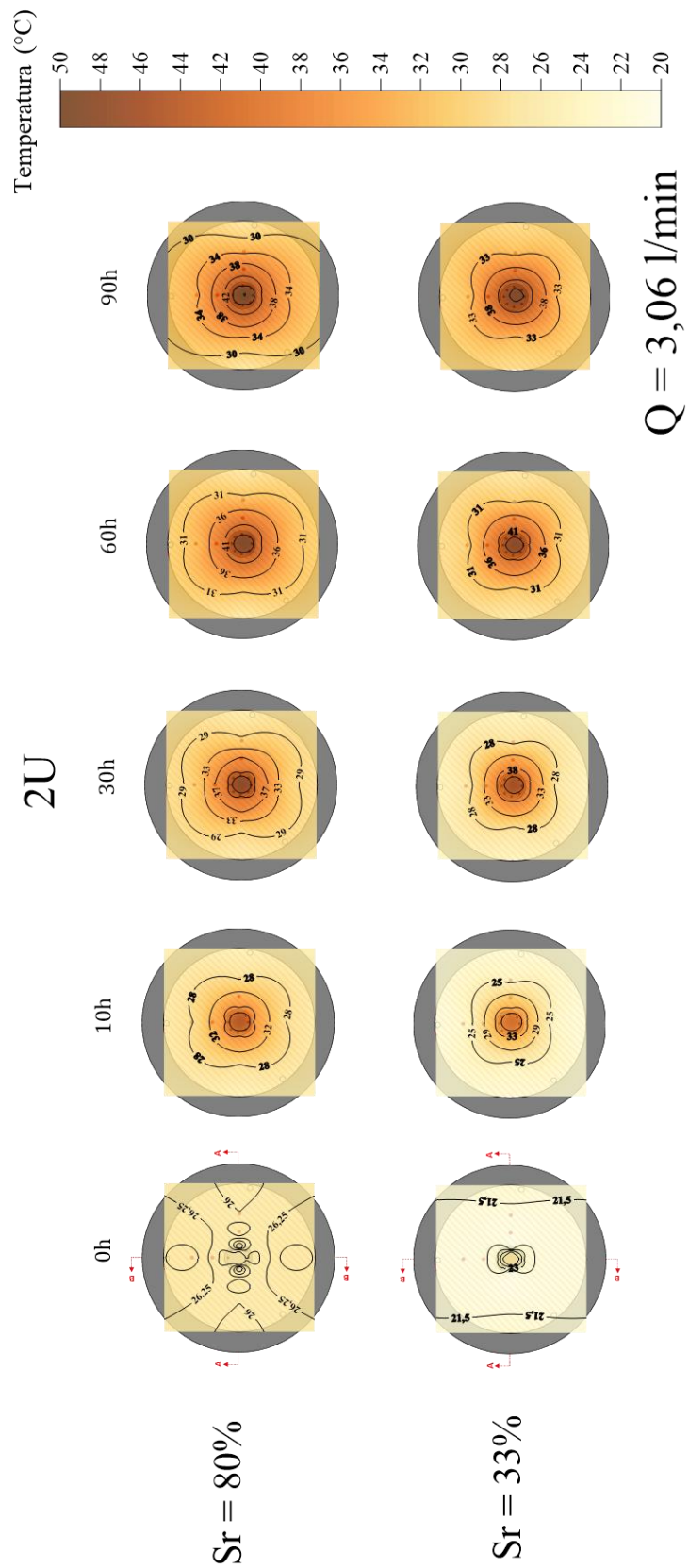


Figura 8 – Comparativo entre as assimetrias na dissipação de calor no solo no espaço tempo para os ensaios 2UQ3S80 e 2UQ3S33.

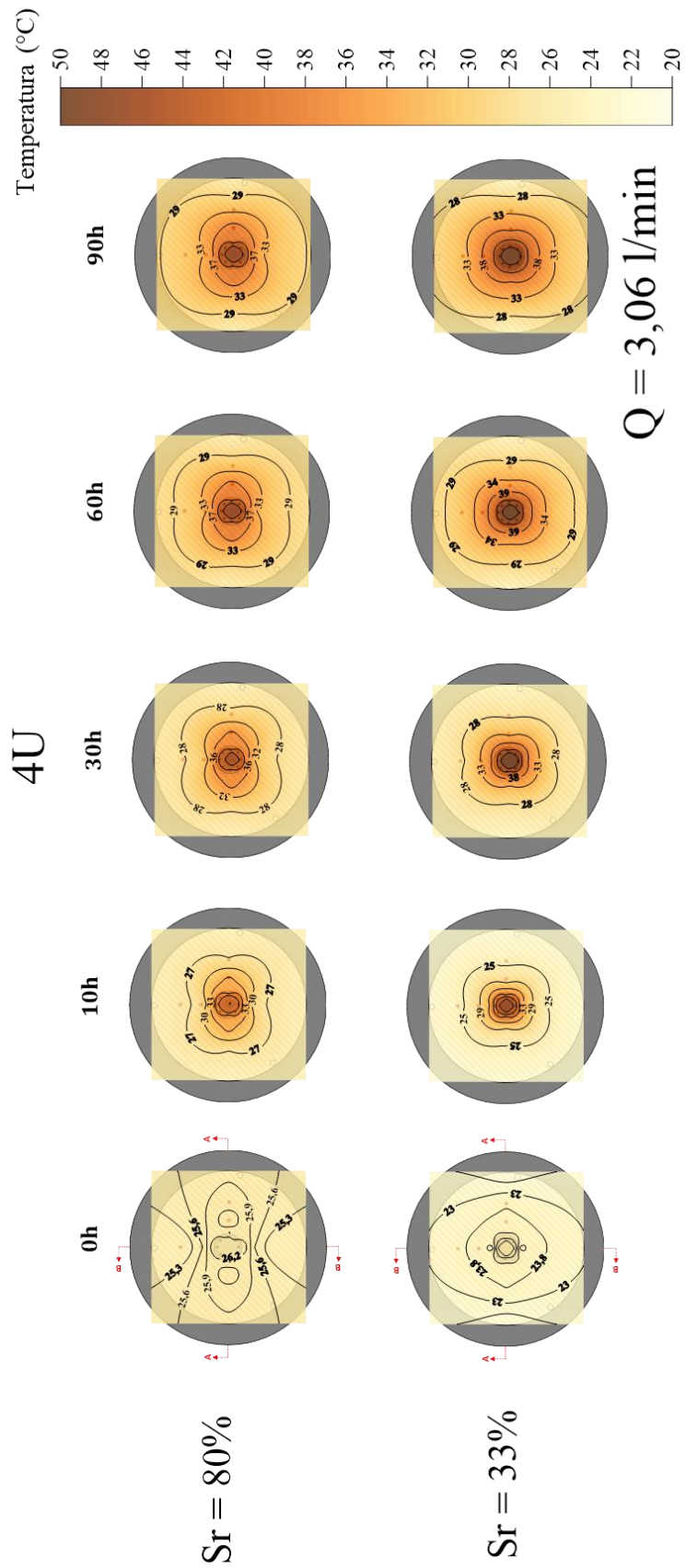


Figura 9 – Comparativo entre as assimetrias na dissipação de calor no solo no espaço tempo para os ensaios 4UQ3S80 e 4UQ3S33.

ANEXO VII

Comparativo geral dos gráficos de resposta térmica adimensional (Φ_g)

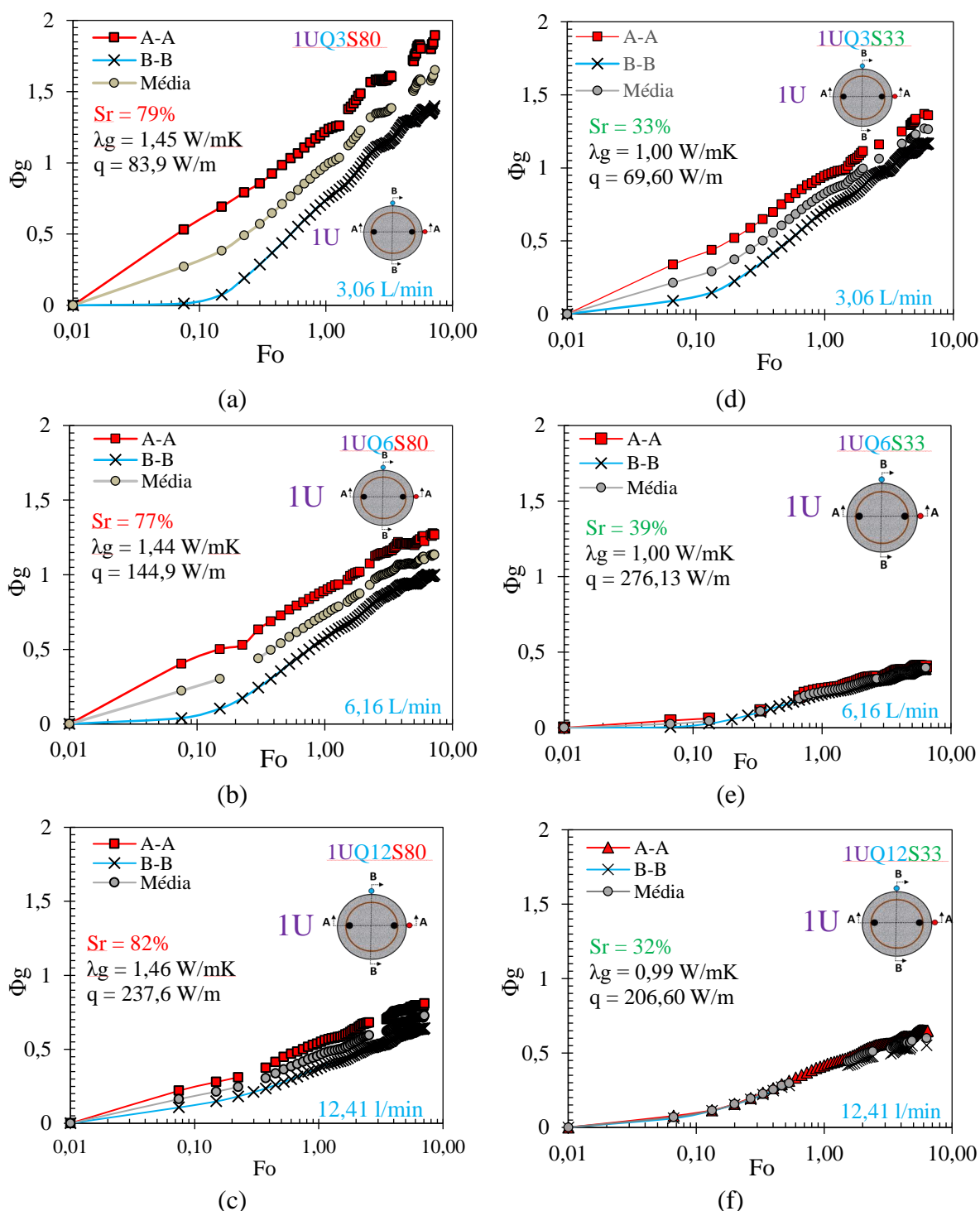


Figura 1 – Comparativo geral dos gráficos de resposta térmica adimensional (Φ_g) na face das estacas em função do tempo adimensional (Fo) nas direções A-A e B-B, na configuração 1U, para os ensaios 1UQ3S80 (a), 1UQ6S80 (b) 1UQ12S80 (c) 1UQ3S33 (d), 1UQ6S33 (e) e 1UQ12S33 (f), respectivamente.

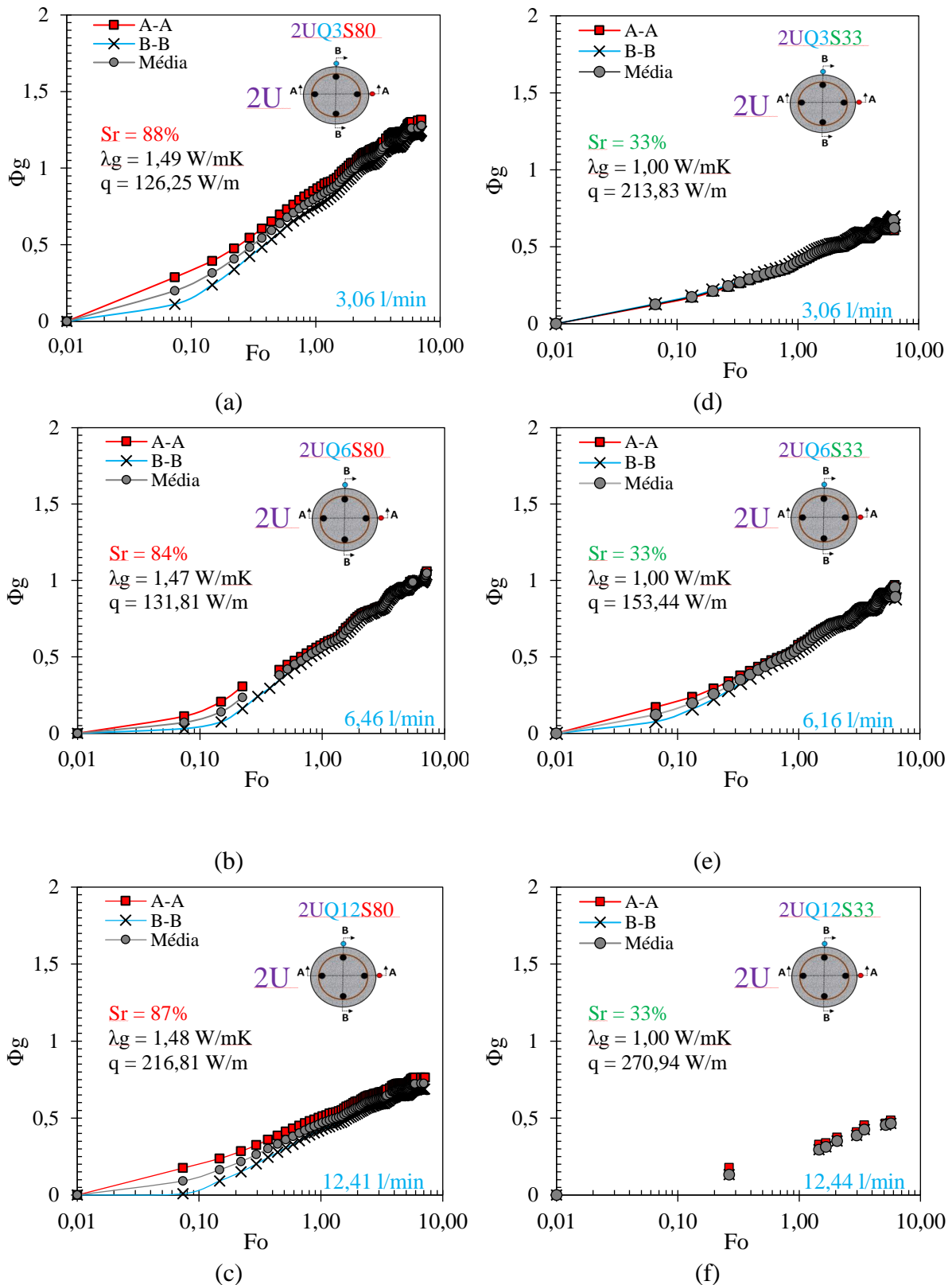
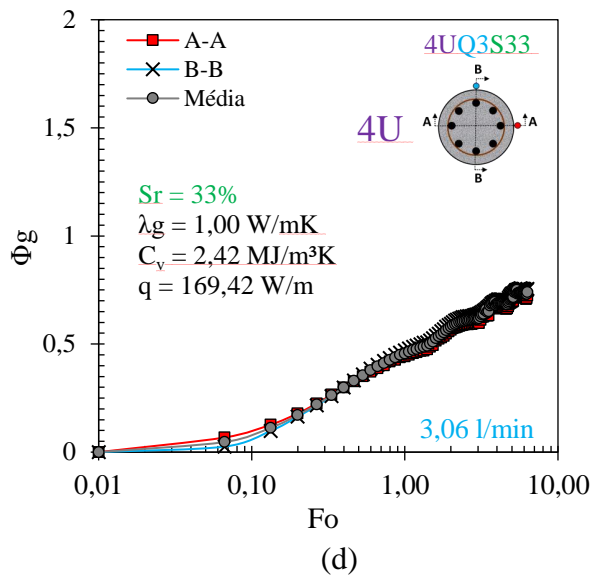
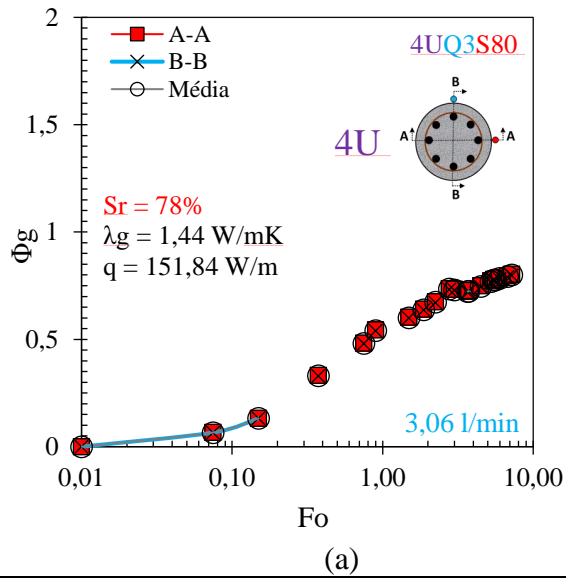
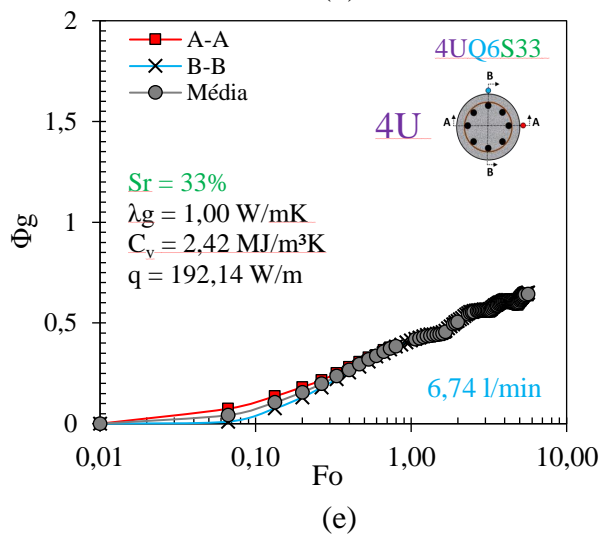


Figura 2 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (Fo), na configuração 2U, para os ensaios 2UQ3S80 (a), 2UQ6S80 (b) 2UQ12S80 (c) 2UQ3S33 (d), 2UQ6S33 (e) e 2UQ12S33 (f), respectivamente.



NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ6S80

(b)



NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ12S80

(c)

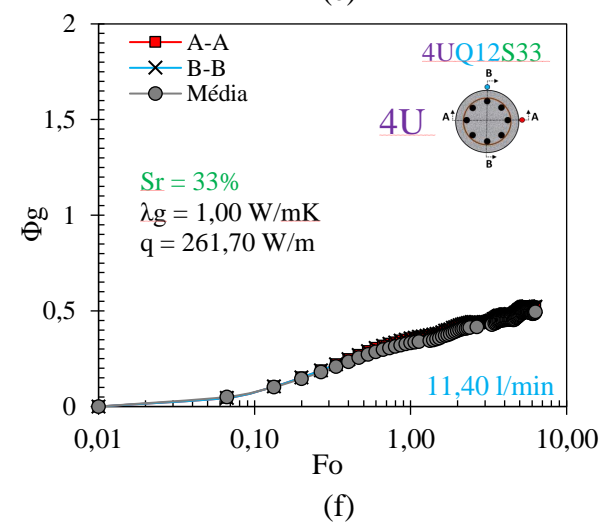
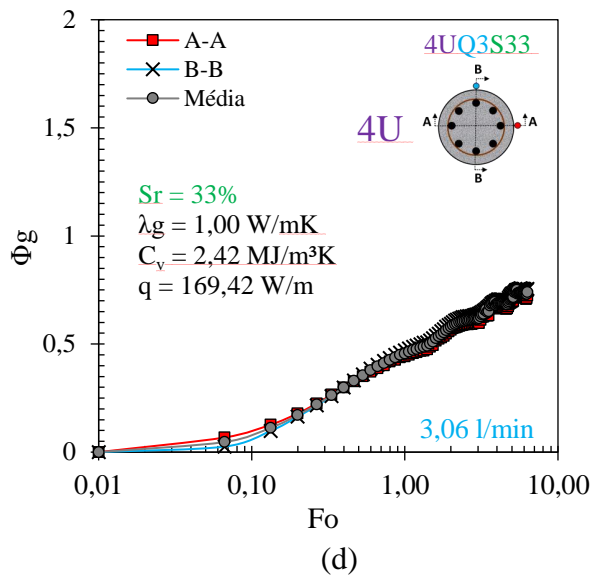
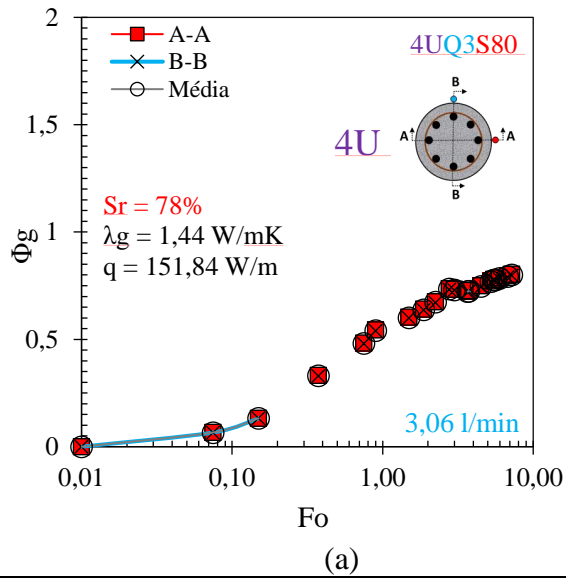
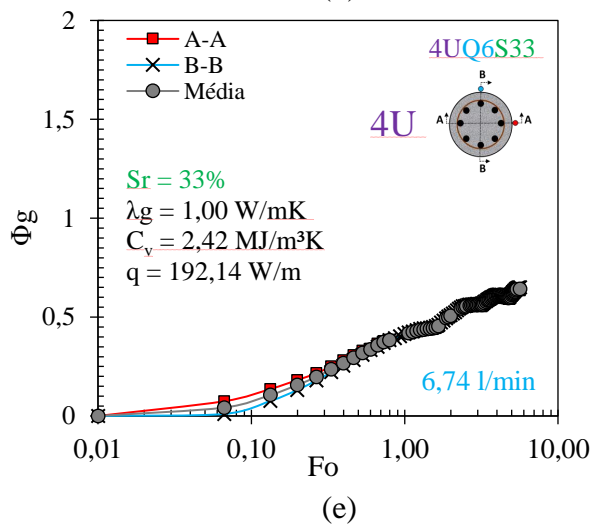


Figura 3 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (Fo), na configuração 4U, para os ensaios 4UQ3S80 (a), 4UQ3S33 (b), 4UQ6S33 (c) e 4UQ12S33 (d) respectivamente.



NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ6S80

(b)



NÃO FOI POSSÍVEL REALIZAR O ENSAIO 4UQ12S80

(c)

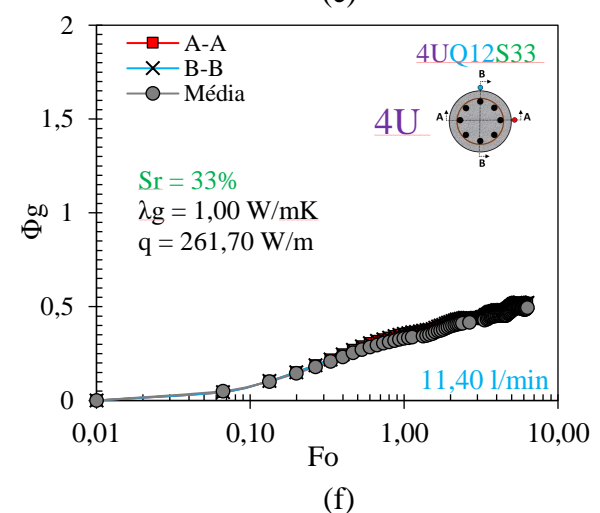


Figura 4 – Resposta térmica adimensional (Φ_g) em função do tempo adimensional (Fo), na configuração 4U, para os ensaios 4UQ3S80 (a), 4UQ3S33 (b), 4UQ6S33 (c) e 4UQ12S33 (d) respectivamente.

ANEXO V: Resultados das temperaturas de entrada e saída nos tubos ativos, fluxo de calor trocado por metro de estaca e número de Reynolds, referente aos ensaios TRT's realizados nessa tese

| Tempo (h) | 1UQ3S80 | | | | 1UQ6S80 | | | | 1UQ12S80 | | | |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|----------|----------|-------|---------|----------|
| | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re |
| 0,00 | 26,21 | 26,44 | 63,79 | 3844,52 | 26,21 | 26,44 | 55,00 | 7539,57 | 27,46 | 27,46 | 150,00 | 15570,13 |
| 1,00 | 36,24 | 35,87 | 78,40 | 4697,17 | 37,87 | 37,74 | 55,37 | 9527,05 | 38,12 | 37,93 | 163,03 | 19273,92 |
| 2,00 | 39,87 | 39,55 | 67,72 | 5035,51 | 42,07 | 41,86 | 89,31 | 10292,98 | 41,38 | 41,17 | 179,97 | 20477,87 |
| 3,00 | 41,69 | 41,3 | 82,47 | 5203,91 | 44,32 | 44,05 | 114,74 | 10708,45 | 43,32 | 43,05 | 231,23 | 21195,67 |
| 4,00 | 42,51 | 42,05 | 97,25 | 5278,47 | 45,77 | 45,42 | 148,66 | 10973,64 | 44,64 | 44,42 | 188,32 | 21704,08 |
| 5,00 | 43,13 | 42,74 | 82,43 | 5340,88 | 46,83 | 46,48 | 148,60 | 11173,38 | 45,77 | 45,54 | 196,80 | 22130,52 |
| 6,00 | 43,64 | 43,36 | 59,17 | 5394,83 | 47,46 | 47,11 | 148,57 | 11292,19 | 46,52 | 46,23 | 248,08 | 22403,82 |
| 7,00 | 44,07 | 43,67 | 84,52 | 5430,22 | 48,15 | 47,79 | 152,78 | 11421,44 | 47,27 | 46,92 | 299,33 | 22677,32 |
| 8,00 | 44,45 | 44,05 | 84,51 | 5466,59 | 48,59 | 48,23 | 152,75 | 11504,49 | 48,21 | 47,92 | 247,93 | 23046,03 |
| 9,00 | 44,76 | 44,36 | 84,50 | 5496,30 | 48,9 | 48,54 | 152,74 | 11563,03 | 48,46 | 48,23 | 196,62 | 23152,51 |
| 10,00 | 44,89 | 44,55 | 71,82 | 5511,63 | 49,03 | 48,67 | 152,73 | 11587,58 | 48,96 | 48,67 | 247,87 | 23312,29 |
| 11,00 | 45,26 | 44,86 | 84,48 | 5544,24 | 49,4 | 49,04 | 152,71 | 11657,46 | 49,53 | 49,17 | 307,64 | 23534,88 |
| 12,00 | 45,26 | 44,86 | 84,48 | 5544,24 | 49,53 | 49,23 | 127,25 | 11687,69 | 49,53 | 49,23 | 256,37 | 23546,30 |
| 13,00 | 45,33 | 44,92 | 86,59 | 5550,48 | 49,78 | 49,42 | 152,69 | 11729,27 | 49,78 | 49,48 | 256,34 | 23641,48 |
| 14,00 | 45,45 | 45,11 | 71,80 | 5565,35 | 49,84 | 49,48 | 152,69 | 11740,61 | 50,22 | 49,85 | 316,11 | 23795,74 |
| 15,00 | 45,58 | 45,17 | 86,58 | 5574,47 | 49,97 | 49,6 | 156,92 | 11764,24 | 50,47 | 50,17 | 256,28 | 23904,35 |
| 16,00 | 45,64 | 45,3 | 71,80 | 5583,59 | 50,09 | 49,79 | 127,23 | 11793,54 | 50,66 | 50,35 | 264,81 | 23974,88 |
| 17,00 | 45,7 | 45,23 | 99,25 | 5583,11 | 50,15 | 49,85 | 127,22 | 11804,89 | 50,66 | 50,35 | 264,81 | 23974,88 |
| 18,00 | 46,14 | 45,79 | 73,90 | 5631,13 | 50,09 | 49,79 | 127,23 | 11793,54 | 50,41 | 50,1 | 264,83 | 23879,57 |
| 19,00 | 46,58 | 46,17 | 86,55 | 5670,53 | 50,34 | 50,04 | 127,22 | 11840,82 | 50,22 | 49,92 | 256,30 | 23809,08 |
| 20,00 | 46,96 | 46,54 | 88,65 | 5706,58 | 50,53 | 50,23 | 127,21 | 11876,77 | 50,41 | 50,04 | 316,09 | 23868,14 |
| 21,00 | 47,27 | 46,86 | 86,53 | 5736,87 | 50,91 | 50,54 | 156,87 | 11942,07 | 50,34 | 49,98 | 307,55 | 23843,37 |
| 22,00 | 47,77 | 47,42 | 73,86 | 5787,85 | 51,09 | 50,73 | 152,62 | 11977,11 | 50,66 | 50,42 | 205,01 | 23988,23 |
| 23,00 | 48,02 | 47,61 | 86,51 | 5809,02 | 51,22 | 50,91 | 131,42 | 12006,48 | 51,09 | 50,79 | 256,22 | 24140,83 |
| 24,00 | 48,34 | 47,98 | 75,95 | 5842,22 | 51,6 | 51,29 | 131,40 | 12078,53 | 51,35 | 51,1 | 213,50 | 24249,64 |
| 25,00 | 48,52 | 48,1 | 88,60 | 5856,66 | 52,04 | 51,66 | 161,04 | 12155,42 | 51,91 | 51,54 | 315,92 | 24440,77 |
| 26,00 | 48,78 | 48,29 | 103,36 | 5878,32 | 52,29 | 51,98 | 131,36 | 12209,59 | 52,35 | 51,98 | 315,87 | 24609,23 |
| 27,00 | 49,03 | 48,6 | 90,70 | 5905,28 | 52,6 | 52,23 | 156,77 | 12262,88 | 52,35 | 51,98 | 315,87 | 24609,23 |
| 28,00 | 49,21 | 48,79 | 88,58 | 5923,09 | 52,85 | 52,48 | 156,76 | 12310,51 | 52,6 | 52,29 | 264,62 | 24716,60 |
| 29,00 | 49,4 | 48,98 | 88,58 | 5941,39 | 53,04 | 52,73 | 131,33 | 12352,48 | 52,85 | 52,48 | 315,81 | 24801,05 |
| 30,00 | 49,4 | 48,98 | 88,58 | 5941,39 | 52,98 | 52,6 | 160,99 | 12334,35 | 53,1 | 52,79 | 264,57 | 24908,67 |
| 31,00 | 49,15 | 48,73 | 88,59 | 5917,31 | 53,23 | 52,85 | 160,97 | 12382,07 | 53,16 | 52,85 | 264,57 | 24931,75 |
| 32,00 | 49,15 | 48,67 | 101,24 | 5914,42 | 53,23 | 52,85 | 160,97 | 12382,07 | 53,16 | 52,91 | 213,36 | 24943,29 |
| 33,00 | 49,21 | 48,73 | 101,24 | 5920,20 | 53,29 | 52,91 | 160,97 | 12393,54 | 53,16 | 52,85 | 264,57 | 24931,75 |
| 34,00 | 48,78 | 48,42 | 75,94 | 5884,57 | 53,41 | 53,04 | 156,73 | 12417,43 | 53,29 | 52,91 | 324,30 | 24968,31 |
| 35,00 | 48,46 | 48,04 | 88,61 | 5850,88 | 53,48 | 53,16 | 135,54 | 12435,60 | 52,98 | 52,66 | 273,12 | 24860,60 |
| 36,00 | 48,34 | 47,98 | 75,95 | 5842,22 | 53,35 | 52,97 | 160,97 | 12405,00 | 52,85 | 52,54 | 264,60 | 24812,57 |
| 37,00 | 48,27 | 47,86 | 86,50 | 5833,07 | 53,35 | 52,97 | 160,97 | 12405,00 | 52,66 | 52,35 | 264,61 | 24739,62 |
| 38,00 | 48,21 | 47,79 | 88,61 | 5826,82 | 53,16 | 52,79 | 156,74 | 12369,66 | 52,72 | 52,41 | 264,61 | 24762,65 |
| 39,00 | 48,15 | 47,79 | 75,96 | 5823,93 | 53,1 | 52,73 | 156,75 | 12358,20 | 52,79 | 52,48 | 264,60 | 24789,53 |
| 40,00 | 47,96 | 47,61 | 73,85 | 5806,13 | 53,04 | 52,73 | 131,33 | 12352,48 | 52,91 | 52,54 | 315,81 | 24824,10 |
| 41,00 | 48,34 | 47,98 | 75,95 | 5842,22 | 53,04 | 52,73 | 131,33 | 12352,48 | 52,85 | 52,48 | 315,81 | 24801,05 |
| 42,00 | 48,46 | 48,1 | 75,95 | 5853,77 | 53,16 | 52,85 | 131,32 | 12375,39 | 52,72 | 52,35 | 315,83 | 24751,13 |
| 43,00 | 48,4 | 48,04 | 75,95 | 5847,99 | 53,16 | 52,85 | 131,32 | 12375,39 | 52,66 | 52,35 | 264,61 | 24739,62 |
| 44,00 | 48,46 | 48,04 | 88,61 | 5850,88 | 53,23 | 52,85 | 160,97 | 12382,07 | 52,6 | 52,23 | 315,84 | 24705,09 |
| 45,00 | 48,9 | 48,48 | 88,59 | 5893,24 | 53,29 | 52,91 | 160,97 | 12393,54 | 52,85 | 52,48 | 315,81 | 24801,05 |
| 46,00 | 49,53 | 49,04 | 103,34 | 5950,54 | 53,48 | 53,16 | 135,54 | 12435,60 | 53,16 | 52,79 | 315,78 | 24920,21 |
| 47,00 | 49,78 | 49,35 | 90,67 | 5977,52 | 53,6 | 53,29 | 131,30 | 12459,53 | 53,16 | 52,85 | 264,57 | 24931,75 |
| 48,00 | 49,9 | 49,48 | 88,56 | 5989,57 | 53,85 | 53,47 | 160,94 | 12500,73 | 53,16 | 52,91 | 213,36 | 24943,29 |
| 49,00 | 50,09 | 49,67 | 88,56 | 6007,89 | 54,23 | 53,79 | 186,32 | 12567,94 | 53,41 | 53,16 | 213,34 | 25039,57 |
| 50,00 | 50,09 | 49,67 | 88,56 | 6007,89 | 54,29 | 53,91 | 160,91 | 12585,25 | 53,67 | 53,35 | 273,05 | 25126,35 |
| 51,00 | 50,22 | 49,73 | 103,31 | 6017,04 | 54,1 | 53,72 | 160,92 | 12548,72 | 54,04 | 53,72 | 273,01 | 25269,34 |
| 52,00 | 50,22 | 49,79 | 90,66 | 6019,94 | 53,92 | 53,54 | 160,93 | 12514,16 | 54,35 | 54,04 | 264,45 | 25391,37 |
| 53,00 | 50,41 | 49,98 | 90,65 | 6038,26 | 53,67 | 53,22 | 190,60 | 12459,53 | 54,73 | 54,54 | 162,05 | 25562,35 |
| 54,00 | 50,22 | 49,73 | 103,31 | 6017,04 | 53,48 | 53,1 | 160,96 | 12429,86 | 54,86 | 54,6 | 221,75 | 25599,35 |
| 55,00 | 50,09 | 49,67 | 88,56 | 6007,89 | 53,48 | 53,1 | 160,96 | 12429,86 | 54,98 | 54,79 | 162,04 | 25659,79 |
| 56,00 | 50,03 | 49,54 | 103,32 | 5998,73 | 53,48 | 53,1 | 160,96 | 12429,86 | 54,92 | 54,66 | 221,74 | 25622,73 |
| 57,00 | 49,9 | 49,48 | 88,56 | 5989,57 | 53,41 | 53,04 | 156,73 | 12417,43 | 54,73 | 54,41 | 272,94 | 25537,05 |
| 58,00 | 49,78 | 49,35 | 90,67 | 5977,52 | 53,41 | 53,1 | 131,31 | 12423,17 | 54,79 | 54,6 | 162,05 | 25585,71 |
| 59,00 | 49,65 | 49,23 | 88,57 | 5965,48 | 53,48 | 53,1 | 160,96 | 12429,86 | 54,79 | 54,54 | 213,23 | 25574,03 |
| 60,00 | 49,59 | 49,17 | 88,57 | 5959,70 | 53,54 | 53,22 | 135,54 | 12447,09 | 54,73 | 54,47 | 221,76 | 25548,72 |
| 61,00 | 49,53 | 49,1 | 90,68 | 5953,43 | 53,29 | 52,91 | 160,97 | 12393,54 | 54,79 | 54,54 | 213,23 | 25574,03 |
| 62,00 | 49,4 | 49,04 | 75,92 | 5944,28 | 53,04 | 52,66 | 160,99 | 12345,80 | 54,86 | 54,54 | 272,93 | 25587,66 |
| 63,00 | 49,28 | 48,92 | 75,93 | 5932,72 | 52,98 | 52,6 | 160,99 | 12334,35 | 54,79 | 54,54 | 213,23 | 25574,03 |
| 64,00 | 49,09 | 48,67 | 88,59 | 5911,53 | 52,91 | 52,54 | 156,76 | 12321,95 | 54,79 | 54,47 | 272,93 | 25560,40 |
| 65,00 | 49,09 | 48,67 | 88,59 | 5911,53 | 52,85 | 52,54 | 131,34 | 12316,23 | 54,48 | 54,22 | 221,78 | 25451,53 |
| 66,00 | 48,9 | 48,54 | 75,94 | 5896,13 | 52,85 | 52,54 | 131,34 | 12316,23 | 54,35 | 54,04 | 264,45 | 25391,37 |
| 67,00 | 49,47 | 49,04 | 90,68 | 5947,65 | 52,72 | 52,41 | 131,34 | 12291,45 | 54,23 | 53,97 | 221,80 | 25354,53 |
| 68,00 | 49,9 | 49,48 | 88,56 | 5989,57 | 52,85 | 52,48 | 156,76 | 12310,51 | 54,17 | 53,91 | 221,81 | 25331,28 |
| 69,00 | 50,22 | 49,79 | 90,66 | 6019,94 | 53,1 | 52,73 | 156,75 | 12388,20 | 54,1 | 53,91 | 162,09 | 25317,73 |
| 70,00 | 50,41 | 50,04 | 78,00 | 6041,16 | 53,48 | 53,16 | 135,54 | 12435,60 | 54,42 | 54,22 | 170,60 | 25439,88 |
| 71,00 | 50,53 | 50,17 | 75,89 | 6053,21 | 53,73 | 53,41 | 135,53 | 12483,48 | 54,42 | 54,22 | 170,60 | 25439,88 |
| 72,00 | 50,50 | 50,17 | 88,54 | 6056,11 | 53,98 | 53,66 | 135,52 | 12531,43 | 54,61 | 54,35 | 221,77 | 25502,04 |
| 73,00 | 50,50 | 50,17 | 88,54 | 6056,11 | 54,04 | 53,66 | 160,93 | 12537,19 | 54,86 | 54,6 | 221,75 | 25599,35 |
| 74,00 | 50,66 | 50,29 | 78,00 | 6065,28 | 54,17 | 53,79 | 160,92 | 12562,17 | 54,79 | 54,6 | 162,05 | 25585,71 |
| 75,00 | 50,59 | 50,23 | 75,89 | 6059,00 | 54,35 | 54,04 | 131,36 | 12603,53 | 54,92 | 54,66 | 221,74 | 25622,73 |
| 76,00 | 50,47 | 50,04 | 90,65 | 6044,05 | 54,67 | 54,29 | 160,89 | 12658,46 | 54,86 | 54,66 | 170,57 | 25611,04 |
| 77,00 | 50,53 | 50,1 | 90,65 | 6049,84 | 54,67 | 54,29 | 160,89 | 12658,46 | 54,98 | 54,72 | 221,74 | 25646,13 |
| 78,00 | 50,53 | 50,1 | 90,65 | 6049,84 | 54,48 | 54,1 | 160,90 | 12621,83 | 54,98 | 54,72 | 221,74 | 25646,13 |
| 79,00 | 50,15 | 49,79 | 75,90 | 6016,56 | 54,48 | 54,1 | 160,90 | 12621,83 | 55,17 | 54,97 | 170,55 | 25732,04 |
| 80,00 | 50,09 | 49,67 | 88,56 | 6007,89 | 54,67 | 54,29 | 160,89 | 12658,46 | 55,17 | 54,97 | 170,55 | 25732,04 |
| 81,00 | 49,72 | 49,35 | 78,02 | 5974,63 | 54,73 | 54,35 | 160,88 | 12670,05 | 55,17 | 54,97 | 170,55 | 25732,04 |
| 82,00 | 49,65 | 49,23 | 88,57 | 5965,48 | 54,79 | 54,41 | 160,88 | 12681,63 | 54,92 | 54,72 | 170,57 | 25634,43 |
| 83,00 | 49,47 | 49,17 | 63,27 | 5953,92 | 54,79 | 54,47 | 135,48 | 12687,43 | 54,86 | | | |

| Tempo (h) | 2UQ3S80 | | | | 2UQ6S80 | | | | 2UQ12S80 | | | |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|----------|----------|-------|---------|----------|
| | Tin | Tout | q (W/m) | Re | Tin | Tout | q (W/m) | Re | Tin | Tout | q (W/m) | Re |
| 0,00 | 26,21 | 26,44 | 115,00 | 3748,41 | 26,21 | 26,44 | 120,00 | 7910,81 | 26,21 | 26,44 | 0,00 | 18260,58 |
| 1,00 | 34,67 | 34,12 | 116,62 | 4433,20 | 31,54 | 31,25 | 129,91 | 8808,28 | 33,61 | 33,43 | 175,66 | 21196,90 |
| 2,00 | 37,24 | 36,62 | 113,34 | 4657,84 | 34,17 | 33,87 | 134,27 | 9286,78 | 36,24 | 35,99 | 196,14 | 22323,49 |
| 3,00 | 38,93 | 38,36 | 120,67 | 4812,54 | 35,8 | 35,49 | 138,66 | 9588,50 | 37,87 | 37,68 | 196,01 | 23034,64 |
| 4,00 | 40 | 39,43 | 120,62 | 4910,08 | 36,86 | 36,49 | 165,43 | 9781,97 | 39,06 | 38,8 | 206,24 | 23557,49 |
| 5,00 | 40,75 | 40,18 | 120,59 | 4978,86 | 37,74 | 37,43 | 138,56 | 9954,30 | 40,06 | 39,86 | 206,16 | 24029,01 |
| 6,00 | 41,38 | 40,8 | 122,67 | 5036,41 | 38,49 | 38,18 | 138,52 | 10097,28 | 40,81 | 40,61 | 206,10 | 24364,58 |
| 7,00 | 42,07 | 41,42 | 137,45 | 5096,93 | 38,93 | 38,61 | 142,96 | 10180,58 | 41,5 | 41,24 | 144,24 | 24661,09 |
| 8,00 | 42,44 | 41,86 | 122,63 | 5134,45 | 39,37 | 39,11 | 116,14 | 10270,89 | 41,88 | 41,67 | 216,32 | 24843,54 |
| 9,00 | 42,88 | 42,3 | 122,61 | 5175,29 | 39,69 | 39,36 | 147,39 | 10325,79 | 42,44 | 42,24 | 278,07 | 25082,82 |
| 10,00 | 42,88 | 42,3 | 122,61 | 5175,29 | 40 | 39,68 | 142,90 | 10386,60 | 42,82 | 42,61 | 154,46 | 25254,72 |
| 11,00 | 43,13 | 42,55 | 122,59 | 5198,52 | 40,38 | 40,05 | 147,35 | 10459,15 | 43,01 | 42,8 | 154,45 | 25367,95 |
| 12,00 | 43,38 | 42,8 | 122,58 | 5221,78 | 40,63 | 40,3 | 147,34 | 10507,61 | 43,2 | 42,98 | 226,51 | 25438,20 |
| 13,00 | 43,38 | 42,86 | 109,90 | 5224,57 | 40,75 | 40,49 | 116,08 | 10537,70 | 43,38 | 43,11 | 277,98 | 25508,49 |
| 14,00 | 43,57 | 42,98 | 124,69 | 5239,00 | 41 | 40,67 | 147,32 | 10579,47 | 43,57 | 43,36 | 216,19 | 25608,32 |
| 15,00 | 43,7 | 43,11 | 124,68 | 5251,11 | 41,19 | 40,86 | 147,31 | 10616,42 | 43,82 | 43,55 | 216,17 | 25721,85 |
| 16,00 | 43,82 | 43,3 | 109,88 | 5265,55 | 41,25 | 40,99 | 116,06 | 10634,92 | 43,89 | 43,67 | 226,46 | 25751,38 |
| 17,00 | 44,32 | 43,73 | 124,66 | 5308,92 | 41,25 | 40,99 | 116,06 | 10634,92 | 43,95 | 43,73 | 226,45 | 25778,64 |
| 18,00 | 44,51 | 43,92 | 124,65 | 5326,66 | 41,57 | 41,24 | 147,29 | 10690,45 | 43,95 | 43,73 | 226,45 | 25778,64 |
| 19,00 | 44,7 | 44,17 | 111,96 | 5347,21 | 41,75 | 41,49 | 116,03 | 10732,40 | 44,07 | 43,86 | 288,20 | 25851,37 |
| 20,00 | 45,01 | 44,48 | 111,95 | 5376,18 | 42,13 | 41,8 | 147,26 | 10799,80 | 44,26 | 43,98 | 288,19 | 25905,93 |
| 21,00 | 45,33 | 44,73 | 126,72 | 5402,83 | 42,51 | 42,17 | 151,70 | 10873,18 | 44,83 | 44,61 | 226,38 | 26178,99 |
| 22,00 | 45,58 | 44,98 | 126,71 | 5426,22 | 42,82 | 42,49 | 147,22 | 10934,92 | 45,08 | 44,8 | 288,10 | 26279,20 |
| 23,00 | 45,83 | 45,3 | 111,92 | 5452,89 | 43,07 | 42,8 | 120,44 | 10989,85 | 45,2 | 45,05 | 154,33 | 26363,50 |
| 24,00 | 46,14 | 45,48 | 139,36 | 5475,83 | 43,51 | 43,17 | 151,64 | 11069,41 | 45,33 | 45,11 | 226,34 | 26406,76 |
| 25,00 | 46,27 | 45,67 | 126,68 | 5490,82 | 43,7 | 43,36 | 151,63 | 11106,77 | 45,45 | 45,3 | 154,32 | 26477,46 |
| 26,00 | 46,58 | 46,04 | 114,00 | 5522,67 | 43,89 | 43,55 | 151,62 | 11144,15 | 45,7 | 45,48 | 226,31 | 26575,50 |
| 27,00 | 46,89 | 46,29 | 126,65 | 5548,91 | 43,95 | 43,61 | 151,62 | 11155,96 | 45,89 | 45,73 | 164,58 | 26675,85 |
| 28,00 | 46,71 | 46,17 | 113,99 | 5534,86 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,08 | 45,86 | 226,28 | 26748,85 |
| 29,00 | 47,08 | 46,48 | 126,65 | 5566,72 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,27 | 46,04 | 236,55 | 26833,28 |
| 30,00 | 47,08 | 46,48 | 126,65 | 5566,72 | 44,01 | 43,73 | 124,86 | 11173,68 | 46,46 | 46,23 | 236,54 | 26920,01 |
| 31,00 | 47,21 | 46,54 | 141,42 | 5575,63 | 44,2 | 43,86 | 151,60 | 11205,19 | 46,71 | 46,48 | 236,52 | 27034,15 |
| 32,00 | 47,08 | 46,48 | 126,65 | 5566,72 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,77 | 46,54 | 236,51 | 27061,54 |
| 33,00 | 47,15 | 46,48 | 141,42 | 5570,01 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,77 | 46,61 | 236,51 | 27061,54 |
| 34,00 | 47,02 | 46,48 | 113,98 | 5563,91 | 44,01 | 43,73 | 124,86 | 11173,68 | 46,77 | 46,54 | 298,21 | 27047,85 |
| 35,00 | 47,02 | 46,48 | 113,98 | 5563,91 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,71 | 46,42 | 164,54 | 27018,17 |
| 36,00 | 47,02 | 46,42 | 126,65 | 5561,10 | 44,14 | 43,86 | 124,85 | 11199,28 | 46,64 | 46,42 | 226,24 | 27004,47 |
| 37,00 | 46,96 | 46,42 | 113,98 | 5558,29 | 44,26 | 43,98 | 124,85 | 11222,92 | 46,77 | 46,54 | 164,53 | 27077,53 |
| 38,00 | 46,89 | 46,29 | 126,65 | 5548,91 | 44,26 | 43,98 | 124,85 | 11222,92 | 46,83 | 46,67 | 226,22 | 27118,63 |
| 39,00 | 46,89 | 46,36 | 111,88 | 5552,20 | 44,26 | 43,92 | 151,60 | 11217,01 | 46,89 | 46,73 | 164,52 | 27132,33 |
| 40,00 | 46,89 | 46,36 | 111,88 | 5552,20 | 44,2 | 43,92 | 124,85 | 11211,10 | 46,83 | 46,67 | 226,22 | 27118,63 |
| 41,00 | 47,15 | 46,61 | 113,98 | 5576,10 | 44,2 | 43,92 | 124,85 | 11211,10 | 46,89 | 46,73 | 164,52 | 27132,33 |
| 42,00 | 47,27 | 46,73 | 113,97 | 5587,35 | 44,32 | 44,05 | 120,39 | 11235,72 | 46,89 | 46,67 | 226,22 | 27118,63 |
| 43,00 | 47,46 | 46,79 | 141,40 | 5599,07 | 44,64 | 44,3 | 151,58 | 11291,90 | 46,83 | 46,67 | 164,52 | 27104,93 |
| 44,00 | 47,71 | 47,11 | 126,62 | 5625,80 | 44,83 | 44,48 | 156,03 | 11328,39 | 46,71 | 46,48 | 174,82 | 27047,85 |
| 45,00 | 48,09 | 47,48 | 128,71 | 5660,98 | 45,14 | 44,86 | 124,81 | 11396,46 | 46,83 | 46,61 | 226,22 | 27091,23 |
| 46,00 | 48,34 | 47,67 | 141,36 | 5681,62 | 45,33 | 45,05 | 124,80 | 11433,98 | 47,33 | 47,11 | 226,18 | 27319,61 |
| 47,00 | 48,59 | 47,98 | 128,69 | 5707,89 | 45,58 | 45,3 | 124,79 | 11483,35 | 47,46 | 47,23 | 236,46 | 27376,72 |
| 48,00 | 48,34 | 47,67 | 141,36 | 5681,62 | 45,7 | 45,36 | 151,52 | 11501,13 | 47,52 | 47,29 | 164,49 | 27420,12 |
| 49,00 | 48,4 | 47,73 | 141,36 | 5687,25 | 45,77 | 45,48 | 129,24 | 11519,90 | 47,58 | 47,42 | 236,44 | 27463,53 |
| 50,00 | 48,46 | 47,86 | 126,58 | 5696,16 | 45,89 | 45,54 | 155,97 | 11537,68 | 47,9 | 47,67 | 174,75 | 27564,07 |
| 51,00 | 48,46 | 47,86 | 126,58 | 5696,16 | 45,89 | 45,61 | 124,78 | 11544,60 | 47,96 | 47,79 | 174,74 | 27618,92 |
| 52,00 | 48,52 | 47,86 | 139,24 | 5698,98 | 45,95 | 45,73 | 98,03 | 11562,39 | 47,96 | 47,73 | 236,41 | 27605,20 |
| 53,00 | 48,59 | 47,92 | 141,35 | 5705,08 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 47,96 | 47,73 | 236,41 | 27605,20 |
| 54,00 | 48,59 | 47,98 | 128,69 | 5707,89 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 48,02 | 47,79 | 236,41 | 27632,63 |
| 55,00 | 48,65 | 47,98 | 141,35 | 5710,71 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 48,09 | 47,92 | 174,73 | 27678,34 |
| 56,00 | 48,52 | 47,92 | 126,58 | 5701,79 | 46,02 | 45,73 | 129,23 | 11569,31 | 48,15 | 47,92 | 236,40 | 27692,05 |
| 57,00 | 48,4 | 47,86 | 113,93 | 5693,35 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 48,15 | 47,98 | 236,40 | 27692,05 |
| 58,00 | 48,4 | 47,79 | 128,70 | 5690,06 | 46,02 | 45,73 | 129,23 | 11569,31 | 47,96 | 47,73 | 236,41 | 27605,20 |
| 59,00 | 48,27 | 47,73 | 113,93 | 5681,15 | 46,08 | 45,79 | 129,22 | 11581,17 | 47,96 | 47,79 | 236,41 | 27632,63 |
| 60,00 | 48,27 | 47,67 | 126,59 | 5678,33 | 46,14 | 45,79 | 155,96 | 11587,10 | 47,9 | 47,73 | 174,74 | 27591,49 |
| 61,00 | 48,15 | 47,54 | 128,71 | 5666,61 | 46,14 | 45,86 | 124,76 | 11594,02 | 47,96 | 47,73 | 236,41 | 27605,20 |
| 62,00 | 48,21 | 47,54 | 141,37 | 5669,42 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 47,9 | 47,67 | 236,42 | 27577,78 |
| 63,00 | 48,21 | 47,61 | 126,60 | 5672,70 | 45,89 | 45,67 | 98,04 | 11550,53 | 47,84 | 47,67 | 236,42 | 27550,36 |
| 64,00 | 48,21 | 47,61 | 126,60 | 5672,70 | 45,89 | 45,61 | 124,78 | 11544,60 | 47,84 | 47,61 | 236,42 | 27550,36 |
| 65,00 | 48,15 | 47,54 | 128,71 | 5666,61 | 45,89 | 45,61 | 124,78 | 11544,60 | 47,77 | 47,61 | 236,42 | 27550,36 |
| 66,00 | 48,46 | 47,79 | 141,35 | 5692,88 | 45,89 | 45,61 | 124,78 | 11544,60 | 47,77 | 47,54 | 236,43 | 27518,37 |
| 67,00 | 48,52 | 47,92 | 126,58 | 5701,79 | 45,95 | 45,67 | 124,77 | 11556,46 | 47,77 | 47,61 | 236,42 | 27550,36 |
| 68,00 | 48,78 | 48,17 | 128,68 | 5725,73 | 46,21 | 45,92 | 129,22 | 11606,87 | 47,71 | 47,48 | 236,43 | 27490,95 |
| 69,00 | 48,9 | 48,29 | 128,67 | 5736,99 | 46,33 | 46,04 | 129,21 | 11630,59 | 47,77 | 47,54 | 236,43 | 27518,37 |
| 70,00 | 49,09 | 48,48 | 128,67 | 5754,83 | 46,52 | 46,23 | 129,20 | 11668,17 | 47,9 | 47,67 | 174,74 | 27591,49 |
| 71,00 | 49,21 | 48,6 | 128,66 | 5766,09 | 46,58 | 46,23 | 155,93 | 11674,10 | 48,09 | 47,92 | 236,40 | 27664,62 |
| 72,00 | 49,4 | 48,79 | 128,65 | 5783,94 | 46,52 | 46,29 | 102,47 | 11674,10 | 48,34 | 48,1 | 246,66 | 27776,62 |
| 73,00 | 49,53 | 48,85 | 143,41 | 5792,86 | 46,64 | 46,36 | 124,74 | 11692,89 | 48,46 | 48,23 | 236,37 | 27833,77 |
| 74,00 | 49,59 | 48,98 | 128,64 | 5801,78 | 46,71 | 46,42 | 129,19 | 11705,75 | 48,65 | 48,42 | 174,70 | 27906,93 |
| 75,00 | 49,78 | 49,1 | 143,40 | 5816,34 | 46,71 | 46,42 | 129,19 | 11705,75 | 48,71 | 48,48 | 174,69 | 27961,80 |
| 76,00 | 49,59 | 48,98 | 128,64 | 5801,78 | 46,71 | 46,42 | 129,19 | 11705,75 | 48,78 | 48,54 | 246,62 | 27977,81 |
| 77,00 | 49,59 | 48,98 | 128,64 | 5801,78 | 46,71 | 46,42 | 129,19 | 11705,75 | 48,78 | 48,54 | 308,27 | 27991,53 |
| 78,00 | 49,53 | 48,92 | 128,65 | 5796,14 | 46,64 | 46,42 | 98,01 | 11698,82 | 48,96 | 48,67 | 236,34 | 28034,98 |
| 79,00 | 49,53 | 48,92 | 128,65 | 5796,14 | 46,64 | 46,36 | 124,74 | 11692,89 | 48,84 | 48,6 | 246,62 | 28005,25 |
| 80,00 | 49,34 | 48,79 | 116,00 | 5781,12 | 46,89 | 46,54 | 155,92 | 11735,42 | 48,96 | 48,73 | 236,34 | 28034,98 |
| 81,00 | 49,4 | 48,79 | 128,65 | 5783,94 | 46,77 | 46,48 | 129,19 | 11717,61 | 48,84 | 48,6 | 308,27 | 28018,97 |
| 82,00 | 49,4 | 48,79 | 128,65 | 5783,94 | 46,77 | 46,54 | 102,46 | 11723,55 | 48,78 | 48,48 | 246,62 | 27977,81 |
| 83,00 | 49,4 | 48,79 | 128,65 | 5783,94 | 46,64 | 46,42 | 98,01 | 11698,82 | 48,78 | 48,6 | 246,62 | |

| Tempo (h) | 4UQ3S80 | | | | 4UQ6S80 | 4UQ12S80 |
|-----------|---------|-------|---------|---------|------------------------------------|------------------------------------|
| | Tin | Tout | q (W/m) | Re | | |
| 0,00 | 26,21 | 26,44 | 113,00 | 3748,41 | | |
| 1,00 | 31,29 | 30,68 | 129,50 | 4138,69 | | |
| 2,00 | 33,98 | 33,24 | 156,95 | 4364,64 | | |
| 3,00 | 35,8 | 34,99 | 171,69 | 4521,22 | | |
| 4,00 | 37,05 | 36,3 | 158,89 | 4635,02 | | |
| 5,00 | 37,99 | 37,3 | 146,13 | 4722,08 | | |
| 6,00 | 38,81 | 38,05 | 160,90 | 4793,04 | | |
| 7,00 | 39,56 | 38,74 | 175,56 | 4858,48 | | |
| 8,00 | 40,12 | 39,36 | 160,82 | 4912,36 | | |
| 9,00 | 40,63 | 39,86 | 162,91 | 4958,65 | | |
| 10,00 | 41,06 | 40,3 | 160,77 | 4998,63 | | |
| 11,00 | 41,32 | 40,55 | 162,87 | 5022,12 | | |
| 12,00 | 41,63 | 40,86 | 162,85 | 5050,71 | | |
| 13,00 | 41,82 | 41,05 | 162,84 | 5068,26 | | |
| 14,00 | 41,94 | 41,24 | 148,03 | 5082,59 | | |
| 15,00 | 42,07 | 41,42 | 137,45 | 5096,93 | | |
| 16,00 | 42,26 | 41,55 | 150,12 | 5111,75 | | |
| 17,00 | 42,38 | 41,61 | 162,81 | 5120,08 | | |
| 18,00 | 42,38 | 41,74 | 135,32 | 5126,11 | | |
| 19,00 | 42,44 | 41,8 | 135,31 | 5131,67 | | |
| 20,00 | 42,57 | 41,86 | 150,11 | 5140,48 | | |
| 21,00 | 42,57 | 41,86 | 150,11 | 5140,48 | | |
| 22,00 | 42,63 | 41,92 | 150,10 | 5146,05 | | |
| 23,00 | 43,01 | 42,24 | 162,77 | 5178,54 | | |
| 24,00 | 43,07 | 42,36 | 150,08 | 5186,90 | | |
| 25,00 | 43,38 | 42,67 | 150,06 | 5215,73 | | |
| 26,00 | 43,51 | 42,86 | 137,37 | 5230,62 | | |
| 27,00 | 43,76 | 42,98 | 164,84 | 5247,85 | | |
| 28,00 | 43,95 | 43,17 | 164,83 | 5265,55 | | |
| 29,00 | 44,14 | 43,36 | 164,82 | 5283,27 | | |
| 30,00 | 44,14 | 43,42 | 152,14 | 5286,07 | | |
| 31,00 | 44,26 | 43,55 | 150,02 | 5297,73 | | |
| 32,00 | 44,45 | 43,73 | 152,12 | 5314,99 | | |
| 33,00 | 44,51 | 43,8 | 150,00 | 5321,06 | | |
| 34,00 | 44,58 | 43,86 | 152,11 | 5327,13 | | |
| 35,00 | 44,64 | 43,92 | 152,11 | 5332,73 | | |
| 36,00 | 44,7 | 43,98 | 152,11 | 5338,33 | | |
| 37,00 | 44,76 | 44,05 | 149,99 | 5344,41 | | |
| 38,00 | 44,76 | 44,05 | 149,99 | 5344,41 | | |
| 39,00 | 44,76 | 44,05 | 149,99 | 5344,41 | | |
| 40,00 | 44,76 | 44,11 | 137,31 | 5347,21 | | |
| 41,00 | 44,76 | 44,11 | 137,31 | 5347,21 | | |
| 42,00 | 44,76 | 44,11 | 137,31 | 5347,21 | | |
| 43,00 | 44,76 | 44,11 | 137,31 | 5347,21 | | |
| 44,00 | 44,76 | 44,05 | 149,99 | 5344,41 | | |
| 45,00 | 44,64 | 43,92 | 152,11 | 5332,73 | | |
| 46,00 | 44,64 | 43,92 | 152,11 | 5332,73 | | |
| 47,00 | 44,64 | 43,98 | 139,43 | 5335,53 | | |
| 48,00 | 44,7 | 44,05 | 137,32 | 5341,60 | | |
| 49,00 | 44,95 | 44,17 | 164,77 | 5358,89 | NÃO FOI POSSÍVEL EXECUTAR O ENSAIO | NÃO FOI POSSÍVEL EXECUTAR O ENSAIO |
| 50,00 | 45,01 | 44,3 | 149,98 | 5367,77 | | |
| 51,00 | 45,2 | 44,48 | 152,08 | 5385,06 | | |
| 52,00 | 45,45 | 44,73 | 152,06 | 5408,44 | | |
| 53,00 | 45,64 | 44,86 | 164,73 | 5423,41 | | |
| 54,00 | 45,77 | 45,05 | 152,05 | 5438,39 | | |
| 55,00 | 45,89 | 45,11 | 164,71 | 5446,81 | | |
| 56,00 | 45,95 | 45,23 | 152,04 | 5455,23 | | |
| 57,00 | 45,89 | 45,17 | 152,04 | 5449,62 | | |
| 58,00 | 45,95 | 45,23 | 152,04 | 5455,23 | | |
| 59,00 | 45,95 | 45,23 | 152,04 | 5455,23 | | |
| 60,00 | 46,02 | 45,3 | 152,03 | 5461,79 | | |
| 61,00 | 46,02 | 45,3 | 152,03 | 5461,79 | | |
| 62,00 | 45,95 | 45,17 | 164,71 | 5452,43 | | |
| 63,00 | 45,83 | 45,05 | 164,72 | 5441,19 | | |
| 64,00 | 45,83 | 45,05 | 164,72 | 5441,19 | | |
| 65,00 | 45,77 | 45,05 | 152,05 | 5438,39 | | |
| 66,00 | 45,64 | 44,98 | 139,38 | 5429,03 | | |
| 67,00 | 45,58 | 44,92 | 139,38 | 5423,41 | | |
| 68,00 | 45,58 | 44,86 | 152,06 | 5420,60 | | |
| 69,00 | 45,52 | 44,8 | 152,06 | 5414,99 | | |
| 70,00 | 45,52 | 44,8 | 152,06 | 5414,99 | | |
| 71,00 | 45,7 | 44,98 | 152,05 | 5431,83 | | |
| 72,00 | 45,7 | 45,05 | 137,27 | 5435,11 | | |
| 73,00 | 45,89 | 45,17 | 152,04 | 5449,62 | | |
| 74,00 | 45,95 | 45,23 | 152,04 | 5455,23 | | |
| 75,00 | 46,02 | 45,3 | 152,03 | 5461,79 | | |
| 76,00 | 46,21 | 45,48 | 154,14 | 5479,11 | | |
| 77,00 | 46,39 | 45,67 | 152,01 | 5496,44 | | |
| 78,00 | 46,64 | 45,86 | 164,67 | 5517,05 | | |
| 79,00 | 46,58 | 45,86 | 152,00 | 5514,24 | | |
| 80,00 | 46,58 | 45,79 | 166,78 | 5510,96 | | |
| 81,00 | 46,52 | 45,79 | 154,12 | 5508,15 | | |
| 82,00 | 46,52 | 45,73 | 166,79 | 5505,34 | | |
| 83,00 | 46,46 | 45,79 | 141,45 | 5505,34 | | |
| 84,00 | 46,52 | 45,79 | 154,12 | 5508,15 | | |
| 85,00 | 46,52 | 45,73 | 166,79 | 5505,34 | | |
| 86,00 | 46,46 | 45,73 | 154,12 | 5502,53 | | |
| 87,00 | 46,33 | 45,61 | 152,02 | 5490,82 | | |
| 88,00 | 46,14 | 45,48 | 139,36 | 5475,83 | | |
| 89,00 | 46,02 | 45,36 | 139,36 | 5464,60 | | |
| 90,00 | 46,02 | 45,36 | 139,36 | 5464,60 | | |
| 91,00 | 46,02 | 45,23 | 166,82 | 5458,51 | | |
| 92,00 | 45,89 | 45,23 | 139,37 | 5452,43 | | |
| 93,00 | 46,02 | 45,36 | 139,36 | 5464,60 | | |
| 94,00 | 46,08 | 45,36 | 152,03 | 5467,41 | | |
| 95,00 | 46,08 | 45,36 | 152,03 | 5467,41 | | |
| 96,00 | 46,21 | 45,48 | 154,14 | 5479,11 | | |
| 97,00 | | | | | | |
| 98,00 | | | | | | |
| 99,00 | | | | | | |
| 100,00 | | | | | | |

Figura 4 – Resultados das temperaturas de entrada e saída nos tubos ativos, fluxo de calor trocado por metro de estaca e número de Reynolds, referente aos ensaios TRT's 4UQ3S80, 4UQ6S80 e 4UQ12S80.

| Tempo (h) | 1UQ3S33 | | | | 1UQ6S33 | | | | 1UQ12S33 | | | |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|----------|----------|-------|---------|----------|
| | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re |
| 0,00 | 26,21 | 26,44 | 0,00 | 3748,41 | 25,89 | 25,75 | 228,17 | 7378,02 | 26,21 | 26,44 | 0,00 | 15223,15 |
| 1,00 | 37,18 | 36,93 | 52,96 | 4669,04 | 31,47 | 30,93 | 228,17 | 8274,10 | 40,38 | 40,3 | 68,18 | 20173,65 |
| 2,00 | 41,75 | 41,42 | 69,78 | 5082,13 | 35,42 | 34,87 | 232,06 | 8955,09 | 44,26 | 44,11 | 127,47 | 21621,43 |
| 3,00 | 44,07 | 43,67 | 84,52 | 5294,46 | 37,68 | 36,99 | 290,88 | 9343,30 | 46,71 | 46,54 | 144,20 | 22548,76 |
| 4,00 | 45,77 | 45,3 | 99,25 | 5450,09 | 39,37 | 38,68 | 290,70 | 9647,66 | 48,34 | 48,17 | 144,02 | 23169,65 |
| 5,00 | 47,02 | 46,54 | 101,32 | 5566,72 | 40,75 | 40,05 | 294,76 | 9898,02 | 49,72 | 49,48 | 203,12 | 23682,56 |
| 6,00 | 48,09 | 47,54 | 116,05 | 5663,79 | 41,88 | 41,17 | 298,85 | 10104,42 | 50,72 | 50,54 | 152,22 | 24075,92 |
| 7,00 | 48,96 | 48,48 | 101,25 | 5748,72 | 42,69 | 42,05 | 269,30 | 10260,23 | 51,78 | 51,6 | 152,09 | 24481,66 |
| 8,00 | 49,78 | 49,35 | 90,67 | 5828,08 | 43,51 | 42,86 | 273,43 | 10411,02 | 52,6 | 52,41 | 160,44 | 24794,59 |
| 9,00 | 50,34 | 49,79 | 115,96 | 5875,08 | 44,14 | 43,48 | 277,57 | 10526,95 | 53,04 | 52,85 | 160,38 | 24964,01 |
| 10,00 | 50,97 | 50,48 | 103,28 | 5937,17 | 44,64 | 43,98 | 277,52 | 10619,84 | 53,6 | 53,35 | 210,93 | 25168,64 |
| 11,00 | 51,6 | 50,98 | 130,66 | 5990,40 | 45,01 | 44,3 | 298,51 | 10684,00 | 53,92 | 53,72 | 168,70 | 25302,22 |
| 12,00 | 51,53 | 50,98 | 115,91 | 5987,10 | 45,39 | 44,67 | 302,68 | 10753,79 | 54,23 | 54,04 | 160,22 | 25424,47 |
| 13,00 | 51,78 | 51,29 | 103,25 | 6013,51 | 45,33 | 44,67 | 277,46 | 10748,20 | 54,35 | 54,1 | 210,80 | 25459,45 |
| 14,00 | 51,97 | 51,48 | 103,25 | 6031,44 | 45,45 | 44,8 | 273,24 | 10771,47 | 54,54 | 54,35 | 160,18 | 25545,07 |
| 15,00 | 52,16 | 51,66 | 105,35 | 6048,91 | 45,58 | 44,98 | 252,21 | 10800,34 | 54,79 | 54,66 | 109,57 | 25654,27 |
| 16,00 | 52,16 | 51,66 | 105,35 | 6048,91 | 45,58 | 44,98 | 252,21 | 10800,34 | 54,79 | 54,6 | 160,14 | 25642,56 |
| 17,00 | 52,1 | 51,6 | 105,35 | 6043,24 | 45,7 | 45,05 | 273,22 | 10818,04 | 54,67 | 54,47 | 168,59 | 25593,79 |
| 18,00 | 52,16 | 51,66 | 105,35 | 6048,91 | 45,83 | 45,17 | 277,41 | 10841,32 | 54,67 | 54,54 | 109,58 | 25607,44 |
| 19,00 | 52,29 | 51,79 | 105,34 | 6061,19 | 45,83 | 45,23 | 252,19 | 10846,91 | 54,79 | 54,54 | 210,72 | 25630,85 |
| 20,00 | 52,1 | 51,66 | 92,71 | 6046,08 | 46,14 | 45,54 | 252,16 | 10904,69 | 54,86 | 54,66 | 168,56 | 25667,94 |
| 21,00 | 51,97 | 51,54 | 90,60 | 6034,27 | 46,33 | 45,67 | 277,36 | 10934,51 | 55,11 | 54,85 | 219,09 | 25753,97 |
| 22,00 | 52,35 | 51,79 | 117,98 | 6064,03 | 46,64 | 46,04 | 252,11 | 10997,92 | 55,42 | 55,16 | 219,03 | 25875,50 |
| 23,00 | 52,47 | 51,98 | 103,23 | 6078,69 | 46,96 | 46,36 | 252,09 | 11057,61 | 55,73 | 55,41 | 269,50 | 25985,59 |
| 24,00 | 52,98 | 52,48 | 105,32 | 6126,51 | 47,4 | 46,73 | 281,46 | 11133,19 | 56,05 | 55,72 | 277,85 | 26109,85 |
| 25,00 | 53,29 | 52,79 | 105,30 | 6155,93 | 47,65 | 46,98 | 281,43 | 11179,85 | 56,36 | 56,1 | 218,84 | 26246,46 |
| 26,00 | 53,67 | 53,16 | 107,39 | 6191,58 | 48,02 | 47,36 | 277,19 | 11249,86 | 56,86 | 56,66 | 168,26 | 26457,46 |
| 27,00 | 54,04 | 53,54 | 105,27 | 6227,32 | 48,27 | 47,48 | 331,77 | 11284,41 | 57,3 | 57,1 | 168,19 | 26633,74 |
| 28,00 | 54,17 | 53,66 | 107,37 | 6239,25 | 48,4 | 47,73 | 281,36 | 11319,89 | 57,61 | 57,35 | 218,59 | 26746,47 |
| 29,00 | 54,54 | 53,97 | 119,99 | 6271,77 | 48,59 | 47,86 | 306,54 | 11349,78 | 57,8 | 57,6 | 168,11 | 26835,37 |
| 30,00 | 54,98 | 54,47 | 107,34 | 6316,87 | 48,96 | 48,23 | 306,50 | 11418,90 | 58,18 | 57,85 | 277,30 | 26963,14 |
| 31,00 | 55,3 | 54,79 | 107,33 | 6347,68 | 48,78 | 48,1 | 285,52 | 11389,94 | 58,3 | 58,03 | 226,85 | 27024,20 |
| 32,00 | 55,55 | 55,04 | 107,32 | 6371,82 | 48,84 | 48,17 | 281,31 | 11402,08 | 58,24 | 57,97 | 226,86 | 26999,76 |
| 33,00 | 55,55 | 54,97 | 122,05 | 6368,44 | 48,84 | 48,23 | 256,12 | 11407,69 | 58,18 | 57,97 | 176,45 | 26987,55 |
| 34,00 | 55,8 | 55,22 | 122,04 | 6392,63 | 48,84 | 48,17 | 281,31 | 11402,08 | 58,37 | 58,16 | 176,42 | 27064,99 |
| 35,00 | 55,8 | 55,22 | 122,04 | 6392,63 | 48,71 | 48,04 | 281,33 | 11377,80 | 58,18 | 57,91 | 226,88 | 26975,34 |
| 36,00 | 55,73 | 55,16 | 119,94 | 6386,34 | 48,84 | 48,17 | 281,31 | 11402,08 | 58,12 | 57,91 | 176,46 | 26963,14 |
| 37,00 | 55,48 | 55,04 | 92,59 | 6368,44 | 48,71 | 48,04 | 281,33 | 11377,80 | 58,24 | 57,97 | 226,86 | 26999,76 |
| 38,00 | 55,67 | 55,16 | 107,31 | 6383,43 | 48,78 | 48,17 | 256,12 | 11396,48 | 58,12 | 57,85 | 226,89 | 26950,95 |
| 39,00 | 55,17 | 54,72 | 94,70 | 6338,04 | 48,78 | 48,1 | 285,52 | 11389,94 | 58,05 | 57,78 | 226,90 | 26922,51 |
| 40,00 | 54,98 | 54,54 | 92,61 | 6320,24 | 48,71 | 47,98 | 306,52 | 11372,19 | 57,87 | 57,6 | 226,94 | 26849,53 |
| 41,00 | 54,92 | 54,47 | 94,71 | 6313,98 | 48,59 | 48,04 | 230,95 | 11366,59 | 57,8 | 57,53 | 226,96 | 26821,20 |
| 42,00 | 54,79 | 54,35 | 92,61 | 6301,98 | 48,52 | 47,86 | 277,15 | 11343,24 | 57,74 | 57,47 | 226,97 | 26796,94 |
| 43,00 | 54,79 | 54,35 | 92,61 | 6301,98 | 48,46 | 47,92 | 226,76 | 11343,24 | 57,61 | 57,35 | 218,59 | 26746,47 |
| 44,00 | 54,61 | 54,16 | 94,73 | 6284,23 | 48,59 | 47,98 | 256,14 | 11360,98 | 57,55 | 57,22 | 277,47 | 26708,17 |
| 45,00 | 54,48 | 54,04 | 92,62 | 6272,25 | 48,96 | 48,29 | 281,30 | 11424,50 | 57,49 | 57,22 | 227,02 | 26696,09 |
| 46,00 | 54,86 | 54,35 | 107,35 | 6305,34 | 49,28 | 48,6 | 285,47 | 11483,37 | 57,3 | 57,03 | 227,06 | 26619,68 |
| 47,00 | 55,3 | 54,79 | 107,33 | 6347,68 | 49,47 | 48,79 | 285,45 | 11518,88 | 57,24 | 56,97 | 227,08 | 26595,59 |
| 48,00 | 55,55 | 55,04 | 107,32 | 6371,82 | 49,65 | 48,98 | 281,23 | 11553,47 | 57,36 | 57,1 | 218,64 | 26645,79 |
| 49,00 | 55,8 | 55,22 | 122,04 | 6392,63 | 49,84 | 49,17 | 281,22 | 11588,99 | 57,61 | 57,35 | 218,59 | 26746,47 |
| 50,00 | 56,24 | 55,66 | 122,02 | 6435,37 | 50,15 | 49,42 | 306,37 | 11641,36 | 57,93 | 57,6 | 277,37 | 26861,68 |
| 51,00 | 56,49 | 55,91 | 122,00 | 6459,75 | 50,28 | 49,6 | 285,37 | 11670,36 | 57,99 | 57,72 | 226,92 | 26898,17 |
| 52,00 | 56,74 | 56,22 | 109,37 | 6487,15 | 50,53 | 49,92 | 255,97 | 11723,70 | 58,37 | 58,09 | 235,24 | 27050,70 |
| 53,00 | 56,92 | 56,41 | 107,26 | 6505,30 | 50,59 | 49,92 | 281,14 | 11729,32 | 58,55 | 58,22 | 277,20 | 27114,01 |
| 54,00 | 57,11 | 56,53 | 121,97 | 6520,54 | 50,53 | 49,85 | 285,34 | 11717,15 | 58,93 | 58,66 | 226,71 | 27282,18 |
| 55,00 | 57,36 | 56,78 | 121,96 | 6545,19 | 50,66 | 49,92 | 310,51 | 11735,87 | 59,31 | 59,03 | 235,02 | 27436,94 |
| 56,00 | 57,61 | 57,16 | 94,61 | 6576,37 | 50,66 | 50,04 | 260,15 | 11747,10 | 59,5 | 59,16 | 285,34 | 27503,25 |
| 57,00 | 57,55 | 57,03 | 109,33 | 6566,95 | 50,66 | 50,04 | 260,15 | 11747,10 | 59,68 | 59,34 | 285,29 | 27578,05 |
| 58,00 | 57,74 | 57,16 | 121,94 | 6582,82 | 50,72 | 50,04 | 285,32 | 11752,72 | 59,81 | 59,53 | 234,91 | 27644,72 |
| 59,00 | 57,74 | 57,16 | 121,94 | 6582,82 | 50,72 | 50,04 | 285,32 | 11752,72 | 59,81 | 59,59 | 184,56 | 27657,24 |
| 60,00 | 57,68 | 57,1 | 121,94 | 6576,87 | 50,59 | 50,04 | 230,78 | 11740,55 | 59,75 | 59,47 | 234,92 | 27619,70 |
| 61,00 | 57,74 | 57,22 | 109,33 | 6585,80 | 50,53 | 49,92 | 255,97 | 11723,70 | 59,75 | 59,47 | 234,92 | 27619,70 |
| 62,00 | 57,87 | 57,28 | 124,04 | 6595,24 | 50,41 | 49,79 | 260,18 | 11700,30 | 59,43 | 59,16 | 226,60 | 27488,74 |
| 63,00 | 57,43 | 56,85 | 121,96 | 6552,11 | 50,22 | 49,6 | 260,19 | 11664,75 | 59,24 | 58,97 | 226,64 | 27410,05 |
| 64,00 | 57,11 | 56,6 | 107,25 | 6523,99 | 50,09 | 49,48 | 256,01 | 11641,36 | 58,99 | 58,78 | 176,32 | 27319,24 |
| 65,00 | 56,99 | 56,47 | 109,36 | 6511,69 | 49,97 | 49,29 | 285,40 | 11612,37 | 58,87 | 58,66 | 176,34 | 27269,84 |
| 66,00 | 56,92 | 56,47 | 94,64 | 6508,25 | 49,72 | 49,1 | 260,24 | 11571,23 | 58,81 | 58,53 | 235,14 | 27230,79 |
| 67,00 | 56,8 | 56,35 | 94,64 | 6496,46 | 49,72 | 49,04 | 285,43 | 11565,62 | 58,49 | 58,34 | 126,00 | 27126,28 |
| 68,00 | 56,55 | 56,1 | 94,65 | 6471,97 | 49,78 | 49,1 | 285,42 | 11576,84 | 58,55 | 58,34 | 176,39 | 27138,55 |
| 69,00 | 56,55 | 56,03 | 109,38 | 6468,55 | 49,9 | 49,29 | 256,02 | 11605,82 | 58,68 | 58,41 | 226,77 | 27179,51 |
| 70,00 | 56,8 | 56,22 | 121,99 | 6490,09 | 50,15 | 49,48 | 281,19 | 11646,97 | 58,74 | 58,53 | 176,36 | 27216,42 |
| 71,00 | 56,86 | 56,28 | 121,99 | 6495,97 | 50,41 | 49,73 | 285,36 | 11694,69 | 58,62 | 58,34 | 235,18 | 27152,88 |
| 72,00 | 56,86 | 56,35 | 107,26 | 6499,41 | 50,59 | 49,92 | 281,14 | 11729,32 | 59,37 | 59,09 | 235,01 | 27461,79 |
| 73,00 | 56,92 | 56,35 | 119,88 | 6502,35 | 50,78 | 50,1 | 285,32 | 11763,96 | 60,06 | 59,78 | 234,85 | 27749,23 |
| 74,00 | 57,18 | 56,66 | 109,35 | 6530,39 | 51,03 | 50,35 | 285,29 | 11810,78 | 60,56 | 60,28 | 234,73 | 27959,45 |
| 75,00 | 57,49 | 56,85 | 134,57 | 6555,08 | 51,28 | 50,6 | 285,27 | 11857,64 | 60,69 | 60,41 | 234,70 | 28014,38 |
| 76,00 | 57,49 | 56,91 | 121,95 | 6558,04 | 51,41 | 50,73 | 285,25 | 11882,02 | 60,75 | 60,47 | 234,68 | 28039,76 |
| 77,00 | 57,68 | 57,1 | 121,94 | 6576,87 | 51,53 | 50,85 | 285,24 | 11904,52 | 60,87 | 60,53 | 284,95 | 28077,88 |
| 78,00 | 57,74 | 57,22 | 109,33 | 6585,80 | 51,53 | 50,79 | 310,41 | 11898,90 | 61 | 60,65 | 293,29 | 28130,91 |
| 79,00 | 58,12 | 57,47 | 136,64 | 6617,16 | 51,6 | 50,91 | 289,43 | 11916,72 | 61,19 | 60,9 | 242,96 | 28224,47 |
| 80,00 | 58,3 | 57,72 | 121,91 | 6638,65 | 51,66 | 50,98 | 285,23 | 11928,92 | 61,12 | 60,9 | 184,32 | 28209,57 |
| 81,00 | 58,43 | 57,97 | 96,68 | 6657,70 | 51,66 | 51,04 | 260,06 | 11934,55 | 61 | 60,78 | 184,34 | 28158,52 |
| 82,00 | 58,55 | 58,03 | 109,29 | 6666,74 | 51,78 | 51,04 | 310,39 | 11945,81 | 60,94 | 60,72 | 184,35 | 28133,03 |
| 83,00 | 58,49 | 58,09 | 84,07 | 6666,74 | 51,72 | 51,04 | 285,22 | 11940,18 | 60,94 | 60,78 | 134,07 | 28145,77 |
| 84 | | | | | | | | | | | | |

| Tempo (h) | 2UQ3S33 | | | | 2UQ6S33 | | | | 2UQ12S33 | | | |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|
| | Tin | Tout | q (W/m) | Re | Tin | Tout | Re | Pr (H2O) | Tin | Tout | Q (W/m) | Re |
| 0,00 | 26,21 | 26,44 | 150,00 | 3748,41 | 24,52 | 24,44 | 7191,83 | 6,22 | 23,7 | 23,57 | 137,34 | 14328,68 |
| 1,00 | 28,09 | 27,25 | 178,53 | 3859,82 | 29,78 | 29,56 | 8052,14 | 5,46 | 31,16 | 31 | 137,34 | 16841,03 |
| 2,00 | 31,66 | 30,56 | 233,52 | 4149,33 | 32,41 | 32,12 | 8493,95 | 5,14 | 34,67 | 34,43 | 205,48 | 18059,45 |
| 3,00 | 33,86 | 32,75 | 235,46 | 4338,12 | 34,17 | 33,81 | 8792,90 | 4,93 | 36,99 | 36,74 | 213,66 | 18892,93 |
| 4,00 | 35,49 | 34,31 | 250,16 | 4477,55 | 35,61 | 35,31 | 9051,24 | 4,77 | 38,62 | 38,43 | 245,58 | 19500,62 |
| 5,00 | 36,36 | 35,31 | 222,52 | 4560,20 | 36,61 | 36,3 | 9227,99 | 4,67 | 39,94 | 39,68 | 254,07 | 19976,27 |
| 6,00 | 37,24 | 36,12 | 237,28 | 4635,47 | 37,43 | 37,12 | 9374,78 | 4,58 | 41 | 40,67 | 254,09 | 20358,57 |
| 7,00 | 37,93 | 36,87 | 224,50 | 4700,03 | 38,06 | 37,74 | 9487,33 | 4,52 | 41,94 | 41,67 | 203,27 | 20722,39 |
| 8,00 | 38,56 | 37,43 | 239,28 | 4753,66 | 38,56 | 38,24 | 9577,77 | 4,47 | 42,69 | 42,3 | 304,90 | 20982,21 |
| 9,00 | 39,25 | 38,05 | 254,04 | 4813,00 | 39,06 | 38,74 | 9668,55 | 4,42 | 43,2 | 42,67 | 245,58 | 21148,29 |
| 10,00 | 39,62 | 38,55 | 226,48 | 4852,56 | 39,31 | 38,93 | 9708,60 | 4,40 | 43,51 | 42,98 | 254,07 | 21265,45 |
| 11,00 | 39,94 | 38,8 | 241,27 | 4878,55 | 39,5 | 39,18 | 9748,71 | 4,38 | 43,89 | 43,36 | 254,09 | 21409,24 |
| 12,00 | 40,12 | 39,05 | 226,44 | 4898,19 | 39,87 | 39,49 | 9810,82 | 4,35 | 44,2 | 43,73 | 245,58 | 21538,03 |
| 13,00 | 40,31 | 39,24 | 226,42 | 4915,57 | 40,25 | 39,93 | 9885,90 | 4,31 | 44,14 | 43,67 | 254,02 | 21515,30 |
| 14,00 | 40,5 | 39,43 | 226,40 | 4932,97 | 40,63 | 40,3 | 9954,74 | 4,28 | 44,39 | 43,86 | 313,22 | 21598,68 |
| 15,00 | 40,56 | 39,55 | 213,70 | 4941,22 | 41,19 | 40,86 | 10057,82 | 4,23 | 44,51 | 43,98 | 253,89 | 21644,18 |
| 16,00 | 40,81 | 39,74 | 226,38 | 4961,40 | 41,63 | 41,3 | 10139,04 | 4,19 | 44,51 | 43,92 | 253,83 | 21632,81 |
| 17,00 | 41,06 | 40,11 | 200,97 | 4989,89 | 42,07 | 41,74 | 10220,44 | 4,15 | 44,45 | 43,98 | 262,23 | 21632,81 |
| 18,00 | 41,88 | 40,8 | 228,40 | 5059,49 | 42,51 | 42,17 | 10301,07 | 4,11 | 44,51 | 44,05 | 245,58 | 21657,46 |
| 19,00 | 42,44 | 41,36 | 228,36 | 5111,28 | 42,95 | 42,61 | 10382,78 | 4,08 | 44,7 | 44,3 | 254,02 | 21740,92 |
| 20,00 | 42,95 | 41,86 | 230,43 | 5158,11 | 43,32 | 42,92 | 10446,02 | 4,05 | 44,89 | 44,36 | 313,22 | 21788,36 |
| 21,00 | 43,38 | 42,24 | 240,97 | 5195,73 | 43,64 | 43,3 | 10511,19 | 4,02 | 45,52 | 44,86 | 253,89 | 22002,94 |
| 22,00 | 43,7 | 42,61 | 230,37 | 5227,83 | 43,82 | 43,48 | 10544,73 | 4,01 | 45,58 | 45,04667 | 253,83 | 22049,81 |
| 23,00 | 43,95 | 42,92 | 217,67 | 5253,90 | 43,95 | 43,61 | 10568,97 | 4,00 | 45,62 | 45,17111 | 262,23 | 22081,06 |
| 24,00 | 44,26 | 43,17 | 230,32 | 5280,00 | 44,26 | 43,86 | 10621,21 | 3,97 | 45,7 | 45,42 | 237,70 | 22143,57 |
| 25,00 | 44,45 | 43,36 | 230,31 | 5297,73 | 44,45 | 44,11 | 10662,27 | 3,96 | 46,33 | 46,11 | 186,67 | 22394,61 |
| 26,00 | 44,83 | 43,73 | 232,39 | 5332,73 | 44,58 | 44,17 | 10680,01 | 3,95 | 46,08 | 45,86 | 186,70 | 22399,50 |
| 27,00 | 44,89 | 43,8 | 230,27 | 5338,80 | 44,7 | 44,36 | 10708,97 | 3,94 | 46,64 | 46,42 | 186,63 | 22512,59 |
| 28,00 | 44,83 | 43,73 | 232,39 | 5332,73 | 44,95 | 44,61 | 10755,69 | 3,92 | 47,27 | 46,92 | 286,78 | 22727,71 |
| 29,00 | 45,01 | 43,92 | 230,26 | 5350,01 | 44,95 | 44,61 | 10755,69 | 3,92 | 47,58 | 47,23 | 296,71 | 22845,78 |
| 30,00 | 45,08 | 43,98 | 232,37 | 5356,08 | 44,95 | 44,55 | 10750,08 | 3,92 | 47,84 | 47,54 | 254,27 | 22954,35 |
| 31,00 | 45,2 | 44,11 | 230,24 | 5367,77 | 44,89 | 44,55 | 10744,47 | 3,92 | 48,09 | 47,79 | 254,22 | 23049,60 |
| 32,00 | 45,39 | 44,36 | 217,55 | 5388,33 | 44,89 | 44,61 | 10750,08 | 3,92 | 48,4 | 48,04 | 305,00 | 23156,31 |
| 33,00 | 45,26 | 44,3 | 202,78 | 5379,45 | 44,95 | 44,61 | 10755,69 | 3,92 | 48,52 | 48,23 | 245,67 | 23215,39 |
| 34,00 | 45,14 | 44,17 | 204,90 | 5367,77 | 44,95 | 44,61 | 10755,69 | 3,92 | 48,65 | 48,35 | 254,11 | 23263,03 |
| 35,00 | 45,08 | 44,05 | 217,58 | 5359,35 | 45,01 | 44,73 | 10772,51 | 3,91 | 48,71 | 48,48 | 194,81 | 23299,25 |
| 36,00 | 45,01 | 44,05 | 202,79 | 5356,08 | 44,89 | 44,55 | 10744,47 | 3,92 | 48,96 | 48,67 | 245,58 | 23383,13 |
| 37,00 | 45,01 | 43,98 | 217,58 | 5352,81 | 44,89 | 44,55 | 10744,47 | 3,92 | 48,9 | 48,6 | 254,07 | 23358,34 |
| 38,00 | 44,95 | 43,98 | 204,91 | 5350,01 | 45,08 | 44,73 | 10779,06 | 3,91 | 48,78 | 48,48 | 254,09 | 23312,59 |
| 39,00 | 44,83 | 43,86 | 204,92 | 5338,80 | 45,26 | 44,86 | 10808,04 | 3,90 | 48,78 | 48,54 | 203,27 | 23324,03 |
| 40,00 | 44,83 | 43,86 | 204,92 | 5338,80 | 45,52 | 45,17 | 10861,36 | 3,88 | 48,84 | 48,48 | 304,90 | 23324,03 |
| 41,00 | 44,89 | 43,86 | 217,59 | 5341,60 | 45,83 | 45,42 | 10913,76 | 3,85 | 48,78 | 48,48 | 254,09 | 23312,59 |
| 42,00 | 45,26 | 44,3 | 202,78 | 5379,45 | 46,02 | 45,67 | 10954,95 | 3,84 | 48,71 | 48,42 | 245,63 | 23287,81 |
| 43,00 | 45,77 | 44,73 | 219,64 | 5423,41 | 46,27 | 45,86 | 10996,15 | 3,82 | 48,59 | 48,29 | 254,12 | 23240,16 |
| 44,00 | 46,08 | 45,05 | 217,50 | 5452,89 | 46,33 | 45,98 | 11013,01 | 3,81 | 48,71 | 48,42 | 245,63 | 23287,81 |
| 45,00 | 46,46 | 45,36 | 232,25 | 5485,20 | 46,64 | 46,29 | 11071,09 | 3,79 | 48,96 | 48,67 | 245,58 | 23383,13 |
| 46,00 | 46,71 | 45,67 | 219,56 | 5511,43 | 46,96 | 46,54 | 11124,50 | 3,77 | 49,15 | 48,85 | 254,02 | 23453,68 |
| 47,00 | 47,08 | 45,98 | 232,20 | 5543,29 | 46,96 | 46,54 | 11124,50 | 3,77 | 49,47 | 49,1 | 313,22 | 23562,38 |
| 48,00 | 47,33 | 46,29 | 219,52 | 5569,54 | 47,08 | 46,73 | 11153,55 | 3,76 | 49,78 | 49,48 | 253,89 | 23694,01 |
| 49,00 | 47,4 | 46,36 | 219,51 | 5576,10 | 47,21 | 46,79 | 11171,36 | 3,75 | 50,09 | 49,79 | 253,83 | 23812,34 |
| 50,00 | 47,52 | 46,48 | 219,50 | 5587,35 | 47,27 | 46,86 | 11183,55 | 3,75 | 50,41 | 50,1 | 262,23 | 23932,63 |
| 51,00 | 47,46 | 46,36 | 232,17 | 5578,91 | 47,15 | 46,73 | 11160,11 | 3,76 | 50,72 | 50,35 | 312,92 | 24039,61 |
| 52,00 | 47,52 | 46,48 | 219,50 | 5587,35 | 47,08 | 46,67 | 11147,93 | 3,76 | 50,97 | 50,66 | 262,12 | 24146,66 |
| 53,00 | 47,65 | 46,54 | 234,27 | 5596,26 | 47,02 | 46,61 | 11136,68 | 3,77 | 50,97 | 50,6 | 312,86 | 24135,18 |
| 54,00 | 47,65 | 46,61 | 219,49 | 5599,54 | 46,89 | 46,54 | 11117,94 | 3,77 | 51,03 | 50,73 | 253,65 | 24171,51 |
| 55,00 | 47,65 | 46,67 | 206,83 | 5602,35 | 46,77 | 46,48 | 11101,07 | 3,78 | 50,97 | 50,73 | 202,92 | 24160,04 |
| 56,00 | 47,77 | 46,73 | 219,48 | 5610,79 | 46,83 | 46,42 | 11101,07 | 3,78 | 51,09 | 50,73 | 304,37 | 24182,99 |
| 57,00 | 47,71 | 46,73 | 206,82 | 5607,98 | 46,77 | 46,42 | 11095,45 | 3,78 | 51,09 | 50,73 | 304,37 | 24182,99 |
| 58,00 | 47,84 | 46,79 | 221,59 | 5616,89 | 46,64 | 46,29 | 11071,09 | 3,79 | 51,03 | 50,66 | 312,84 | 24158,13 |
| 59,00 | 47,77 | 46,79 | 206,82 | 5613,61 | 46,52 | 46,23 | 11054,23 | 3,80 | 51,03 | 50,66 | 312,84 | 24158,13 |
| 60,00 | 47,4 | 46,48 | 194,18 | 5581,73 | 46,77 | 46,42 | 11095,45 | 3,78 | 50,97 | 50,6 | 312,86 | 24135,18 |
| 61,00 | 47,33 | 46,36 | 204,74 | 5572,82 | 46,89 | 46,48 | 11112,32 | 3,78 | 50,84 | 50,54 | 253,69 | 24098,86 |
| 62,00 | 47,33 | 46,36 | 204,74 | 5572,82 | 46,89 | 46,61 | 11124,50 | 3,77 | 50,72 | 50,35 | 312,92 | 24039,61 |
| 63,00 | 47,15 | 46,23 | 194,20 | 5558,29 | 47,15 | 46,73 | 11160,11 | 3,76 | 50,59 | 50,23 | 304,49 | 23991,85 |
| 64,00 | 47,15 | 46,23 | 194,20 | 5558,29 | 47,21 | 46,86 | 11177,92 | 3,75 | 50,53 | 50,17 | 304,50 | 23968,92 |
| 65,00 | 47,02 | 46,17 | 179,43 | 5549,38 | 47,4 | 46,98 | 11206,98 | 3,74 | 50,41 | 50,1 | 262,23 | 23932,63 |
| 66,00 | 47,46 | 46,54 | 194,17 | 5587,35 | 47,84 | 47,36 | 11283,87 | 3,71 | 50,28 | 49,98 | 253,80 | 23884,89 |
| 67,00 | 47,84 | 46,86 | 206,81 | 5620,17 | 48,27 | 47,86 | 11371,10 | 3,68 | 50,34 | 49,98 | 304,55 | 23896,35 |
| 68,00 | 48,02 | 47,04 | 206,80 | 5637,06 | 48,65 | 48,23 | 11441,46 | 3,65 | 50,59 | 50,23 | 304,49 | 23991,85 |
| 69,00 | 48,27 | 47,29 | 206,78 | 5660,51 | 48,96 | 48,6 | 11505,28 | 3,63 | 50,72 | 50,35 | 312,92 | 24039,61 |
| 70,00 | 48,46 | 47,42 | 219,43 | 5675,52 | 49,28 | 48,85 | 11558,78 | 3,61 | 50,91 | 50,6 | 262,13 | 24123,71 |
| 71,00 | 48,59 | 47,67 | 194,10 | 5693,35 | 49,28 | 48,85 | 11558,78 | 3,61 | 51,22 | 50,91 | 262,06 | 24242,29 |
| 72,00 | 48,9 | 47,92 | 206,74 | 5719,63 | 49,34 | 48,98 | 11576,62 | 3,61 | 51,66 | 51,29 | 312,69 | 24399,26 |
| 73,00 | 49,09 | 48,1 | 208,83 | 5736,99 | 49,47 | 48,98 | 11588,83 | 3,60 | 51,97 | 51,66 | 261,91 | 24529,59 |
| 74,00 | 49,28 | 48,23 | 221,48 | 5752,01 | 49,53 | 49,17 | 11612,30 | 3,59 | 52,16 | 51,85 | 261,87 | 24602,48 |
| 75,00 | 49,34 | 48,35 | 208,81 | 5760,46 | 49,59 | 49,17 | 11617,94 | 3,59 | 52,29 | 51,98 | 261,84 | 24652,39 |
| 76,00 | 49,15 | 48,1 | 221,49 | 5739,81 | 49,47 | 49,04 | 11594,46 | 3,60 | 52,41 | 52,04 | 312,50 | 24686,96 |
| 77,00 | 49,28 | 48,23 | 221,48 | 5752,01 | 49,28 | 48,85 | 11558,78 | 3,61 | 52,54 | 52,16 | 320,91 | 24734,99 |
| 78,00 | 49,15 | 48,17 | 206,72 | 5743,09 | 49,21 | 48,79 | 11546,58 | 3,62 | 52,6 | 52,29 | 261,78 | 24771,51 |
| 79,00 | 49,03 | 48,1 | 196,18 | 5734,17 | 49,03 | 48,6 | 11511,85 | 3,63 | 52,79 | 52,41 | 320,85 | 24831,14 |
| 80,00 | 49,09 | 48,1 | 208,83 | 5736,99 | 48,96 | 48,54 | 11499,64 | 3,63 | 52,54 | 52,16 | 320,91 | 24734,99 |
| 81,00 | 48,96 | 47,98 | 206,73 | 5725,26 | 48,84 | 48,48 | 11482,75 | 3,64 | 52,35 | 52,04 | 261,83 | 24675,43 |
| 82,00 | 48,78 | 47,86 | 194,09 | 5711,18 | 48,71 | 48,29 | 11452,72 | 3,65 | 52,35 | 52,04 | 261,83 | 24675,43 |
| 83,00 | 48,59 | 47,67 | 194,10 | 5693,35 | 48,71 | 48,35 | 11458,35 | 3,65 | 52,35 | 51,98 | 312,51 | 24663,91 |
| 84,00 | 48,52 | 47,54 | 206,76 | 5683,96 | 48,78 | 48,42 | 11471,49 | 3,64 | 52,16 | 51,79 | 312,56 | 24590,97 |

| Tempo (h) | 4UQ3S33 | | | | 4UQ6S33 | | | | 4UQ12S33 | | | |
|-----------|---------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|----------|----------|-------|---------|----------|
| | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re | Tin | Tout | Q (W/m) | Re |
| 0,00 | 24,58 | 24,69 | 0,00 | 1482,90 | 25,27 | 22,82 | 0,00 | 7380,23 | 26,21 | 26,44 | 138,01 | 13987,48 |
| 1,00 | 29,41 | 28,75 | 140,21 | 1634,08 | 29,59 | 29,19 | 139,17 | 8789,47 | 29,91 | 29,75 | 138,01 | 15770,13 |
| 2,00 | 32,29 | 31,62 | 142,19 | 1734,30 | 32,54 | 32,12 | 172,55 | 9338,63 | 32,98 | 32,81 | 146,47 | 16791,96 |
| 3,00 | 34,36 | 33,62 | 156,93 | 1806,67 | 34,73 | 34,24 | 176,47 | 9749,71 | 35,17 | 34,93 | 206,62 | 17526,36 |
| 4,00 | 36,05 | 35,24 | 171,67 | 1866,48 | 36,43 | 35,93 | 151,06 | 10078,52 | 36,86 | 36,62 | 206,49 | 18112,03 |
| 5,00 | 37,37 | 36,55 | 173,70 | 1914,62 | 37,74 | 37,24 | 184,43 | 10335,95 | 38,18 | 37,93 | 214,99 | 18573,54 |
| 6,00 | 38,43 | 37,62 | 171,51 | 1954,00 | 38,87 | 38,36 | 184,27 | 10411,15 | 39,31 | 39,11 | 171,91 | 18982,81 |
| 7,00 | 39,31 | 38,43 | 186,28 | 1985,47 | 39,75 | 39,3 | 184,15 | 10590,56 | 40,31 | 39,93 | 326,53 | 19307,61 |
| 8,00 | 39,94 | 39,11 | 175,65 | 2010,00 | 40,56 | 40,05 | 184,03 | 11203,63 | 41,06 | 40,67 | 335,03 | 19574,91 |
| 9,00 | 40,56 | 39,68 | 186,19 | 2032,38 | 41,38 | 40,74 | 213,20 | 11360,46 | 41,5 | 41,24 | 223,31 | 19756,74 |
| 10,00 | 41,06 | 40,18 | 186,16 | 2051,25 | 41,82 | 41,24 | 183,86 | 11458,41 | 41,88 | 41,55 | 283,40 | 19881,24 |
| 11,00 | 41,25 | 40,49 | 160,76 | 2060,71 | 42,19 | 41,61 | 187,98 | 11535,69 | 42,07 | 41,8 | 231,85 | 19960,73 |
| 12,00 | 41,75 | 40,8 | 200,92 | 2076,05 | 42,57 | 41,99 | 212,98 | 11615,19 | 42,38 | 42,05 | 283,34 | 20062,02 |
| 13,00 | 42,07 | 41,11 | 203,01 | 2088,01 | 42,76 | 42,11 | 217,09 | 11647,65 | 42,57 | 42,3 | 231,81 | 20141,69 |
| 14,00 | 42,26 | 41,36 | 190,30 | 2096,37 | 43,01 | 42,42 | 191,99 | 11706,35 | 42,76 | 42,49 | 231,79 | 20210,56 |
| 15,00 | 42,38 | 41,49 | 188,18 | 2101,13 | 43,26 | 42,67 | 191,96 | 11758,81 | 42,88 | 42,61 | 231,78 | 20254,08 |
| 16,00 | 42,51 | 41,67 | 177,60 | 2107,03 | 43,45 | 42,86 | 216,97 | 11798,72 | 43,01 | 42,67 | 291,86 | 20288,55 |
| 17,00 | 42,69 | 41,8 | 188,16 | 2112,94 | 43,57 | 43,05 | 216,95 | 11831,29 | 43,07 | 42,74 | 283,27 | 20312,14 |
| 18,00 | 42,76 | 41,92 | 177,58 | 2116,56 | 43,7 | 43,05 | 187,73 | 11844,95 | 43,07 | 42,8 | 231,77 | 20323,03 |
| 19,00 | 42,88 | 41,99 | 188,15 | 2120,18 | 43,76 | 43,17 | 191,89 | 11863,88 | 43,13 | 42,8 | 283,27 | 20333,92 |
| 20,00 | 42,95 | 42,05 | 190,26 | 2122,66 | 43,82 | 43,3 | 216,87 | 11883,86 | 43,26 | 42,98 | 240,33 | 20390,21 |
| 21,00 | 43,01 | 42,17 | 177,57 | 2126,09 | 43,7 | 43,11 | 191,80 | 11851,26 | 43,26 | 43,05 | 180,25 | 20402,92 |
| 22,00 | 43,45 | 42,49 | 202,91 | 2140,60 | 43,82 | 43,23 | 166,74 | 11876,50 | 43,51 | 43,23 | 240,31 | 20481,06 |
| 23,00 | 43,76 | 42,98 | 164,84 | 2155,90 | 43,82 | 43,23 | 220,86 | 11876,50 | 43,76 | 43,48 | 240,29 | 20571,98 |
| 24,00 | 44,26 | 43,3 | 202,85 | 2171,60 | 44,14 | 43,61 | 191,64 | 11950,15 | 44,2 | 43,86 | 291,74 | 20721,24 |
| 25,00 | 44,58 | 43,73 | 179,58 | 2185,98 | 44,51 | 43,86 | 191,60 | 12015,45 | 44,45 | 44,23 | 188,75 | 20834,20 |
| 26,00 | 44,95 | 44,05 | 190,12 | 2199,21 | 44,95 | 44,42 | 195,71 | 12120,87 | 44,7 | 44,42 | 240,21 | 20914,42 |
| 27,00 | 45,2 | 44,36 | 177,43 | 2209,97 | 45,39 | 44,86 | 195,67 | 12213,74 | 44,95 | 44,67 | 240,19 | 21005,62 |
| 28,00 | 45,52 | 44,61 | 192,19 | 2220,91 | 45,83 | 45,23 | 195,63 | 12299,28 | 45,26 | 45,05 | 180,12 | 21131,55 |
| 29,00 | 45,7 | 44,86 | 177,40 | 2229,18 | 46,08 | 45,54 | 170,63 | 12358,44 | 45,39 | 45,17 | 188,69 | 21177,19 |
| 30,00 | 45,95 | 45,05 | 190,05 | 2237,64 | 46,33 | 45,79 | 195,57 | 12411,29 | 45,77 | 45,48 | 248,70 | 21303,22 |
| 31,00 | 46,08 | 45,23 | 179,49 | 2243,60 | 46,58 | 46,04 | 195,55 | 12464,16 | 45,89 | 45,61 | 240,11 | 21348,90 |
| 32,00 | 46,27 | 45,36 | 192,14 | 2249,75 | 46,89 | 46,29 | 195,55 | 12523,38 | 46,08 | 45,73 | 300,12 | 21405,55 |
| 33,00 | 46,27 | 45,36 | 192,14 | 2249,75 | 47,21 | 46,61 | 220,50 | 12591,08 | 46,14 | 45,86 | 240,09 | 21440,28 |
| 34,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,4 | 46,73 | 195,55 | 12623,88 | 46,14 | 45,79 | 300,12 | 21427,49 |
| 35,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,58 | 46,92 | 195,54 | 12663,03 | 46,27 | 45,98 | 248,65 | 21485,98 |
| 36,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,65 | 47,04 | 220,50 | 12683,14 | 46,39 | 46,11 | 240,07 | 21531,69 |
| 37,00 | 46,27 | 45,48 | 166,80 | 2252,06 | 47,58 | 46,92 | 170,58 | 12663,03 | 46,46 | 46,11 | 300,08 | 21544,49 |
| 38,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,65 | 46,98 | 195,57 | 12676,79 | 46,33 | 45,98 | 300,10 | 21496,95 |
| 39,00 | 46,21 | 45,42 | 166,81 | 2249,75 | 47,65 | 46,98 | 166,46 | 12676,79 | 46,21 | 45,86 | 300,11 | 21453,08 |
| 40,00 | 46,21 | 45,36 | 179,48 | 2248,60 | 47,65 | 46,92 | 170,63 | 12670,44 | 46,02 | 45,73 | 248,68 | 21394,59 |
| 41,00 | 46,21 | 45,36 | 179,48 | 2248,60 | 47,58 | 46,92 | 195,61 | 12663,03 | 45,95 | 45,61 | 291,56 | 21359,87 |
| 42,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,58 | 46,86 | 195,63 | 12656,69 | 45,89 | 45,54 | 300,14 | 21336,11 |
| 43,00 | 46,27 | 45,42 | 179,47 | 2250,91 | 47,52 | 46,92 | 170,67 | 12656,69 | 45,77 | 45,42 | 300,15 | 21292,26 |
| 44,00 | 46,33 | 45,48 | 179,47 | 2253,22 | 47,46 | 46,86 | 166,51 | 12643,99 | 45,64 | 45,36 | 240,13 | 21257,55 |
| 45,00 | 46,39 | 45,54 | 179,47 | 2255,52 | 47,4 | 46,86 | 195,61 | 12637,64 | 45,7 | 45,42 | 240,13 | 21279,47 |
| 46,00 | 46,46 | 45,67 | 166,79 | 2259,37 | 47,46 | 46,79 | 220,55 | 12636,58 | 45,77 | 45,48 | 248,70 | 21303,22 |
| 47,00 | 46,58 | 45,79 | 166,78 | 2263,99 | 47,4 | 46,79 | 195,53 | 12630,23 | 45,95 | 45,67 | 240,11 | 21370,83 |
| 48,00 | 46,83 | 45,98 | 179,44 | 2272,46 | 47,52 | 46,98 | 170,54 | 12663,03 | 46,27 | 45,98 | 248,65 | 21485,98 |
| 49,00 | 46,96 | 46,17 | 166,76 | 2278,62 | 47,77 | 47,17 | 195,46 | 12709,60 | 46,52 | 46,17 | 300,08 | 21566,43 |
| 50,00 | 47,15 | 46,36 | 166,75 | 2285,94 | 47,9 | 47,36 | 195,43 | 12743,48 | 46,77 | 46,48 | 248,61 | 21668,85 |
| 51,00 | 47,21 | 46,48 | 154,08 | 2289,40 | 48,21 | 47,61 | 195,56 | 12802,76 | 47,02 | 46,73 | 248,59 | 21760,31 |
| 52,00 | 47,46 | 46,61 | 179,40 | 2296,72 | 48,34 | 47,86 | 224,46 | 12843,00 | 47,21 | 46,98 | 197,14 | 21840,82 |
| 53,00 | 47,77 | 46,86 | 192,04 | 2307,51 | 48,52 | 47,98 | 253,50 | 12874,77 | 47,4 | 47,11 | 248,56 | 21899,37 |
| 54,00 | 47,96 | 47,04 | 194,14 | 2314,64 | 48,65 | 48,04 | 199,45 | 12894,89 | 47,65 | 47,29 | 308,53 | 21978,07 |
| 55,00 | 48,02 | 47,17 | 179,36 | 2318,30 | 48,71 | 48,23 | 224,35 | 12921,37 | 47,77 | 47,48 | 248,52 | 22034,81 |
| 56,00 | 48,21 | 47,36 | 179,35 | 2325,62 | 48,78 | 48,23 | 224,36 | 12928,78 | 47,9 | 47,54 | 308,50 | 22069,60 |
| 57,00 | 48,21 | 47,36 | 179,35 | 2325,62 | 48,84 | 48,23 | 224,36 | 12935,14 | 47,84 | 47,54 | 257,09 | 22058,61 |
| 58,00 | 48,15 | 47,36 | 166,69 | 2324,46 | 49,03 | 48,35 | 224,37 | 12967,97 | 47,84 | 47,54 | 257,09 | 22058,61 |
| 59,00 | 48,27 | 47,42 | 179,35 | 2327,93 | 49,03 | 48,42 | 224,38 | 12975,39 | 47,84 | 47,48 | 308,51 | 22047,63 |
| 60,00 | 48,4 | 47,61 | 166,68 | 2334,10 | 49,09 | 48,48 | 199,47 | 12988,10 | 47,96 | 47,61 | 299,92 | 22093,39 |
| 61,00 | 48,46 | 47,61 | 179,34 | 2335,26 | 49,09 | 48,48 | 199,49 | 12988,10 | 47,9 | 47,48 | 359,92 | 22058,61 |
| 62,00 | 48,27 | 47,48 | 166,69 | 2329,09 | 49,03 | 48,42 | 199,49 | 12975,39 | 47,84 | 47,48 | 308,51 | 22047,63 |
| 63,00 | 48,15 | 47,42 | 154,03 | 2325,62 | 48,9 | 48,29 | 199,50 | 12947,85 | 47,71 | 47,42 | 248,53 | 22012,85 |
| 64,00 | 48,09 | 47,29 | 168,81 | 2321,96 | 48,84 | 48,23 | 199,52 | 12935,14 | 47,84 | 47,42 | 359,93 | 22036,64 |
| 65,00 | 48,02 | 47,29 | 154,04 | 2320,61 | 48,71 | 48,1 | 170,44 | 12907,60 | 47,77 | 47,42 | 299,94 | 22023,83 |
| 66,00 | 48,02 | 47,23 | 166,70 | 2319,45 | 48,52 | 47,92 | 199,56 | 12868,41 | 47,71 | 47,42 | 248,53 | 22012,85 |
| 67,00 | 47,9 | 47,23 | 141,38 | 2317,14 | 48,4 | 47,79 | 170,47 | 12841,94 | 47,65 | 47,23 | 359,95 | 21967,09 |
| 68,00 | 47,9 | 47,17 | 154,04 | 2315,99 | 48,21 | 47,73 | 195,42 | 12815,47 | 47,58 | 47,17 | 351,39 | 21943,30 |
| 69,00 | 47,77 | 47,11 | 139,28 | 2312,33 | 48,09 | 47,54 | 170,49 | 12782,64 | 47,65 | 47,36 | 248,53 | 21990,88 |
| 70,00 | 47,84 | 47,17 | 141,39 | 2314,83 | 48,09 | 47,54 | 170,45 | 12782,64 | 47,84 | 47,54 | 257,09 | 22058,61 |
| 71,00 | 48,21 | 47,48 | 154,03 | 2327,93 | 48,02 | 47,54 | 170,39 | 12775,23 | 48,09 | 47,86 | 197,08 | 22162,97 |
| 72,00 | 48,52 | 47,73 | 166,67 | 2338,73 | 48,27 | 47,79 | 174,50 | 12828,17 | 48,46 | 48,1 | 308,44 | 22274,67 |
| 73,00 | 48,78 | 47,98 | 168,77 | 2348,56 | 48,46 | 48,04 | 170,29 | 12874,77 | 48,71 | 48,35 | 308,41 | 22366,24 |
| 74,00 | 48,96 | 48,17 | 166,65 | 2355,69 | 48,84 | 48,29 | 199,32 | 12941,49 | 48,96 | 48,6 | 308,39 | 22457,84 |
| 75,00 | 49,03 | 48,35 | 143,44 | 2360,51 | 49,09 | 48,6 | 203,44 | 13000,82 | 49,09 | 48,79 | 256,97 | 22516,47 |
| 76,00 | 49,15 | 48,35 | 168,74 | 2362,83 | 49,34 | 48,85 | 203,40 | 13053,80 | 49,28 | 48,98 | 256,96 | 22586,10 |
| 77,00 | 49,15 | 48,42 | 153,98 | 2364,18 | 49,53 | 49,04 | 174,32 | 13094,07 | 49,53 | 49,17 | 308,33 | 22666,74 |
| 78,00 | 49,21 | 48,48 | 153,97 | 2366,49 | 49,72 | 49,23 | 199,20 | 13134,36 | 49,65 | 49,35 | 256,92 | 22721,74 |
| 79,00 | 49,53 | 48,73 | 168,72 | 2377,48 | 49,84 | 49,35 | 203,33 | 13159,80 | 49,65 | 49,35 | 256,92 | 22721,74 |
| 80,00 | 49,47 | 48,73 | 156,07 | 2376,33 | 49,97 | 49,48 | 199,19 | 13187,37 | 49,65 | 49,29 | 308,31 | 22710,74 |
| 81,00 | 49,53 | 48,79 | 156,07 | 2378,64 | 50,03 | 49,48 | 203,33 | 13193,74 | 49,59 | 49,29 | 256,93 | 22699,74 |
| 82,00 | 49,59 | 48,73 | 181,37 | 2378,64 | 50,03 | 49,48 | 174,29 | 13193,74 | 49,65 | 49,23 | 359,70 | 22699,74 |
| 83,00 | 49,53 | 48,73 | 168,72 | 2377,48 | 50,03 | 49,48 | 199,19 | 13193,74 | 4 | | | |